А.М. Должанський, О.С. Максакова,
К.О. Чорноіваненко, Т.А. Аюпова,
Н.В. Полякова, О.А. Бондаренко, І.М. Ломов

Технічне регулювання та контроль на підприємстві

Том 2
Технології та дефекти продукції металургії

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАУКИ І ТЕХНОЛОГІЙ

А.М. Должанський, О.С. Максакова, К.О. Чорноіваненко,
Т.А. Аюпова, Н.В. Полякова, О.А. Бондаренко, І.М. Ломов

Технічне регулювання та контроль на підприємстві
Том 2. Технології та дефекти продукції металургії

ПІДРУЧНИК

Дніпро
2023

УДК 620.19+621.77+658.562+669
Т 38

Рецензенти:

Приходько І.Ю, зав. відділом процесів обробки металів тиском Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України (м. Дніпро), д-р техн. наук, ст. наук. співр.;

Король Р.М., к.т.н., директор ДП «Науково-дослідний та конструкторсько-технологічний інститут трубної промисловості ім. Я.Ю. Осади» (м. Дніпро);

Нестеренко О.Ю., керівник органу сертифікації персоналу ТОВ СП «ТОВАРИСТВО ТЕХНІЧНОГО НАГЛЯДУ ДІЕКС»

Авторський колектив:

Должанський А.М., Максакова О.С., Чорноіваненко К.О., Аюпова Т.А., Полякова Н.В., Бондаренко О.А., Ломов І.М.

Рекомендовано вченою радою
Українського державного університету науки і технологій
як навчальний підручник
(протокол № 5 від «27» лютого 2023 р.)

Т 38 Технічне регулювання та контроль на підприємстві. Том 2. Технології та дефекти продукції металургії. Том 2. Технології та дефекти продукції металургії: підручник / А.М. Должанський, О.С. Максакова, К.О. Чорноіваненко, Т.А. Аюпова, Н.В. Полякова, О.А. Бондаренко, І.М. Ломов ; за ред. д-ра техн. наук, проф. А.М. Должанського ; Укр. держ. ун-т науки і технологій. – Дніпро : «Свідлер А.Л.», 2023. – 632 с.

ISBN 978-617-627-179-6

Підручник містить інформацію стосовно технологій, стандартизованих видів металургійної продукції та її дефектів, що є суттєвим для організації та реалізації заходів з технічного контролю якості на металургійному підприємстві. Представлено стислу характеристику основних металургійних технологій, які зумовлюють якість продукції та відповідають структурі та змісту дисциплін «Технічний контроль якості», «Дефектоскопія, випробування та випробувальне обладнання» та «Стандартизація продукції та послуг» за спеціальністю 152 – Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка.

Підручник призначений для студентів, аспірантів, викладачів закладів вищої освіти, а також – співробітників підприємств і фірм, організацій та установ, які діють у сферах технічного регулювання, забезпечення та технічного контролю якості, зокрема, у сфері виготовлення якісної металургійної продукції.

Іл. 272, табл.. 5, бібліограф. 151 назв.

УДК 620.19+621.77+658.562+669

Навчальне видання

ISBN 978-617-627-179-6

© Должанський А.М., Максакова О.С., Чорноіваненко К.О., Аюпова Т.А., Полякова Н.В., Бондаренко О.А., Ломов І.М., 2023
© Укр. держ. ун-т науки і технологій, 2023

Зміст

ВСТУП…… 6

1 ОСНОВНІ ВИДИ ПРОДУКЦІЇ ТА БАЗОВІ ТЕХНОЛОГІЇ МЕТАЛУРГІЇ …. 9

1.1 Види продукції чорної металургії……. 9

1.2 Базові технології металургії …….. 18

1.2.1 Обробка матеріалу (металу, сплаву) в рідкому стані……. 19

1.2.1.1 Виробництво чавуну…….. 19

Паливо доменної плавки……..... 21

Руди і флюси доменної плавки……..... 21

Підготовка руд до плавки……..... 23

Доменний процес……..... 25

1.2.1.2 Позадоменне (безкоксове) виготовлення заліза…… 30

1.2.1.3 Виробництво сталі……..... 33

Виробництво сталі у конвертерах…… 36

Виробництво сталі в мартенівських печах…… 40

Виробництво сталі в електропечах…… 43

Виплавка сталі у вакуумі……..... 47

Обробка рідкого металу поза сталеплавильного агрегату……..……. 51

Розливка сталі у злитки (виливки) ……..…… 54

1.2.1.4 Виробництво деяких кольорових металів…… 56

Виробництво алюмінію……..... 60

Виробництво міді……..…….. 64

Виробництво титану……..…… 70

Виробництво магнію……..…… 78

Виробництво нікелю……..…… 85

Виробництво свинцю……..…… 94

Виробництво цинку……..…… 100

Виробництво вольфраму……..……... 107

Виробництво молібдену……..…… 115

1.2.1.5 Виробництво феросплавів……..…… 122

Виробництво феросиліцію……..…… 125

Виробництво вуглецевого феромарганцю…… 126

Виробництво вуглецевого феррохрому…… 127

Виробництво феронікелю……..……..... 129

Виробництво феротитану…… 129

Виробництво феровольфраму……..... 130

Виробництво феромолібдену……..... 132

Виробництво ферованадію……..... 133

1.2.1.6 Виробництво коштовних («дорогоцінних», «благородних») металів……..... 133

Виробництво золота……. 133
Виробництво срібла…….. 136
Виробництво платини та платиноїдів…… 140
Запитання для самоконтролю до підрозділів 1.1 та 1.2.1 ……..... 156
1.2.2 Обробка матеріалу (металу, сплаву) у твердому стані…… 158
1.2.2.1 Елементарні основи процесів обробки металів тиском.. 158
1.2.2.2 Технологічні процеси, пов'язанні з обробкою металів тиском……..... 176
Термічна обробка металів……..... 176
Хіміко-термічна обробка (ХТО) металів……. 187
Термомеханічна обробка металів……..... 190
Оздоблення металовиробів (загальна характеристика). 190
Очищення поверхні металовиробів від окалини……..... 191
Різання металу……..... 196
Правка металу……..... 199
Зачистка прокату……..... 202
Нанесення покриттів на металовироби…… 205
Ідентифікація та простежуваність металургійної продукції……..... 218
Пакування та зберігання металургійної продукції..... 222
1.2.2.3 Фізико-технологічні основи процесів обробки металів тиском……..... 224
Кування (ковка) ……..... 224
Об'ємна штамповка…… 233
Холодна листова штамповка……..... 242
Загальна характеристика процесів прокатки…….. 251
Процес подовжньої прокатки……..... 252
Процес подовжньої прокатки труб…….. 258
Процеси подовжньої періодичної прокатки труб..... 261
Процес поперечно-гвинтової прокатки труб..... 271
Процес поперечної прокатки……..... 276
Обтискне виробництво…….. 278
Листопрокатне виробництво……..... 282
Сортова прокатка (прокатка профілів) …….. 291
Виробництво гнутих профілів……..... 310
Виробництво зварних труб……..... 315
Виробництво профільованих труб……. 318
Виготовлення безшовних труб прокаткою……... 321
Прокатка залізничних коліс і бандажів……..... 338
Волочіння дроту, прутків і труб……..... 346
Пресування……..... 361

Виготовлення деяких видів металовиробів (сіток, цвяхів, гайок, болтів, гвинтів, шурупів)…… 372
Продукція порошкової металургії……..... 394
Виготовлення порошків…….…….. 396
Формування порошків…….…… 398
Запитання для самоконтролю до підрозділу 1.2.2…….. 407
2 ДЕФЕКТИ МЕТАЛУРГІЙНОЇ ПРОДУКЦІЇ ……..... 410
2.1 Загальні аспекти виявлення та запобігання прояву дефектів металургійної продукції…….……..... 410
2.2 Ідентифікація основних видів дефектів металургійного походження та їх запобігання…….…….……..... 412
2.2.1 Дефекти первісного металу…….…… 412
2.2.2 Дефекти литої заготовки…….…….... 413
2.2.3 Дефекти металу, які зумовлені термічною обробкою…… 427
Дефекти, що зумовлені порушеннями режимів термічної та/або термомеханічної обробки металу…….…… 427
Дефекти, що зумовлені впливом умов нагріву на форму і стан поверхні виробів…….…….…….. 436
2.2.4 Дефекти виробів, зумовлені процесами обробки металу тиском.... 440
Дефекти, що зумовлені деформацією заготовки і суттєво пов'язані з історією виготовлення виробу……..... 441
Дефекти, що зумовлені суттєвими порушеннями режимів та технології обробки металу тиском…….…….. 461
2.2.5 Дефекти зварювання…….……..... 507
2.2.6 Дефекти операцій оздоблення металовиробів після обробки тиском…….…….…….. 512
2.2.7 *Дефекти травлення металовиробів*……..... 518
2.2.8 *Деякі дефекти при нанесенні покриттів на металовироби*..... 521
Запитання для самоконтролю до розділу 2…….…….... 524
Джерела інформації…….…….……..... 527
Предметний покажчик…….…….……..... 534
Іменний покажчик…….…….……..... 549
Додаток А. *Таблиця А1.* Деякі характеристики видів металургійної продукції..... 552

ВСТУП

З розвитком глобальних, перш за все – економічних зв'язків світовою спільнотою все більше уваги приділяється виготовленню якісної продукції, яка має відповідати різним, у тому числі – специфічним нормативним вимогам (стандартам, технічним умовам, договорам на постачання тощо). Повною мірою це стосується продукції чорної та кольорової металургії, яка залишається матеріальною основою життєдіяльності промислово розвинутих країн. Особливо це є важливим для України, в якій експорт металургійної продукції формує значну долю бюджетних надходжень.

Суттєвою обставиною при цьому стає те, що на тлі загального розширення номенклатури продукції металургії, в Україні продовжується формування національної системи стандартизації з переходом на національні стандарти (ДСТУ) з орієнтацією на їх максимальну гармонізацію з відповідними міжнародними та європейськими (ISO та EN) нормативними документами. В них, окрім вимог до якості продукції, часто визначають ступені характеристик, які зумовлюють сортність виробів та критерії щодо їх придатності.

У наявний час більшість металургійних процесів вийшла «на пік» розвитку, що віддзеркалюється відсутністю «проривів» та своєрідною «кризою» стосовно *розвитку* теоретичних підходів до опису звичайних металургійних процесів. Новітні розробки, значною мірою, представляються у вигляді відповідних математичних та комп'ютерних моделей. Це пояснює значну кількість посилань у підручниках з металургії на джерела інформації, які опубліковані у минулому столітті, оскільки новітні публікації включають, значною мірою, вже відомі результати.

Все ж таки, існує тенденція щодо покращення якості металургійної продукції зміщенням вектору досліджень та розробок з відомого використання «грубих» технологічних прийомів до застосування та урахування комплексного впливу фізико-хімічних явищ, які мають місце та супроводжують перероблення металу на всіх стадіях його перетворень (вилучення із сировини, лиття, термічна або термомеханічна обробка, оздоблення тощо), перехід з макрорівня на мікро- та навіть нанорівень із застосуванням прийомів молекулярного чи атомарного аналізу.

У виробничій практиці накопичений значний досвід розробки та застосування металургійних технологій та ідентифікації дефектів металургійної продукції, які зустрічаються на вказаних переробленнях.

Кваліфіковані технологи та фахівці з технічного контролю якості здібні пов'язати такі дефекти з невідповідностями конкретних процесів перероблення напівфабрикатів, запропонувати шляхи їх усунення та запобігання прояву. Відповідна професійна діяльність тісно пов'язана із стандартизацією, метрологією та вимірюваннями. Але носіями такого досвіду, здебільшого, є особи, яких за природних причин стає все менше.

Частина їх досвіду знайшла відображення у виданнях ряду авторів-упорядників: Бігеєв А.М., Бернштейн М.Л., Гаврилін Є.Ф., Шулаєв І.П., Юхвець А.І., Титов Ю.О., Дашевський С.І., Гуляєв Г.І., Сафьян М.М., Мазур В.Л., Роянов В.О. та ін., у ДСТУ 2658-95 «Прокат чорних металів. Терміни і визначення дефектів поверхні», в інших нормативних документах, а також у вигляді розпорошених відомостей на Інтернет-сторінках.

Такі дані опосередковано базуються на величезній інформації щодо побудови металургійних технологій та теоретичних основ їх реалізації, які розроблені рядом осіб, що явилися засновниками наукових шкіл та авторів фундаментальних досліджень. Серед них слід відзначити вчених дніпропетровської школи металургів: Виноградов А.П., Ємельяненко П.Т., Чекмарьов О.П., Гасик М.І., Тельний С.І., Хитрік С.Й., Фортунато Л.М., Баптизманський В.І., Готліб А.Д., Воловик Г.А., Таран-Жовнір Ю.М., Стародубов К.Ф., Бунін К.П., Кривошеєв А.В., Котешов М.П., Узлов І.Г., Большаков В.І., Долженков І.Є., Ваткін Я.Л., Сафьян М.М., Гуляєв Г.І., Мутьєв М.С., Гіммельфарб А.А., Куцова В.З., Шевакин Ю.Ф., Мазур В.Л. із співробітниками та інші, - а також представників інших наукових шкіл з металургії чорних і кольорових металів: Челищев Є.В., Кнорозов Б.В.,

Кудрін В.О., Уткін М.І., Ентоні У.Х., Гун Г.Я., Зелікман А.Н., Коршунов Б.Г., Лівінгстон С., Корнілов І.І., Чугаєв Л.В., Суворов І.К., Полухін П.І. Рокотян Є.С., Єленєв С.О., Романовський В.П., Сторожев М.В., Попов Є.О., Лахтін Ю.М., Перлін І.Л., Єрманок М.З., Коковіхін Ю.І, Березовський С.Ф. Дашевський С.І. та багато інших.

На підставі цієї накопиченої інформації стає необхідним, щоб фахівці з технічного контролю якості могли самотужки пов'язувати якість металургійної продукції з вадами відповідних технологій, оскільки більшість відомих монографій, підручників та навчальних посібників присвячена фрагментарному висвітленню таких даних.

Це зумовлює незручності при підготовці відповідних фахівців та складнощі при реалізації їх діяльності у сфері технічного регулювання, впровадження заходів із забезпечення якості продукції та технічного контролю у виробничих умовах.

У цьому сенсі *об'єднання інформації* стосовно типових дефектів основних видів металургійної продукції, ймовірних технічних і технологічних джерел утворення невідповідностей, виявлення, запобігання прояву та можливих шляхів мінімізації шкоди від них стає невід'ємною частиною навчання фахівців з технічного контролю якості та забезпечення загальної якості, зокрема, тих, що навчаються за вказаним напрямом у вишах з металургійною профілізацією.

Тому метою наявного підручника стало, по можливості, *комплексне, системне* та стисле представлення матеріалів щодо аспектів технічного та технологічного забезпечення якості металургійної продукції.

Наявний підручник ні в якому разі не претендує на вичерпність представлених відомостей щодо теорій та технологій металургійних процесів, оскільки більш ґрунтовно і докладно ці процеси та основи їх застосування описані в спеціальній літературі. На погляд авторів, він дає необхідний мінімум знань у цій сфері для підготовки фахівців з технічного контролю якості металургійної продукції, щодо походження її дефектів та можливостей їх уникнення. При цьому доцільним стало представлення номенклатури металургійної продукції у зв'язку з відповідними нормативними документами та даними щодо ідентифікації та можливого негативного *комплексного* впливу на напівфабрикат поточного та попередніх перероблень, а також певна уніфікація назв дефектів, які мають місце у різних, але подібних умовах.

Це, певною мірою, пояснює деяку ілюстративність подачі матеріалів, яка компенсується сумісним представленням типових дефектів, базових технологій металургії та деяких аналітичних виразів, які визначають критичні показники з реалізації процесів та якості продукції.

Важливим при викладенні відповідної інформації стало прагнення до формування у студентів *фізично обґрунтованих уявлень* про основні металургійні процеси: виготовлення чавуну і сталі, лиття, обробка металів тиском, термічна обробка, оздоблення тощо. Тому бажаним є попереднє освоєння слухачами відповідних складових фундаментальних фахових навчальних дисциплін (математика, фізика, хімія, основи механіки тощо).

У підручнику використано майже двадцятирічний досвід з підготовки фахівців на кафедрі «Якість, стандартизація та сертифікація» Національної металургійної академії України (тепер – кафедра Систем якості, стандартизації та метрології Українського державного університету науки і технологій) за спеціальностями «Якість, стандартизація та сертифікація» (до 2015 р.) та «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка» (після 2015 р.) за освітніми програмами «Якість, метрологія та експертиза» з підготовки бакалаврів та «Якість, стандартизація, сертифікація та метрологія» з підготовки магістрів.

Частина представлених матеріалів базується на оригінальних розробках авторів, зокрема тих, що стосуються виготовлення дроту та профільованих труб.

Наявне видання доповнює навчальні матеріали попереднього підручника «Технічне регулювання та контроль на підприємстві», авторів: Должанський А.М. та ін. (2021 р.), у якому була представлена інформація щодо усього комплексу завдань, які виникають при запровадженні та реалізації заходів технічного регулювання. Маються на увазі аспекти

стандартизації, оцінки відповідності, законодавчої метрології та організації технічного контролю якості продукції, процесів і систем на підприємстві, зокрема, на металургійному з використанням метрологічних і кваліметричних методів та засобів проведення вимірювань, оцінкою їх застосовності і точності.

Також, як і попередній вказаний підручник, наявне видання узгоджене з вимогами Галузевого стандарту вищої освіти України з підготовки фахівців за спеціальністю 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка» і базується на узагальненому світовому та національному досвіді проведення вказаних робіт, зокрема, на основі законів України, стандартів ISO серії 9000 та національних стандартів України.

До підручника увійшли лекційні матеріали співавторів-викладачів, а також актуалізована інформація, зібрана студентами під час підготовки ними кваліфікаційних випускних робіт. Він може бути корисним студентам, аспірантів, викладачам вишів, а також – підприємцям, співробітникам організацій, установ, підприємств і фірм, які діють у сферах технічного регулювання та технічного контролю якості, зокрема, в металургійній галузі.

Всі розділи наявного підручника викладені при редагуванні Должанським А.М.

При цьому, *Должанським А.М.* написані: Вступ (0,25 друк. арк.); у співавторстві з Максаковою О.С. – підрозділ 1,1 (доля 0,15 друк. арк.); сумісно з іншими співавторами – підрозділ 1.2 (доля 7,2 друк. арк.) та підрозділ 2.2 (доля 1,6 друк. арк.); *загальна участь у написанні підручника* (з Джерелами інформації та Додатком А з долею 2,0 друк. арк.) – 11,2 друк. арк.;

Максаковою О.С. сумісно з Должанським А.М. написаний підрозділ 1.1 (доля 2,7 друк. арк.); сумісно з іншими співавторами – підрозділ 2.2 (доля 0,6 друк. арк.); *загальна участь у написанні підручника* (з Джерелами інформації та Додатком А на 1,6 друк. арк.) – 4,9 друк. арк.;

Чорноіваненко К.О. сумісно з іншими співавторами прийняла участь у написанні підрозділу 1.2 (доля 2,7 друк. арк.) та – підрозділу 2.2 (доля 0,6 друк. арк.); загальна участь у написанні підручника – 3,3 друк. арк.

Аюповою Т.А. сумісно з іншими співавторами написаний підрозділ 1.2 (доля 2,6 друк. арк.) та підрозділ 2.2 (доля 0,6 друк. арк.); *загальна участь у написанні підручника* – 3,2 друк. арк.;

Поляковою Н.В. сумісно з іншими співавторами написаний підрозділ 1.2 (доля 1,4 друк. арк.) та підрозділ 2.2 (доля 1,0 друк. арк.); *загальна участь у написанні підручника* – 2,6 друк. арк.;

Бондаренко О.А. сумісно з іншими співавторами написаний підрозділ 1.2 (доля 1,3 друк. арк.) та підрозділ 2.2 (доля 0,7 друк. арк.); особисто написаний підрозділ 2.1 (0,1 друк. арк.); *загальна участь у написанні підручника* – 2,1 друк. арк.;

Ломовим І.М. сумісно з іншими співавторами написаний підрозділ 1.2 (доля 1,2 друк. арк.) та підрозділ 2.2 (доля 0,5 друк. арк.); *загальна участь у написанні підручника* – 1,7 друк. арк.

Автори щиро дякують всім, хто сприяв появі наявного підручника, зокрема, студентам-випускникам бакалаврату та магістратури. Будемо також вдячні за відзиви, побажання та зауваження за змістом представлених матеріалів.

1 ОСНОВНІ ВИДИ ПРОДУКЦІЇ ТА БАЗОВІ ТЕХНОЛОГІЇ МЕТАЛУРГІЇ

У джерелі [1], присвяченому загальним аспектам організації технічного контролю, вже відмічалося, що організація робіт з управління якістю продукції на підприємствах, зокрема, в металургійній галузі передбачає наявність у державі дієвої системи технічного регулювання та створення в організаціях систем якості таких, що ефективно функціонують та розвиваються.

Ця сфера діяльності базується на принципах, які однакові для всіх організацій та незалежні від їх розміру, продукції, що випускається, та підпорядкованості. Але конкретизація відповідних робіт та перевірка їх ефективності суттєво залежать від самої продукції та умов її виготовлення.

Змістовна інформація щодо вказаної специфіки, яка відображена у довідниках, навчальних посібниках, монографіях, статтях тощо, є вельми громіздкою, і докладно віддзеркалити *все* поле відповідних даних неможливо. Але для конкретизації аспектів технічного регулювання та забезпечення якості стосовно виготовлення саме металургійної продукції стисле представлення її основних видів та відповідних технологій виготовлення уявляється необхідним.

1.1 Види продукції чорної металургії

Метали відносяться до найбільш розповсюджених матеріалів, які використовуються для забезпечення різноманітних потреб людства.

Узагальнено, продукцію металургії зазвичай представляють наступними її основними видами:

- сирець (заготовка, «напівфабрикат», «напівпродукт»);
- товарний матеріал (метал, сплав, композит);
- матеріали для легування та модифікування;
- вироби (матеріал після обробки інструментом).

Показники якості, притаманні металургійній продукції, регламентуються нормативно-технічною документацією (НТД), перш за все – стандартами (Додаток А), а також – специфікаціями, сертифікатами, договорами щодо постачання тощо.

При цьому відображуються показники якості продукції, засоби контролю і критерії визначення невідповідностей (браку), а саме:

- призначення продукції;
- матеріал та його внутрішній стан у виробах (марка матеріалу), зовнішній вигляд виробів (форма, розміри, якість поверхні тощо);
- хімічний склад, структура, текстура, механічні та/або технологічні властивості тощо);
- спосіб виготовлення;
- особливі вимоги (вид покриття, наявність захисної оболонки на готовому виробі, точність показників якості, види контролю тощо).
- загальні характеристики (особливості постачання, специфічна тара, маса визначеної кількості виробів, наприклад, маса погонного метру дроту або кількість цвяхів певного розміру в одному кілограмі тощо).

Метали поділяють на «чорні», «кольорові» та «коштовні (дорогоцінні, благородні)» [2]. При цьому, у виробничій та повсякденній практиці (на відміну від хімічних виробництв) «металами» часто називають як самі метали, так і їх сплави.

В останні роки на підставі рекомендацій НТД [3] в обіг уведені назви хімічних елементів на основі їх латинських найменувань згідно з таблицею Д.І. Менделеєва, що вже відображено в підручниках з хімії. Наприклад, елемент, що має позначення *Mn*, отримав назву «*манган*», *Fe* – «*ферум*», *O* – «*оксиген*» тощо. Цей стадарт скасував деякі неприйнятні пропозиції, які були у його попередній версії (зокрема, написання назв

елементів з великої літери), повернув звичні назви деяких *речовин*, які відповідають їх хімічним елементам тощо. Наприклад, коли мова йде про хімічний елемент *Mn*, його ідентифікують як «*манган*», а при описанні відповідної речовини її представляють як «*марганець*»).

Все ж таки, представлені зміни у нормативній документації викликали певну плутанину, оскільки перехід у виробничій практиці на застосування новітніх термінів (якщо він відбудеться «силовим шляхом») потребує певного часу та навички персоналу. Якщо вираз «мангановий сплав» ще якось зрозумілий, то терміни «*ферумні сплави*» замість звичного «*залізні сплави*» або «*оксигенове дуття*» замість звичного «*кисневе дуття*» у металургії уявляються, принаймні, натепер малоприйнятними. Деякі *назви* сплавів за умов використання новітніх термінів потребують прискіпливої роботи лінгвістів, наприклад, зрозуміла назва «*нікелеві сплави*» при використанні нової назви елементу *Ni* – «*нікол*» замість «*нікель*» (тобто «*ніколові сплави*») звучить «недозрілою». Ймовірно, тому згідно з новою версією стандарту ДСТУ 2439 допускається використовувати звичні технічні назви хімічних *речовин*.

Суттєвою обставиною також є використання у багатьох діючих НТД назв хімічних елементів, їх сполук та пов'язаних з ними термінів, які використовувалися раніш. Це потребує великої роботи з узгодження термінології відповідних взаємно повязаних стандартів.

Тому при подальшому викладенні тексту при використанні назв хімічних *речовин* та їх сполук, зокрема, тих, що стосуються складів металургійних матеріалів та хімізму процесів, застосовані найменування, які є звичними та зрозумілими для більшості технологів-металургів, а при представленні хімічних *елементів* використані їх нові назви, рекомендовані ДСТУ 2439.

У таблиці 1.1 наведені деякі нові назви хімічних елементів поряд з їх найменуваннями, які й натепер використовуються на практиці при визначенні складу технічних матеріалів: металів і сплавів.

До групи *чорних* металів відносять: залізо та його сплави, магній і хром.

До групи *коштовних* («благородних») металів включають: золото, срібло, платину й інші метали платинової групи (паладій, родій й ін.).

До *кольорових* відносять усі інші метали та їх сплави.

Нижче розглянемо деякі типові метали з їх властивістями, що є найбільш застосовними у промисловсті.

Технічне залізо – це *речовина*, яка, здебільшого, складається з хімічного елементу, що позначається в хімічних формулах символом *Fe* – ферум (від англ. *Ferrum*), і в періодичій системі Д.І. Менделеєва має атомний номер 26. Його деякі властивості (показники якості) наступні.

Це сріблясто-сірий електропровідний пластичний (ковкий) метал, який на повітрі утворює оксиди $FeO{\cdot}nH_2O$ у вигляді плівки (іржі), які, деякою мірою, сповільнюють його подальше окслення. Твердість заліза за Брінелем не перевищує 100 НВ; модуль пружності (модуль Юнга) $190…210{\cdot}10^3$ МПа; модуль зсуву $8{,}4{\cdot}10^3$ МПа; границя міцності на розрив 170…210 МПа, границя текучості – 100 МПа; ударна в'язкість 300 МПа; середня питома теплоємність (при 273…1273 К) 640,57 Дж/кг·К; щільність (густина) 7840 кг/м^3; температура плавлення 1538 °С, температура кипіння 2862 °С. Вище температури Кюрі (770 °С) залізо втрачає феромагнітні властивості. До температури 912 °С існує в алотропній модифікації α-заліза з об'ємноцентрованою кубічною кристалічною ґраткою, за вищої температури – у вигляді γ-заліза із гранецентрованою кубічною ґраткою, вище 1394 °С знову змінює тип ґратки на об'ємноцентровану кубічну.

За поширеністю в природі *залізо* займає друге, а за вмістом у земній корі – четверте місце серед металів (після алюмінію). На нього припадає 5,10% маси земної кори. Саморідне жалізо зустрічається рідко. Частіше зустрічається *метеоритне* залізо.

Таблиця 1.1 – Ідентифікатори та назви деяких хімічних речовин, які використовуються на практиці при визначенні складу технічних металів і сплавів [3]

Позначення хімічного елементу	Назва		Примітки
	використовувана на практиці для хімічних речовин (до реформи)	нова (для хічіних елементів за ДСТУ 2439:2018)	
H	водень	водень	*Дозволено:* гідроґен
C	вуглець	вуглець	*Дозволено:* карбон
O	кисень	кисень	*Дозволено:* оксиген
N	азот	азот	*Дозволено:* нітроґен
F	фтор	фтор	*Дозволено:* флюор
Si	кремній	кремній	*Дозволено:* силіцій
S	сірка	сірка	*Дозволено:* сульфур
Mn	марганець	манґан	
Fe	залізо	залізо	*Дозволено:* ферум
Ni	нікель	нікель	
Cu	мідь	мідь	*Дозволено:* купрум
As	миш'як	арсен	
Ag	срібло	срібло	*Дозволено:* аргентум
Sn	олово	олово	*Дозволено:* станум
Sb	сурма	стибій	
Pt	платина	платина	
Au	золото	золото	*Дозволено:* аурум
Hg	ртуть	ртуть	
Pb	свинець	свинець	*Дозволено:* плюмбум
Bi	вісмут	бісмут	

Відомо понад 300 мінералів, що містять цей метал: оксиди, сульфіди, силікати, фосфати, карбонати та ін. Найважливішими природними сполуками заліза, що мають промислове значення, є магнітний залізняк (магнетит) Fe_3O_4, червоний залізняк (гематит) Fe_2O_3, бурий залізняк $Fe_2O_3 \cdot nH_2O$ та пірит FeS_2. Оксиди служать *рудами*, з яких добувають залізо, а пірит – сировиною для сульфатно-кислотного виробництва.

Родовища заліних руд є в Україні в районі м. Кривий Ріг, кременчуцькому залізорудному районі (Полтавська область), Білозерському залізорудному районі (Запорізька область).

Родовища бурого залізняку зосереджені на Керченському півострові.

Багаті родовища залізних руд є в Гренландії, Німеччіні, Росії та ін.

Технічне залізо є основою чавунів та сталей (*див. нижче*).

Чисте залізо (як матеріал) має досить обмежене застосування. Його використовують при виготовленні сердечників електромагнітів та якорів електромашин, як каталізатор хімічних процесів, для виготовлення анодних пластин залізо-нікелевих акумуляторів, для шарів на дисках носіїв постійної пам'яті комп’ютерів, у медицині – як антианемічний засіб та ін. Залізний порошок використовують при зварюванні, а також для цементації міді.

Манган (хімічний елемент *Mn*); ***марганець*** (речовина), який також відноситься до групи чорних металів, – це сріблясто-білий твердий хрупкий метал з атомною масою 25. Відомі його чотири кристалічні модифікації, кожна з яких термодинамічно стабільна у певному інтервалі температур. Нижче 707 °С стабільним є α-манган зі складною структурою, елементарна гратка якої містить 58 атомів. Це зумовлює хрупкість металу.

Щільність (густина) марганцю 7,44 г/см^3; електропровідність 0,00695×10^6 Ом$^{-1}$·см$^{-1}$; теплопровідність 0,0782 Вт/см·К; температура плавлення 1245 °С; температура кипіння – біля 2080 °С [4].

У земній корі міститься приблизно 0,03% марганцю (третє місце після заліза та титану). Численні горні породи містять його невеликі кількості. Разом з тим, зустрічаються скупчення його сполук з киснем, головним чином, у вигляді мінералів: *піролюзиту* $MnO_2 \cdot xH_2O$ (вміст до 63,2% мангану), *гаусманіту* ($Mn^{II}Mn_2^{III}O_4$, *брауніту* $3Mn_2O_3 \cdot MnSiO_3$ (69,5 % мангану), *манганіту* $MnO(OH)$ (62,5 % мангану), *родохрозиту* (манганový шпат, малиновый шпат) $MnCO_3$ (47,8 % мангану), *псиломелану* $mMnO \bullet MnO_2 \bullet nH_2O$ (45…60 % мангану); *пурпуриту* ($Mn^{3+}[PO_4]$) (36,65 % мангану).

Манган легко окиснюється киснем, сіркою, галогенами, особливо, у – порошкоподібному стані та при нагріванні. Компактный метал на повітрі стійкий, оскільки покривається щільною оксидною плівкою Mn_2O_3. Ще больш стійка плівка утворюється при дії на манган холодної азотної кислоти.

Вуглець реагує з розплавленим марганцем, утворюючи карбіди Mn_3C та інші. У відповідних умовах манган може також утворювати силіциди, бориди, фосфіди.

Чистий *марганець* можна отримати електролізом розчинів його солей. Але оскільки 90% усього марганцю використовується при виготовленні різних сплавів на основі заліза, з руд зазвичай виплавляють його високопроцентний (60…90%) сплав із залізом, так званий – феромарганець (*див. нижче*). Останньому сприяє те, що манган є супутнім залізу в багатьох рудах, але зустрічаються й його самостійні родовища.

Україна посідає друге місце у світі за запасами марганцевих руд, які після збагачення у вигляді марганцевого концентрату різних сортів із вмістом металу від 26% до 43% є основним видом продукції, що випускається АТ «Марганецьким гірничозбагачувальним комбінатом (ГЗК)» та АТ «Покровським ГЗК» (раніш – трест Орджонікідзе-Марганець (Дніпропетровська область).

За кордоном марганцеві руди є у Чиатурському родовищі (район Кутаїси, Грузія). Відомі також такі родовища у Росії.

Гірничі породи, що містять манган, водою виносяться до Світового океану. При цьому, в глубоких місцях океану його концентрація сягає 0,3% з утворенням нерозчинного у воді оксиду мангану, з якого на дні формуються так звані залізо-марганцеві конкреції. В останніх кількість мангану може сягати 45%, що робить їх перспективною сировиною для промисловості.

Певна кількість марганцю використовується в хімічній промисловості, керамічному і скляному виробництвах.

Зокрема, сполуки мангану MnO_2 и $KMnO_4$ в якості окиснювачів широко використовують у тонкому органічному синтезі, наприклад, при виробництві терефталевої кислоти, при окисненні парафінів у вищі жирні кислоти тощо.

У медицині пермарганат калію $KMnO_4$ використовують у вигляді 5% разчину у воді для обробки ран. Сульфат мангану $MnSO_4$ був успішно використаний для лікування атеросклерозу.

Значна кількість диоксиду мангану MnO_2 споживається при виготовленні марганцево-цинкових гальванічних елементов в якості окиснювача-деполяризатора.

Арсенид мангану володіє сильним магнітокалоричним ефектом (тобто змінює температуру поблизу умов фазового перетворення), який ще посилюється під тиском.

Телурид мангану – перспективний термоелектричний матеріал.

Сплав *манганін,* що містить 83% міді, 13% марганцю и 4% нікелю має високий електричний опір, який мало міняється при зміні температури. Тому його використовують, наприклад, для виготовлення реостатів.

Основна ж частина марганцевих руд (95…98%) надходить у чорну і кольорову металургію.

У чорній металургії марганець у вигляді феромарганцю використовують для «розкиснення» сталі при її плавці. Крім того, у розплаві сталей він пов'язується із сіркою, что також покращує їх властивості (*див. нижче*). Уведення до 12…13% марганцю (з отриманням так званої «сталі Гадфільда»), иноді – у сполученні з іншими легуючими металами, суттєво зміцнює сталь, робить її твердою, зносо– та ударостійкою. Така сталь використовується для виготовлення куль кульових мельниць, робочих органів землеройних і камнедробильних машин, броневих елементів тощо. Для отримання «дзеркального чугуну» (*див. нижче*) у розплав уводять до 20% марганцю.

У кольоровій металургії марганець уводять у розплави при виготовленні бронз і латуней.

Ще одним представником групи «чорних металів» є ***хром*** – голубовато-білий метал з кубічною об'ємно-центрованою решіткою. У періодичній системі елементів Д.І. Менделеєва він має номер 24. При температурі 39 °С він переходить з парамагнітного стану до діамагнітного. Хром (з модифікаторами) володіє твердістю за шкалою Мооса 8,5 і є одним із самих твердих металів, поступаючись лише вольфраму. Чистий хром добре піддається механічній обробці. Цей метал стійкий на повітрі. При 2000 °С он згорає з утворенням зеленого оксиду хрома(III) Cr_2O_3.

Розрізняють три основних мінерали хрома: *магнохромит* ($Mn,Fe)Cr_2O_4$, *хромпікотит* ($Mg,Fe)(Cr,Al)_2O_4$ і *алюмохромит* ($Fe,Mg)(Cr,Al)_2O_4$. За зовнішнім виглядом вони однакові, і їх неточно та узагальнено (за наявністю в їх складі *хроміту*, тобто $FeCr_2O_4$) называють «*хромитами*». У природі їх склад нестабілен: Cr_2O_3 (18…62%), FeO (1…18%), MgO (5…16%), Al_2O_3 (0,2 …33%), Fe_2O_3 (2… 30%), TiO_2 до 2%, V_2O_5 до 0,2%, ZnO до 5% и MnO до 1%; у наявності також *Co, Ni* й ін.

Крім різних хромитів, хром входить до складу ряду інших мінералів – хромової слюди (*фуксита*), хромового хлориту, хромвезувіану, хромдіопсиду, хромтурмаліну, хромового гранату (*уваровиту*) й ін., які часто супроводжують руди, але самі промислового значення не мають. У природних умовах хром, як і залізо, мігрує і може накопичуватись у глинах.

Хром разом із залізом, титаном, нікелем, ванадієм і марганцем утворює одно геохімічне сімейство. Найбільш великі родовища хрома знаходяться у Південно-африканській республіці, Казахстані, Росії, Зимбабве, на Мадагаскарі. Також є родовища на території Турції, Індії, Арменії, Бразилії, на Філіпінах.

У природі хром зустрічається, в основному, у вигляді хромистого залізняка – хроміту заліза $Fe(CrO_2)_2$. З нього отримують ферохром відновленням вуглецем (коксом) в електроплавильних печах (*див. нижче*).

Хром використовують в якості зносостійких і декоративних гальванічних покриттів металів.

В металургії цей метал широко застосовують в якості легуючої добавки до спеціальних корозійностійких (нержавких) сталей, які містять більш 10% хрому (*див. нижче*). При меншому вмісті хрому сталь набуває значної міцності та твердості. Сплав нікелю з хромом – *ніхром* (80% *Ni*, 20% *Cr*) має високу температуру плавлення, його використовують в нагрівальних елементах печей, які дають можливість досягти температури 1100 °С.

Залізо й його сплави залишаються основою більшості сьогоденних технологій і техніки: їх застосування складає більше 90% всіх використовуваних металів сучасних виробництв. Найважливішими тут виступають сплави заліза з вуглецем, з яких формуються великі групи: ***чавуни*** і ***сталі***.

Види цих матеріалів зумовлюються кількістю вуглецю, наявністю та кількістю легуючих та модифікуючих компонентів, які уводять до відповідних розплавів, а також застосованими технологіями виробництва.

До легуючих та модифікуючих матеріалів відносяться *феррометали*, або феросплави (феромаргацець, ферохром, феротитан, феросиліцій, феровольфрам та ін.). а також спеціально виготовлені *лігатури*. Останні представляють із себе сплави з точно визначеним вмістом компонентів, які використовуються для модифікування (або мікролегування) інших металів та сплавів.

Бажані властивості вказаних матеріалів визначають спосіб їх *виготовлення* та форму *поставки* продукції. Наприклад, через низьку пластичність більшості марок чавунів (також як і значної кількості марок бронз) з них виготовляють *литі* вироби. Пластичні матеріали (більшість марок сталі, також як мідь, алюміній, золото й ін.) використовують для виробів, які вимагають пластичного формозмінення початкової заготовки.

Часто шляхом використання певних технологічних прийомів (деформація напівфабрикату, термічна або термомеханічна обробка, покриття тощо) підвищують рівень показників якості виробів.

Властивості цих видів продукції регламентуються нормативними документами, відображеними у Додатку А.

Чавун представляє із себе багатокомпонентний сплав заліза з більш ніж 2,14% вуглецю, до 2% марганцю, до 4% силіцію (*кремнію*), фосфором та сіркою. В чавуні також міститься незначна кількість водню, азоту та кисню. У легованому чавуні можуть бути хром, нікель, ванадій, вольфрам і титан, кількість яких залежить від складу вихідної руди та умов легування.

У залежності від призначення чавуни, що виплавляють у доменних печах (*див. нижче*), поділяють на *три основні категорії*:

– переробний чавун, що призначений для подальшого виплавлення сталі;

– ливарний чавун, що призначений для отримання виливків та подальшого використання у машинобудівництві;

– доменні феросплави, які використовуються для розкиснення та легування сталей у сталеплавильному виробництві.

Кожну марку чавунів поділяють на:

– три группы – *за вмістом марганцю*;

– п’ять класів (А, Б і т.д) – *за вмістом фосфору*;

– на п’ять категорій (I, II і т.д.) – *за вмістом сірки*.

Переробний чавун являється основним вихідним матеріалом для отримання сталі, на що витрачається приблизно 80…85% усього чавуну. Він поділяється на три види:

- переробний коксовый (марок М1, М2, М3, Б1, Б2);

- переробний коксовий фосфористий (марок МФ1, МФ2, МФ3);

- переробний коксовий високоякісний (марок ПВК1, ПВК2, ПВК3).

Найбільш розповсюджені переробні коксові чавуни марок М1, М2 і М3 у своєму складі містять 3,8…4,4% *C*; 0,5…1,4% *Si*; 0,5…1,5% *Mn*; 0,15…0,3% *P*; 0,02…0,06% *S*. Чавуни цих марок використовують для виплавлення сталі мартенівським та киснево-конверторним способами (*див. нижче*). Чавуни марок Б1 та Б2, які містять фосфору менше 0,06% (клас А) і сірки менше 0,04% (категорія III), також використовують для перероблення на сталь бесемерівським способом (*див. нижче*).

Переробні коксові фосфористі чавуни марок МФ1, МФ2 та МФ3 містять 1…2% фосфору; їх переробляють у сталі в мартеновських печах, що гойдаються.

Переробні коксові високоякісні чавуни марок ПВК1, ПВК2, ПВК3 мають мінімальний вміст шкідливих домішок (наприклад, за класом А – менше 0,02% *P*, за категорією I – менше 0,015% *S*); іх використовують для виплавлення якісних сталей в електродугових та інших печах.

Ливарний чавун (марок ЛК1…ЛК7) після випуску з доменної печі разливають у чушки і в холодному стані спрямовують до машинобудівних заводів, де для виготовлення

деталей машин його повторно піддають плавленню у спеціальних *печах-вагранках*. Зазвичай ливарні чавуни містять 0,1…0,3% *P*. Для художнього литва застосовують фосфористі чавуни, які містять до 1,2% *P*.

До доменних феросплавів відносять:

– так звані дзеркальні чавуни марок ЗЧ1, ЗЧ2, ЗЧ3, які містять 10…25% *Mn*;

– феромарганець *Мп6*, *Мп7* із вмістом 70…75% *Mn*;

– доменный феросиліцій Си10, Си15 з вмістом 9…13% *Si* (іноді – більше) та до 3% *Mn*.

У доменних печах з руд деяких родовищ виплавляють також природнолеговані чавуни, що містять хром, ванадій, нікель та ін.

Сталями називають сплави заліза з вуглецем, вміст якого не перевершує 2,14%. Тому суттю перероблення чавуну у сталь стає зменшення вмісту вуглецю, а також інших складових шляхом переводу їх у шлак або гази.

Сталь виготовляють у вигляді виливків або безперервнолитої заготовки, які надають для подальшого перероблення-використання як внутрішнім, так і зовнішнім споживачам.

Сталі надзвичайно різноманітні. При цьому єдиної світової системи класифікації сталей немає: країни, компанії та фірми зазвичай використовують свої системи класифікації.

У минулому в СРСР внаслідок великої роботи були розроблені класифікація та уніфікована система позначень різних марок сталі, узгоджені з вимогами до їх складу та якості. Це було відображено у відповідних стандартах та Технічних умовах. В Україні та інших країнах пострадянського простору ця класифікація зберігається до наявного часу.

Зазвичай сталі класифікують за:

- способом виготовлення;
- якістю;
- хімічним складом;
- характером застигання у виливницях та будовою виливка;
- призначенням.

За способом виготовлення сталь може бути:

– конвертерною;

– мартенівською;

– електросталлю;

– отриманою внаслідок електрошлакового переплаву;

– отриманою іншими способами (*див. нижче*).

Часто від способу виготовлення залежать деякі особливості якості металу. Наприклад, не дивлячись на однаковий хімічний склад та наступну термічну обробку, властивості *основної* та *кислої* мартенівських сталей різні, і це вимушені враховувати споживачі.

За якістю сталі зазвичай поділяють на наступні групи:

– звичайної якості;

– якісні;

– високоякісні.

Різниця між цими групами зумовлюється вмістом шкідливих домішок (у першу чергу – сірки і фосфору), що допускаються НТД, а також в особливих вимогах щодо вмісту неметалевих включень. Наприклад, у сталей звичайної якості кількість сірки і фосфору не повинна перевищувати 0,040…0,060%, у якісних сталей – не больше 0,030…0,040%, а у високоякісних – не більше 0,020…0,030% (у деяких випадках вміст цих елементів допускается лише не більше 0,005…0,010%).

За *хімічним складом* розрізняють сталі:

- *вуглецеві* (у тому числі: низько-, середньо-, високовуглецеві, інструментальні);

- *низьколеговані* та *леговані* (у тому числі – хромисті, марганцовисті, хромонікелеві тощо). Прийнято, що низьколеговані сталі містять у своєму складі до 2,5 % легувальних елементів у сумі, середньолеговані – 2,5…10%, високолеговані – понад 10%. На відміну від цього, відрізняють модифіковані сталі, які отримують уведенням в розплавлені метали (сплави) модифікаторів (легувальних речовин) у кількості, зазвичай, не більше від десятих часток процента, які, майже не змінюючи хімічного складу, впливають на структуру металів поліпшуючи їхні механічні та деякі інші властивості. При модифікуванні збільшення дозування присадки є або неможливим (через малу розчинність чи леткість), або неефективним і навіть шкідливим. Модифікування також відрізняється від *мікролегування*, при якому збільшення дозування присадки приводить до звичайного легування (без явної границі між отримуваними ефектами).

Сталі розрізняють за *марками* [5].

Марки вуглецевої сталі звичайної якості позначають буквами «Ст» з наступною числовою ідентифікацією хімічного складу, зазвичай – середнього вмісту вуглецю в *десятих долях* процента, наприклад: «СтО», «Ст1», «Ст2» і т.д.

Позначеннями якісних вуглецевих сталей слугує слово «Сталь» з наступними числами та літерами. Перше двозначне число після цього слова відповідає середньому вмісту вуглецю в *сотих долях* процента, наприклад: «Сталь 10», «Сталь 20», «Сталь 45» і т.д.

Вуглецеві інструментальні сталі маркують літерою «У». Число після цієї літери вказує на вміст вуглецю в *десятых долях* процента, наприклад: «У7», «У10», «У12» і т.д.).

Для легованої сталей згідно з ДСТУ 7806 (ГОСТ 4543) використовують єдині умовні позначення їх хімічних складових, представлених у таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Позначення хімічних елементів при маркуванні легованих сталей

Елемент			Елемент		
назва	символ	позначення при маркуванні	назва	символ	позначення при маркуванні
Вуглець	*C*	У	Вольфрам	*W*	В
Манган	*Mn*	Г	Цирконій	*Zr*	Ц
Нікель	*Ni*	Н	Селен	*Se*	Е
Хром	*Cr*	Х	Мідь	*Cu*	Д
Титан	*Ti*	Т	Силіцій	*Si*	С
Кобальт	*Co*	К	Азот	*N*	А (у середині маркування)
Молібден	*Mo*	М	Фосфор	*P*	П
Ванадій	*V*	Ф	Алюміній	*Al*	Ю
Бор	*B*	Р	Рідкісноземельні метали		Ч

При цьому після числа з визначення кількості вуглецю (у сотих долях процента) послідовно проставляють літери згідно з даними табл. 1.2 та відповідні числа, які вказують приблизний вміст належних елементів, якщо він вище 1%. Якщо вміст елементу не вище за 1%, число не проставляється. Літера «А» в кінці позначення марки вказує на те, що сталь є високоякісною.

Наприклад, марка І2Х2Н4А означає, що це – високоякісна сталь, яка містить приблизно 0,12% *C*, 2% *Cr* та 4% *Ni*. Позначення марки сталі ЗОХГС свідчить про те, що в ній є приблизно 0,30% *C* та не більше, ніж по 1% хрому, марганцю і силіцію (кремнію).

Характер застигання виливка у виливниці залежить від ступеня розкиснення: повне розкиснення сталі зумовлює її «спокійну» кристалізацію, без видимих ефектів. При неповному розкисненні внаслідок активного виділення газів сталь нібито «кипить». Тому

за характером застигання сталі у виливниці розрізняють *спокійні, киплячі* та *напівспокійні* сталі.

За призначенням можна виділити наступні основні групи сталей [2]:

– *конструкційна сталь*, яку використовують при виготовленні різних металоконструкцій. Конструкційні сталі можуть бути як простими вуглецевими, так і легованими. Легована сталь декілька дорожче за вуглецеву, але володіє кращими властивостями, зокрема, міцністю, внаслідок чого її витрати менше, а використання часто стає економічно доцільним;

– *топочна і котельна сталь* – низьковуглецева сталь, яку застосовують для виготовлення парових котлів і топок. Ця сталь повинна мати добрі пластичні властивості у холодному стані, добре зварюватись та не мати прагнення до старіння;

– *сталь для залізничного транспорту* – рельсова сталь, осьова сталь, сталь для бандажів залізничних коліс. Це середньовуглецева сталь, яка має відповідати високим вимогам щодо суцільності структури металу та механічних властивостей, зокрема, щодо втомності;

– *підшипникова сталь* слугує матеріалом для виготовлення кульових і роликових підшипників. До цієї сталі, яка містить біля 1% вуглецю та 1,5% хрому, пред'являють дуже високі вимоги щодо відсутності неметалевих включень;

– *інструментальна сталь* використовується для виготовлення різних, у тому числі – ріжучих інструментів, валків прокатних станів, деталей кувального та штампувального обладнання. Вона зазвичай містить значну кількість вуглецю (іноді до 2%), а також у ряді марок – значну кількість легуючих елементів: хром, вольфрам, молібден й ін.

Крім вказаних, є ще ряд груп сталей, призначення яких узгоджується з їх назвою: *рессорно-пружинні*, *електротехнічні, трансформаторні*, *динамні, нержавкі (корозійностійкі), гарматні, снарядні, броневі, трубні* та ін.

Із сталі та чавуну з використанням відповідних технологій та обладнання на спеціалізованих підприємствах виготовляють кінцеву продукцію чорної металургії.

При цьому розрізняють наступні типи такої продукції.

Прокатну продукцію поділяють на наступні види: сортовий прокат, листовий прокат, труби та спеціальні профілі [6].

Сортовий прокат за формою і розмірами поперечного перерізу готових виробів поділяють на профілі: *прості, фасонні, періодичні та спеціальні*.

До *простих профілів сортового прокату* відносять:

– блюми і сляби;

– заготовку: квадратну і круглу (трубну);

– крупний і середній сорт (квадрат, круг, шестигранник);

– дрібний сорт (катанка, круг, штрипс та ін.);

– дріт.

До *фасонних профілів сортового прокату* відносять рейки, балки, швелери, таври, куточки та ін. з розмірами перерізу, які відповідають крупному, середньому та дрібному сорту.

До *періодичних профілів сортового прокату* відносять арматуру періодичного профилю; заготовку автомобільних осей тощо;

До *спеціальних профілів прокату* відносять гнуті профілі, колеса, кільця, кулі та ін.

Листовий прокат класифікують умовно в залежності від товщини: на *товсті* листи (більше 4 мм) і *тонкі* листи (менше 4 мм).

У товстих листах відокремлюють: *плити* (толщиною больше 60 мм) і *універсальну сталь* – плоский прокат с катаними (плоскими) кромками.

У тонколистовій продукції відокремлюють: *жерсть* (від 0,08 до 0,5 мм) и *фольгу* (товщиною меше 0,08 мм).

Листовий прокат може виготовлятись як окремими «картками», так і в рулонах. Рулони шириной менше 300 мм называють «*стрічкою*».

Металеві трубы розрізняють [7]:

– *за призначенням* – «загального призначення» (комунікаційні та для будівництва); «нафтові та геологорозвідувальні» (бурильні, обсадні, насосно-компресорні; нафтопроводні); «для машинобудування» (для енергетичної промисловості, підшипникові, високого тиску, крекінгові);

– *за зовнішнім виглядом* – круглого та фасонного перерізу;

– *за матеріалом та його станом* – чавунні, сталеві, з кольорових металів та сплавів; монометалеві, біметалеві, багатошарові; гаряче-, тепло– холоднодеформовані; відпалені;

– *за способом виготовлення* – литі, катані, волочені, пресовані, профільовані, зварені, паяні;

– *за особливими вимогами* – з покриттям або без нього, прецизійні; визначеної точності тощо;

– *за загальними характеристиками* – з регламентуванням особливих умов постачання (наприклад, із заглушками на кінцях), визначеної довжини, з певною шорсткістю поверхні тощо.

До ***металовиробів*** відносять метизи та скобяні вироби. Їх виготовляють волочінням, ковкою, штамповкою, висаджуванням, вирубкою, гибкою.

Групу *метизів* складають болти, гвинти, гайки, шурупы, саморізи, шайби, цвяхи, шплинти, дюбелі, анкери, талрепи, коуши, троси, сітку, сталеву стрічку, зварювальні електроди, пили, ножі та ін.

До *скобяних виробів відносять* скоби, задвижки, крюки, костилі, кутники, дверні та оконні ручки, навіси тощо.

Майже кожен вид продукції (наприклад, сталь товарна у виливках, прокатаний куточок, гарячекатані труби або цвяхи), як правило, має підвиди (різновиди, типорозміри), які відрізняються розмірами перерізу, рівнем властивостей, переліком показників якості, специфічних вимог тощо та мають задовольняти відповідні різноманітні вимоги галузей економіки та споживачів. Тому майже кожному виду продукції можуть відповідати декілька національних стандартів. Зокрема, в Україні – це ДСТУ (гармонізовані стандарти ДСТУ ISO, ДСТУ EN, ДСТУ DIN тощо), чинні міждержавні стандарти або інші НТД. Також треба мати на увазі можливу наявність аналогічних *галузевих* стандартів та *технічних умов*, у яких наведені особливі або більш жорсткі вимоги до якості відповідної продукції.

Перелік більшості стандартів на продукцію металургії, а також – на на вторинні метали, що є чинними в Україні, наведено в таблиці А1 Додатку А. Там також представлено перелік деяких аналогічних зарубіжних стандартів, належність яких до тих чи інших країн визначається їх ідентифікацією: ASTM, DIN, JIS тощо (*див.* [1, розділ 2]).

Виконання конкретних вимог, що викладаються у відповідних нормативних документах, а також реалізація інших заходів технічного регулювання та робіт із забезпечення якості залежать, значною мірою, від технологій, які використовуються. Це узгоджується з «Принципом віддзеркалення» (*див.* [1, розділ 1]), згідно з яким якість продукції повинна забезпечуватись якістю процесів, а ті, у свою чергу – якістю системи.

1.2 Базові технології металургії

Умовно, всі процеси з виготовлення металургійної продукції можуть бути розподілені на:

– *чорну металургію*, яка пов’язана з обробкою чорних металів та виготовленням феросплавів;

– *кольорову металургію*, яка пов’язана з обробкою кольорових та коштовних металів;

– *порошкову металургію*, яка пов’язана з виготовленням виробів з порошків металів і сплавів та використанням спеціальних технології та обладнання.

У цих процесах використовуються відповідні, здебільшого, типові технології, що забезпечують *обробку* матеріалу (металу, сплаву):

– в умовно *рідкому* стані (наприклад, виготовлення чавуну, сталі, феросплавів);

– у перехідному *від рідкого стану до твердого* стану (у ливарному виробництві);

– в умовно *твердому* стані, які, у свою чергу, представляються процесами:

– зі зміною форми, стану та/або розмірів напівфабрикату чи сировини (наприклад, обробка тиском);

– без зміни форми напівфабрикату чи сировини (наприклад, термічна обробка);

Вказана «*умовність*» базується на тому, що й у твердому стані пластична деформація матеріалу є різновидом його течії. Тому критерієм «*твердості*» може бути здібність матеріалу зберігати свою набуту форму при наявній температурі без зовнішніх інструментальних впливів.

В Україні чорна металургія залишається однією з провідних галузей промисловості. Вона включає понад 300 підприємств з видобутку руди й її збагаченню, виробництву чорних металів, труб і метизів, феросплавів, вогнетривких матеріалів, вторинної обробки чорних металів та ін. У середньому, експорт металургійної продукції приносить країні декілька десятків відсотків її валютної виручки.

Металургійне підприємство чорної металургії з *повним циклом* включає *основні* цехи доменного («1-е перероблення»), сталеплавильного («2-е перероблення») і прокатного («3-є перероблення») виробництва. Такі підприємства звуться «*металургійними комбінатами*». Іноді, крім вказаних, до складу підприємства входять так звані основні цехи 4-го перероблення: трубопрокатні та трубоволочильні, волочильні, пресові, штампувальні, кувальні тощо.

До складу деяких металургійних комбінатів організаційно або на засадах кооперації входять також як основні коксохімічні та/або агломераційні виробництва (цехи) з виготовлення сировини (агломерату, окатишів), які відіграють *додаткову* роль із забезпечення роботи доменного цеху.

Існують також металургійні організації (картелі, трести, концерни), які мають додаткові великі і складні господарства зі збагачення руди та вугілля, а іноді – і з їх видобутку.

Відсутність у підприємства доменного або доменного і сталеплавильного цехів робить його «підприємством з *неповним* металургійним циклом».

На деяких машинобудівних заводах функціонують цехи або дільниці з переплаву та лиття металів, кувальні, штампувальні (кувально-штампувальні), які за суттю реалізують металургійні технології.

Крім вказаних, до складу металургійного підприємства повинні входити *допоміжні* цехи та дільниці, призначені для обслуговування основних виробництв: підготовчі, механічні, енергетичні, транспортні, ремонтні та ін.

Природно, роботу основних і допоміжних цехів (дільниць) організує та забезпечує обладнанням, ресурсами, необхідною технічною, технологічною, науковою інформацією тощо керівництво підприємства та його відділи (менеджменту і маркетингу, постачання, збуту, технічної підтримки та контролю, випробувальні лабораторії, охорони праці та захисту довкілля, бухгалтерія, юридична служба тощо).

1.2.1 Обробка матеріалу (металу, сплаву) в рідкому стані

1.2.1.1 Виробництво чавуну

Основною метою доменного виробництва є отримання чавуну із залізних руд шляхом їх переробки в *доменных печах* (рисунок 1.1) [2, 8…11].

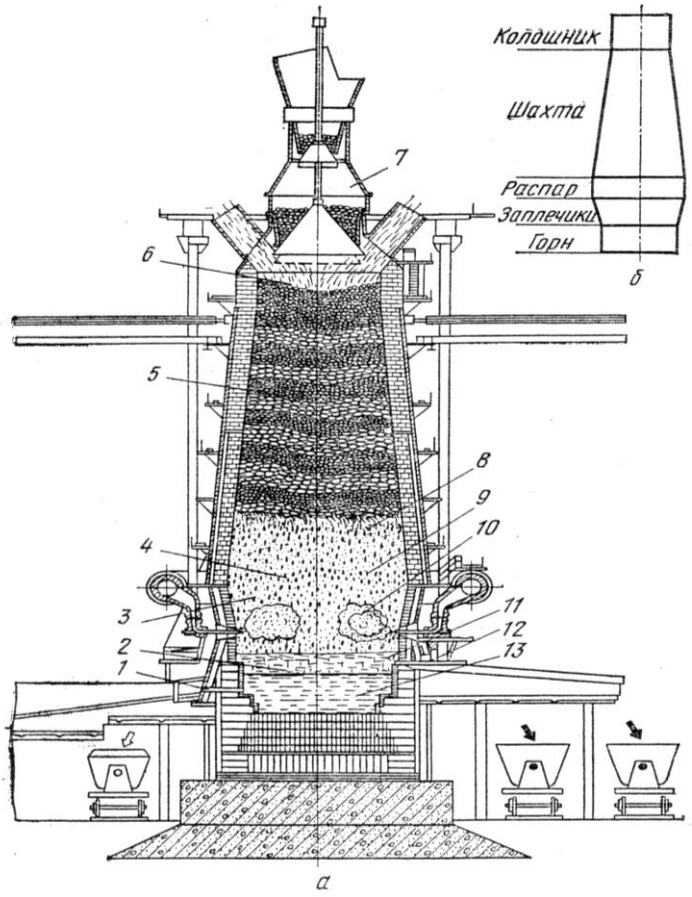


Рисунок 1.1 – Розріз (а) і профіль (б) робочого простору доменної печі: 1 – чавунна льотка; 2 – горн; 3 – заплечики; 4 – розпар; 5 – шахта; 6 – колошник; 7 – засипний апарат; 8 – горизонт утворення чавуну; 9 – горизонт утворення шлаку; 10 – зона горіння коксу; 11 – шар шлаку; 12 – шлакова льотка; 13 – розплавлений чавун

Робочий простір доменної печі у горизонтальних перерізах має круглу форму, а у вертикальному перерізі – своєрідну форму, яка називається *профілем*. Висота печі може сягати 35 м, що приблизно у 2,5…3 рази більше діаметра в її основі.

Верхня частина печі носить назву «*шахта»* і закінчується наверху отвором – *колошником,* який закривається рухомою колонкою – *колошниковым затвором.* Найбільш широка частина печі називається *розпаром,* а нижня частина – *горном.*

Стінки печі викладують з вогнетривких матеріалів – в основному, шамотною цеглою. Нижню частину *горну* і його основу (*лещадь*) виконують з особливо вогнетривких матеріалів – вуглецевих (графітизованих) блоків. Для підвищення стійкості вогнетривкої кладки у ній розміщують (приблизно на 3/4 висоти печі) металеві холодильники, по яких циркулює вода. Для зменшення витрат води застосовують випарне охолодження.

Іззовні кладку печі охоплює сталевий кожух товщиною до 40 мм. Для зменшення навантаження на нижню частину печі її верхню частину (шахту) розміщують на сталевому кільці, яке спирається на колони.

Економічніс доменних печей зростає при збільшенні їх корисного об'єму (робочого простору). Сучасні крупні доменні печі мають об'єм 2000…3000 м^3. На металургійному комбінаті «АрселорМиттал Кривий Ріг» (раніше – «Криворіжсталь») встановлена пічь об'ємом 5000 м^3.

Доменна пічь працює *постійно* протягом 5…10 років, поки обладнання не стане вимагати капітального ремонта. З неї періодично випускають чавун і шлак, безперервно видаляють доменні гази. При цьому, рівень шихтових матеріалів у печі знижується. На місце, що вивільняється, завантажують окремими порціями («*колошами*») необхідні шихтові матеріали.

Основними сировинними матеріалами доменної плавки є *паливо, залізні та марганцеві руди* та *флюс*, які для підвищення техніко-економічних показників процесу попередньо можуть піддавати спеціальній підготовці.

Паливо доменної плавки

В якості палива у сучасній доменній плавці використовують кокс, мазут, природничий і коксовий гази та кам'яновугільний пил. Вони слугують не тільки джерелом тепла, але його реагентом, який забезпечує відновлення заліза з руди та утворення чавуну шляхом навуглецювання заліза.

Основним видом палива є *кокс* – пориста кускова речовина, яка залишається після видалення з кам'яного вугілля летючих складових при його нагріванні до 950…1200 °С без доступу повітря в спеціальних коксових батареях (печах). Крім вуглецю кокс містить 10…13% золи, 0,5…2% сірки.

Кокс, який завантажується у доменну піч, не повинен бути занадто дрібним (це погіршує газопроникненість шихти), або занадто крупним (це зумовлює руйнування кусків коксу з утворенням дрібних фракцій). Завдяки збереженню форми куска на всьому шляху пересування шихти від колошника до горну, забезпечується проходження газового потоку крізь шар рідких, напіврідких і твердих материалів у доменній печі.

У нижній частині доменної печі розпечений кокс утворює своєрідну дренажну решітку, крізь яку стікають рідки продукти плавки.

Висота столба шихти у печі може сягати 30 м, і на куски коксу, особливо, у нижній частині печі, діють великі навантаження. Тому однією з основних виог до коксу є його висока механічна міцність як у холодному, так і у розпеченому стані.

Кокс повинен бути пористим для забезпечення доброї горючесті та володіти високою теплотою горіння. Чим менше золи, шкідливих домішок і летючих речовин у коксі, тим більше у ньому вуглецю, і вище теплота згоряння.

Зі збільшенням вмісту золи і сірки в коксі зростає кількість шлаку, витрати тепла на його розплавлення і зменшується механічна міцність кокса. Зі збільшенням вмісту сірки і фосфору погіршується якість чавуну.

Підвищена кількість летючих речовин у коксі свідчить про незавершеність попереднього процесу коксування, що призводить до зниження міцності кокса. Занадто малий вміст летючих речовин у коксі свідчить про його пережог, що також негативно відбивається на його якості.

У коксі завжди міститься волога, джерелом якої є вода, яку використовують при коксохімічному виробництві для гасіння кокса, та/або з атмосфери. Оскільки кокс завантажують у піч «за масою», вміст вологи у ньому слід витримувати постійним для збереження заданого теплового режиму печі.

На виплавку 1т чавуну витрачається біля 550 кг коксу, а вартість кокса складає 45…55% собівартості чавуну.

Руди і флюси доменної плавки

Залізні руди вносять до доменної печі залізо, яке хімічно пов'язане з іншими елементами.

З *марганцевою рудою* до доменної печі вноситься марганець для отримання чавуну необхідного складу.

Флюсом називаються добавки, які завантажуються у доменну піч для зниження температури плавлення порожньої породи руди, офлюсування золи кокса та надання шлаку необхідних за технологією фізико-хімічних властивостей (зокрема, для отримання рідкого легкопересувного шлаку з високою здібністю поглинати сірку).

Залізна руда складається з мінералу (рудної речовини, до складу якої входить залізо), порожньої породи та домішок.

Рудною речовиною, частіш за все, є оксиди, силікати і карбонати заліза.

Порожня порода зазвичай складається з кремнезему, глинозему, вапна і магнезії, які утворюють складні мінерали, або – рідше – з доломіту або вапняка.

Домішки руд поділяються на корисні та шкідливі. Корисними домішками вважають манган, хром, нікель, ванадій, вольфрам, молібден та ін. Шкідливі домішки – сірка, фосфор, миш'як (хімічний елемент *арсен*), цинк, свинець і, у ряді випадків – мідь, яка погіршує якість чавуну або руйнівно діє на вогнетри футеровки доменної печі.

Критеріями оцінки якості залізних руд являються:

– вміст заліза;

– тип основного мінералу, що містить залізо;

– склад і властивості порожньої породи;

– вміст шкідливих домішок;

– стабільність хімічного складу;

– здібність до хімічного відновлення заліза («відновлюваність»);

– кусковатість;

– міцність;

– пористість;

– вологість.

Чим вище вміст заліза у руді, тим краще працює доменна пічь. Встановлено, що при підвищенні вмісту заліза у руді на 1% продуктивність печі зростає на 2,0… 2,5%, а витрати коксу зменшуються на 1,4…2 % [8].

До *багатих* залізних руд відносять руди, що містять 60…68% заліза, до *середніх* – 50…60%, до бідних – 40…50% заліза.

У залежності від типу рудного мінералу залізні руди поділяють на чотири основні групи:

1. *Червоний залізняк* (гематитова руда) – найбільш розповсюджена залізна руда, до складу якої входить мінерал *гематит* Fe_2O_3 – безводний оксид заліза. У чистому вигляді останній має колір від темночервоного до темносірого і містить 70% заліза та 30% кисню. Відповідним чином, ця *руда* містить 45…65% заліза, його добру відновлюваність та небагато шкідливих домішок.

2. *Магнитний залізняк* (магнетитова руда), до складу якої входить мінерал магнетит – магнітна закис-окис заліза Fe_3O_4. У чистому вигляді в останній міститься 72,4% заліза та 27,6% кисню. *Руда* зазвичай містить 40…60% заліза. Вона володіє добре вираженими магнітними властивостями, має темносірий або чорний з різними відтінками колір. Порожня порода руди кремнеземиста з домішками інших оксидів. Залізо з магнітного залізняка відновлюється трудніше, ніж з інших руд.

3. *Бурий залізняк* представляється залізовмісткими мінералами *водних оксидів заліза* $nFe_2O_3 \cdot mH_2O$, які містять від 52% до 69% *Fe*. Віповідно, у *руді* зазвичай міститься 25…60% *заліза*. Вона має колір від жовтого до буро-жовтого. Порожня порода залізняка – глиниста, іноді – кремністо-глиноземіста.

4. *Шпатовий залізняк* – залізна руда, основу якої складає мінерал *сидерит* (карбонат заліза $FeCO_3$ із вмістом 48,3% *заліза*). Відповідно, у руді зазвичай 30…40% заліза. Сидерит має колір від жовтовато-білого до брудносірого. Він легко окиснюється та

переходить до стану бурого залізняка. Серед усх залізних руд шпатовий залізняк володіє найбільш високою відновленістю.

Крім цих представлених руд, залізо у значній кількості (46,6%) міститься у сірчаному колчедані (піриті). Однак пірит у доменній плавці не використовують. Його застосовують в якості сировини у сірчанокислотному виробництві, а відходи у вигляді окисненого заліза – при виробництві агломерату.

Промислове використання також знаходять і бідні залізні руди: марганцеві та гематитові кварцити. Їх збагачують та отримують залізнорудний концентрат, у якому міститься більше 60% заліза.

Кускові руди з високим вмістом заліза можна переробляти у доменній печі без попередньої підготовки, але таких руд мало, і вони, в основному, використовуються при виплавці сталі (*див. нижче)*.

Марганцеві руди містять 25…45% мангану у вигляді різних оксидів. Їх додають до шихти для підвищення кількості цього металу у чавуні.

В якості ***флюсу*** обирають матеріал з хімічними властивостями, які є протилежними порожній породі. Найважливішою вимогою при цьому стає низький вміст у них шкідливих домішок: сірки та фосфору.

Оскільки порожня порода вітчизняних залізних руд, переважно, кремнеземиста (кисла), тобто містить надлишок SiO_2, то роль флюсу повинні відігравати сильноосновні матеріали, які містять оксиди кальцію *CaO* і, частково, *MgO*: кальцит (вапняк $CaCO_3$) та доломитизований варняк (суміш кальциту та доломіту).

Типовий металургійний вапняк після відпалу містить 50…55% *CaO*. Надлишок вапна у доменному шлаці сприяє також видаленню з чавуну сірки. Доломитизований вапняк застосовують для покращення рухливості шлаку шляхом доведення кількості оксиду мангану у шлаці до 6…8%.

Якщо склад порожньої породи проявляє *основні* (*не кислі*!) властивості, флюси мають бути кислими або глиноземистими.

На вітчизнянх заводах флюси вводять до доменної печі, головним чином, у вигляді офлюсованого агломерату та офлюсованих окатишів.

Підготовка руд до плавки

Збільшення вмісту заліза у доменній шихті досягають *збагаченням* залізних руд, а *покращення газопроникності шихти* – окускуванням дрібних залізних руд і концентратів [8].

У наявний час більше 90% руд, що видобуваються, перед завантаженням у доменну піч піддають спеціальній підготовці, в процесі якої їх характеристики можуть значно покращатись.

Основними видами обробки руд є:

– дроблення;

– сортування (грохочіння);

– усереднення;

– збагачення;

– кускування.

Дроблення руд, здебільшого, за допомогою конусних дробарок застосовують як *самостійну операцію* для отримання кусків руди необхідного розміру та як *допоміжну операцію* – при збагаченні руд (для руйнування механічних звязків между залізорудним мінералом і порожньою породою). Це найбільш вартісна операція в системі підготовки руд.

У залежності від розмірів кусків руди після дроблення розрізняють чотири різновиди дроблення:

– крупне (розмір кусків 100…300 мм);

– середнє (40…60 мм);

– дрібне (8…25 мм);

– тонке (менше 8 мм).

Для плавки в доменній печі розмір кусків руди повинен бути 10…30 мм, для агломерації – менше 5…10 мм, для магнітного збагачення – біля 0,1 мм.

Сортуванням (грохочінням) називається розподілення руди на класи за крупністю. Для руд, які поступавють на металургійний завод без збагачення, грохочіння є самостійною та дуже важливою операцією, в процесі якої відокремлюють дрібну руду (менше 10 мм) для агломерації, а крупнішу (больше 10 мм) сортують на два класи: доменну (10…30 мм) і мартенівську (30…80 мм).

При обробці руд на збагачувальних фабриках грохочіння є допоміжною операцією, яку проводять сумісно з дробленням руд. Це дозволяє завантажувати у дробарні пристрої тільки ті фракції, які підлягають дробленню, що дозволяє зменшити витрати електроенергії, підвищити продуктивність дробильних пристроїв та якість дроблення.

Грохочіння руд з розмірами часток більше 1…3 мм здійснюють на механічних ситах («*грохотах*»). Для більш тонко подрібнених матеріалів використовують гідравлічне разділення: матеріал подають разом з водоюй у спеціальні пристрої, де крупні зерна осаджуються скоріше за дрібні. У пристроях типу «гідроциклон» разділення часток за крупністю здійснюється під дією відцентрової сили.

Залізні руди у стані видобутку завжди мають непостійний хімічний склад. При безпосередньому їх використанні в доменній печі це може викликати порушення теплового стану та хімічного складу шлаку і, як наслідок – зміну *рівного ходу печі*, при яких неминучі збільшення витрати коксу, зниження продуктивності печі та погіршення якості чавуну.

Для зменшення негативного впливу варіації хімічного складу руд на показники доменної плавки, руди піддають ***усередненню***, тобто змішуванню залізорудних матеріалів з метою вирівнювання у часі хімічного та гранулометричного складів. Цим прагнуть досягти зменшення коливань (не більше ±0,5% від середнього значення) вмісту заліза та кремнезему в шихті.

Одним з основних методів усереднення руди є її пошарова укладка в штабелі великої ємності.

Збагаченням називається процес разділення рудного мінералу та порожньої породи з метою підвищення питомої кількості металу та зменшення вмісту порожньої породы у шихтовому матеріалі, а в деяких випадках – і шкідливих домішок.

Усі способи збагачення базуються на різниці фізичних властивостях рудних мінералів і порожньої породи.

У результаті збагачення руди отримують:

– *концентрат* – продукт, що вилучається, у якому міститься більша частина металу;

– *«хвости»* – відходи при збагаченні руди, які містять незначну кількість металу;

– *проміжний продукт*, який піддають повторному збагаченню.

У наявний час збагаченню піддають біля 80% усієї руди. При цьому, у залежності від методу та обладнання, що використовуються, рівень вилучення заліза при збагаченні руди може складати від 60% до 95%.

Розрізняють п’ять основних методів збагачення руд:

– *рудовідбірка*, яка основана на різниці кольору та блиску кусків рудного мінералу та порожньої породи;

– *промивка*, яка базується на різній схильності кусків рудного мінералу та порожньої породи размивці водою;

– гравітаційне збагачення – розділення у рідкому середовищі рудних мінералів та порожньої породи у залежності від щільності зерен;

– флотація – метод, заснований на різниці фізико-механічних властивостях поверхонь часток рудного мінералу та порожньої породи;

– магнітна сепарація (найбільш розповсюджений метод збагачення), який оснований на наявності у мінерала магнітних властивостей. Різновидом цього способу є рідинна магнітна сепарація, коли руда під дією на неї магнітного поля одночасно промивається водою. Зрозуміло, що магнітне збагачення можна безпосередньо використовувати тольки для так званих сильномагнітних магнетитових і титаномагнетитових руд. Інші средньо– та слабомагнітні руди перед збагаченням піддають магнитизуючому відпалу.

Кускування залізних руд, яке широко використовується в металургії чорних і кольорових металів – це процеси перетворення дрібних руд і концентратів у кускові матеріали.

Відомі три методи кускування руд і концентратів:

– *агломерація* (процес спікання дрібних руд, концентратів и флюсів шляхом спалювання пального в шарі матеріалу, що спікається, або внаслідок підводу високотемпературного тепла іззовні);

– *окатування* (процес отримання з концентрату сирих куль діаметром 10…25 мм з наступним їх обпалом при температурі 1200…1350 °С);

– *брикетування* (процес пресування пилеподібних руд і концентратів у куски однакової форми з додаванням речовин, що зв'язують, або без них).

У чорній металургії найбільше розповсюдження отримали агломерація та окатування руд.

Крім чавуну, кінцевими продуктами доменної плавки є: шлак, колошниковый газ і колошниковий пил.

Доменний шлак при його накопиченні випускають у розплавленому стані крізь шлакові льотки (*див. рис. 1.1*) у ковши-шлаковози. Ще порівняно недавно шлаки направляли до отвалів. Натепер широке використання знайшла мокра грануляцяя шлаків: при виливанні рідкого шлаку у воду він перетворюється у дрінозернистий матеріал. Гранульований шлак використовують для виготовлення цементу та інших шлакових матеріалів. З доменного шлаку отримують також щебень, литі вироби та ін.

Доменний, або колошниковий газ виділяється у великій кількості та безперервно видаляється крізь газовідводи з доменної печі. Він містить значну кількість горючих складових. Після очищення від пилу (часток руди, палива, флюсів) доменний газ використовують як пальне для нагріву воздухонагрівачів доменних печей, водяних і парових котлів. У суміші з більш калорійними коксовим або природничим газами його використовують також для нагріву мартеновських і нагрівальних печей.

Колошниковий пил, який містить 45…50% заліза (інше – частки руди, палива, флюсів), використовують в агломераційному процесі.

Доменний процес

Доменний процес представляє із себе сукупність механічних, фізичних і фізико-хімічних явищ, які мають місце в доменній печі (*див. рис. 1.1*). У результаті доменного процесу шихтові матеріали (кокс, залізовмісткі компоненти і флюс) перетворюються на чавун, шлак і доменний газ.

У хімічному відношенні доменний процес є відновлювано-окиснюючим: з оксидів відновлюється залізо, при цьому відновлювачі окиснюються. Але частіше доменний процес називають «*відновнюючим*», оскільки його основною метою є відновлювання оксидів заліза до металу.

У сучасних доменних печах усі процеси щодо завантаження шихтових материалів повністю механізовані. Матеріали на колошник подають спеціальними тележками – *скипами*, які пересуваються по рейках нахиленого мосту.

Доменну пічь завантажують спочатку коксом, а потім пошарово – агломератом та/або рудою, коксом і флюсом за допомогою *засипного апарату* окремими порціями – *подачами*. Об'єм матеріалів однієї подачи відповідає об'єму декількох скипів, тому *подача* на колошник завантажується декількома скипами. При цьому, одну частину скипів подачи формують коксом, а іншу – залізовмісткими компонентами і флюсом. Якщо використовується тільки офлюсований агломерат, подача складається тільки зі скипів з агломератом і коксом.

Кількісне відношення компонентів шихти в кожній подачі постійно і визначається *розрахунком шихти*.

Завантаження подач здійснюють послідовно з інтервалами у 5…8 хвилин у воронку на верхній площині печі, яка знизу закрита *колошниковим затвором*.

При опущенні затвора (*див. рис. 1.1*) суміш падає у піч та заповнює простір на колошнику, який вивільняється при поступовому плавленні та зниженні шихтових матеріалів.

Горіння та необхідна для виплавки чавуну температура подтримується дуттям у піч підогрітого повітря або кисня. До *дуття* може додаватися природничий газ та водень. Дуття поступає до кільцевої труби, яка розміщена навкруги нижньої частини печі, а з неї – по вигнутим трубам крізь 14…36 *фурм* до верхьбої частини *горну* печі.

При згорянні у печі 1т коксу утворюється близько 5000 м^3 газа. В результаті, з печі об'ємом 3000…3200 м^3 за добу виділяється приблизно 15…17 млн. м^3 доменного газа, який містить до 25% *CO*. Його спалюють у спеціальних установках – *кауперах,* які призначені для попереднього нагріву у спеціальних *повітронагрівачах*, повітря (або кісню), що вдувається у доменну піч. Кожну доменну піч обслуговують три-чотири *повітронагрівачі*.

Рідкі чавун і шлак розділяються в горні печі завдяки різним значенням їх густини. По мірі накопичення в горні чавун випускають 10…18 разів на добу крізь чавунну льотку, а шлак – крізь шлакові льотки («*верхній шлак*») та чавунну льотку під час випуску чавуну («*нижній шлак*»).

У ковшах-чавуновозах ємністю 80…100 тонн чавун по залізничним путям подають або до сталеплавильного цеху для перероблення на сталь, або до розливочної машини.

У першому випадку чавун зливають у *міксери* («копильники») ємністю до 2000 т, які нагріваються газом. При витримці у міксері вирівнюються хімічний склад і температура чавуну, здійснюється додаткове видалення сірки.

У другому випадку розливочна машина представляє собою конвеєр із закріпленими на ньому формами («мульдами»). У них після твердіння з чавуну отримують невеликі виливки – чавунні чушки (масою до 55 кг кожна), які стають товаром.

Роботу доменної печі також забезпечують допоміжні агрегати: шихтові двори, обладнання завантажувально-розвантажувальних пристроїв, бункерні естакади з вагон-вагами для автоматичного зважування шихтових матеріалів; підйомні механізми, які доставляють тележки-скипи із шихтою до завантажувального апарату доменної печі; ливарний двір; ковши-чавуновози та шлаковози й ін.

У доменній печі шихта опускається під дією своєї ваги у простір, що вивільняється внаслідок зменшення її об'єма при горінні вуглецю кокса, витрат вуглецю кокса на пряме відновлення, утворення та плавлення чавуну і шлаку, а також ущільнення шихти при її русі.

Периферійне (по колу) розміщення фурм і зон горіння призводить до переважного руху шихти у стін печі. Швидкість такого руху у периферійному кільці колошника складає 90…140, а у центрі – 70…120 мм/хв.

Час перебування шихты у печі змінюється у межах від 5,5 до 7 годин. Активізація роботи центру печі завжди призводить до суттєвого збільшення швидкості опускання шихти в осьовій зоні та зменшенню різниці швидкостей руху на периферії та в центрі.

Внаслідок різних швидкостей руху шихти у робочому просторі матеріали, які були разом завантажені у піч, приходять до горну неодночасно. Це явище, яке називають *випередженням*, необхідно враховувати при змінах умов роботи печі, наприклад, при переході на плавлення іншого виду чавуну, зміні якості шихтових матеріалів тощо.

Найважливішою умовою здійснення доменного процесу є безперервний зустрічний рух і взаємодія в робочому просторі печі шихтових матеріалів, які опускаються, та потоку газів, що підіймаються та утворюються в *горні* при горінні вуглецю коксу в дутті.

Для найбільш повного використання тепла та відновлювальної здібності газового потоку температура і склад газів у всіх точках перерізу доменної печі повинні бути однаковими, а шихта – рівномірно нагрітою.

Для цього, виходячи з особливостей конструкції доменної печі, матеріали при завантаженні на колошник повинні бути розподілені *нерівномірно за повздовжнім перерізом* печі як за крупністю, так і за компонентами шихти: у стін має бути більше крупного агломерату для кращого використання периферійних газів, а ближче до осі – більше кокса. Завелика кількість дрібних фракцій залізорудних компонентів біля стін печі може завадити опусканню шихти і привести до так званого «*тугого ходу*». Тому основну частину дрібних фракцій слід розміщувати у проміжному кільці між периферією та центром.

За *поперечним перерізом печі* матеріали повинні, навпаки, розподілятися сурово рівномірно за допомогою конуса і воронки, що забезпечує равномірний вміст диоксиду вуглецю в газі та однакову температуру.

Головними відновлювачами заліза у доменній печі являються окис вуглецю (60…80%) і твердий вуглець коксу. Деяка кількість заліза відновлюється воднем. Відновлення заліза з його оксидів протікає ступенево від вищих оксидів до нижчих, а далі – до чистого металу шляхом послідовного видалення кисню.

Через декілька хвилин після завантаження матеріалів на колошник вони нагріваються до температури вище 570 °С, і відновлення заліза з його оксидів здійснюється, в основному, за рахунок реакції з оксидом вуглецю *CO* (так зване, *непряме відновлення*).

При опусканні рудних матеріалів підвищується їх температура і вміст *CO* в доменних газах; при цьому утворюються умови для заключного відновлення заліза. Ці процеси закінчуються у нижній частині шахти печі при температурах біля 900…950 ºС (за деякими даними – при 1300…1400 ºС).

Відновлення твердим вуглецем називається *прямим відновленням*. Воно здійснюється у зоні розпара печі (*див. рис. 1.1*) при температурах выще 950…1000 ºС.

Встановлено, що робота печі з мінімальною витратою коксу може бути забезпечена, коли здійснюється як непряме, так і пряме відновлення заліза, що залежить від температури повітряного дуття, кількості природничого газу та інших факторів.

Відновлене у доменній печі з руди залізо (з температурою плавлення $T_{пл}$ = 1539 ºС) у розпарі печі знаходиться у твердому стані у вигляді пористої губчатої маси при 1300…1400 ºС. Таке *губчасте залізо* з моменту його появи поглинає вуглець та інші елементи, утворюючи чавун.

Свіжевідновлене залізо також слугує каталізатором реакцій з розкладання оксиду вуглецю на сажистийй вуглець та диоксид вуглецю. Ця реакція здійснюється на поверхні губки. Сажистий вуглець володіє підвищеною хімічною активністю і взаємодіє з атомами заліза, утворюючи карбід *Fe_3C*. Останній добре розчиняється у твердому залізі з поступовим утворенням сплаву заліза з вуглецім. Внаслідок цього температура плавлення сплаву значно знижується і сягає мінімального значення 1135…1147 ºС при 4,3% вуглецю. Ще інтенсивніше навуглецювання реалізується після переходу металу до рідкого стану. Його каплі стікають до горну печі і контактують на поверхні кусків розпеченого коксу з вуглецем. Внаслідок цього вміст вуглецю в сплаві різко зростає і на горизонті фурм за межами зон горіння сягає 3,8…4,0%.

У чавуні також розчиняється манган, який відновлюється, силіцій, сірка та інші домішки, які попадають до доменної печі з шихтовими матеріалами у вигляді різних хімічних сполук. Ці домішки у подальшому потрапляють до складу чавуну та покращують (манган та кремній) або погіршують (сірка та фосфор) його властивості та якість.

Маргацець – постійний домішок залізних руд. При спеціальній виплавці чавунів з підвищеним вмістом мангану у доменну піч завантажують і марганцеву руду.

Манган при виплавці переробного чавуну починає переходити у метал вже у розпарі, але найбільш інтенсивне насичення ним чавуну здійснюється у заплечиках і горні при відновленні його вищих оксидів оксидом вуглецю до рівня *MnO* аналогічно оксидам заліза при температурах вище 1100 ºС.

Окрім зростання витрат коксу, для збільшення ступеня відновлення марганцю необхідно мати достатню кількість вапна *CaO* у шлаці.

Силіцій (кремній) знаходиться у порожній породі руди та у золі коксу у вигляді вільного кремнезему SiO_2 або у вигляді силікатів $SiO_2 \cdot 2CaO$ та ін. Основна маса силіцію переходить у чавун у нижній частині заплечиків і в горні.

Відновлення силіцію здійснюється з кремнезему SiO_2 за схемою: $SiO_2 \longrightarrow SiO \rightarrow Si$. Відповідні реакції протікають з поглинанням тепла при температурах не нижче 1450 ºС. Тому для виплавки чавуну з підвищеним вмістом силіцію необхідно значно збільшувати витрати коксу та застосовувати високотемпературне дуття, збагачене киснем. Одночасно для збільшення кількості вільного кремнезему у шлаці необхідно зменшувати у ньому вміст вапна *CaO*.

Інші корисні домішки (нікель, ванадій, титан та ін.) потрапляють до доменної печі у вигляді включень із залізної руди. При доменній плавці нікель відновлюється та переходить у чавун повністю, хром – на 85…95%, ванадій – на 70…80%.

Фосфор вноситься до доменної пічі із залізними рудами, головним чином, у вигляді $P_2O_5 \cdot 3CaO$. Відновлення фосфора здійснюється оксидом вуглецю *CO*, воднем, а також твердим вуглецем. Фосфор, що вноситься шихтою, переходить у чавун практично повністю.

Сірка – особливо шкідливе включення у чавуні (а також – у сталі). Основну кількість сірки до чавуну вносить кокс, частину – залізна руда, агломерат та окатиші. У доменній печі 10…20% сірки видаляється у вигляді сполук. Інша частина сірки переходить у чавун і шлак у вигляді сульфідів заліза *FeS* (які добре розчинюються у чавуні), кальцію *CaS* та ін.

В умовах доменної плавки основним способом *десульфурації*, тобто видалення сірки з металу, являється утворення сульфіду кальцію *CaS* за реакцією, що здійснюється з виділенням тепла *Q*:

$$FeS + CaO = FeO + CaS + Q. \qquad (1.1)$$

Оскільки *CaS* нерозчинний у чавуні, він переходить у шлак. Найінтенсивніше ця реакция протікає при проходженні крапель чавуну крізь шар шлаку.

Окрім необхідності мати достатню кількість вапна *CaO* у шлаці, видаленню сірки сприяє висока температура в горні: з нагрівом зменшується в'язкість шлаку, що полегшує дифузію сульфідів і сприяє відновленню *FeO*.

Частина сірки видаляється за допомогою магнезії *MgO* (яка завжди є у шлаці) з утворенням *MgS*, який нерозчинний у металі і переходить до шлаку.

Інтенсивне відновлення силіцію, мангану і фосфору з їх оксидів, розчинених у шлаці, здійснюється у заплечиках і горні. Тут же сірка, що поглинута металом у ході плавки, переходить у шлак. Чавун з кінцевим складом, що утворився, поступово плавиться і стікає у нижню частину горна. Залізо і фосфор повністю відновлюються та переходять у чавун. При цьому, важливе значення мають склад, властивості, кількість та температура рідкого шлаку, який концентрується на поверхні чавуну, запобігаючи його окисненню.

У доменній печі шлакоутворення починається у розпарі печі. Шлак утворюється під дією високих температур в результаті плавлення порожньої породи та флюсу, до яких у горні приєднується зола спаленого коксу. Шлакоутворюючими оксидами являються *SiO_2, CaO, MgO, Al_2O_3, FeO, MnO*, а також сульфіди металів, переважним з яких є *CaS*. При певних співвідношеннях ці тугоплавкі оксиди можуть утворювати відносно легкоплавкі *суміші* з $T_{пл}$ = 1150…1200 ºС.

Утворенню шлаку передують процеси розм'ягчення та спікання порожньої породи, які супроводжуються утворенням твердих розчинів і різних хімічних сполук. Чим ширше температурний інтервал, у якому йде трансформація шлакоутворюючих компонентів з твердого стану у рідкий, тим більшу частину по висоті печі займає в'язка маса, що заповнює порожнечу між кусками коксу та заважає зустрічному руху і розподіленню газів. У зв'язку з цим, температурний інтервал розм'ягчення шлакоутворюючих компонентів повинен бути якомога меншим.

У процесі шлакоутворення розрізняють первинний, проміжний і кінцевий шлаки.

Первинний шлак з'являється у початковій стадії шлакоутворення в результаті плавлення легкоплавких сполук.

Він поступово переміщується до зон печі з більш високими температурами, нагрівається, його хімічний склад безперервно змінюється внаслідок відновлення заліза і мангану з їх оксидів та розчинення у шлаці нових кількостей *CaO* та *MgO,* які збільшують його кількість, і стає відповідним *проміжному шлаку*.

Кінцевий шлак утворюється в горні після розчинення у шлаці золи спаленого коксу та залишків вапна та заключного розподілу сірки між чавуном і шлаком. При цьому, він суттєво змінює свій склад. У результаті взаємодії з розплавленим чавуном і залишками неспаленого коксу в шлаці відновлюються оксиди заліза та мангану, в ньому розчиняються *FeS, MnS,* зола коксу та ін.

Хімічний склад шлаку впливає на склад чавуну, і тому при виплавці чавуну певного виду (переробний, ливарний та інші) завжди прагнуть до формування шлаку відповідного складу. Типовий склад шлаку: 40…50% *CaO*; 38…40% *SiO_2*; 7…10% *Al_2O_3*.

Одна з найважливіших характеристик шлаку – його *основність* $O_ш$, тобто відношення вмісту основних оксидів до вмісту кислотних оксидів. У виробничій практиці основність нерідко визначають спрощено:

$$O_ш = \%(CaO) / \%(SiO_2). \qquad (1.2)$$

При виплавці різних чавунів і феросплавів значення $O_ш$ коливається у межах 0,9…1,4.

З підвищенням основності шлаку покращується видалення сірки та відновлення мангану, а для відновлення силіцію основність повинна бути зменшеною.

При використанні офлюсованого агломерату умови шлакоутворення змінюються. Наявність вапна в агломераті забезпечує добрий контакт шлакоутвюючих оксидів, тому їх розм'ягчення при нагріві та утворення первинного шлаку протікає у порівняно невелиуій зоні по висоті печі, внастідок чого значно покращується газопроникненість цієї зони. Відновлення заліза з офлюсованого агломерату протікає інтенсивніше та більш рівномірно за перерізом, внаслідок чого у первиному шлакоутворенні приймає участь менша кількість *FeO*, а зона початку утворення шлаку зміщується в область більш високих температур.

Усі представлені процеси протікають у доменній печі одночасно, взаємно впливаючи один на одні. Тому завершальна кількість вуглецю в чавуні не піддається точному регулюванню та залежить від кількості елементів у сплаві.

Манган і хром, будучи карбідоутворюючими елементами, сприяють збільшенню вмісту вуглецю в чавуні.

Силіцій і фосфор, утворюючи більш міцні сполуки із залізом, руйнують карбіди заліза та знижують вміст вуглецю в чавуні.

Отже, в переробному маломарганцевому чавуні міститься 4…4,6% вуглецю; у дзеркальному чавуні міститься 5…5,5% вуглецю та 10…25% мангану, а в 75%-му феромарганці вміст вуглецю сягає 7…7,5%. У ливарному чавуні, що містить 2,5% силіцію, вміст вуглецю не перевершує 3,5%, а у феросиліції вміст вуглецю знижується до 2% і нижче.

Вміст мангану та силіцію (кремнію) сильно впливає на структуру продукту, що має суттєве значення для виробництва ливарного чавуну, який використовується у машинобудуванні. Завдяки підвищеній кількості силіцію, значна частина вуглецю знаходиться у вигляді графіту, що сприяє підвищенню міцності виливків. У місці зламу такий чавун має сірий колір. Збільшення вмісту карбидів залізу у чавуні підвищує його крихкість. На зламі такий чавун має білий колір.

Основними напрямами удосконалення доменного виробництва являються:

– будівництво економічно більш вигідних печей великого об'єму (до 5000 м^3);

– удосконалення систем комплексної механізації та компьютеризованого автоматичного управління;

– покращення підготовки сировинних матеріалів;

– інтенсифікація доменного процесу.

Під *інтенсифікацією доменного процесу* зазвичай розуміють зростання швидкості його протікання шляхом утворення умов для збільшення подачи до горну доменної печі дуття, яке витрачається на спалювання вуглецю, а також – на зменшення витрат коксу.

Основними методами такої інтенсифікації стають:

– високотемпературний нагрів дуття;

– уволодження дуття;

– збагачення дуття киснем;

– вдування до горну вуглеводнемістких добавок;

– застосування комбінованого дуття;

– підвищення тиску газів у робочому просторі доменної печі.

Від якості чавуну суттєво залежать якість сталі, що виготовляють з нього, та ефективність сталеплавильних процесів.

Цьому сприяє *позадоменне видалення сірки з чавуну* шляхом витримки чавуну в ковшах-чавуновозах і в міксері. Такий спосіб дає добрі результати при вмісті у чавуні больше 2% *Mn*, що пов'язане зі зниженням розчинності сульфіду мангану *MnS* при зниженні температури та переходом цієї сполуки з металу до шлаку.

Ще одним з опробованих у промислових масштабах способів позадоменного видалення сірки є обробка чавуну у випускному жолобі або у чавуновозі содою $NaCO_3$ (у кількості 1% від маси чавуну). При цьому, сірчаністий натрій Na_2S, що утворюється, переходить до шлаку.

1.2.1.2 Позадоменне (безкоксове) виготовлення заліза

Сучасна доменна піч за своєю продуктивністю та економічністю натепер не має конкурентів. Однак доменне виробництво має суттєві недоліки, пов'язані з необхідністю використання кам'яновугільного коксу та агломерату, для чого необхідні видобуток вуглів, що коксуються, збагачення залізних руд, коксохімічне, хімічне та агломераційне виробництва тощо. Все це, крім чисто виробничих витрат, вимагає вирішення серйозних екологічних проблем [12].

Тому організація рентабельного процесу прямого отримання заліза безпосередньо із залізної руди поза доменної печі представляє собою перспективну інженерну задачу.

При цьому необхідно мати на увазі наступне:

– розвиток способів глибокого збагачення залізних руд забезпечує не тільки отримання високого вмісту заліза в концентратах, але і помітне очищення їх від сірки та

фосфору. При звичайній доменній плавці ці переваги не можуть бути використані (особливо, з огляду на вміст сірки в коксі);

– матеріал, отриманий безпосередньо із залізних руд, практично не містить шкідливих домішок кольорових металів, перш за все, *Zn* і *Pb*, що важливо при виробництві сталей відповідального призначення.

Процес підвищення вмісту заліза в залізорудних матеріалах отримав назву *металізації*, а одержуваний продукт – назву *металізованого*, під *ступенем металізації* якого розуміють кількість («відсоток») заліза в продукті.

За призначенням металізовані продукти зазвичай поділяють на три групи:

1) зі ступенем металізації до 85% – використовуються як шихта доменної плавки;

2) зі ступенем металізації 85 ... 95% – використовуються як шихта при виплавці сталі;

3) при вмісті більше 98% *Fe* використовують для виробництва залізного порошку (*див. нижче про порошкову металургію*).

У зв'язку з посиленням екологічного контролю за металургійним виробництвом і одночасно – у зв'язку з необхідністю мати шихтові матеріали, вільні від домішок кольорових металів, масштаби позадоменного виробництва заліза безперервно зростають, одночасно розширюється і фронт дослідних робіт у цьому напрямку.

Рішення проблеми отримання (у промислових масштабах) заліза, минаючи доменний процес, здійснюється, в основному, способами, які коротко представлено нижче.

Твердофазне відновлення заліза із залізорудних матеріалів відбувається при температурах, які перевищують 1000...1200 °С, тобто в умовах, коли і сировина (залізна руда або залізорудний концентрат), і продукт є твердими фазами. За кордоном прийнята аббревіатура *DRI* (*від англ.* Direct Reduced Iron). Оскільки матеріал, що отримується, нагадує пористу губку, його часто називають «*губчастим залізом*».

Основна маса такого продукту (в світі – до 30 млн. т/рік на кількох десятках установок використовується в якості шихти сталеплавільних агрегатів (*див. нижче*). При цьому, залізо відновлюється при взаємодії з твердими або газоподібними *C*; *CO*; H_2; CH_4 [13].

Існує кілька десятків типів процесів і установок прямого твердофазного відновлення заліза.

Найбільш поширеними є способи Мідрекс (Midrex, США) і ХіЛ (HyL) за найменуванням фірми Hojalata y Lamina, Мексика). За цими способами виготовляють приблизноно 90% всієї світової маси твердофазно відновленого заліза.

За способом Мідрекс після металізації сировини природним газом окатиші губчастого заліза безперервно завантажуються у бункер ємністю 5 тис. тонн, де зберігаються в інертній атмосфері перед наступною плавкою в дугових печах. Витрата газу на процес становить близько 350 $м^3$ на 1 т губчастого заліза.

Процес ХіЛ відновлення сировини здійснюється в періодично і по черзі діючих ретортах-ємностях ємністю 100...150 тонн кожна, в яких розташована цегляна насадка з добавкою нікелю в якості каталізатора.

Відновлення ведеться при температурі 870...1050 °С природним газом, який попередньо конвертується в окис вуглецю, піддається десульфурации і зневодненню. Реторти переставляються з однієї позиції на іншу, що обумовлює циклічний характер процесу, який складається з послідовних операцій: завантаження; нагрів і відновлення залізорудної шихти; охолодження; вивантаження губчастого заліза. Газ у реторти подають зверху. Для вивантаження готової губки служать різець і спеціальні розвантажувальні скребки. Губчасте залізо надходить на жолоб і далі – на конвеєр, що транспортує губку.

До процесів твердосплавного відновлення заліза також може бути віднесене отримання із залізних руд карбіду заліза в присутності водню і природного газу при

температурі ~ 600 °С і тиску ~ 4 атм (0,4 МПа), в результаті чого отримують зерна розміром 0,1 ... 1,0 мм, які містять більше 90% Fe_3C.

Заслуговують також на увагу технології, які забезпечують безкоксову переробку комплексних руд, що містять, крім заліза, ванадій, титан, нікель й ін. з використанням будь-якого (навіть некоксівного) вугілля в якості твердого відновника.

Рідкофазне відновлення заліза.

У промислових масштабах «Круппівський сиродутний процес – Krupp Rennverfahren» реалізований в 30-х роках XX століття в Німеччині. Процес здійснювався в обертових нахилених футерованих трубчастих печах, в які з одного боку завантажували подрібнені вугіль або кокс, залізну руду, колошниковий пил і т.д., а з іншого боку (там, де видавалася готова криця) встановлювалися пальники для спалювання паливовугільного пилу. Відновлення заліза в киплячому залізовмісткому шлаці відбувалося в присутності *C* і *CO*. Температура в зоні утворення криці досягала 1250...1350 °С.

Практика показала, що такі агрегати володіли низькою продуктивністю і економічністю через злипання і налипання на стінки установки розм'якшеної криці.

Також певне розповсюдження отримали установки за методом Віберга і заводу Хаганіс (Швеція), а також деякі інші.

В останні роки особливу увагу приділяють пошуку оптимальних рішень з організації відновлення заліза з руд у рідкій фазі. Причинами цього є наступні обставини:

– можливість отримання заліза безпосередньо з руд виключає необхідність споруджувати коксові батареї і агломераційні фабрики, немає необхідності у витратах на пошуки коксівного вугілля і отримання коксу;

– істотно поліпшуються умови роботи персоналу і зменшується навантаження на навколишнє природне середовище;

– підвищується ефективність використання корисних компонентів в природно-легованих рудах.

– спрощується організація виробництва марок сталі, вільних від домішок шкідливих кольорових металів;

– з'являється можливість ефективно переробляти шлаки, шлами та інші відходи, що містять цінні компоненти.

Цьому відповідають дві промислові і кілька напівпромислових установок, в яких реалізовані два інженерних рішення.

Перше з них здійснено на заводі фірми Іскор в Преторії (ПАР) компанією Вест Альпіне (VOEST ALPINE). Розробники назвали процес КОРЕКС (COREX – *від англ.* Coal-Reduction-Experience) [12].

Згідно з ним, до відновлюваної шахти 14 (рисунок 1.2) завантажують кускову руду (або агломерат, або окатиші, або суміш цих компонентів). Опускаючись назустріч струму відновного газу, матеріал відновлюється до губчастого заліза (до 90% *Fe*). Потім губчасте залізо шнековим транспортером подається у плавильну газифікаційну камеру, де здійснюється остаточне відновлення, плавлення і нагрівання розплаву. Випуск чавуну і шлаку здійснюється так само, як і в звичайній доменної печі. Середній склад одержуваного чавуну, у мас. %: 4,24 *C*; 0,6 *Si;* 0,33 *S*; 0,16 *P*; температура 1493 °С; вихід шлаку ~ 0,45 кг/т; витрати (на 1 т чавуну): залізна руда 1497 кг; вугілля 1183 кг; флюси 424 кг; кисень 588 м^3.

Відновлювальний газ утворюється в плавильно-газифікаційній камері, де розміщене газифіковане вугілля (газіфікуючий агент – кисень). Завдяки високій температурі (вище 1000 °С) під куполом плавильної камери-газифікатора вищі вуглеводні, що виділяються з вугілля, розкладаються на оксид вуглецю і водень. В результаті, в камері не утворюються такі небажані побічні продукти, як смоли, феноли тощо.

Газ, що утворюється в газифікаційній камері, складається з *CO* і H_2, а також містить вугільний пил і частинки заліза. Дрібний пил, в основному, вловлюється в циклоні гарячого пилу 16 і повертається до газифікатора. Спеціальний кісневий пальник допалює вуглець в пилу до *CO*, а також розплавляє золу й інші елементи пилу. Гази, що виходять з циклону 16, подаються до відновної камери-шахти 14. Тут відбувається відновний процес одночасно з десульфурацією газу. З урахуванням додавання охолоджуючого газу 18 температура відновного газу 15 знаходиться в оптимальному інтервалі 800…850 °С.

Газ, який виходить з відновлювальної шахти, очищається і охолоджується в скрубері 12, і потім його можна використовувати або для виробництва електроенергії, або на хімічних виробництвах, або на розташованих поруч агрегатах твердофазного відновлення заліза; останній варіант є переважним.

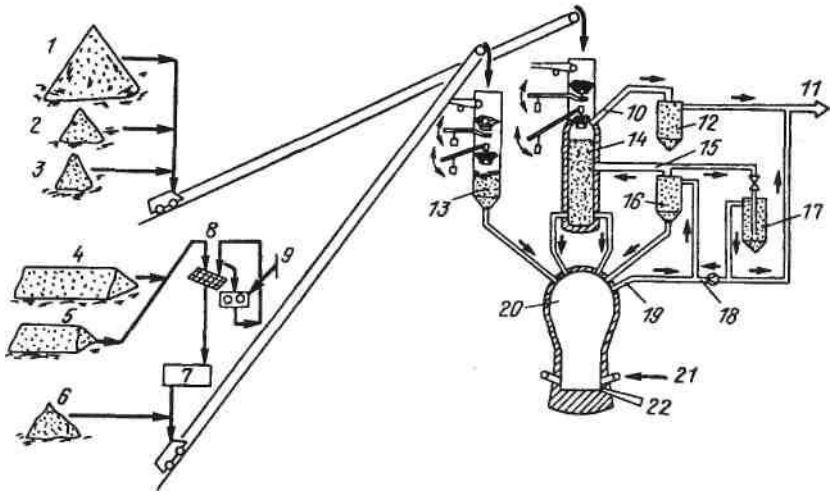


Рисунок 1.2 – Схема процесу COREX [12]: 1 – залізна руда; 2 – вапно; 3 – доломіт; 4 – вугілля; 5 – кокс; 6 – пісок; 7 – осушувальний пристрій; 8 – грохочіння; 9 – дробарка; 10 – колошніковий газ; 11 – гази; 12 – скрубер колошникового газу; 13 – система подачі вугілля; 14 – відновлювальна шахта; 15 – відновний газ; 16 – циклон гарячої пилу; 17 – скрубер охолоджуючого газу; 18 – охолоджуючий газ; 19 – продукти газифікації; 20 – плавильний агрегат-газифікатор; 21 – кисень; 22 – випуск металу і шлаку

Відомі й інші модифікації рідкофазного відновлення металів з руд [12].

Окремим напрямком процесу рідкофазного відновлення є комплексна переробка залізовмістних матеріалів з домішками цінних компонентів (цинку, свинцю, ванадію, титану, благородних металів).

Зокрема, успішно переробляються залізовмісні шлаки цинкового виробництва з отриманням чавуну і уловлюванням цинку, шлами ванадієвого виробництва з отриманням чавуну і вилученням з нього ванадію; великий інтерес представляє проблема переробки шламів глиноземного виробництва з отриманням чавуну і алюмінієвої сировини тощо.

1.2.1.3 Виробництво сталі

Сталеплавильне виробництво – це друге (після виготовлення чавуну) перероблення чорної металургії. Його мета – отримання сталі з переробних чавуну та сталевого лому (*скрапу*) в сталеплавильных агрегатах металургійних підприємств [2, 10, 13, 14].

Сталеплавильний процес базується на хімічних реакціях окиснювання киснем та видалення більшої частини складових і домішок чавуну – вуглецю, силіцію, маргану та фосфору. Після окиснення домішок з металевого сплаву видаляють розчинений у ньому кисень та, уводячи легуючі елементи, отримують сталь заданого складу.

Особливістю *окиснення вуглецю* є виділення бульбашок *CO*, що утворює враження киплячої рідини. Це відбувається при так званій *константі реакції*:

$$K = \frac{p_{co}}{[C]\cdot[O]}\ , \qquad (1.3)$$

де $[C]$; $[O]$ – концентрації розчинених у металі вуглецю та кисню відповідно; p_{co} – парціальний тиск *CO*.

У присутності кисню манган легко окиснюється як при кислому, так і при основному процесі, частково відновлюючи залізо з його оксидів.

Як свідчать теорія і практика, з підвищенням температури і основності шлаку концентрація мангану в металі збільшується. Це свідчить про заміну окиснювального процесу відновленим. Оскільки манган входить до складу майже всіх сталей, його відновлення в процесах плавлення – явище бажане.

Силіцій володіє ще більшою спорідненістю до кисню, ніж манган, і практично повністю окиснюється вже у період плавлення. SiO_2 при плавці під *основним* шлаком перетворюється на міцний силікат кальцию $(CaO)_2 \bullet SiO_2$, що зумовлює майже повне окиснення силіцію, який міститься у шихті.

При *кислому* процесі поведінка силіцію інша: має місце його інтенсивне відновлення.

Фосфор у сталі є шкідливою домішкою, погіршуючи її механічні властивості. Тому вміст фосфору в сталі, у залежності від її призначення, прагнуть обмежити на рівні 0,015…0,016%.

Окиснення фосфору здійснюється киснем, що пов'язаний у сполуках *CaO* та *FeO*.

Сірка, також є шкідливою домішкою у сталі. *Видалення сірки* (десульфурація) здійснюється при її реакції з рідким залізом. Підвищення основності та зниження окисненості шлаку сприяють десульфурації сталі. Підвищенню ступеню видалення сірки сприяють елементи, які утворюють сульфіди більш міцні, ніж сульфід заліза. До таких елементів відносяться рідкісноземельні метали. Позитивним фактором також стають підвищення температури металу та активне перемішування ванни.

Гази (кисень, водень та азот) містяться у будь-якій сталі, і навіть при їх кількості у соті або тисячні долі відсотка суттєво негативно впливають на властивості (якість) металу.

Зменшення їх розчиннсті при при кристалізації сталі з переходом з рідкого до твердого стану супроводжується виділенням газів, що може стати причиною утворення ряду дефектів, зокрема, флокенів і пористості у виливках (*див. нижче*).

Азот і водень успішно видаляються з рідкої сталі в результаті реакції окиснення вуглецю. Бульбашки *CO*, який утворюється в цій реакції, захоплюють на своєму шляху уверх деяку кількість інших газів: H_2 та N_2.

Чим активніше протікає «кипіння» металу, тим менша кількість газів у ньому і краще його якість.

Для видалення H_2 и N_2 застосовують також вакуумну обробку, продувку ванни нейтральним газом (аргоном) та ін. (*див. нижче*).

У присутності деяких елементів у металі можуть утворюватись їх сполуки з азотом – нитриди. Наявність нитридів у кристалічній структурі багатьох сталей негативно впливає на властивості металу.

Вельми відповідальною операцією процесу виплавки сталі являється ***розкиснення***, в ході якого вилучається кисень шляхом зв'язування його в оксиди різних металів, які мають більшу спорідненість до кисню, ніж залізо.

Найбільш рзповсюдженими розкиснювачами є манган і силіцій, які застосовуються у вигляді феросплавів, а також алюміній.

У залежності від умов уведення розкиснювачів до металу розрізняють два методи розкиснення: *глубинне (*або *осаджувальне) і дифузійне.*

При глубинному розкисненні розкиснювачі уводять у глибину рідкого металу. У такому разі потрібний певний час, щоб продукти розкиснення – оксиди силіцію, мангану або алюмінію потрапили до шлаку.

При дифузіному розкисненні розкиснювачі у тонко подрібненому вигляді вводяться до шлака, який покриває метал. У цьому випадку спочатку здійснюється розкиснення шлаку. Наступне зменшення кількості кисню в металі здійснюється за рахунок його переходу з металу до шлаку. При цьому відсутнє забруднення металу неметалічними включеннями – продуктами розкиснення.

Для ще больш повного розкиснення рідкий метал оброблюють у вакуумі (*див. нижче*) або синтетичними шлаками.

Вище вже було відмічено, що у залежності від ступеня розкиснення розрізняють *спокійну, киплячу та напівспокійну сталь.*

Спокійна сталь – це сталь повністю розкиснена завдяки уведенню великої кількості розкиснювачів, внаслідок чого весь кисень пов'язується з елементом-розкиснювачем. При розливці такої сталі (*див. нижче*) гази не виділяються, і вона застигає *спокійно.*

Кипляча сталь – це сталь, частково розкиснена манганом. При разливці у виливки вона нібито *кипить* через виділення бульбашок оксиду вуглецю, який утворюється при неповному окисненні вуглецю.

Напівспокійна сталь – це сталь, яка за ступенем розкисненості займає проміжне місце між киплячою та спокійною. Зазвичай напівспокійну сталь розкиснюють частково у печі марганцем, а потім у ковші – кремнієм або алюмінієм.

На якість готової сталі, продуктивність сталеплавильних агрегатів і стійкість їх футеровки сильно впливає *шлаковый режим*, який визначається кількістю і складом шлаку.

Шлак виконує декілька важливих функцій у процесі виплавки сталі:

– пов'язує усі оксиди (окрім *CO*), які утворюються в процесі окиснення домішок вихідного чавуну. Зокрема, видалення силіцію, фосфору та сірки здійснюється тільки після їх окиснення та обов'язкового переходу у вигляді оксидів з металу до шлаку;

– у багатьох сталеплавильних процесах слугує передавачем кисню з пічної атмосфери до рідкого металу;

– у мартенівських і дугових сталеплавильних печах (*див. нижче*) завдяки шлаку здійснюється передача тепла металу;

– захищає метал від насичення газами, які є в атмосфері печі.

Шлак утворюється в результаті окиснення складових частини шихти, з оксидів флюсів, руди і футеровки печі.

За властивостями шлакоутворюючі компоненти можна розділити на кислотні (SiO_2; P_2O_5; TiO_2 та ін.), основні (CaO; MgO; FeO; MnO та ін.) і амфотерні (Al_2O_3; Fe_2O_3; Cr_2O_3 та ін.) оксиди. Як і в доменному процесі, найважливішими компонентами шлака, які здійснюють основний вплив на його властивості, являються оксиди SiO_2 та CaO.

Змінюючи склад шлаку, можна також регулювати за ходом плавки вміст у металі мангану, хрому та деяких інших елементів.

Для того, щоб шлак був спроможний успішно виконувати свої функції, він повинен у різні періоди сталеплавильного процесу мати не тільки визначений хімічний склад, але й необхідну *плинність* (характеристика зворотня до в'язкості). Це досягається використанням в якості шихтових матеріалів плавки певних розрахункових кількостей шлакоутворювачів – вапняка, вапна, плавикового шпату, бокситів та ін.

У сучасній металургії *базовими способами виплавки сталі* являються кисневоконвертерний, мартенівський та електросталеплавильний процеси, які реалізуються відповідно у кисневих конвертерах, мартенівських та електричних печах. Співвідношення виготовлення сталей за цими видами виробництва не є постійним і залежить від ряду

факторів економічного, технічного, енергетичного, наукового, кон'юнктурного та ін. характеру.

Виробництво сталі у конвертерах

Конвертер представляє собою ємність грушеподібної форми (рисунок 1.3), зроблений з листової сталі і футерований *основною* цеглою. Робоче положення конвертера вертикальне. До його нижньої частини прикріплюється приставне днище 1, яке по мірі зносу замінюють на нове. До днища може приєднуватись повітряна коробка, до якої подають стиснуте повітря. Середня частина 2 конвертера має циліндричну форму. Верхню частину 4 називають «козирком», або «шоломом». Вона має горловину, крізь яку заливають рідкий чавун і зливають сталь і шлак. Крізь отвір у горловині у конвертер для підводу дуття уводять водоохолоджувальну фурму *3,* яка розміщується над рівнем рідкого металу на відстані 0,3...0,8 м.

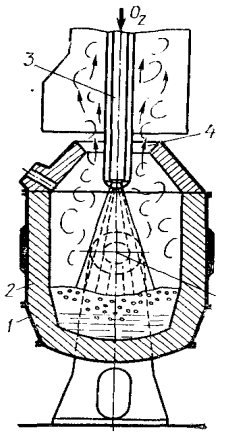


Рисунок 1.3 – Схема сталеплавильного конвертера [13, 14] (*позначення позицій – у тексті*)

У шлемній частині конвертера є отвір («льотка») для випуску сталі, яка запобігає потраплянню шлаку у метал. Льотка зачиняється вогнетривкою глиною.

Механізм повороту конвертера складається із системи передач, що пов'язує його цапфи з приводом, і забезпечує обертання навкруги горизонтальної осі на 360°. Для конвертерів ємністю більше 200 тонн застосовують двосторонній привід обертання.

Ємність сучасних конвертерів 20…450 т, а тиск повітряного дуття 0,3…1,35 МН/м^2. Для переробки 1 т чавуну потрібно близько 350 кубічних метрів повітря.

При заливці чавуну конвертер обертають у горизонтальне положення. Після заливки його повертають у вертикальне положення і одночасно подають дуття, яке при продувці знизу не дозволяє металу проникати крізь отвори фурм у повітряну коробку.

У процесі продувки повітрям у рідкому чавуні вигорають силіцій, манган, вуглець і – частково – залізо.

При досягненні необхідної концентрації вуглецю конвертер повертають у горизонтальне положення та припиняють подачу повітря. Готовий метал розкиснюють і виливають у ковш.

При *бесемерівському процесі* у конвертер заливають рідкий чавун з високим вмістом силіцію (до 2,25% і більше), мангану (0,6…0,9%) та мінімальною кількістю сірки і фосфору.

За характером реакцій цей процес проходить три періоди.

Перший період починається після пуску дуття у конвертер і продовжується 3…6 хвилин. З горловини конвертера разом з газами вилітають дрібні краплі рідкого чавуну з утворенням іскор. У цей період окиснюються силіцій, манган і – частково – залізо.

Утворюваний закис заліза частково розчиняється у рідкому металі, сприяючи подальшому окисненню силіцію та мангану. Ці реакції протікають з виділенням великої кількості тепла, що викликає розігрівання металу. Шлак залишається кислим із вмістом 40…50% SiO_2.

Другий період починається після практично повного вигоряння силіцію та мангану. Рідкий метал є достатньо добре розгрітим, що утворює сприятливі умови для окиснення вуглецю до *CO* з поглинанням тепла. Горіння вуглецю продовжується 8…10 хв. та супроводжується деяким зниженням температури рідкого металу. Утворюваний окис вуглецю спалюється на повітрі. Над горловиною конвертера з'являється яскраве полум'я.

У міру зниження вмісту вуглецю у металлі полум'я над горловиною зменшується, що свідчить про початок третього періоду, який продовжується не більше 2…3 хв. Він відрізняється від попередніх періодів появою над горловиною конвертера бурого диму. Це показує, що з чавуну майже повністю вигоріли силіцій, манган і вуглець, і почалось інтенсивне окиснення заліза.

Після цього конвертер обертають до горизонтального положення і у нього уводять розкиснювачі (феромарганець, феросиліцій або алюміній) для зниження вмісту кисню у металі. При цьому окиснюються: *Mn* до *MnO, Si* – до SiO_2, *Al* – до Al_2O_3 і відновлюється *Fe*.

Готову сталь виливають з конвертера у ковш, а потім спрямовують на розливку (*див. нижче*).

Щоб отримати сталь з попередньо заданою кількістю вуглецю, продувку металу припиняють у той момент, коли в ньому вуглець ще весь не спалився. Іншим шляхом є досягнення повного вигорання вуглецю, а потім – додавання необхідної кількості чавуну або феросплавів, які містять необхідну кількість *C*.

Томасовський процес призначений для перероблення на сталь чавунів з великим вмістом фосфору**.**

У конвертер з *основною* футеровкою спочатку завантажують свіжеобпалене вапно, а потім заливають чавун, що містить 1,6…2,0% *P*, до 0,6% *Si* і до 0,8% *S*. Тут утворюється вапняковий шлак, необхідний для вилучення та зв'язування фосфору. Заповнення конвертера рідким чавуном, обертання конвертера і пуск дуття здійснюються таким же чином, як і при бесемерівському процесі.

У перший період продувки у конвертері окиснюються залізо, силіцій, манган і формується шлак. У цей період температура металу декілька підвищується.

Під час другого періоду продувки вигорає вуглець, що супроводжується деяким зниженням температури металу. Коли вміст вуглецю у металі стає менше 0,1%, полум'я над конвертером поступово зникає.

У третьому періоді інтенсивно окиснюється фосфор та відновлюється залізо. Ця реакція супроводжується виділенням значної кількості тепла.

В результаті окиснення фосфор переходить із розплаву у шлак, що зумовлює в останньому кількість 16… 24% P_2O_5 .

Перед розкисненням металу з конвертера видаляють шлак, оскільки вуглець, силіцій і манган, які містяться в розкиснювачах, можуть відновлювати фосфор із шлаку з його переводом назад до металу.

Томасівську сталь використовують для виготовлення кровельної жерсті (бляхи) дроту та сортового прокату.

Для інтенсифікації бесемерівського і томасівського процесів в останні роки почали широко використовувати киснево-конвертерний процес з використанням дуття, збагаченого киснем або технічно чистим (з чистотою не менше 99,5%) киснем.

Головною перевагою кисневого дуття являється зниження кількості азота в сталі з 0,012…0,025% (при повітряному дутті) до 0,008…0,004% (при кисневому). Уведення до складу дуття суміші кисню з водяною парою або вуглекислим газом дозволяє підвищити якість сталі до рівня, який відповідає мартенівським та електричним печам.

Цей процес при високій продуктивності (тривалість плавки складає 30…50 хв.), гнучкості та малих затратах на будівництво дає можливість переробки чавунів практично будь-якого складу при використанні металічного лому у кількості 10…30% (за масою) з виплавленням широкого сортаменту сталей, включаючи леговані.

Для *киснево-конвертерного процесу з верхньою продувкою* використовують конвертер грушеподібної форми з концентричною горловиною. Це забезпечує зручність верхнього уведення до полості конвертера кислородної фурми, відведення газів, заливки чавуну, завалки лому та шлакоутворюючих матеріалів. Такі конвертери виготовляють ємністю 100...350 т рідкого чавуну.

Процес виготовлення сталі в кисневому конвертері складається з наступних періодів: завантаження металічного лому, заливка чавуну, продувка киснем, завантаження шлакоутворюючих, злив сталі і шлаку.

Завантаження кисневого конвертера сталевим ломом здійснюється у нахиленому положенні крізь горловину за допомогою завалочних машин лоткового типу. Потім за допомогою заливочних кранів заливають рідкий чавун, після чого конвертер встановлюють у вертикальне положення, уводять фурму і подають кисень. Загальна витрата технічного кисню для отримання 1 т сталі складає 50...60 м^3.

Одночасно з початком продувки завантажують першу порцію шлакоутворювачів і залізної руди (40…60% від загальної кількості). Залишкову частину сипких матеріалів подають у конвертер в процесі продувки однією або декількома порціями, частіше за все, через 5…7 хвилин після початку продувки.

На процес рафінування значний вплив заподіює положення фурми (відстань від кінця фурми до поверхні ванни) і тиск кисню, що подається. Правильно організований режим продувки забезпечує добру циркуляцію металу та його перемішування зі шлаком. Останнє, у свою чергу, сприяє підвищенню швидкості окиснення *C*, *Si*, *Mn* та *P*, які містяться у чавуні. Зазвичай висота фурми подтримується у межах 1,0…3,0 м (за деякими даними, до 0,3 м), тиск кисню 0,8…1,4 МПа.

Формування шлаку з необхідною основністю та заданими властивостями залежить від швидкості розчинення вапна у шлаці. Кількість потрібного вапна визначається розрахунковим шляхом і залежить від складу: чавуну та вмісту SiO_2 у руді, бокситів, вапна тощо. Зазвичай загальна витрата вапна складає 5…8% від маси плавки, витрата бокситу – 0,5…2,0%, плавикового шпату – 0,15…1,0%.

Окиснення усіх домішок чавуну починається із самого початку продувки. При цьому найбільш інтенсивно окиснюються силіцій і манган.

Характерною особливістю киснево-конвертерного виробництва є нерівномірність окиснення вуглецю як за об'ємом ванни, так і у процесі продувки. Окиснення вуглецю та інших домішок здійснюється як безпосередньо киснем дуття, так і оксидом заліза *FeO*. Одночасно утворюється активний шлак з необхідним вмістом *CaO*, завдяки чому видаляються сірка і фосфор з утворенням у шлаці стійких сполучень $P_2O_5 \cdot 3CaO$ та *CaS*.

З перших хвилин продувки одночасно з окисненням вуглецю починається процес видалення фосфору. Найбільш інтенсивно це має місце у першій половині продувки при відносно низькій температурі металу, високому вмісті *FeO* у шлаці; основність шлаку та його кількість швидко збільшуються. Киснево-конвертерный процес дозволяє отримати у сталі менше 0,02% *P*.

Умови для видалення *сірки* при киснево-конвертерному процесі неможна вважати такими ж сприятливими, як для видалення фосфору. Причина заключається в тому, що шлак містить значну кількість *FeO*, а висока основність шлаку досягається лише у другій половині продувки. Ступінь десульфації у цьому процесі знаходиться на рівні 30…50%, і вміст сірки у кінцевій сталі складає 0,02…0,04%.

Хід киснево-конвертерного процесу зумовлюється температурним режимом, регулюється зміною кількості дуття та уведенням у конвертер охолоджувачів – металолома, залізної руди та вапняку.

При досягненні заданого вмісту вуглецю дуття відключають, фурму підіймають, конвертер нахиляють і метал крізь льотку (для зменшення перемішування зі шлаком) виливають у ковш, встанавлюваний під конвертером. Температура металу при випуску з конвертера – біля 1600 ^{o}C.

Отриманий продукт містить підвищений вміст кисню. Тому важливою операцією являється *розкиснення металу*, яке проводять у сталеразливному ковші. Для цієї мети одночасно зі зливом сталі по спеціальному обертовому жолобу в ковш подають розкиснювачі (*Si, Mn, A1*). При їх взаємодії з оксидом заліза *FeO* утворюються нерозчинні оксиди *MnO, SiO_2, $A1_20_3$*, які переходять до шлаку.

Також у ковш уводять легуючі добавки.

Під час продувки чавуну в конвертері утворюється значна кількість газів. Для використання їх тепла та очищення від пилу кожен конвертер оснащений котлом-утилізатором і установкою для очищення газів.

Управління конвертерним процесом здійснюється за допомогою компьютерів, до яких уводиться інформація щодо вихідних матеріалів (склад і кількість чавуну, лому, вапна), а також про показники процесу (кількість і склад кисню, газів, які відводяться, температура тощо).

Продуктивність кисневого конвертера емністю 300 т сягає 400...500 т/год у порівнянні з мартенівськими та електропечами (*див. нижче*), для яких цей параметр не перевищує 80 т/год.

Крім представленого киснево-конвертерного процесу з верхньою продувкою, реалізується також *киснево-конвертерный процес з донною продувкою*. При цьому, потік кисню, оточеного шаром вуглеводнів, забезпечують крізь днище без руйнування вогнетривів. У наявний час у світі експлуатуються декілька десятків конвертерів з донною продувкою і садкою до 250 тонн.

У днищі таких конвертерів, у залежності від їх ємності, встановлюють від 7 до 21 фурм. Зазвичай їх розміщують в одній половині днища так, щоб при нахилі конвертера вони були вище за рівень рідкого металу. *Перед* установкою конвертера у вертикальне положення через фурми пускають дуття.

При донній продувці покращуються умови перемішування ванни, збільшується поверхня для проходження реакцій. В результаті, швидкість вилучення вуглецю порівняно з верхньою продувкою збільшується, що дає легку можливість отримувати сталь із вмістом вуглецю менше за 0,05%.

Умови видалення сірки в газову фазу у вигляді SO_2 при донній продувці також більш сприятливі.

Перевагами процесу з донною продувкою є підвищення виходу придатного металу на 1…2%, скорочення терміну продувки, прискорення плавлення лому, менш потрібна висота будівлі цеху тощо. Це представляє певний інтерес, перш за усе, для можливості заміни мартеновських печей без корінної реконструкції будівель. Однак стійкість таких конвертеров нижче.

Аналіз переваг і недоліків способів виплавки сталі у конвертерах з верхньою та нижньою продувкою привів до розробки процесу, в якому метал піддається продувці зверху киснем, а знизу – киснем у захисному оточенні з вуглеводнів або аргону (чи азоту).

Використання *конвертера з комбінованою продувкою* у порівнянні з продувкою тількі зверху дозволяє підвищити вихід металу, збільшити долю лому у шихті, знизити витрати феросплавів, зменшити витрати кисню, підвищити якість сталі за рахунок

зниження в ній вмісту газів при продувці інертним газом наприкінці операції, а порівняно з нижньою продувкою – декілька підвищити стійкість обладнання.

Виробництво сталі в мартенівських печах

Мартеновська піч (рисунок 1.4) представляє собою регенеративну пламенну піч, висока температура у якій (1750...1800 °С) досягається за рахунок спалювання газу в плавильному просторі.

У мартенівському процесі, на відміну від конвертерного, недостатньо тепла хімічних реакцій та фізичного тепла речовин, що використовуються, для плавлення твердих шихтових матеріалів. Для компенсації цього дефіциту в робочому просторі печі спалюється паливо у струмені повітря, яке попередньо нагрівають до високої температури.

Газ і повітря нагріваються у регенераторах 1, 2, 10 та 11. Ліворуч від плавильного простору 7 знаходяться канали для газа 3 та повітря 4, які з'днані з регенераторами 1 і 2. Такі ж канали для газа 9 та повітря 8 розміщені праворуч від плавильного простору 7; вони відповідно з'днані з регенераторами 10 і 11.

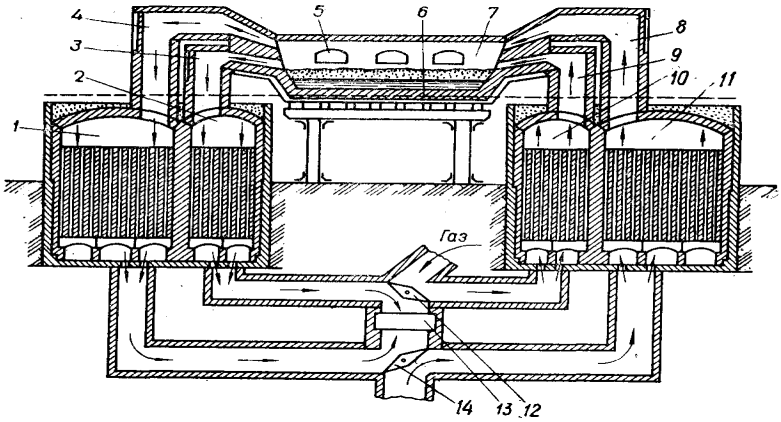


Рисунок 1.4 – Схема мартенівскої печі [13, 14] (*позначення позицій – у тексті*)

Більшість мартеновських печей опалюють сумішшю доменного, коксового і генераторного газів. Також застосовують природний газ. Деякі мартенівські печі, які працюють на мазуті, мають з кожної сторони по одному регенератору для нагріву тільки повітря.

Для якісного нагріву необхідно, щоб процес горіння палива повністю завершувався у робочому просторі. Тому повітря у піч подається у кількості, яка перевершує теоретично необхідне значення.

Для інтенсифікації процесу повітря збагачують киснем, який подається у факел полум'я. До цього додається кисень, який утворюється внаслідок розкладу при високих температурах вуглекислого газу та води. В результаті, газова атмосфера печі має окиснювальний характер.

Кисень можна уводити і до ванни печі (аналогічно продувці металу в конвертері). Такий прийом скорочує тривалість плавки та підвищує продуктивність печі на 25…30%.

На практиці експлуатуються мартенівські печи ємністю від 20 до 900 тонн рідкої сталі. Важливою характеристикою таких печей являється також площина пода. Для печі ємністю 900 т вона дорівнює приблизно 120 м^2 з виробництвом сталі приблизно 10 т/м^2 на добу; витрати палива при скрап-рудному процесі (*див. нижче*) – 120...180 кг/т, а при скрап-процесі – 170... 250 кг/т.

Шихтові матеріали мартенівського процесу складаються, як і при інших сталеплавильних процесах, з металевої частини: чавун у рідкому стані або у чушках,

металевий лом (*скрап*), розкиснювачі, легуючі, – і неметалевої частини: залізна руда, мартенівський агломерат, вапняк, вапно, боксити.

Співідношення кількості чавуну і сталевого лома у шихті може бути різним у залежності від процесу, марок сталі, що виготовляються, та економічних умов.

Шихтові матеріали (скрап, чвун, флюси) завантажують у піч напольною машиною крізь завалочні вікна 5 (*див. рис. 1.4*).

Розігрів шихти, розплавлення металу і шлаку в печі ведеться в плавильному просторі при контакті матеріалів з факелом розпечених газів.

Під час мартенівської плавки відбувається окиснення заліза та інших елементів, які містяться у шихті. Утворювані при цьому оксиди металів FeO, Fe_2O_3, MnO, CaO, P_2O_5, SiO_2 та ін. разом з частками футеровки, яка поступово руйнується, та домішками, що вносяться шихтою, утворюють шлак.

За характером шихтових матеріалів мартенівський процес поділяється на декілька різновидів. Найбільше розповсюдження з них отримали:

– скрап-рудний процес, який широко застосовують на заводах з повним металургійним циклом;

– скрап-процес, який частіше реалізується на заводах, де немає доменного виробництва, зокрема, на машинобудівних підприємствах.

При *скрап-рудному процесі* більшу частину металевої шихти складає *рідкий* чавун (від 55 до 75%); інше – металевий лом і руда.

При *скрап-процесі* основну масу металевої маси шихти (від 55 до 75 %) складає металевий лом, а чавун, як правило, застосовується у твердому стані (в чушках).

Флюсом в обох процесах зазвичай слугує вапняк $CaCO_3$ (8...12% від маси металу).

Процес плавки у мартенівських печах може бути *основним* або *кислим*.

Для реалізації *основного процесу* плавки подину і стінки печі викладують магнезитовими цеглинами, а свод – динасовою або хромо-магнезитовою цеглою. Верхні шари подини наварюють магнезитовим або доломитовим порошком і ремонтують після кожної плавки. В процесі плавки отримують *основний* шлак з великим вмістом (54…56%) *CaO*.

Перед початком такої плавки визначають кількість вихідних матеріалів (чушковий чавун, сталевий скрап, вапняк, залізна руда) та послідовність їх завантаження у піч.

За допомогою заливочної машини мульда (спеціальний короб) з шихтою уводиться до плавильного простору печі і перевертається, висипаючи шихту на подину печі. Спочатку завантажують дрібний скрап, потім – більш крупний, а на нього – кускове вапно (3…5% від маси металу). Після прогріву цих матеріалів подають сталевий лом і переробний чавун двома-трьома порціями. Такий порядок завантаження матеріалів дозволяє їх швидко розігріти та розплавити.

У період завантаження та розплавлення шихти відбувається часткове окиснення заліза і фосфору, майже повне окиснення силіцію та мангану з утворенням первинного шлаку. Вказані елементи окиснюються спочатку за рахунок кисню пічних газів і руди, а потім – за рахунок закису заліза, що розчинений у шлаці.

При основному процесі плавки відбувається часткове видалення сірки з металу внаслідок взаємодії сірчаного заліза з вапном і утворенням *FeO* та *CaS*.

Для цього необхідні висока температура та достатня основність шлаку.

Оксиди SiO_2, MnO, P_2O_5, CaO, а також сульфід *CaS*, які утворюють шлак, перед початком кипіння ванни періодично випускають з печі у шлакові чаші.

У присутності шлаку рідкий метал стає ізольованим від прямого контакту з газами, і окиснення домішок проходить *під шаром шлаку*. Кисень у цих умовах переноситься закисом заліза, що розчиняється у металі і шлаці.

Після випуску первинного шлаку в піч завантажують вапно для утворення нового шлаку з більшою основністю.

Теплове навантаження печі збільшують, щоб тугоплавке вапно швидше перейшло до шлаку, а температура металевої ванни підвищилась. Через 15…20 хв. у піч завантажують залізну руду, яка збільшує кількість оксидів заліза у шлаці і зумовлює у металі реакцію окиснення вуглецю до стану *CO*. Останній виділяється з металу у вигляді бульбашок, утворюючи вигляд його кипіння, що сприяє перемішуванню металу, видаленню включень і розчинених газів, а також рівномірному розподіленню температури по глибині ванни. Для доброго кипіння ванни необхідно підводити тепло, оскільки така реакція є ендотермічною. Тривалість (1,25…2,5 години і більше) кипіння ванни залежить від ємності печі і марки сталі.

Для больш інтенсивного насичення ванни киснем до шлаку уводять залізну руду. Зазвичай останню додають у піч у першу половину періоду кипіння, який має назву «*полірування металу*».

Протягом другої половини періоду кипіння залізну руду до ванни не додають. Метал «кипить» дрібними бульбашками за рахунок накопичених у шлаці оксидів заліза.

Коли вміст вуглецю в металі стає декілька нижче за потрібний для готової сталі, а кількість сірки і фосфору зменшується до мінімума, кипіння завершують і починають розкиснення сталі у ванні печі феромарганцем, феросиліцієм та алюмінієм, тобто починається остання стадія плавки – період доведення і розкиснення металу.

У піч уводять кусковий феромарганець (із вмістом до 12% *Mn*), а потім через 10…15 хвилин – феросиліцій (із вмістом 12…16% *Si*).

Манган і силіцій взаємодіють з розчиненим у металі киснем, у результаті чого реакція окиснення вуглецю призупиняється. Зовнішньою ознакою звільнення металу від кисню є відсутність виділення бульбашок окису вуглецю на поверхні шлаку.

Готовий метал випускають з печі крізь отвори, які розміщені у нижній частині подини, і які на час плавки були забиті вогнетривкою глиною.

На завершення, сталь розкиснюють алюмінієм і феросиліцієм у сталерозливочному ковші під час її випуску з печі.

Для *кислого процесу* вогнетривку кладку печі виконують динасовими цеглинами. Верхні частини подини наварюють кварцевим піском і ремонтують після кожної плавки.

Кислий процес складається з таких же періодів, що й *основний*. Шихту використовують дуже чистою за вмістом фосфору та сірки, оскільки утворюваний *кислий* шлак не може утримувати відповідні шкідливі домішки.

Печі зазвичай працюють на твердій шихті. Кількість скрапу дорівнює 30…50% маси металевої шихти. У шихті допускається не більше 0,5% *Si*. Залізну руду у піч подавати неможна, оскільки вона може взаємодіяти з кремнеземом подини та руйнувати її через утворення легкоплавкої сполуки $2FeO \cdot SiO_2$.

Сталь виплавляється під шаром кислого шлаку з низьким вмістом вільного закису заліза, що захищає метал від насичення киснем.

Для отримання первинного шлаку у піч завантажують деяку кількість кварциту або мартенівського шлаку. Після цього шихту нагрівають пічними газами; залізо, силіцій, манган окиснюються, їх окисли сплавляються з флюсами та утворюють кислий шлак, у якому міститься до 40…52% SiO_2. У цьому шлаці більша частина заліза знаходиться в силікатній формі, що ускладнює його перехід із шлаку до металу.

Кипіння у ванні при кислому процесі починається пізнише, ніж при основному, і проходить повільніше навіть при доброму нагріві металу. Крім того, кислі шлаки мають підвищену в’язкість, що негативно відбивається на вигоранні вуглецю.

Інтенсифікація мартенівського виробництва досягається використанням печей великої ємності, застосуванням двованних печей, доброю підготовкою шихтових матеріалів, автоматизацією управління процесом плавки. Підвищенню продуктивності печей і економії палива сприяє застосування кисневого дуття.

Інші способи інтенсифікації виробництва пов'язані з управлінням складу шихти і шлаку.

Так, при *одношлаковому процесі без* відновлювального періоду, який застосовується для виплавки мартенівського сортаменту сталей, по закінченні окиснювального періоду у піч уводять силікомарганець і ферохром у кількості, що необхідна для отримання потрібного хімічного складу певної марки сталі, а шлак покращують додаванням вапна та флюсів. Завершальне розкиснення та легування сталі після її випуску проводять у ковші.

При *плавці з рафінуванням у ковші пічним шлаком,* яка застосовується частіше на печах ємністю 100…200 тонн, після завершення окиснювального періоду і розкиснення металу у печі наводять новий шлак з високим вмістом *CaO*. Далі протягом 40…60 хв. шлак розкиснюють подрібненим коксом і феросиліцієм. Перед випуском у шлак уводять 10…20% CaF_2, що забезпечує високу рафінуючу здібність шлаку. При випуску з печі спочатку зливають у ковш рідкий шлак, а потім – метал. Перемішування металу зі шлаком забезпечує високий рівень вилучення домішок (перш за все – сірки) і неметалевих включень.

Однією з форм рафінування сталі у ковші можна вважати застосування *синтетичних шлаків* на основі $CaO{\cdot}Al_2O_3$. Але у такому разі потрібні додаткові витрати тепла для плавлення шлаку.

Виробництво сталі в електропечах

Виплавка сталі в електропечах базується на перетворенні електричної енергії на теплову:

– при горінні клектричної дуги;

– у спеціальних нагрівальних елементах;

– за рахунок збудження вихрових струмів.

На відміну вів конвертерного і мартенівського процесів виділення тепла у електропечах не пов'язане з використанням окиснювачів. Тому електроплавку можна вести у будь-якому середовищі: окиснювальному, відновлювальному, нейтральному, – і у широкому діапазоні тиску: від вакууму до надлишкового тиску. Це дає можливість отримуватиякісні та високоякісні сталі.

Для виплавки електросталі використовують, головним чином, електричні печі двох типів: дугові та індукційні.

Дугові печі працюють на змінному струмі. Типова схема дугової печі представлена на рисунку 1.5.

Вона має зварений або клепаний корпус, який складається з таких частин: з'ємний куполоподібний звід з трьома отворами для електродів, циліндричні стінки та сферична подина, механізм для закріплення та вертикального переміщення електродів; дві опорні станини; механізм нахилу печі для забезпечення випуску сталі крізь випускний отвір по жолобу та у напряму завантажувального вікна із заслінкою для скачування шлаку.

У дугових печах використовують вугільні та графітизовані електроди. Діаметр електродів дорівнює 350…550 мм і визначається потужністю струму, що споживається.

У процесі плавки нижні кінці електродів згорають. Тому електроди поступово опускають та у необхідних випадках нарощують зверху.

Електрична дуга, що виникає між електродами і рідким металом та/або шихтою, представляє собою потік електронів, іонизованих газів і парів металу і шлаку. Температура електричної дуги може перевищувати 3000 ^oC.

Дугові печі можуть мати ємність 3…250 тонн і споживають потужність до 125 мегават. У них для виплавки високоякісної вуглецевої або легованої сталі застосовують шихту у твердому стані. Тут можна при температурі до 2000 °С розплавляти сплави з високою концентрацією тугоплавких компонентів.

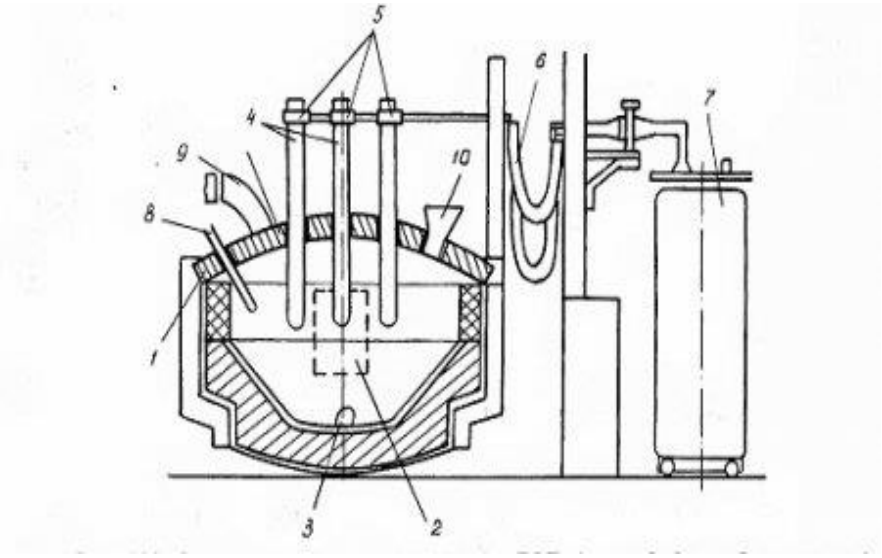


Рисунок 1.5 – Схема дугової електропечі [13, 14]: 1 – звід, 2 – робоче вікно; 3 – отвір для випуску сталі; 4 – електроди; 5 – тримачі електродів; 6 – коротка електрична мережа; 7 – трансформатор; 8 – киснева фурма; 9 – труба для відведення газів; 10 – завантажувальний отвір (воронка)

У момент запалювання катодом дуги являється електрод, який випускає електрони, а металічна шихта – анодом. При зміні полярності струму, коли катодом стає холодна шихта, дуга згасає, оскільки на початок плавки метал ще не нагрітий, і його температура недостатня для емісії (випуску) електронів. При наступній зміні полярності дуга знову виникає і т.д. Отже, у початковий період плавки дуга горить нестійко. Після розплавлення шихти, коли ванна покривається рівним шаром електропровідного шлаку, дуга стабілізується.

У дуговых печах з *основною* футеровкою тверду шихту використовують при плавці сталі з окисненням шихти і при переплавці металу без окиснення шихти.

Технологія плавки з окисненням шихти в *основній* дуговій печі подібна до технології скрап-процесу плавки сталі в *основних* мартенівських печах (*див. вище*).

Після заправки подини у піч завантажують шихту. На печах малої та середньої ємності це здійснюють мульдами, або лотками крізь завалочне вікно, а на печах великої ємності – крізь звід, який відводять на сторону разом з електродами.

На подину печі спочатку завантажують дрібний сталевий лом, потім – крупніший. Шихту укладають щільно, особливо, у місцях під електродами. Середній вміст вуглецю у шихті має бути на 0,5…0,6% вище, ніж у готової сталі, оскільки він вигорає, забезпечуючи добре кипіння ванни.

Після завантаження шихти електроди опускають до легкого дотику до шихти, підкладаючи під їх нижні кінці шматочки коксу, і включаючи струм, починають плавку.

При плавці сталі в дугових печах розрізняють окиснювальний та відновлювальний періоди.

Під час *окиснювального періоду* розплавляється шихта, окиснюється силіцій, манган, фосфор, надлишковий вуглець, частково – залізо та інші елементи, зокрема, хром, титан, і утворюється первинний шлак. Реакції окиснення такі ж, як і при *основному* мартенівському процесі. Фосфор з металу видаляється протягом першої половини окиснювального периоду, поки метал у ванні сильно не розігрівся. Утворюваний при цьому первинний фосфористий шлак у кількості 60…70% видаляють з печі.

Після видалення фосфору та скачування первинного шлаку метал добре прогрівається і починається горіння вуглецю.

Для отримання нового шлаку до *основної* дугової печі подають обпалене вапно та інші необхідні матеріали, а для інтенсивного кипіння ванни у піч вкидають необхідну кількість залізної руди або окалини та шлакоутворюючих речовин.

Під час кипіння ванни протягом 45…60 хвилин надлишковий вуглець згорає, розчинені гази та неметалеві включення видаляються. Після видалення надлишкового вуглецю скачують весь шлак.

На цьому етапі, контролюючи хід плавки, відбирають проби металу для оперативного визначення в ньому вмісту вуглецю і мангану, а також проби шлаку для визначення його складу.

Якщо у металі в період окиснення згідно з хімічним аналізом міститься менше вуглецю, ніж потрібно, то у піч уводять куски зношених графітових електродів або кокс.

Під час відновлювального періоду плавки розкиснюють метал, переводять максимально можливу кількість сірки у шлак, доводять хімічний склад металу до заданого та готують його до випуску з печі.

Відновлювальний період в *основних* дугових печах при виплавці сталей з низьким вмістом вуглецю проводиться під вапняковим («білим») шаром шлаку, а при виплавці високовуглецевих сталей – під карбідним шлаком.

Для отримання «білого» шлаку в піч завантажують шлакову суміш, яка складається з вапна та плавикового шпату.

Через деякий час на поверхні утворюється шар шлаку темного кольору з достатньо високою концентрацією *FeO* та *MnO*.

Перед розкисненням металу в пічь двома-трьома порціями вкидують другу шлакову суміш, яка складається з кускового вапна, плавикового шпату, подрібненого деревинного вугілля і коксу. Через деякий час вміст *FeO* і *MnO* знижується. Проби шлаку світлішають, закис заліза з металу починає переходити у шлак. Для посилення розкиснювальної дії до кінця відновлювального періода у піч вкидують порошок феросиліцію, під впливом якого вміст *FeO* у шлаці знижується. У «білому» шлаці міститься до 50…60% *CaO*, а на його поверхні плаває деревинне вугілля, що сприяє ефективному видаленню сірки з металу.

Під час відновлювального периоду плавки у метал уводять необхідні домішки, у тому числі – і легуючі. На завершення, метал розкиснюють у печі алюмінієм.

Виплавка сталі під карбідним шлаком на першій стадії відновлювального процесу здійснюється таким же чином, як і під «білим» шлаком. Потім на поверхню шлаку завантажують карбідоутворюючу суміш, яка складається з коксу, вапна і плавикого шпату.

Утворюваний при високій температурі карбід кальцію CaC_2 збільшує розкиснювальну здібність карбідного шлаку та його здатність вилучати сірку. Для прискорення утворення карбідного шлаку, який володіє здібністю навуглецювання, піч добре герметизують.

При виплавці сталі *методом переплаву*, в піч не завантажують залізну руду; умови для кипіння ванни відсутні. Шихта повинна складатися з легованих відходів, що містять мало фосфору, оскільки його неможна видалити у шлак. Для зниження вмісту вуглецю до шихти додають 10…15% м’якого заліза. Утворюваний при розплавленні шихти первинний шлак з печі не видаляють. Це зберігає легуючі елементи (*Cr, Ti, V*), які переходять зі шлаку в метал.

Розкиснення сталі може проводитися як у печі перед випуском, так і у ковші.

Електродугові печі з *кислою футеровкою* зазвичай застосовують при виплавці сталі для фасонного лиття. Їх ємність складає від 0,5 до 10 тонн. Кисла футеровка володіє більш високою термостійкістю, що дозволяє експлуатувати піч з урахуванням умов безперервної роботи ливарних цехів машинобудівних заводів.

Основним недоліком печей з кислою футеровкою стає те, що під час плавки з металу не видаляються сірка і фосфор. Тому до якості шихти, яка використовується, щодо вмісту цих шкідливих домішок пред'являються жорсткі вимоги.

Плавка у *кислій* печі продовжується приблизно стільки ж, як і в *основній* печі (50…70 хв.). В окиснювальний період видаляється менша кількість вуглецю (0,1…0,2 %). Через підвищений вміст *FeO* у шлаці метал кипить без присадок залізної руди. Вміст SiO_2 у шлаці до кінця окиснювального періоду підвищується до 55…65 %. При нагріві металу починається відновлення силіцію вуглецем, і до кінця процесу вміст силіцію в металі збільшується до 0,2…0,4 %.

В ***індукційних плавильних печах*** методом переплаву виплавляють, як правило, сталі і сплави складного хімічного складу. Тут використовується тепло, яке виділяється у струмопровідних металі та шихті за рахунок збудження вихрових електричних струмів змінним магнітним полем. Джерелом магнітного поля в індукційній печі слугує індуктор.

У порівнянні з дуговими електропечами індукційні печі мають ряд переваг: відсутність електродів і електричних дуг дозволяє отримувати сталі і сплави з низьким вмістом вуглецю і газів; плавка характеризується малим угаром легуючих елементів, високим коефіцієнтом корисної дії (к.к.д.) і можливістю точного регулювання температури металу. Оскільки в індукційних печах відсутні вуглевмістні електроди, метал не піддається навуглецюванню. Під дією електромагнітних сил метал циркулює, що прискорює хімічні реакції і сприяє отриманню однорідного металу.

Індукційні печі можуть мати ємність від 50 кг до 100 т і більше.

Така піч (рисунок 1.6) складається з вогнетривкого тигля 3 з матеріалами шихти 2. Тигель 3 може бути розміщенний в індукторі 1 (див. рис. 1,6, *а*), або над ним (див. рис. 1,6, *б*). Тигель 3 з індуктором 1 встановлюють на подовій плиті 4, яка, у свою чергу, розміщена на опорних брусах 5.

Індуктор 1 розташовують в ізоляційному шарі. Він представляє собою соленоїд, виконаний з мідної водоохолоджувальної трубки. Струм до індуктора подається гнучкими кабелями або мідними шинами. Потужність і частота змінного струму, що виробляється в генераторах, визначаються ємністю плавильного тигля 3 і складом шихти. Зазвичай в індукційних печах застосовують струм частотой 500…2500 Гц. Крупні печі працюють на менших частотах. Потужність генератора обирають з розрахунку 1,0…1,4 кВт/кг шихти.

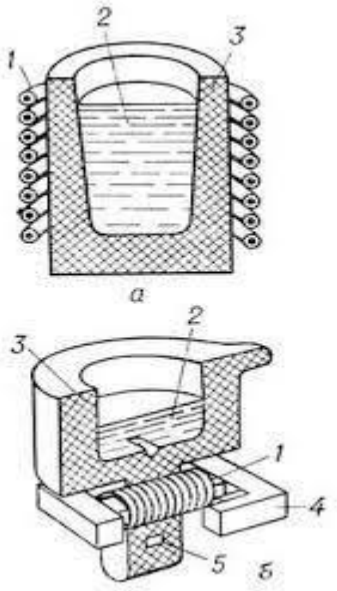


Рисунок 1.6 – Схема індукційної печі [13, 14] (*позначення позицій – у тексті*)

Воду для охолодження підводять резиновими шлангами. Вся піч розміщена у металевому кожусі. Зверху тигель закривається асбоцементною плитою, яка відокремлює тигель від змінного воротника зі зливним носком, до якого піч може нахилятися для зливу металу.

Тигель 3 печі виготовляється набивкою або викладається цеглою. Для набивки використовують подрібнені вогнетривкі матеріали – *основні* (магнезит) або *кислі* (кварцит).

Оскільки плавка в індукційній печі проходить дуже швидко, шихта для неї застосовується, як правило, з високоякісного металолома відомого складу.

Перед плавкою здійснюють точний розрахунок шихти щодо вмісту вуглецю, сірки і фосфору, а також легуючих елементів. Внаслідок цього угар легуючих виходить дуже невеликим.

Шихту завантажують до тигля таким чином, щоб вона щільно заповнювала весь об'єм. Після завантаження шихти включають струм на повну потужність.

По мірі проплавлення шихти завантажують решту. Потім на поверхню металу завантажують шлакоутворюючу суміш, яка складається з вапна, магнезитового порошка та плавікового шпату. Температура шлаку у всіх випадках менше за температуру металу, оскільки шлак не володіє магнітною проникністю, і в ньому не індуктується електричний струм.

У процесі плавки шлак розкиснюють добавками порошку коксу і подрібненого розкиснювача. По ходу плавки додають легуючі матеріали. Метал наприкінці плавки розкиснюють кусковими феросплавами та алюмінієм.

Безперервний розвиток техніки зумовлює все больш високі вимоги до якості сталі, що супроводжується створенням відповідних ефективних технологій та технічних засобів.

Відомі способи підвищення якості сталі можуть бути умовно представлені трьома групами:

– виплавка у вакуумі;

– спеціальні способи електроплавки металів;

– обробка рідкого металу поза сталеплавильного агрегату.

Виплавка сталі у вакуумі

Використання вакууму (менше за 10^{-2} Па) при виплавці сталі дозволяє отримати метал практично будь-якого хімічного складу з низьким вмістом газів, неметалевих включень і домішк кольорових металів, оскільки реакції дегазації та розкиснення металу вуглецем у вакуумі протікають більш повно.

Технічна реалізація вакуумних печей передбачає наявність камери, з'єднаної з вакуум-насосом, в якій тим чи іншим шляхом розплавляється метал. Затверділий злиток характеризується доброю структурою та відсутністю усадкової раковини.

Вакуумні дугові печі підрозділяють на печі з електродом, що не витрачається, та з електродом, який витрачається.

Електрод, який не витрачається, виготовлюють з вольфраму або графіту. При плавці з таким електродом подрібнена шихта завантажується у водоохолоджуваний мідний тигель і під дією електричної дуги розплавляється, очищується від шкідливих домішок і потім кристалізується у вигляді злитка.

Такі печі промислового застосування не знайшли, оскільки в них неможливо отримувати злитки великої маси.

У наявний час розповсюдження отримали *вакуумні дугові печі з електродом, що витрачається*. Відповідний електрод представляє із себе вихідний метал, який підлягає переплаву, і містить зазвичай усі необхідні легуючі елементи.

Вакуумні дугові печі працюють як на змінному, так і на постійному електричному струмі.

При переплаві сталевих електродів застосовують постійний струм. «Плюс» подається на електрод, «мінус» – на злиток. Розміри електрода круглого або квадратного перерізу обирають такими, щоб зазор між електродом і стінкою кристалізатора був більше довжини електричної дуги, що горить між електродом і ванною рідкого металу. В іншому разі можливе небажане перекидання дуги на стінку кристалізатора.

Однією з переваг вакуумного дугового переплаву являється відсутність контакту рідкого металу з керамічними матеріалами. Основний недолік – обмежений час перебування металу у рідкому стані, що суттєво знижує рафінуючі можливості вакууму.

Ємність існуючих *вакуумних індукційних печей* сягає 60 т. Вони поділяються за принципом дії на періодичні та напівбезперервні.

У *печах періодичної дії* після кожної плавки камеру печі відкривають (при цьому, вакуум зникає), вилучають злиток і завантажують шихту. Такі печі використовують, в основному, в лабораторіях і для фасонного лиття.

У *печах напівбезперервної дії*, які використовуються у промислових масштабах, завантаження шихти, зміна виливниць і вилучення виливка проводяться без порушення вакууму в плавильній камері.

Печі цього типу (рисунок 1.7) мають три камери: плавильну 2, завантажувальну 8 і камеру виливниць 1. У плавильній камері встановлені водоохолоджуваний індуктор з вогнетривким тиглем 3, у якому плавиться шихта. Каркас тигля, виконаний з куточків нержавкої сталі, спирається на цапфи. При зливанні металу і очищенні тигля останній нахиляють за допомогою механічного або гідравлічного приводу.

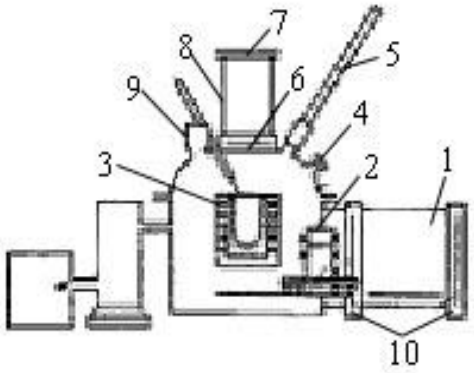


Рисунок 1.7 – Схема вакуумної индукційної печі напівбезперервної дії (*позначення позицій – у тексті*) [13, 14]

Камера виливниць і завантажувальна камера з'єднуються з плавильною камерою через вакуумні затвори 6 і 10, які дозволяють завантажувати шихту у піч і вивантажувати злиток без порушення вакууму у плавильній камері.

Додавання легуючих матеріалів і розкиснювачів здійснюється крізь дозатор 9, встановлений на кришці 7 печі. Для контролю процесу плавки піч оснащена вікном («гляділкою») 4 і термопарою 5.

Технологія виплавки металу у вакуумній індукційній печі напівбезперервної дії визначається маркою сталі, що виплавляється, та якістю шихтових матеріалів.

Для плавки використовують шихтові матеріали, очищені від мастил і вологи. Для легування застосовують феросплави і чисті метали. Перед завантаженням шихту попередньо прокалюють. Після завантаження печі включають струм, і розплавлення шихти ведуть на максимальній потужності. При появі перших порцій рідкого металу і при наявності у шихті вуглецю до печі впускають аргон, підвищуючи тиск до $1{,}3 \cdot 10^4$ Па для запобігання виплесків рідкого металу через активне окиснення вуглецю з утворенням *CO*.

Після повного розплавлення шихти метал вивільняють від водню, азота, кисню і домішок кольорових металів шляхом зниження тиску до 1,3…0,13 Па.

У процесі рафінування здійснюють також легування металу. Спочатку, за необхідності, присаджують хром і ванадий, потім – титан.

Перед розливкою до металу уводять алюміній, рідкісноземельні метали, кальцій і магній. Для отримання щільного виливка розливку проводять зазвичай в атмосфері аргона.

Основним недоліком вакуумних індукційних печей являється контакт рідкого металу з вогнетривкою футеровкою тигля, що може призвести до відповідного забруднення металу.

До спеціальних способів електроплавки металів відносять:

– плазменну або плазменно-дугову плавку (плазменно-дуговий переплав);

– електрошлаковий переплав;

– електронно-променевий переплав.

При *плазменній* або *плазменно-дуговій плавці* спеціальних сталей і сплавів у плазменних печах джерелом енергії для нагріву металу являється низькотемпературна плазма зі ступенем іонізації, близької до 1% і температурою приблизно 10^5 К.

Така плазма (іонізований газ, у якому концентрація позитивних та негативних зарядів є рівною) отримується при уведенні до дугового електричного розряду газоподібної речовини (зазвичай – аргону).

Для такої плавки сталі застосовують два типи агрегатів:

– печі з вогнетривкою футеровкою;

– печі з мідним водоохолоджуваним кристалізатором.

Плазменні печі з вогнетривкою футеровкою (рисунок 1.8) багато в чому схожі на дугові сталеплавильні печі (*див. рис. 1.5*). На відміну від останніх, у плазменні печі замість графітових електродів установлюють, у залежностівід розмірів печі, від одного до трьох плазмотронів 4 (*див. рис. 1.8)*. У печей постійного струму анодом слугує ванна рідкого металу, струм до якої підводиться подовим електродом 6.

Металургійні можливості плазмених печей з нейтральною атмосферою дуже широкі, і метал можна розкиснювати, десульфурувати, рафінувати від газів і неметалевих включень, легувати азотом.

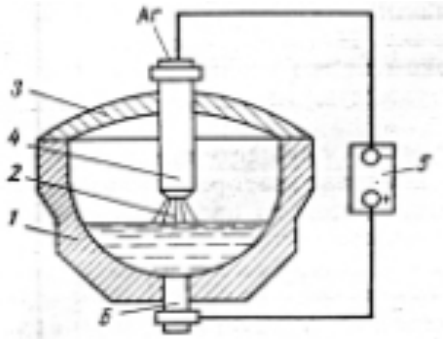


Рисунок 1.8 – Схема плазменної печі з вогнетривкою футеровкою [13, 14]: 1 – корпус; 2 – потік плазми; 3 – кришка; 4 – плазмотрон; 5 – джерело високої електричної напруги; 6 – подовий електрод

У *плазменно-дуговій печі з водоохолоджуваним кристалізатором* плавлення заготовки здійснюється двомя плазмотронами. Формування злитка відбувається в кристалізаторі, що охолоджується водою. Тут здійснюють *плазменно-дуговий переплав* для отримання сталі і сплавів особливо високої чистоти. Джерелом тепла в установці 3 (рисунок 1.9) слугує плазменна дуга 4 з температурою 10000...15000 °С, яка формується плазмотроном 2. Вихідним матеріалом для отримання злитків слугує стружка або інші подрібнені відходи металообробної промисловості, що подаються з контейнера 1. Метал 6 плавиться і твердне у водоохолоджуваному кристалізаторі 5, а злиток, який утворюється,

витягується донизу. Завдяки високій температурі з металу інтенсивно випаровуються сірка і фосфор, а також видаляються неметалеві включення.

Електрошлаковий переплав являється вельми перспективним способом отримання високоякісного металу. Він включає наступне. Сталь, що переплавляється, подається до установки (рисунок 1.10) у вигляді електрода 1, який витрачається (переплавляється).

Розплавлений шлак 2 (суміш 60...65% CaF_2, 25...30% Al_2O_3, CaO та інші домішки) володіє великим електричним опором, і при проходженні електричного струму в ньому генерується тепло, достатнє для розплавлення електрода 1. Краплі металу проходять шар шлаку, збираються у ванні 3 і тверднуть у водоохолоджуваній виливниці 4, утворюючи злиток *5*. При цьому, кристалізація металу здійснюється поступово і спрямована знизу уверх, що сприяє видаленню неметалевих включень, і тим самим – утворенню щільної та однорідної структури злитка. Наприкінці переплаву піддон *6* опускають і затверділий злиток вилучають з виливниці.

Сучасні установки електрошлакового переплаву дозволяють отримувати злитки різного перерізу масою до 40 тонн.

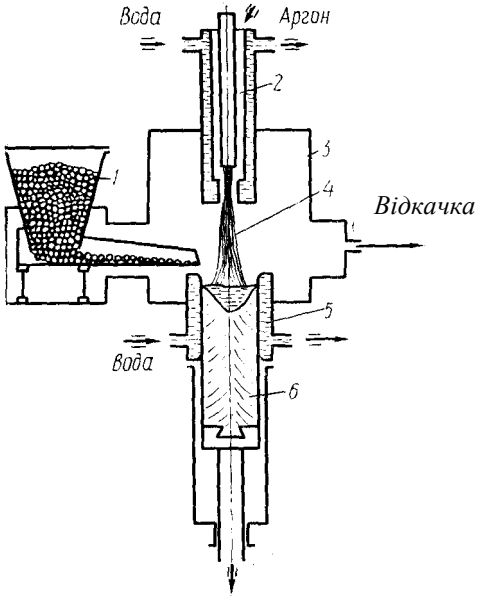


Рисунок 1.9 – Схема плазменно-дугового переплаву в печі з водоохолоджуваним кристалізатором [13] (*позначення позицій – у тексті*)

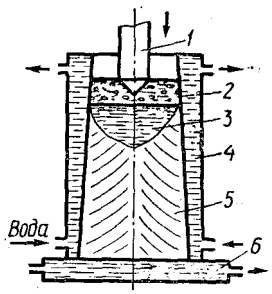


Рисунок 1.10 – Схема електрошлакового переплаву [*14*] (*позначення позицій – у тексті*)

Електронно-променевий переплав здійснюється за рахунок тепла, що утворюється в результаті опромінення металу 3 (рисунок 1.11), який піддається переплаву, потоком електронів, прискорених в електричному полі високої напруги.

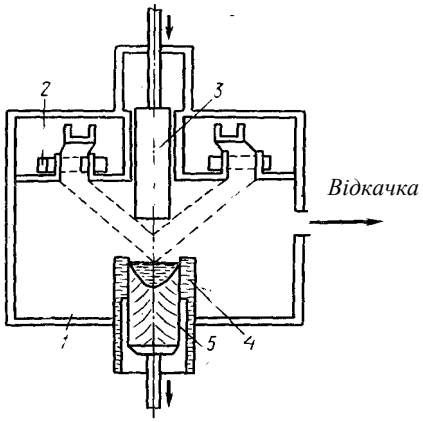


Рисунок 1.11 – Схема електронно-променевого переплаву [14] (*позначення позицій – у тексті*)

Переплав металу ведеться у вакуумній установці 1 при тиску 0,001 Па, а твердіння злитка 5 – у водоохолоджуваному кристалізаторі 4. Глибокий вакуум 2 та сприятливі умови затвердіння забезпечують отримання особливо чистого металу.

Електронно-променева плавка має ряд переваг: електронні промені дозволяють забезпечити високу щільність енергії нагріву, регулювати швидкість плавки у широких межах, запобігти забрудненню розплаву матеріалом тигля та використовувати шихту в будь-якому вигляді. Тому електронно-променевий переплав застосовують для отримання сталей особливо високої чистоти, сплавів зі спеціальними властивостями, а також чистих тугоплавких металів (*W, Mo, Nb* та ін.).

До *спеціальних* способів електроплавки металів іноді відносять і *вакуумно-дуговий переплав,* який здійснюється у вакуумних дугових печах з електродом, що витрачається (*див. вище – рис. 1.7*).

Обробка рідкого металу поза сталеплавильного агрегату

Сталі, виплавлені в кислородних конвертерах, мартенівських і електричних печах, не завжди задовольняють за своїми властивостями вимоги сучасної техніки. Для підвищення їх якості, окрім спеціальних технологічних процесів рафінуючих переплавів (електрошлаковий, вакуумно-дуговий, плазменно-дуговий, електронно-променевий та ін.), які розглянуті вище, застосовують прийоми позапічного рафінування у сталерозливочному ковші. Останній призначений для короткочасного зберігання та траспортування рідкої сталі, випущеної із сталеплавильного агрегату.

Головною метою такої обробки являється зниження вмісту розчинених у металі газів, неметалевих включень і сірки.

У загальному випадку сталерозливочний ковш (рисунок 1.12) має форму усіченого конусу з великою основою зверху.

Ковш має зварной кожух 4, футерований усередині вогнетривкою шамотною цеглиною. Сталь з ковша розливають крізь один або два стакани, розміщені у його днищі. Отвори закривають (або відчиняють) із середини вогнетривкою пробкою 1 за допомогою стопора 3, з'єднаного з приводом 2. Ємність ковша зазвичай визначається ємністю плавильної печі і може складати 5...450 тонн.

Ковш переміщують за допомогою мостового крана або на спеціальному залізничному візку.

У наявний час немає такого способу обробки рідкої сталі у ковші, який би дозволив *одночасно* суттєво знизити у металі вміст неметалевих включень, сірки і газів. Тому, у залежності від поставленої задачі, застосовують той або інший спосіб позапічної обробки металів.

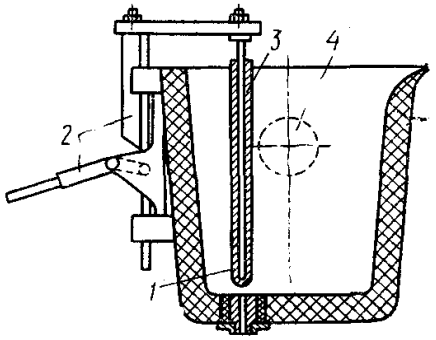


Рисунок 1.12 – Схема сталерозливочного ковша [15] (*позначення позицій – у тексті*)

З методів позапічного рафінування сталі найширше застосування отримали обробка рідкими синтетичними шлаками і вакуумування.

Обробка сталі синтетичним шлаком міститься у наступному.

У розливочний ковш *перед випуском* сталі з печі наливают 3...5% (по відношенню до її маси) попередньо приготований у спеціальній шлакоплавильній печі рідкий шлак, який володіє високою рафінуючою здібністю і містить 54% CaO, 42% Al_2O_3, до 3% SiO_2 та 1% FeO.

Потім у ковш за можливості з великої висоти потужним струменем випускають виплавлену сталь. У результаті інтенсивного перемішування сталі зі шлаком поверхня їх взаємодії збільшується у сотні разів порівняно з тією, що могла бути у печі. Тому процеси рафінування різко прискорюються, і для їх протікання необхідно вже не 1,5...2 години, як зазвичай у печі, а приблизно стільки ж, скільки продовжується випуск плавки.

Сталь, яка рафінована синтетичним шлаком, відрізняється низьким вмістом кисню, сірки і неметалевих включень, що забезпечує їй у твердому стані високі пластичність і ударну в'язкість. Зокрема, мартенівська сталь, оброблена синтетичними шлаками, за якістю наближується до якості сталі, що виплавлена в електричних печах. Така обробка дозволяє збільшити продуктивність дугових печей на 10…15% за рахунок скорочення періоду рафінування сталі в них. При цьому компенсуються затрати, пов'язані з виплавкою відповідного шлаку.

Позапічну обробку рідкої сталі вакуумом у промислових масштабах почали застосовувати з початку 50-х років XX ст.

При такій обробці виплавлену в мартенівских або електричних печах сталь витримують протягом 10..15 хв. у спеціальних камерах при тиску 265...665 Па. Більш тривала обробка призводить до небажаного зниження температури металу.

При зниженому тиску розчинність газів (азота, водню) в сталі зменшується, і вони у вигляді бульбашок вспливають на поверхню, також захоплюючи із собою неметалеві включення.

Існує декілька різновидів вакуумної обробки сталі.

Найбільш простим способом являється *вакуумування сталі у ковші*. У такому разі ковш з рідким металом розміщують у герметичній камері, з якої відкачують повітря (рисунок 1.13).

При зниженні тиску в камері метал закипає внаслідок бурного виділення з нього газів. Після такі дегазації металу камеру розгерметизовують, а ковш з вакуумованою сталлю відправляють на розливку.

Вакуумна обробка сталі у ковші дозволяє зменшити у 3...5 разів вміст газів, і у 2...3 рази – кількість неметалевих включень у сталі, що сприяє підвищенню у твердому стані її міцності і пластичності.

Ефективність ковшового вакуумування знижується при обробці великих мас металу і попередньо повністю розкисненої сталі.

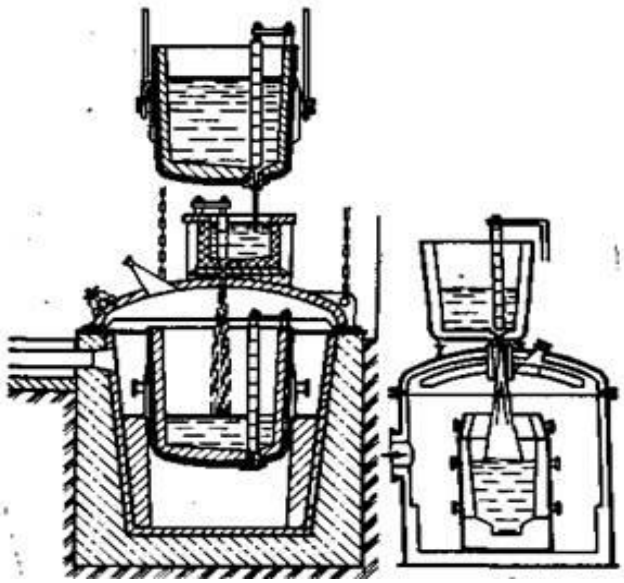


Рисунок 1.13 – Схема вакууматора [15] (*пояснення – у тексті*)

Обробка рідкої сталі аргоном у ковші також є одним з найпростіших способів підвищення якості металу. При цьому, аргон вдувають у рідку сталь крізь пористі вогнетривкі пробки, які встановлюють у днищі ковша. Цей газ не розчиняється у рідкій сталі, тому при продувці ним об'єму рідкого металу утворюється велика кількість бульбашок, які інтенсивно перемішують метал і виносять на його поверхню неметалеві включения. Крім того, водень і азот, розчинені у сталі, переходять у бульбашки аргону і разом з ним залишають рідкий метал, тобто одночасно проходить і дегазація сталі. Додаткова інтенсифікація цих явищ забезпечується накладенням на ковш зі сталлю електромагнітного поля, що обертається.

В останній час для отримання сталі з дуже низьким вмістом вуглецю обробку металу у вакуумі суміщують з його продувкою киснем або сумішшю аргону і кисню.

Продувка металу у ковші порошкоподібними матеріалами являється одним із сучасних способів підвищення якості сталі та продуктивності сталеплавильних агрегатів. При цьому до рідкого металу струмом інертного газу (аргону) крізь фурму вводять подрібнені десульфуратори та розкиснювачі. В результаті такої обробки можна отримати метал із вмістом як сірки, так і кисню менше 0,005%.

При дегазації великих мас сталі застосовують *порційне та циркуляційне вакуумування.*

При *порційному вакуумуванні* футерована *вакуумна* камера відносно невеликого об'єму розміщується над ковшом з рідким металом. Патрубок камери, футерований всередині та ззовні, занурюють у рідкий метал. Під дією атмосферного тиску порція металу (10…15% від загальної маси) підіймається доверху камери, де дегазується. При русі ковша униз або камери уверх метал витікає, а при зворотному русі знов підіймається до камери. Для повної дегазації сталі необхідно провести 30…60 таких циклів вакуумної обробки.

При *циркуляційному способі вакуумування* сталі застосовують вакуумну камеру з двома патрубками. Рідкий метал з ковша підіймається до камери по одному патрубку завдяки ежекторній дії аргону, який пдають у вхідний патрубок. Метал у камері дегазується і витікає зворотньо до ковша другим патрубком, тобто здійснюється безперервна циркуляція металу крізь вакуумну камеру, та його відповідне вакуумування.

Струминне вакуумування застосовують, здебільшого, в процесі відливки крупних злитків у виливницю (*див. нижче*), яка встановлюється у вакуумній камері. При цьому, струмінь сталі, яку виливають з ковша, розривається газами, які виділяються, на безліч

дрібних крапель. Поверхня металу різко зростає, що призводить до його глибокої дегазації. Крім того, сталь також додатково дегазується у виливниці.

Для підвищення якості сталі та гнучкості її виробництва при виготовленні відносно невеликих об'ємів якісного металу застосовують агрегати: так звані *«піч-ковш»*, – які об'єднують властивості електродугової печі та ковша (рисунок 1.14).

Сталь з ковша розливають або у виливниці, або на машинах безперервної розливки.

Розливка сталі у злитки (виливки)

Взагалі, розливка сталі відноситься до сфери ливарного виробництва, яке існує як самостійна галузь металургії.

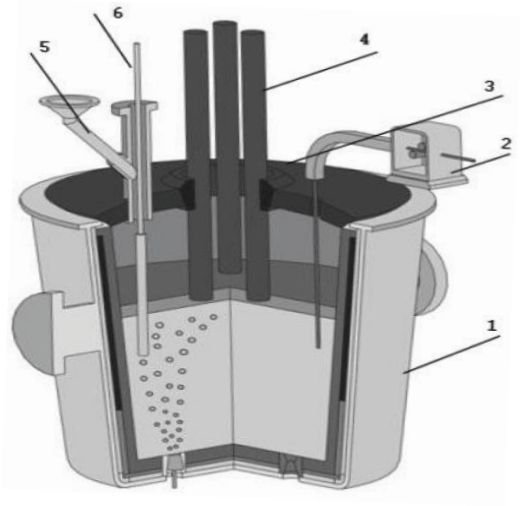


Рисунок 1.14 – Схема агрегату «піч-ковш» [15]: 1 – сталерозливний ковш; 2 – трайб-апарат; 3 – звід агрегату піч-ківш; 4 – графітові електроди; 5 – воронка подачі сипних матеріалів; 6 – аварійна фурма

Технології та обладнання ливарного виробництва знаходять широке застосування на промислових підприємствах при виготовленні продукції лиття з чорных, кольорових і коштовних металів, пластмас та інших матеріалів.

У чорній металургії процеси лиття використовуються як технологічно відокремлені (*самостійні)*, наприклад, при випуску чавуну в чушках, виготовленні литих деталей з недеформівних сплавів або як *проміжні* процеси між виплавкою металів і виготовленням товарної продукції на наступних переробленнях, зокрема, обробкою тиском (*див. нижче*).

Злитки (виливки) сталі формуються у *виливницях*, які представляють із себе чавунні товстостінні ємності. Маса виливків для наступної прокатки зазвичай складає 10...12 т (рідше – до 25 т), а для поковок сягає 250...300 т. Леговані сталі іноді розливають у злитки масою в декілька сотен кілограм.

Узагальнена будова сталевого злитка представлена на рисунку 1.15.

Характерною особливістю злитка є значний об'єм, який містить *дендрити* – гілкоподібні складові металографічної структури металу, що формуються внаслідок особливостей його кристалізації. Ці утворення служать концентраторами напружень, які погіршують механічні властивості металу і потребують наступної пластичної деформації для відповідної перебудови структури.

Застосовують два основних способи розливки сталі у виливниці: зверху та сифоном. Розливку зверху зазвичай застосовують для вуглецевих, а розливку сифоном – для легованих сталей [16].

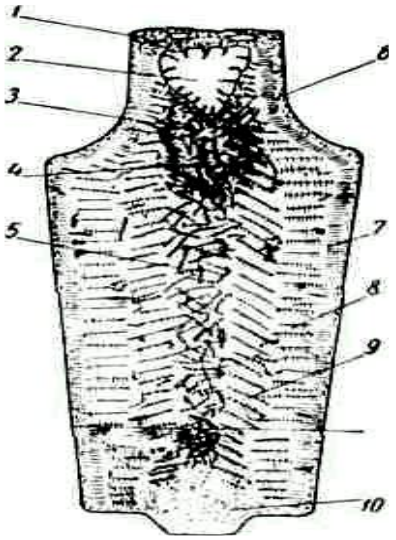


Рисунок 1.15 – Схематичне зображення будови сталевого злитка [15]: 1 – мости; 2 – усадкова раковина; 3 – усадкові порожнечі та ліквацийна зона; 4 – усадкова рихлість і ліквацийна зона; 5 – зона середніх дендритів всіляких напрямів; 6 – тонкий шар компактної зернистої будови; 7 – дрібні компактні дендрити, що йдуть до стінок виливниці; 8 – великі дендрити; 9 – великі похилі дендрити; I0 – частина злитка з компактною зернистою будовою

При *розливці зверху* (рисунок 1.16, *а*) сталь заливають з ковша 2 у кожну виливницю 1 окремо. При цьому, поверхня виливків внаслідок попадання бризок рідкого металу на стінки виливниці може забруднюватись плівками оксидів.

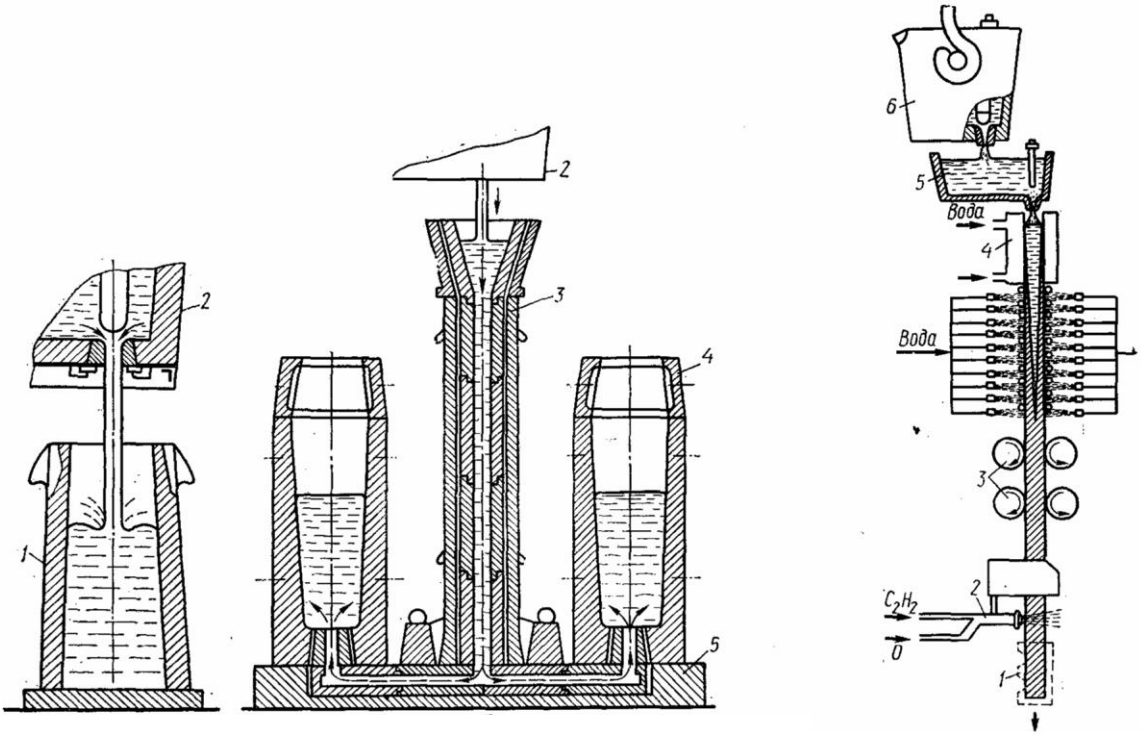
При *сифоній разливці* (рисунок 1.16, *б*) сталлю заповнюють одночасно від 2 до 60 встановлюваних на піддоні 5 виливниць через центровий літник 3 і канали у піддоні 5. У цьому випадку сталь поступає до виливниць знизу, що забезпечує плавне, без розбризкування їх заповнення, поверхня виливків стає чистою, скорочується час розливки. Сталь у надставці 4 зберігається у рідкому стані, завдяки чому зменшуються усадкова раковина і відходи злитку при обрізці. Недоліком цього способу являється ускладнення технології підготовки системи і необхідність деякого перегріву металу перед розливкою.

Вище було відмічено, що на процес затвердіння сталевого виливка і утворення його кристалічної структури впливають не тільки умови охолодження, але й ступінь розкиснення. За останньою ознакою сталі поділяються на киплячі, спокійні та напівспокійні. Вид розкиснення сталі віддзеркалюється на поздовжних макрошлифах злитків (рисунок 1.17).

При цьому у більшій або меншій мірі розливка у злитки обумовлює нерівномірність структури (і як наслідок – властивостей) по об’єму металу.

Безперервна розливка сталі здійснюється на спеціальних агрегатах – установках безперервної розливки сталі – УБРС (рисунок 1.16, *в*). Рідку сталь з ковша 6 через проміжну ємність (міксер) 5 безперервно заливають зверху у кристалізатор 4 (який являє собою водоохолоджувану виливницю без дна), а з його нижньої частини зі швидкістю 1...2,5 м/хв. витягують за допомогою валків 3 затверднувший виливок. На виході з кристалізатора злиток охолоджується водою, остаточно твердне і потрапляє у потоці до зони різання, де його розрізають газовим різаком 2 на злитки («штуки») визначеної довжини. Отримані заготовки за допомогою кантувача передаються на роликовий конвеєр і далі – у потоці до прокатних станів.

На УБРС отримують злитки з перерізами: прямокутний з розмірами (150...200) х (300…500) мм; квадратний та круглий з характерним розміром 150…400 мм; у вигляді товстостінних труб, а також максимально наближені до форми перерізу майбутнього прокатного профілю.



а *б* *в*

Рисунок 1.16 – Схеми розливки сталі у виливниці [15]: *а* – зверху; *б* – сифонним способом (*позначення позицій – у тексті*); *в* – на установках безперервної розливки (для останнього способу: 1 – безперервнолита заготовка; 2 – ацетиленовий різак; 3 – тягнучі або тягнучі та деформуючі валки; 4 – кристалізатор; 5 – проміжна ємність «міксер»; 6 – сталерозливочний ковш)

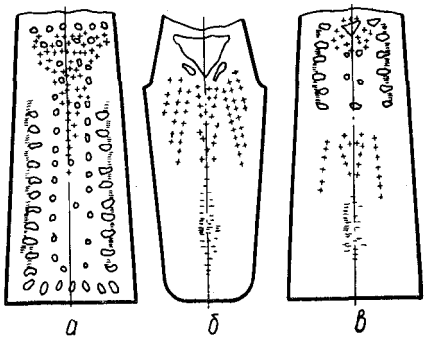


Рисунок 1.17 – Схематичне зображення поздовжних макрошлифів киплячої (*а*), спокійної (*б*) та напівспокійної (*в*) сталі [15]

Завдяки безперервній подачі рідкого металу і спрямованому затвердінню злитків, отриманих на УБРС, у них відсутня усадкова раковина. Тому вихід придатних заготовок може сягати 96...98% маси сталі, яка розливається, поверхня отримуваних злитків відрізняється доброю якістю, а метал заготовки – щільною та однорідною будовою.

1.2.1.4 Виробництво деяких кольорових металів

Кольорова металургія – комплексна галузь промисловості. Її продукція широко використовується у точному машинобудуванні, літакобудуванні, електроніці,

робототехніці і т.д. Історично склалося так, що ця галузь об'єднала в собі цілий ряд спеціалізованих підгалузей, які можна згрупувати за двома основними ознаками [2, 12, 16, 17]:

– за стадіями видобутку і переробки сировини на готову продукцію;

– у залежності від основного виду продукції.

За першою ознакою можна виділити гірничодобувну промисловість, включаючи збагачення видобутих руд, металургійну переробку руд і концентратів, металообробку, допоміжні виробництва: ремонтні та машинобудівні.

За другою ознакою виділяють 14 промислових підгалузей:

– *алюмінієва* (видобуток бокситів та іншої алюмінійвмісткої сировини; виробництво глинозему, алюмінію, галію та фтористих солей, хімічної продукції та будівельних матеріалів);

– *мідна* (видобуток та збагачення руди, виготовлення чорнової та рафінованої міді, рідкісних металів, сірчаної кислоти, мінеральних добрив, будівельних матеріалів);

– *свинцево-цинкова* (видобуток та збагачення руди, виготовлення свинцю, цинку, кадмію, рідкісних і коштовних металів, а також хімічної продукції та будівельних матеріалів);

– *нікель-кобальтова* (видобуток та збагачення руди, виготовлення нікелю та кобальту, міді, рідкісних і коштовних металів, хімічної продукції та інших матеріалів);

– *титано-магнієва* (видобуток та збагачення титанової сировини, виготовлення титану, магнію та їх сполучень);

– *вольфрамо-молібденова* (видобуток та збагачення вольфрамо-молібденової руди, виготовлення вольфрамових і молібденових концентратів і відповідної промислової продукції);

– *олов'яна* (видобуток, збагачення та виробництво олова);

– *сурм'яно-ртутна* (видобуток та збагачення сурм'яни і ртутних руд, виробництво сурми, ртуті та їх сполучень);

– *рідкісні метали та напівпровідникові матеріали* (видобуток та збагачення руд рідкісних металів і напівпровідникових матеріалів, інтерметалевих сполучень та виробів з них);

– *коштовні* (*дорогоцінні) метали* (видобуток та переробка золотовмістних руд і пісків, виготовлення коштовних (дорогоцінних) металів і сплавів, вторинна переробка таких металів). Часто цю категорію виділяють у самостійну сферу діяльності;

– *обробка кольорових металів* (виробництво всіх видів прокату і труб з кольорових металів і сплавів);

– *вторинні кольорові метали* (збір і первинна переробка лому та відходів і виплавка вторинних кольорових металів);

– *електродна* (виготовлення вугільної та графітової електродної продукції);

– *тверді сплави, порошкові, тугоплавкі та жароміцні метали* (виробництво твердих сплавів, порошкових тугоплавких і жароміцних металів, непереточуваних пластин і прокату із жароміцних і твердих сплавів).

Орієнтовна структура споживання на внутрішньому ринку України наступна [18]: алюміній (приблизно 342 тис. т), мідь (147 тис. т), цинк (59,5 тис. т), свинець – 8,2 тис. т), нікель – 5,3 тис. т), титан – 2,3 тис. т), олово (0,6 тис. т), вольфрам – 0,44 тис. т), кобальт – 0,14 тис. т), молібден – 0,125 тис. т), електродна продукція – 24 тис. т), тверді сплави – 0,92 тис. т), напівпровідникові сплави (0,1 тис. т), продукція рідкісних металів (у тоннах): ванадій – 660, цирконій – 90, ніобій – 50, кадмій – 50, тантал – 15, галій – 5, церій – 1,8, індій – 1,5, селен – 1, берилій – 1, ітрій – 0,8, телур – 0,5, скандій – 0,5, германій – 0,5, гафній – 0,5, оксиди рідкісних лужноземельних металів –20.

Особливостями кольорової металургії як галузі промисловості України, які впливають на ефективність її функціонування, являються:

– нестача власної сировини; нестача власних *освоєних* родовищ для виробництва алюмінію, міді, цинку, свинцю, олова, вольфраму, молібдену, германію та інших. Практично відсутні первинні виробництва електролітичної міді, нікелю, олова, титанових сплавів і зливків, алюмінієвого і титанового прокату, труб з алюмінію та його сплавів, які імпортуються. На доступній та власній сировині в Україні базуються лише виробництва алюмінію, титану, цинку, магнію, феронікелю, цирконію, кремнію, ртуті;

– висока матеріалоємність, зумовлена переробкою бідної поліметалічної сировини (часто із вмістом цінного компонента 0,3…2,1% основних важких кольорових металів і від сотих долей до 0,5% рідкісних і легуючих металів). Виключенням є виробництво алюмінію, для якого використовуються боксити із вмістом до 45 % глинозему;

– висока енергоємність (особливо – при виробництві алюмінію, міді, нікелю, кобальту і свинцю), що зумовлює прагнення до розташування відповідних підприємств поблизу джерел дешевої електроенергії. За деяким даними кольорова металургія споживає 2,5% палива і 9,0% електроенергії, що виробляються в Україні [18, 19];

– високі трудозатрати;

– комлексність переробки сировини, яка, здебільшого, характерна переробці поліметалічних руд;

– багатостадійність технологічних процесів, пов’язана з комплексністю переробки сировини;

– висока екологічна небезпека виробництва (підприємства кольорової металургії є одним з основних стаціонарних джерел забруднення середовища. Вони викидають в атмосферу оксиди азоту, сірчанистий газ. Ґрунти забруднюються свинцем, цинком, хромом, міддю. Тому значні земельні площі доводиться вилучати під звалища промислових відходів);

– висока капіталоємність, фондоємність, велика тривалість будівельно-монтажного циклу;

– майже на всіх підприємствах кольорової металургії відсутній замкнутий цикл виробництва.

Нині, на відміну від чорної металургії, кольорова металургія в Україні розвинута порівняно слабо. Пов’язано це з тим, що у минулому на території нашої країни не було відкрито великих покладів руд кольорових металів, а відповідні потреби задовольняються й досі за рахунок багатих родових з різних районів колишнього СРСР. В останні роки ситуація суттєво змінилася. В нашій країні було відкрито багато найрізноманітнішої сировини для розвитку кольорової металургії.

Як сировину для виробництва алюмінію можна використовувати боксити, алуніти, сієніти, нефеліни, а також каолін, запаси якого на території України дуже великі. Основною алюмінієвою рудою, на якій базується майже вся світова алюмінієва промисловість, є боксити.

Запаси бокситів на території України незначні. Промислове значення мають родовища Смілянське (Черкаська обл.) і Високопільське (Дніпропетровська обл.). Вони в змозі забезпечити сировиною Запорізький алюмінієвий завод протягом певного часу, але їх запасів недостатньо для збільшення виробництва алюмінію в Україні. Родовища бокситів відкриті, але до кінця не розвідані на півдні Дніпропетровської області, в Приазов'ї, Карпатах.

Цінною сировиною для виробництва алюмінію є алуніти. Значні запаси їх відкриті в Закарпатській області (родовища Берегівське, Беганське). Нефелінові сієніти як сировина для виробництва алюмінію є в Приазов'ї і Дніпропетровській області. Дуже важливою сировиною для виробництва алюмінію є каолін. Його родовища є в багатьох областях України, а видобувається він, переважно, у Вінницькій, Хмельницькій, Дніпропетровській і Запорізькій областях.

Головними родовищами калійно-магнієвих солей на Україні є Стебниківське і Калушське в Прикарпатті та сполук магнію – Сивашське в Криму.

Найбільші родовища титанових руд знаходяться в Житомирській (Іршанське і Стремигородське) та Дніпропетровській (Самотканське) областях. Титанові руди також є у Київській, Черкаській, Харківській (Краснокутськ) областях та на узбережжі Чорного та Азовського морів.

Ртутні руди розробляються в Донецькій і Закарпатській областях.

Оловяні і цинкові руди відкриті на півночі Житомирської області.

В Україні є цілий ряд родовищ нікелю, але всі вони дрібні за величиною запасів. Найбільші з них, які мають промислове значення, знайдено в Кіровоградській, Вінницькій та Дніпропетровській областях.

Хромітові руди виявлено в долині р. Південний Буг.

В Україні є значні запаси ртуті. Основне її родовище – Микитівське, яке розташоване в межах м. Горлівки. Родовища ртуті є також в Закарпатті та Криму.

Унікальні родовища сировини для отримання ряду рідкісних і рідкісноземельних металів розташовані у Житомирському Поліссі та в Приазов'ї.

Розробку золоторудного родовища розпочато в Закарпатті.

Поліметалічні руди є в Закарпатті, Львівській та Луганській областях [18].

Для зменшення залежності України від імпортних поставок необхідно прискорити розвиток власної сировинної бази: видобуток сульфідних мідно-нікелевих руд Прутовського родовища і самородної мідної руди у Волинській області, комплексних руд Жовторіченського та Крапивенського родовищ, рідкіснометалевих та рідкісноземельних руд Азовського та Новополтавського родовищ.

Одним з основних джерел задоволення потреб України в кольорових металах є *вторинна* кольорова металургія.

На гірничовидобувних підприємствах кольорової металургії добувають, збагачують і здійснюють металургійну переробку руд нікелю, ртуті, титанового і цирконієвого концентрату, високоякісних кварцитів.

На початок другого десятиліття XXI ст. галузь кольорової металургії України формували 52 підприємства різних форм власності, на яких працювало приблизно 50 тис. осіб. З того часу, на жаль, за різних об'єктивних причин відповідні дані скоротилися.

Натепер в Україні є чотири гірничодобувні підприємства кольорової металургії: Вільногірський державний гірничо-металургійний комбінат, ВАТ «Іршанський гірничо-збагачувальний комбінат», ВАТ «Микитівський ртутний комбінат» та ВАТ «Побузький феронікелевий завод».

Розміщення підприємств кольорової металургії зумовлено, переважно, двома основними факторами: сировинним і енергетичним.

Підприємства, які переробляють руди з незначним вмістом основного металу, тяжіють до джерел сировини (виплавка ртуті, нікелю, рідкісних металів та ін.).

Енерговмісткі виробництва (титано-магнієве, цинкове, алюмінієве) розмішуються в місцях дешевої електроенергії, як правило, поблизу потужних електростанцій.

У розміщенні підприємств кольорової металургії в Україні виділяються два основних регіони: Придніпровський і Донецький.

Придніпровський район кольорової металургії спирається на потужну енергетичну базу, яку утворюють ДніпроГЕС (м. Запоріжжя), теплові й атомні електростанції.

У Запоріжжі розташовані титано-магнієвий і алюмінієвий комбінати. Титано-магнієвий комбінат одержує магнієву сировину з Калуша, Стебника і Сиваша, а титанову – з Іршанського і Самотканського родовищ. Алюмінієвий комбінат працює на імпортних бокситах. Для виробництва глинозему, яким має забезпечуватись Запорізький алюмінієвий комбінат, біля Миколаєва побудовано великий глиноземний завод.

У Вільногірську поблизу Середньодніпровської ГЕС знаходиться Верхньодніпровський гірничо-металургійний комбінат, який працює на титано-цирконієвих рудах Самотканського родовища, а в місті Світловодську, біля Кременчуцької ГЕС діють завод чистих металів і завод твердих сплавів.

У Кіровоградській області на базі нещодавно відкритого родовища нікелевої руди діє Побузький нікелевий завод. Для забезпечення заводу паливом використовується коксівне вугілля і електроенергія Південноукраїнської атомної електростанції. Виробництво магнію здійснюється також Калуським ВО «Хлорвініл».

Будівельні алюмінієві профілі виготовляються на Броварському заводі алюмінієвих будівельних конструкцій (Київська обл.), на спільних підприємствах: «Інтерсплав», «Укргермет», «Обімет».

На території Донецького регіону знаходиться Костянтинівський цинковий завод «Укрцинк», який працює на імпортній сировині, Артемівський завод з обробки кольорових металів, який випускає латунь, латунний і мідний прокат (м. Бахмут, раніше – Артемівськ) та деякі інші.

На жаль, з 2014 р. частина Донецької та Луганської областей України не є підконтрольною центральній владі. Зокрема, це зумовлює зменшення кількості підприємств кольорової металургії та відсутність достовірної інформації про їх функціонування.

Сюди можна віднести Микитівський ртутний комбінат (м. Горлівка), який включає завод, рудники і збагачувальну фабрику; у м. Довжанськ (раніше – Свердловськ) знаходиться завод алюмінієвого прокату; спільні підприємства «Донкавмет» та «Укргермет», які спеціалізуються на виготовленні латуні і бронзи з вторинної сировини (майже повністю працюють на сировині замовників) та ін.

Для підтримки існуючих потужностей з виробництва концентратів, перш за все, слід увести в експлуатацію на діючих комбінатах вже розвідані родовища: титанових руд – Стремигородське, Міжріченське; нікелевих руд – Тарноватське силікатних руд. Для забезпечення існуючих металургійних потужностей з виробництва алюмінію, цинку, свинцю, міді та спецлігатур доцільно: у алюмінієвій підгалузі – участь у будівництві копалини на родовищі Діан-Діан (Гвінея); у свинцево-цинковій підгалузі – введення в експлуатацію Мужіївського та Біляївського родовищ. Щодо рідкісних, чистих металів та спецлігатур можна здійснюватии переробку попелу теплоелектростанцій та надсмольних вод коксохімзаводів (для отримання германію), переробку лежалих хвостів хіміко-металургійної фабрики ВАТ «Металургійний комбінат імені Ілліча» у м. Маріуполі (отримання танталу та ніобію); переробку шламів теплоелектростанцій, які працюють на нафтопродуктах (отримання ванадію); збирання та переробку вторинної сировини (для отримання вольфраму); переробку фосфорвмісних руд Донбасу (отримання рідкісноземельних елементів) [20].

Кольорова металургія взагалі характеризується різноманітністю виробництв, технологічних схем і процесів, особливості яких визначають вимоги до кнонторолю якості. Нижче надано коротку інформацію щодо реалізації виробничих процесів підгалузей кольорової металургії.

Виробництво алюмінію

Алюмі́ній (*Al*) – хімічний елемент ІІІ групи періодичної системи, його атомний номер 13, відносна атомна маса 26,9815. Це найпоширеніший метал земної кори, що становить приблизно 7,5% від її маси [21].

Алюміній – сріблясто-білий легкий, при кімнатній та підвищеній температурі пластичний та відносно міцний метал з температурою плавлення 660 °С. Він має високі корозійну стійкість, тепло– та електропровідність, легко утворює сплави з іншими металами. У більшості реакцій з їх оксидами є відновником. Завдяки своїй хімічній активності у природі він зустрічається у вигляді алюмосилікатів – сполук з киснем і кремнієм.

Алюміній та його сплави застосовують у багатьох сферах промисловості і техніки. Перш за все, це авіаційна і автомобільна галузі промисловості. Широко застосовується алюміній також у ракетобудуванні, машинобудуванні, транспортобудуванні,

електротехнічній промисловості і приладобудуванні, промисловому і цивільному будівництві, хімічній промисловості, виробництві предметів народного вжитку.

В електротехнічній промисловості алюміній і його сплави застосовують для виготовлення кабелів, шинопроводів, конденсаторів, випрямлячів змінного струму. У приладобудуванні він використовується при виробництві кіно– і фотоаппаратури, радіотелефонної апаратури, різних контрольно-вимірювальних приладів.

Алюміній почали широко застосовувати при виготовленні апаратури для виробництва і зберігання міцної азотної кислоти, пероксиду водню, органічних речовин і харчових продуктів завдяки його високій корозійній стійкості і нетоксичності. Алюмінієва фольга стала дуже поширеним пакувальним матеріалом, оскільки вона набагато міцніше і дешевше олов'яної. Також алюміній став використовуватися для виготовлення тари для консервації і зберігання продуктів сільського господарства, для будівництва зерносховищ та інших швидкозводних споруд тощо.

Алюміній високої чистоти також знаходить використання в ядерній енергетиці, напівпровідниковій електроніці, радіолокації. Він набув поширення як антикорозійне покриття та в пристроях, де потрібна висока здатність віддзеркалення.

В металургійній промисловості алюміній використовують як відновник при виготовленні ряду металів, таких як хром, кальцій, марганець. Він також використовується для розкиснювання сталі (*див. вище*) і при зварюванні сталевих деталей [22].

Алюмінієва підгалузь України включає ВАТ «Миколаївський глиноземний завод», ВАТ «Запорізький виробничий алюмінієвий комбінат», ЗАТ Дніпровський завод «АЛЮМАШ», ВАТ «АЛЮПОЛ», Броварський завод алюмінієвих будівельних конструкцій, Запорізький Завод Алюмінієвої Катанки; виробників вторинних алюмінієвих сплавів – ТОВ «ЮГамет», ТОВ ТПК «Укрсплав», ТОВ «Промметсплав», СП «Інтерсплав» та ін., які випускають вторинні алюмінієві сплави марок АК5М2, АК7, АК7п, АК7ч, АК9, АК9ч, АК8М3, АК12, АК12М2 та ін. Нормативні документи, в яких відображені вимоги до деяких видів алюмінієвої продукції, наведені у таблиці А1 Додатку А.

Загальна потужність цих підприємств складає: глинозем – 1,2 млн.т на рік, первинний алюміній та сплави на його основі – 110 тис.т на рік, вторинний алюміній та його сплави – 165 тис.т на рік, будівельні алюмінієві профілі – 15 тис.т на рік.

Найчастіше алюміній виробляють з *бокситів*, які містять 40…60% глинозему (Al_2O_3), а також кремнезем, оксид заліза і діоксид титану. Більше 90% світових запасів цього мінералу зосереджене в країнах тропічного і субтропічного поясу: в Австралії, Гвінеї, Ямайці, Суринамі, Бразилії, Індії.

В нашій країні також є і використовуються *нефелінові руди*. При переробці нефелинів отримують значні об'єми супутної продукції: кальциновану соду, поташ, добрива і цемент.

Технологічний процес отримання первинного алюмінію складається з трьох основних стадій:

– отримання глинозему з алюмінієвих руд;

– отримання алюмінію з глинозему;

– рафінування алюмінію.

Глинозем можна одержати трьома способами: лужним, кислотним і електролітичним. Найбільше поширення має лужний спосіб (метод Байєра, вживаний для переробки високосортних бокситів з кількістю до 6% *кремнезему*). Узагальнено, цей метод передбачає наступні технологічні переходи:

- змішування бокситів з *Na(OH)*;
- обробка суміші в автоклаві при температурі 250 $^{\circ}C$ та тиску 40 атм, внаслідок чого отримується алюмінат натрію $Na[Al(OH)_4]$ та відхід, званий «червоний шлам»;

- після нагріву та згущення при 90 °С лужний алюмінат натрію охолоджується, і в результаті його *декомпозиції* отримуються гідроокис алюмінію $Al(OH)_3$ та розчин $Na(OH)$. Останній повертається на перший крок процесу;
- фільтрація гідроокису алюмінію;
- кальцінація гідроокису алюмінію при 1300 °С з отриманням Al_2O_3.

Цим способом вилучається з бокситів 85…87% одержуваного глинозему. Отриманий окис алюмінію являє собою міцну хімічну речовину з температурою плавлення 2050 °С.

Далі глинозем *методом електролізу* перетворюють на алюміній. При цьому відновлення розчину глинозему в розплавленому кріоліті (Na_3AlF_6) та виділення алюмінію ведеться згідно процесу Холла-Еру при 950…970 °С в електролізері (рисунок 1.18).

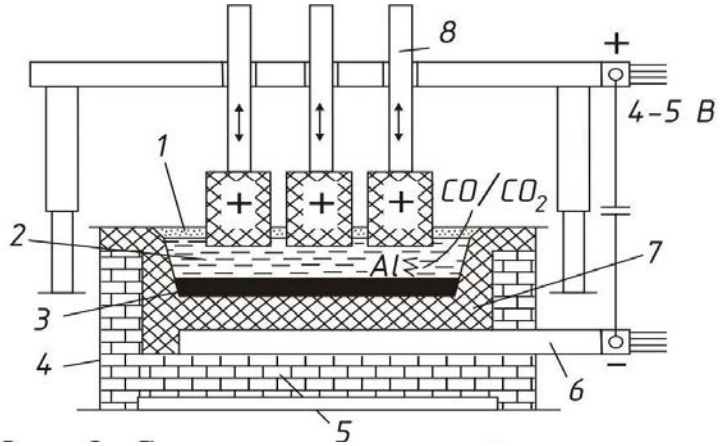


Рисунок 1.18 – Схема електролізної ванни [22]: 1 – окис алюмінію; 2 – криолітно-глиноземний розплав; 3 – рідкий алюміній; 4 – ванна зі сталевого листа; 5 – шамот; 6 – струмопровідна шина; 7 – вугільні блоки; 8 – аноди

Дно електролізної ванни служить катодом, а вугільні бруски, занурені в кріоліт – анодами. Температура процесу досягає 950 °С, що значно вище за температуру плавлення самого металу.

При електролізі на катоді виділяється алюміній, а на аноді – кисень. Алюміній, що має більшу густину, ніж початковий розплав, збирається на дні електролізера, звідки його періодично випускають. У міру виділення металу, до розплаву додають нові порції оксиду алюмінію.

Кисень, що виділяється при електролізі, взаємодіє з вуглецем анода, який вигорає, утворюючи CO і CO_2. В результаті, вугільні аноди надзвичайно швидко витрачаються, що постійно потребує установки нових вугільних блоків.

Зменшеними витратами на електроенергію та шкідливого впливу на довкілля характеризується процес Содерберга щодо виробництва алюмінію з використанням поновлюваних електродів, який практикується на багатьох європейських і американських алюмінієвих заводах. Тут електроди формуються у спеціальній відновній камері зі коксосмоляної пасти, що набивається у відкриту з обох кінців оболонку з листової сталі. Паста додається у верхній отвір оболонки за її витрачанням. Опускаючись донизу, вона встигає нагрітися з розплавленням до того, як досягне ванни для виконання своєї функції.

На сучасних заводах електролізери встановлюють групами по 150 і більше одиниць. З двох тонн глинозему виходить одна тонна *первинного алюмінію*.

У залежності від хімічного складу первинний алюміній поділяють на алюміній *технічної чистоти* і *високої чистоти*.

Електролізом кріоліто-глиноземного розплаву одержують промисловий алюміній з *технічною* чистотою 99,5…99,8%.

У деяких випадках (наприклад, для забезпечення високої електропровідності в області кріогенних температур) такого ступеня чистоти недостатньо. Тому з промислового алюмінію або його відходів шляхом рафінування отримують ще більш чистий алюміній (*Al*99,99R).

Найбільш відомий метод рафінування – тришаровий електроліз, який реалізується в електролізері за схемою на рисунку 1.19.

На відміну від електролізу кріоліто-глиноземного розплаву, анодом тут служить розплавлений метал, що рафінується (нижній анодний шар). Електроліт складається з чистих фторидів або суміші хлориду барія і фторидів алюмінію і натрія (середній шар). Алюміній, що розчиняється з анодного шару в електроліті, виділяється над електролітом (верхній катодний шар). Чистий метал служить катодом.

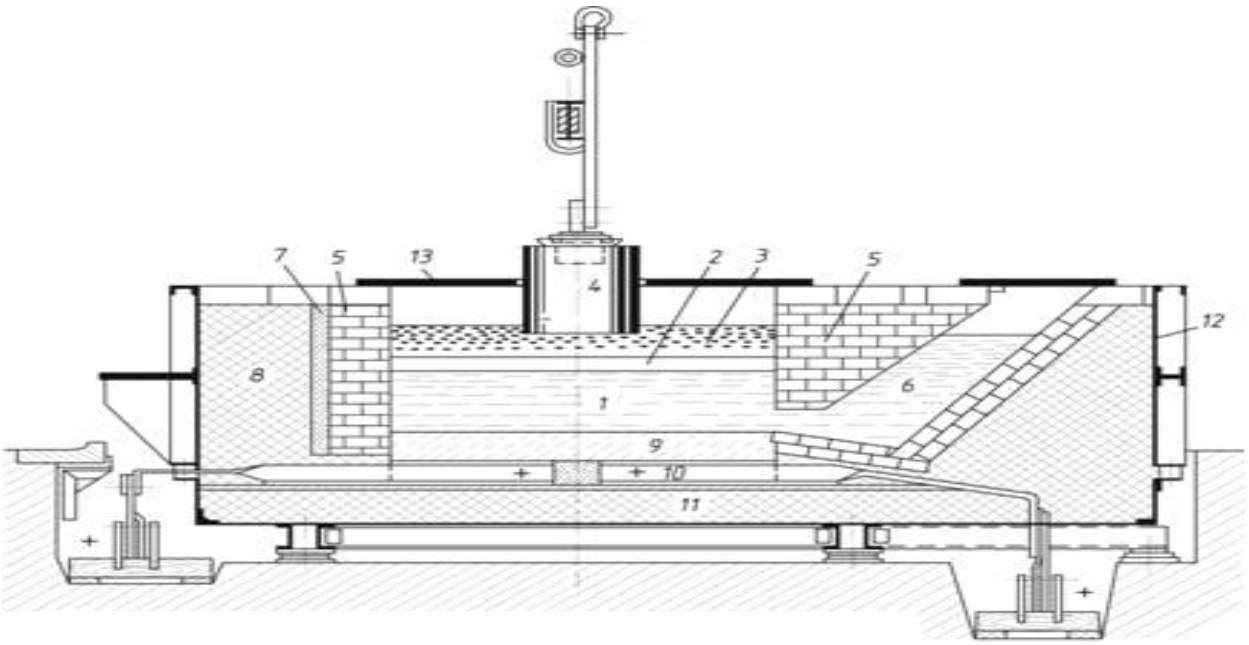


Рисунок 1.19 – Схема електролізера для рафінування алюмінію [22]: 1 – алюмінієвий розплав; 2 – електроліт; 3 – рафінований алюміній високої чистоти; 4 – катод з графіту; 5 – магнезитова стінка; 6 – передній горн; 7 – ізолюючий шар; 8 – бічна ізоляція; 9 – вугільна подина; 10 – анодний струмопідвід; 11 – ізоляція подини; 12 – залізний короб; 13 – кришка

Підведення струму до катодного шару здійснюється графітовим електродом. Ванна працює при 750…800 °С, витрата електроенергії складає 20 кВт·ч на 1 кг чистого алюмінію, тобто дещо вище, ніж при звичайному електролізі алюмінію. Метал анода містить 25…35% *Cu*; 7…12% *Zn*; 6…9% *Si*; до 5% *Fe* та незначну кількість мангану, нікелю, свинцю і олова, решта (40…55%) – алюміній.

Усі важкі метали і кремній при такому рафінуванні залишаються в анодному шарі. Наявність магнію в електроліті призводить до небажаних змін складу електроліту або до сильного його ошлакування. Для очищення від магнію шлаки, що містять магній, обробляють флюсами або газоподібним хлором. У результаті рафінування отримують чистий алюміній і продукти сегрегації («*зайгер-продукт*»), які містять важкі метали та силіцій і виділяються у вигляді лужного розчину і кристалічного залишку. Лужний розчин є відходом, а твердий залишок застосовується для розкиснення. Рафінований алюміній переробляють у напівфабрикат в зазначеному складі або легують магнієм.

Алюміній чистотою вище за марку *A1*99,99R також може бути отриманий рафінуючим електролізом при зонній плавці чистого або технічно чистого алюмінію із застосуванням в якості електроліту комплексних алюмоорганічних з'єднань алюмінію.

Такий електроліз проходить при температурі близько 1000 °С між твердими алюмінієвими електродами і, в принципі, схожий з рафінуючим електролізом міді (*див. нижче*). Природа електроліту диктує необхідність працювати без доступу повітря і при низькій щільності струму.

Цей вид рафінуючого електролізу, спочатку вживаний лише в лабораторних умовах, вже здійснюється у невеликому виробничому масштабі: виготовляється декілька тонн металу на рік. Номінальна міра очищення – 99,999…99,9999%. Потенційними сферами застосування металу такої чистоти є кріогенна електротехніка і електроніка. Можливе також застосування розглянутого методу рафінування і в гальванотехніці.

Ще більш високу чистоту – номінально, до *А1*99,99999 – можна отримати черговою зонною плавкою металу.

При наступній переробці алюмінію підвищеної чистоти на напівфабрикат, лист або дріт необхідно, враховуючи низьку температуру рекристалізації металу та вживати спеціальні відповідні запобіжні заходи.

Виробництво міді

Мідь (символ *Cu*) – пластичний метал рожево-червоного кольору, який відноситься до групи важких металів. В періодичній системі Д.І. Менделеєва вона знаходиться за номером 29. Її щільність 8890 кг/м^3; температура плавлення 1083 °С; теплопровідність 390 Вт/(м × град); питомий електроопір 1,724× 10^{-8} Ом·м; у відпаленому стані межа міцності 190…215 МПа, межа текучості 60…75 МПа, відносне подовження 60%, твердість за Бринелем НВ 400…450 МПа; у нагартованому стані межа міцності 280…360 МПа, межа текучості 280…340 МПа, відносне подовження 6%, твердість за Бринелем НВ 1100 МПа [18, 19].

З точки зору хімічних властивостей – це малоактивний метал, який не взаємодіє з водою, розчинами лугів, соляною і розбавленою сірчаною кислотою. Проте, мідь розчиняється в сильних окиснювачах (наприклад, в азотній кислоті). Мідь має досить високу стійкість до корозії. Проте, у вологій атмосфері, що містить вуглекислий газ, поверхня металу покривається зеленуватим нальотом (*патиною*).

Мідь частіше, ніж інші метали, зустрічається в природі у вигляді самородків, інколи вельми великих розмірів. Поширення міді в земній корі – 4,7·10^{-3} % за масою.

Завдяки своїм унікальним властивостям мідь знайшла широке застосування в промисловості, будівництві тощо. Поступаючись лише сріблу в електропровідності та теплопровідності, вона широко використовується в електротехніці, для прокладки ліній електропередач, телефонного та телеграфного зв'язку, в теплотехніці. З міді виготовляють деталі хімічної апаратури та інструмент для роботи з вибухонебезпечними або легкозаймистими речовинами. Термін служби мідних будівельних конструкцій обчислюється сотнями років. Мідь прекрасно гармонує з деревом, природним каменем, цеглиною і склом.

Дуже важлива сфера застосування міді – виробництво сплавів. Один з найкорисніших і найбільш вживаних сплавів – *латунь* (або «жовта мідь»). Її головні складові частини: мідь і цинк. Добавки інших елементів дозволяють отримувати латунь з найрізноманітнішими властивостями. Латунь твердіша за мідь, вона ковка і в'язка, тому легко прокатується в тонкі листи або виштамповується у найрізноманітніші форми.

З прадавніх часів відомий сплав: *бронза*. Бронза більш легкоплавка у порівнянні з міддю, але за своєю твердісті перевершує окремо взяті складові: чисту мідь і олово. Сьогодні вже відомі алюмінієві, свинцеві, кремнієві, марганцеві, берилієві, кадмієві, хромові, цирконієві бронзи. З міді отримують також мельхіор (сплав з нікелем), дюралюміній (сплав з алюмінієм).

Нормативні документи, в яких відображені вимоги до міді та її сплавів, наведені у таблиці А1 Додатку А.

Мідь і більшість її сплавів добре обробляються тиском не лише при високих температурах, але й при низьких. При цьому, сумарні обтиснення можуть сягати 90% та вище, після чого для подальшої деформації потрібний проміжний відпал. З міді та її сплавів виробляють усі види напівфабрикатів, що отримуються обробкою тиском: плити, листи, стрічки, поковки, продукти штампування, труби, профілі, дріт (*див. нижче*). Мідь і її сплави добре зварюються і легко піддаються паянню та різанню.

До недоліків міді слід віднести її порівняно високу щільність, а також схильність до окиснення, корозійного розтріскування та «водневої хвороби» (утворення розривів і тріщин у виробах при їх нагріванні у середовищі, що містить водень).

Мідь входить до складу більш, ніж 198 мінералів, з яких для промисловості важливими є лише 17. З них для виробництва міді найбільше значення мають *халькопірит* (він же – *«мідний колчедан»*) $CuFeS_2$, *халькозін* (*«мідний блиск»*) Cu_2S, *ковелін* CuS, *борніт («пістрява мідна руда»)* Cu_5FeS_4.

Значна частина світових запасів мідевмісної сировини містить мідь в окисній формі, але основною мідною сировиною являються сульфідні руди, запаси яких в надрах Землі є найбільшими. З них у даний час виплавляється близько 90% всієї первинної міді.

Найбільш відомі родовища у світі: Джезказган і Балхаш у Казахстані, Удокан, Катугинське, Урал та Улуг-Танзек (Росія), міденосний пояс Центральної Африки, Мансфельд у Німеччині. Інші найбагатші родовища міді знаходяться в Чилі (Еськондіда і Кольяусі) і США (Моренсі, Томас-Рейндж, Спер-Маунтін), а також – Гурайя (Саудівська Аравія), Уоджіна (Австралія), Сейс-Лагос (Бразилія).

Інколи зустрічається багата окисна і самородна мідь. Саме вона і представляє найбільший інтерес для нашої країни оскільки на території України розвідано два родовища самородної міді: Північно-Західний регіон України (Житомирська, Рівненська, Волинська області) і окисна копальня на Донбасі.

Для виплавки міді необхідно затратити руди або концентратів в п'ять-шість разів більше, ніж палива. Тому міделиварні підприємства будують, зазвичай, у районах розташування її родовищ.

Основними підприємствами з переробки міді в Україні являються: Артемівський завод з обробки кольорових металів, 9 виробничо-заготівельних регіональних підприємств «Вторкольормет», СП «Донкавамет», «Укргермет», науково-виробнича фірма «Форум», фірма «КАТЕХ» та ін.

Мідні руди і концентрати мають однаковий мінералогічний склад і відрізняються лише кількісним співвідношенням між різними мінералами, тому фізико-хімічні основи їх металургійної переробки однакові.

Як і для багатьох інших кольорових металів, принципові схеми виробництва міді багатостадійні, що, насамперед, визначається поліметалічним характером мідних руд і відносно малим вмістом у них визначального елемента.

Для переробки сировини, що містить мідь, застосовують як піро-, так і гідрометалургійні процеси.

У загальному обсязі виробництва міді на долю пірометалургійних способів доводиться близько 85% світового випуску цього металу.

Пірометалургійна технологія виробництва міді передбачає переробку початкової сировини (руди або концентрату) на чорнову мідь з подальшим її обов'язковим рафінуванням [19].

Пірометалургійна переробка мідних руд або концентрату реалізується за наступною технологічною схемою:

– окиснювальне випалення;

– плавка на штейн (побічний або проміжний продукт виробництва) за варіантом I або на чорнову мідь (варіант II);

– конвертація мідних штейнів;

– вогняне рафінування чорнової міді;

– електролітичне рафінування;

– переплав.

В окремих випадках можливе виключення початкових стадій.

Основною метою *окиснювального випалення сульфідних мідних концентратів* є часткове видалення з них сірки. Окрім цього, при окиснювальному випаленні здійснюється переведення частини сульфідів заліза у форму оксидів, які переводяться у шлак при подальшому плавленні огарка.

Реалізуються цей процес у багатоподових печах з перегрібанням шихти або в печах киплячого шару.

Конструкція багатоподової печі забезпечує рух матеріалів, що обробляються, зверху до низу зигзагоподібно, переміщаючи їх з подів вищих рівнів на поди, які розташовані нижче. Гази в печі рухаються противоточно шихті.

Процес випалення складається з таких основних стадій: нагрів і сушка шихти, термічна дисоціація вищих сульфідів, займання і горіння сульфідів.

Нагрів і сушка концентрату і флюсів відбувається на верхніх подах печі. Флюси додаються у шихту з метою понизити загальний вміст сірки для запобігання спіканню. Як флюси використовують вапняк, кварцовий пісок, іноді гірські породи, що містять, зокрема, золото і срібло.

При подальшому нагріві шихти до температур 350…400 °С майже одночасно починають відбуватися процеси дисоціації сульфідів, їх займання та горіння.

У цілому, окиснювальне випалення мідних концентратів проводять в температурному інтервалі 750…850 °С. При вищих температурах можуть починатися процеси плавлення сульфідів і спікання шихтових матеріалів, що є неприпустимим.

Окрім цього, випалення забезпечує добре змішування всіх компонентів шихти та зниження до 2-х разів витрат палива при наступному переробленні у відбивних печах.

Отримуваний огарок характеризується наявністю не тільки сульфідів, але й оксидів металів і практично повною відсутністю вищих сульфідів.

При проведенні випалення можливе утворення невеликих кількостей сульфатів міді $CuSO_4$ і заліза $FeSO_4$.

Гази, що відходять, містять 6…7% SO_2. Після виходу з випалювальної печі вони проходять трьохстадійне очищення від пилу в циклонах і трубчастому електрофільтрі. Уловлений пил об'єднують з огарком і відправляють у відбивну піч, де відбувається плавка на штейн.

Безповоротні втрати міді при випаленні концентратів не перевищують 0,5%.

Сучаснішим агрегатом для випалення мідних концентратів є *печі киплячого шару*, в яких фізико-хімічні процеси практично не відрізняються від тих, що описані вище. Їх продуктивність у 4…5 разів вище, вміст SO_2. у газах, що відходять, знаходиться на рівні 13…15%, але пилевинос з печі збільшується приблизно в два рази.

Наступною операцією є *плавка на штейн*. Основною метою цієї операції являється одержання двох рідких продуктів: *штейну* і *шлаку*.

Мідні штейни складаються, в основному, з сульфідів міді Cu_2S і заліза FeS. При цьому вирішуються задачі якомога повнішого переведення міді та низки інших цінних компонентів (у першу чергу – благородних металів) у штейн, а також шлакування порожньої породи та частини заліза у вигляді оксидів.

Плавку на штейн можна реалізувати в різних пічних агрегатах: в електропечах, в печах шахтного типу та інших. Зокрема, *відбивна плавка* відрізняється достатньо широкою універсальністю, оскільки придатна для переробки багатьох видів флотаційних концентратів. Це є основною причиною її широкого розповсюдження в мідній промисловості до теперішнього часу.

Суть відбивної плавки полягає в тому, що шихта, яка завантажується, плавиться за рахунок тепла від віпромінювання спалюваного вуглеводневого палива (природний газ,

мазут, вугільний пил та ін.). Факел, що утворюється при горінні палива, розташовується над поверхнею розплаву. Спалювання палива у відбивних печах ведуть при коефіцієнті 1,05 надлишку повітря, тобто в слабо окиснювальній, майже нейтральній атмосфері. Температура газів на певній відстані від стінок 1250…1600 °С. При цьому враховують, що відвальний шлак має температуру плавлення 1150…1200 °С.

Процес плавки у відбивній печі можна представити таким чином. В міру нагрівання починають плавитися легкоплавкі складові шихти – сульфідні та оксидні евтектики. Первинний розплав, що утворюється при цьому, стікає по поверхні укосів, розчиняючи у собі більш тугоплавкі компоненти шихти, і потрапляє до шлакового розплаву. З цієї миті фактично починається розділення шлакової і штейнової фаз. Краплі оксидної фази розчиняються в загальній масі шлаку, присутнього в печі постійно, а краплі штейну проходять через шар шлаку і утворюють у нижній частині ванни самостійний шар. Час перебування розплаву у відбивній печі становить 10…14 годин.

Регулювати склад отримуваних штейнів у відбивній печі неможливо. Тому контроль усього процесу в цій печі зводиться до шлакоутворення, зокрема, за взаємодією розплавленого шлаку з конвертерним (*див. далі*), який періодично заливається в піч. Конвертерний шлак містить вищі оксиди заліза і оксиди міді (до 3,5% у перерахунку на мідь).

Випуск штейну проводиться через льотки періодичної дії або через сифонні пристрої, що працюють за принципом сполучених посудин. Сифон для штейну може працювати у безперервному режимі. Вихід штейну і вміст у ньому міді повністю визначається складом початкової шихти. Вилучення міді та благородних металів у штейн сягає 96…99,5%. Штейн зазвичай містить (у % за масою): *Cu* (15…55), *Fe* (15…50), *S* (20…30). Крім цього, в штейні містяться й інші метали: *Zn, Ni, Pb, Sn*, а також – благородні і рідкісні метали.

Для випуску шлаку використовують шлакові вікна. Вихід шлаку по масі перевищує вихід штейну в 1,1…1,5 рази. Від кількості шлаку, що утворюється, залежать втрати з ним міді, а також витрати палива та флюсів. Відвальний шлак складається із SiO_2, *FeO, CaO,* Al_2O_3 і містить від 0,1 до 0,5% міді.

До недоліків відбивної плавки, не дивлячись на її широке розповсюдження в мідній промисловості всього світу, відносяться:

– низька питома продуктивність (5…8 т/м^2 поду печі на добу);

– висока витрата палива, хоча сульфідні матеріали самі є частиною палива;

– низький тепловий коефіцієнт корисної дії – к.к.д. (до 30%);

– неможливість регулювати склад отримуваних штейнів;

– труднощі з очищенням і утилізацією сірковмісних газів.

Істотне підвищення продуктивності (до 10…12 т/м^2 добу), зниження втрат тепла з газами, що відходять, завдяки зменшенню їх кількості і зниженню температури на виході, і як наслідок, підвищення теплового к.к.д. до 70% досягається при плавці на штейн в *електричних руднотермічних печах*. Проте цей процес пов'язаний з істотною витратою електроенергії (від 380 до 500 кВт-год/т шихти залежно від складу і вологості початкових мідних концентратів).

Основною метою наступного *процесу конвертації* є одержання чорнової міді шляхом окиснення заліза (з переходом його у шлак) і окиснення сірки (з переходом її в газову фазу).

У виробничій практиці мідеплавильного виробництва, як правило, використовуються бесемерівські горизонтальні конвертери типу Пірс-Сміт (рисунок 1.20).

Усе технологічне обслуговування процесу здійснюється через горловину 6, яка знаходиться в середній частині корпусу. Повітряне дуття подається через фурми 7, розташовані на одній стороні корпуса по його твірній.

У першому періоді, завдяки вищій спорідненості заліза до кисню у порівнянні з міддю, відбувається окиснення сульфідів заліза до його нижчого оксиду, який переходить у шлак. Штейн, що залишився завдяки цьому, збагачується міддю.

Для глибокого переходу заліза у шлак шляхом зниження активності його оксиду в конвертер присаджують кварцовий флюс. В результаті, утворюється *файєліт* ($2FeO{\cdot}SiO_2$), що супроводжується істотним екзотермічним ефектом і дещо знижує енергетичні витрати на плавлення флюсу. Перший період процесу конвертації носить циклічний характер.

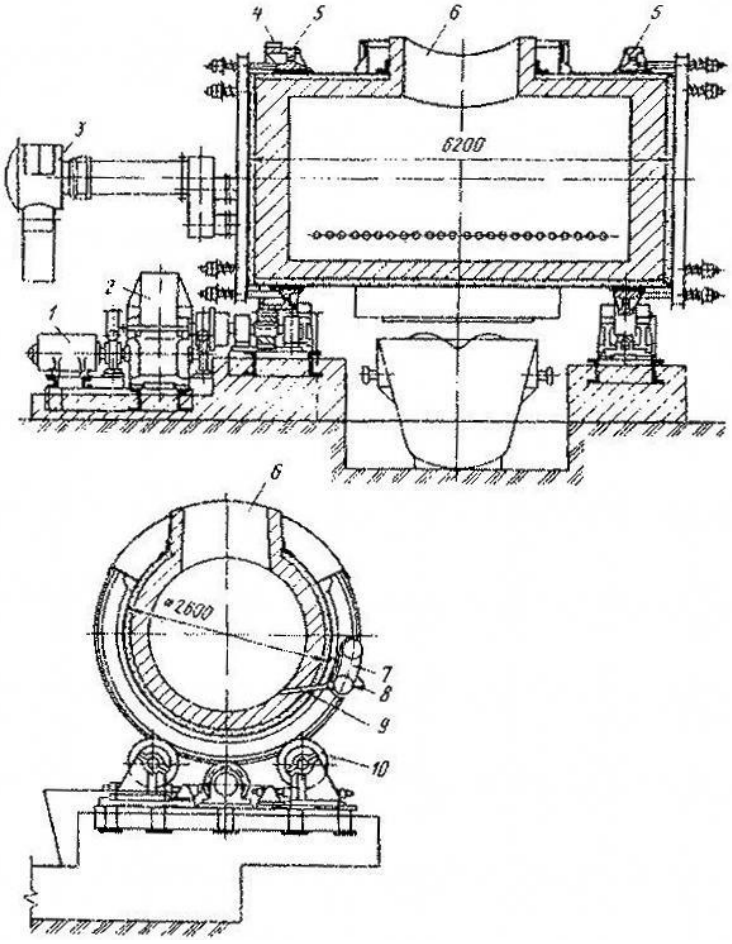


Рисунок 1.20 – Схема горизонтального конвертера [19]: 1 – електродвигун; 2 – редуктор; 3 – сальниковий пристрій; 4, 5 – зубчатий і опорний бандажі; 6 – горловина; 7 – фурма-колектор; 8 – кульковий клапан; 9 – фурмена трубка; 10– опорний ролик

Кожен цикл складається з операцій:

– заливка рідкого штейну;

– завантаження кварцового флюсу та інших твердих домішок;

– продування розплаву повітрям;

– злив конвертерного шлаку.

Після кожного циклу продування в конвертері залишається збагачена міддю сульфідна маса. Її кількість та процентний вміст міді в розплаві поступово зростають до граничної величини, що відповідає складу напівсірчанистої міді Cu_2S. Тому тривалість першого періоду конвертації, який називають *набором сульфідної маси*, залежить від складу початкового штейну і інтенсивності дуттєвого режиму плавки. Тривалість першого періоду може коливатися від 6 до 24 годин.

Після зливу останньої порції шлаку в конвертері залишається майже чиста напівсірчиста мідь – *білий штейн* (78…80% *Cu*), або так званий *«білий матт»*.

Другий період конвертації, який закінчується одержанням чорнової міді, проводиться безперервно протягом 2…3 годин без завантаження будь-яких твердих і

оборотних матеріалів і при подачі тільки повітря. Як правило, чорнова мідь містить не менше 96% міді.

Готову чорнову мідь залежно від місця проведення конвертації або заливають у міксер і далі, за мірою потреби – до рафінувальних агрегатів, або розливаюсь у злитки масою до 2 тонн і відвантажують на рафінувальні заводи.

Гази процесу конвертації, що містять до 7% SO_2, використовують для отримання сірчаної кислоти.

Пряме використання чорнової міді, споживачами не допускається унаслідок присутності домішок, які погіршують найважливіші властивості міді. Окрім цього, чорнова мідь містить ряд цінних елементів-супутників, які доцільно вилучати. Тому вся чорнова мідь піддається подальшому *рафінуванню*, яке реалізується у декілька стадій.

Зокрема, метою *вогняного рафінування* міді [23] є максимально можливе вилучення домішок, які мають підвищені порівняно з міддю спорідненість до кисню. На цій стадії з міді прагнуть видалити сірку, залізо, нікель, цинк, свинець, миш'як, олово та інші елементи, а також розчинені в ній гази і кисень. Мідь після вогняного рафінування розливають у спеціальні злитки (*«аноди»*) пластинчастої форми (800×900×35…40 мм), вагою 240…320 кг. Тому печі для вогняного рафінування часто називають *анодними печами*. Ці печі за конструкцією дуже схожі на відбивні для плавки мідних концентратів. До відмінностей належить наявність робочих вікон із заслінками на одній з бічних стінок печі. Вікна призначені для завантаження у піч твердих матеріалів і технологічного обслуговування ванни в період рафінування.

Вогняне рафінування – періодичний процес. Він складається з ряду послідовних операцій:

– підготовка і завантаження печі;
– плавлення і розігрівання рідкої міді;
– окиснювальне рафінування;
– скачування окиснювального шлаку;
– відновне рафінування;
– випуск і розливання анодної міді.

Після розігріву металевої ванни до температури 1200 °С починається *окиснювальне рафінування* міді. Воно здійснюється за рахунок продування розплаву повітрям. Стисле повітря вдувають у ванну на глибину 300…400 мм за допомогою сталевих трубок, покритих іззовні вогнетривкою обмазкою. Трубки вводять через робочі вікна печі.

На початку процесу, з урахуванням закону мас відбувається переважне окиснення міді з наступним переходом кисню до більш активних металів.

Тривалість окиснювального рафінування залежить від ступеня забруднення початкової чорнової міді і зазвичай становить від 1,5 до 4 годин.

Оксиди металів-домішок разом з оксидом міді і кремнеземом, який завантажують у невеликій кількості для ошлакування домішок, утворюють на поверхні ванни шлак. В кінці окиснювального рафінування шлак викачують з печі дерев'яними гребками.

Вихід шлаків становить 1…2% від маси металу, і вони містять до 50% міді. Окиснювальні шлаки для вилучення з них міді, зазвичай, повертають до процесу рафінування.

Слід зазначити, що матеріали, які мають близьку з міддю спорідненість до кисню, важко окиснюються і погано переводяться у шлак. До таких домішок належать миш'як і сурма. Практично повністю при вогняному рафінуванні в міді залишаються благородні метали, а також селен і телур.

Після окиснювального продування мідь насичена киснем, вміст якого знижують на стадії *відновного рафінування*. Ця стадія реалізується шляхом обробки розплаву вуглеводнями (природний газ, мазут, свіжозрубана деревина тощо). При їх розкладанні утворюється водень і монооксид вуглецю, які взаємодіють з розчиненим оксидом міді і відновлюють мідь.

В ході відновної обробки ванна добре перемішується газовими бульбашками, що забезпечує високий ступінь відновлення оксидів міді і сприяє її глибокій десульфурації.

Тривалість періоду відновлення сягає 2,5…3,0 годин і визначається ступенем насичення ванни киснем.

Після відновного рафінування отримують компактну червону мідь, що містить не більше 0,01% сірки і 0,1…0,2% кисню. Таку мідь розливають на анодні злитки, які містять 99,4…99,6% міді.

Загальна тривалість вогняного рафінування при переробці твердої міді становить близько 24 годин.

При наступному *електролітичному рафінуванні* міді здійснюється її глибоке очищення від домішок. Другим важливим завданням цієї стадії є вилучення супутніх цінних елементів: золото, срібло, селен, телур. У середньому, одна тонна анодної міді містить 30…100 г золота і до 100 г срібла.

Суть електролітичного рафінування міді полягає в тому, що литі аноди і тонкі матриці з електролітичної міді (катоди) почергово навішують в електролітичній ванні, заповненій електролітом, і крізь цю систему пропускають постійний електричний струм. Електролітом є водний розчин сульфату міді $CuSO_4$ у кількості 160…200 г/л і сірчаної кислоти H_2SO_4 у кількості 135…200 г/л. До електроліту додатково вводять колоїдні добавки, витрата яких складає 50…60 г/т міді. Вони сприяють поліпшенню якості поверхні і структури катодних осадів.

Процес електролітичного рафінування міді включає такі елементарні стадії:

– електрохімічне розчинення міді на аноді з утворенням катіонів міді;

– перенесення катіона через шар електроліту до поверхні катода;

– електрохімічне відновлення катіона міді на катоді;

– уведення атома міді у кристалічну решітку катода (зростання катодного осаду).

При електролітичному рафінуванні міді найчастіше працюють при густині струму 240…300 А/м^2 і напрузі 0,25…0,3 В. Витрата електроенергії на сучасних мідеплавильних заводах складає 230…350 кВт·год на 1 т катодної міді.

Час нарощування повновагомого катода (60…140 кг) в електролізних ваннах становить від 6 до 15 діб.

Після ретельної промивки готові катоди направляють споживачеві або переплавляють у злитки особливої форми – *вайєрбарси*, які застосовують для виготовлення дроту або інших видів прокату.

Розчинення анода зазвичай триває 20…30 діб і залежить від його товщини і режиму електролізу. За час роботи анодів проводять 2…3 зміни катодів. Анодні залишки, що становлять 12…18% первинної маси анода, переплавляють в анодних печах у нові аноди.

Шлами, що виходять при електролітичному рафінуванні міді, переробляють з метою вилучення благородних металів, селену і телуру. Як правило, вартість цих компонентів шламу окупає всі витрати на електролітичне рафінування міді.

Виробництво титану

Титан (символ *Ti*) – поліморфний метал сріблясто-білого кольору. У періодичній системі елементів Д.І. Менделєєва титан розташований під номером 22. У найважливіших і найбільш стійких сполуках титан є чотиривалентним. Атомна маса титану 47,90. За своїм зовнішнім виглядом титан схожий на сталь. Його механічна міцність приблизно в 2 рази більше, ніж у чистого заліза, і у 6 разів вище за алюміній. За корозійною стійкістю титан перевершує корозійностійкі (нержавкі) сталі і наближається до благородних металів.

Поєднання невеликої щільності з достатньою міцністю і відмінною корозійною стійкістю в багатьох агресивних середовищах є найважливішою властивістю титану як конструкційного матеріалу.

Титан має непогані технологічні властивості. Він добре обробляється тиском: легко прокатується, кується, штампується, піддається токарній обробці. Метал добре зварюється точковим та аргонно-дуговим зварюванням.

В основному, титан широко використовується в авіабудуванні. Сплави на основі титану застосовують також при будівництві морських суден, автомобільного та залізничного транспорту. Підвищена корозійна стійкість зумовлює використання титану і його сплавів у хімічному та металургійному машинобудуванні, при виготовленні медичного інструменту та в інших областях техніки. Останнім часом титан все частіше застосовується у будівництві як захисне декоративне покриття.

Чистий титан використовують в електровакуумній промисловості для виготовлення деталей електронного устаткування. У цій області титановий порошок застосовують також як поглинач газу.

Серед відомих мінералів з титаном основне промислове значення мають два: рутил та ільменіт.

Рутил – природний діоксид титану TiO_2 – є найкращим видом сировини при виробництві титану, але великі родовища рутилових руд зустрічаються рідко.

Ільменіт $FeO \cdot TiO_2$ – найбільш розповсюджений мінерал титану. Ільменітові руди являють собою розсипні породи, які часто зустрічаються в суміші з магнетитом Fe_3O_4. Такі руди називаються *титаномагнетитами*. До 40% ільменіту видобувається з річкових і прибережних морських пісків. В цих рудах вміст титану доходить до 35%.

Перспективною сировиною для одержання титану є також *перовскітові* ($CaO \cdot TiO_2$) та *сфенові* ($CaO \cdot TiO_2 \cdot SiO_2$) руди. Їх використання стає рентабельним тільки при комплексній переробці.

Цінними елементами-супутниками титану в рудах є тантал, ніобій, цирконій і рідкісноземельні метали.

Титанові руди із вмістом титану від 6 до 35% піддають збагаченню з використанням гравітаційних методів, магнітної або електростатичної сепарації. Рутилові концентрати містять до 95% TiO_2. Приблизний склад ільменітових концентратів: TiO_2 – 42…60%; FeO – 26…34%; Fe_2O_3 – 12…25%; CaO до 2 %; SiO_2 – 1,5…3,5%; MgO – 1…3% [19, 24].

Титаномагнієва підгалузь України – єдина, яка має потужну сировинну базу титану. До підприємств цієї галузі належить «Запорізький державний титано-магнієвий комбінат», який виробляє титанову губку, титановий шлак та невелику кількість феротитану і титанового литва.

Деякі титаномагнетитові руди не піддаються механічному збагаченню. У цьому випадку для вилучення титану використовують відновлювальну плавку з одержанням чавуну та багатого титанового шлаку (80…87% TiO_2). Таку ж плавку застосовують для первинної обробки ільменітових концентратів з метою розділення титану та заліза. Її проводять у трьохелектродних круглих електропечах потужністю 3,5…20 МВА (мегавольт-ампер), подібних до сталеплавильних (*див. рис. 1.5*) або тих, що застосовуються для плавки нікелю чи електротермії цинку (*див. нижче*).

Температура такого перероблення 1650…1750 °С. Середовище повинне бути помірно відновним, при цьому вугільну футеровку не використовують. Подину викладають притертою магнезитовою цеглою, стіни захищають гарнісажем з тугоплавкого шлаку, накопиченим за особливим режимом.

Чавун, отриманий з титаномагнетитової руди, випускають через льотку, підняту над подом на 400 мм, а шлак – через шлакову льотку, іноді – разом з чавуном.

Плавку ведуть періодично або безперервно.

При періодичній плавці у титановмісних шлаках залишається всього 5% окису заліза, а при безперервному режимі – 8…15%, але безперервне перероблення продуктивніше й більш автоматизоване.

Отже, вихідною сировиною для металургійного виробництва титану можуть бути рудні концентрати і титанові шлаки, а також іноді –технічний діоксид титану, одержаний при розкладанні ільменітових концентратів сірчаною кислотою.

Уся перелічена сировина містить титан у формі TiO_2. Пряме відновлення діоксиду титану до металу пов'язано зі значними труднощами. Причиною цих труднощів є висока активність титану при підвищених температурах, особливо стосовно кисню, азоту і вуглецю. Навіть незначні кількості цих домішок ведуть до утворення оксидів, карбідів і нітридів титану. Крім того, кисень і азот здатні розчинятися у титані.

Тому на всіх стадіях виробництва титану необхідно виключити його контакт з цими елементами. Це досягається герметизацією апаратури і створенням у ній нейтральної атмосфери або вакууму. Крім того, обов'язковою умовою є висока чистота вихідних сполук титану, а також застосованих реагентів-відновлювачів.

Сьогодні найбільша частина титану, що випускається промисловістю, виробляється шляхом відновлення тетрахлориду титану магнієм або натрієм. У невеликих кількостях титан одержують відновленням його діоксиду кальцієм або гідридом кальцію.

На рисунку 1.21 наведена узагальнена технологічна схема одержання титану з ільменітових концентратів магнієтермічним способом.

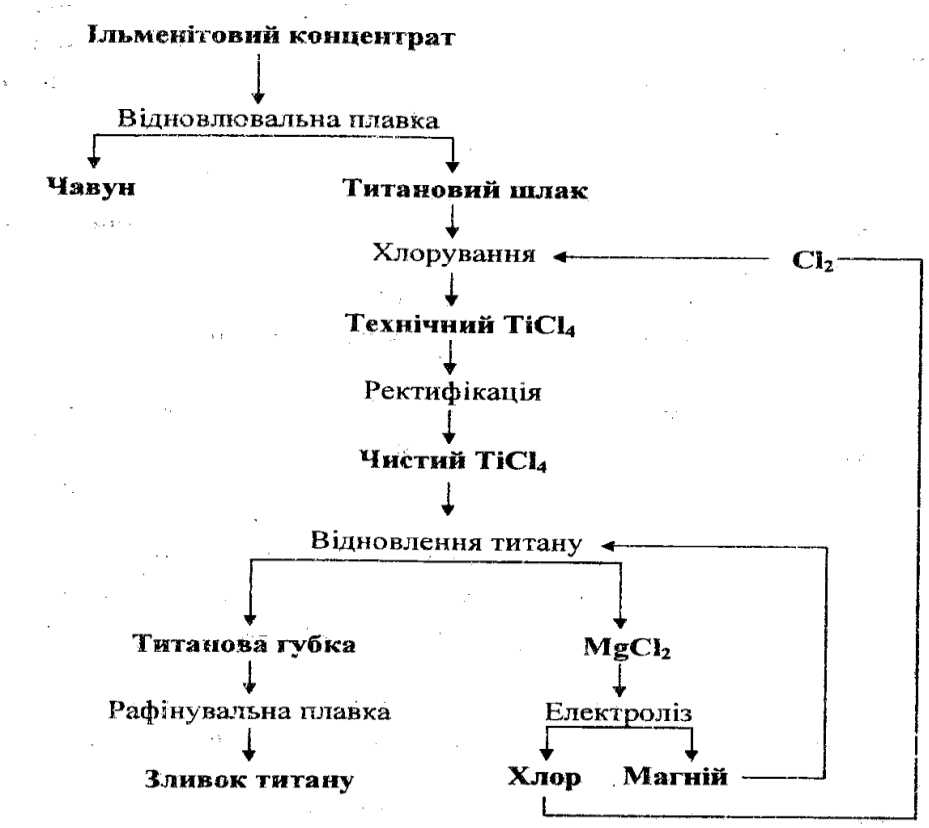


Рисунок 1.21 – Узагальнена схема виробництва титану з ільменітових концентратів магнієтермічним способом [19, 24]

Одержання чистого тетрахлориду титану складається з трьох основних технологічних операцій: а) відновлювальна плавка ільменітових концентратів або титаномагнетитових руд; б) виробництво технічного $TiCl_4$; в) його очищення від домішок (ректифікація).

Можливість розділення титану та заліза в цьому процесі заснована на великій різниці у міцності їх оксидів.

Необхідність проведення відновлювальної плавки пов'язана з тим, що пряме хлорування залізовмісних концентратів вимагає більших додаткових витрат хлору на утворення хлоридів заліза, які важко надалі використовувати.

Відновлювальну плавку проводять в електричних руднотермічних печах, що зумовлено високою температурою плавлення (більше 1500 °С) і значною в'язкістю титанових шлаків. Плавку ведуть з мінімальною добавкою флюсів або зовсім без них, щоб не знижувати вміст TiO_2 у шлаках менш за 82…87%.

Як відновлювач при плавці використовують вуглець коксу або антрациту. Шлак і чавун періодично зливають через льотку в спільну виливницю. Після розшаровування рідких фаз і їх затвердіння чавун і шлаки розділюють і направляють на відповідну переробку або споживачеві. Вилучення титану в шлак досягає 96%. Питома витрата електроенергії становить 3,5…4,5 кВт-год на 1 тонну титанового шлаку.

Тетрахлорид титану одержують обробкою подрібненого титанового шлаку або рутилового концентрату газоподібним хлором у присутності вугілля при 700…900 °С.

Крім оксиду титану, хлор взаємодіє з кисневими сполуками інших елементів, що є у вхідній шихті. При цьому утворюються легкі хлориди заліза, кремнію, ванадію та ін.

Хлорування титановмісних матеріалів може здійснюватись у сольовому розплаві та у киплячому шарі. Так, для хлорування брикетованих шихт можуть використовуватись шахтні електропечі (рисунок 1.22) або шахтні хлоратори безперервної дії з рухомим шаром брикетів.

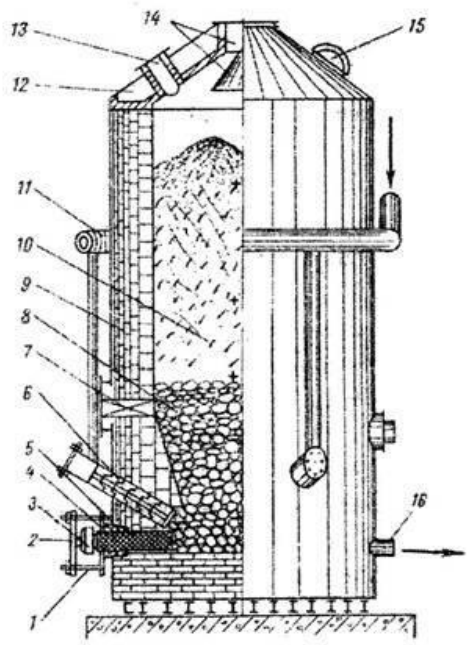


Рисунок 1.22 – Схема шахтної електропічі для хлорування титановмісних брикетів [19, 24]: 1 – кріплення електродів; 2 – траверса; 3 – водоохолоджувальний кесон; 4 – електрод; 5 – ущільнювач; 6 – фурма; 7 – очищувач газу; 8 – вугільний шар; 9 – футеровка; 10 – брикетована шихта; 11 – підведення хлору; 12 – склепіння печі; 13 – відвід паро-газової суміші; 14 – розподільний конус; 15 – вибуховозапобіжний клапан; 16 – злив розплаву

Основним недоліком хлорування брикетів є великі витрати на їх виготовлення. Одним із способів, що усувають цей недолік є хлорування в сольовому розплаві, що проводять у відпрацьованому електроліті магнієвих електролізерів, який складається з

хлоридів калію, натрію, кальцію та магнію. Процес проводять при 800…850 °С. Необхідна температура підтримується за рахунок теплоти екзотермічних реакцій. Надлишкова теплота відводиться за допомогою водоохолоджуваних кесонів.

Найпоширеніша схема очистки та конденсації включає уловлення твердих хлоридів у пилових камерах і рукавних фільтрах і сублімацію пари $TiCl_4$ у конденсаторах.

Перспективний метод хлорування діоксиду титану в киплячому шарі (КШ) ще не знайшов широкого застосування у промисловості, незважаючи на його значні переваги.

В апараті КШ забезпечуються високі швидкості протікання реакції, простота регулювання процесу і його безперервність. Крім того, цей метод, як і хлорування в сольовому розплаві, не вимагає брикетування шихти. Основними причинами обмеженого використання процесу хлорування в КШ є труднощі підбору оптимальної крупності вихідних шлаків (або рутилу) і коксу, яке б забезпечувало стабільне спільне «кипіння» часток усіх компонентів шихти у газовій фазі та незначний пилевиніс матеріалу.

Одержаний в результаті конденсації технічний тетрахлорид титану зазвичай містить: 97…99% $TiCl_4$; 1,0…2,5% $SiCl_4$; 0,003…0,02% $FeCl_3$ і до 0,2% VCl_4. Вилучення титану в тетрахлорид зі шлаків становить 92…93%.

Далі технічний тетрахлорид титану очищають від домішок методом ректифікації, яку проводять у ректифікаційних колонах з нержавіючої сталі у дві стадії. Спочатку при 60…130 °С возгоняють найбільш низькокиплячий компонент $SiCl_4$ (температура кипіння 57 °С). Одержаний залишок, що містить $TiCl_4$ з домішкою висококиплячих хлоридів, направляють у другу колону з температурою 136 °С. У цій стадії переважно возгоняється і переходить у дистилят чистий $TiCl_4$, а VCl (температура кипіння 164 °С) та $FeCl_3$ (температура кипіння 319 °С) залишаються у кубовому залишку.

Вилучення титану в очищений продукт з технічного тетрахлориду становить близько 96%. Очищений $TiCl_4$ містить домішки у кількості 10^{-5} …10^{-3} % і є сировиною для одержання металевого титану.

За *магнієтермічним способом* відновлення тетрахлориду титану до металевого стану проводять магнієм у сталевих герметичних апаратах в атмосфері аргону або гелію. Апарат включає піч з електричним або газовим обігрівом та сталеву реторту з кришкою, обладнаною патрубками для завантаження твердого або рідкого магнію.

У реторту, де перебуває магній, з напірного бака надходить $TiCl_4$, і його пара взаємодіє з магнієм. Реакція є екзотермічною. Енергії, що виділяється, цілком достатньо для спонтанного перебігу процесу без додаткового підводу тепла. Нагрівання реторти необхідне тільки на початку та наприкінці операції. При цьому, процес можна вести тільки в інтервалі температур 720…975 °С. Нижня температурна межа обмежена температурою плавління $MgCl_2$, а верхня – початком взаємодії титану із залізом реторти. Оптимальну температуру підтримують регулюванням швидкості подачі $TiCl_4$.

Відновлений титан одержують у вигляді губки.

Теоретично, матеріали в реторті повинні розділятися на 3 шари: рідкий магній, хлорид магнію та губчатий титан. Фактично ж більша частина рідких фаз усмоктується губчастим титаном. Це сповільнює реакцію відновлення. Тому для більш повного використання робочого об’єму реторти $MgCl_2$ періодично випускають (до 75…85% від його загальної кількості) і направляють у магнієве виробництво на електроліз для регенерації магнію та хлору.

Застосовані на титанових заводах апарати для магнієтермічного процесу дозволяють одержувати за одну операцію 500…3800 кг титанової губки.

Титанова губка являє собою пористу спечену масу титану (55…65%), просочену залишками $MgCl_2$ (25…35%) і надлишкового магнію (9…12%). Цей продукт зветься *реакційною масою*.

Для очищення реакційної маси, здебільшого, застосовують вакуумну дистиляцію, що заснована на відносно високій пружності пари магнію та його хлориду у порівнянні з титаном при 850…950 °С.

Температура дистиляції становить 950…1000 °С, а вакуум у середині реторти – 0,01Па.

Магній і його хлорид, пари яких утворюють у конденсаторі кристалічну друзу, відправляють на виробництво магнію (*див. нижче*).

Процес вакуумного очищення губчастого титану триває 50…60 годин для апарата місткістю 2 т губки. Післч закінчення процесу реторту витягують з печі і транспортують в окреме приміщення, де її демонтують, а губку вибивають за допомогою пневматичних зубил або на пресі.

Титанова губка першого сорту марки ТГ-100 повинна містити не більше 0,08% *Cl*, 0,07% *Fe*, 0,02% H_2, 0,03% *C*, 0,04% *Si*, 0,04% O_2, решта – *Ti*.

У наявний час більшість заводів з виробництва титану використовує *натрієтермічний процес* одержання цього металу. Він характеризується відновленням $TiCl_4$ натрієм в інтервалі температур 801…883 °С, що обмежується «знизу» температурою плавлення хлористого натрію, а «зверху» – температурою кипіння натрію. У цих умовах взаємодіють, в основному, газоподібний $TiCl_4$ і рідкий натрій.

Відновлення ведуть в атмосфері аргону в апаратах з нержавкої сталі, куди одночасно подають тетрахлорид титану і рідкий натрій у співвідношенні, близькому до стехіометричного. Спершу з апарату відкачують повітря, заповнюють аргоном і нагрівають у печі до 560…700 °С. Після початку процесу відновлення піч виключають, і відновлення йде повністю за рахунок теплоти хімічних реакцій. Надлишкова теплота відводиться обдуванням реторти повітрям.

Готову реакційну масу, що містить 17% *Ti*, 83% *NaCl* і незначні домішки натрію, вирізають з реторти на верстаті спеціальною фрезою і подрібнюють у молотковій дробарці до крупності 10 мм.

Виділення титану з подрібненої маси проводять вилуговуванням водою. Після розчинення *NaCl* титановий порошок відокремлюють від розчину на центрифузі і сушать у вакуумній сушарці. Порошок має крупність від 0,2 до 2,4 мм. Середній вміст домішок у ньому 0,01…0,07% *C*, 0,04…0,15% O_2, 0,001…0,02% N_2, 0,05…0,019% H_2O.

Натрієтермічний процес має ряд переваг:

– легкість транспортування натрію по трубах і точність дозування при подачі його до реактора внаслідок низької температури плавління (98 °С);

– високі швидкості відновлення $TiCl_4$ при 100%-му використанні відновника;

– простота відділення продукту реакції (NaCl) від металевого титана водним вилуговуванням;

– титан одержується у вигляді порошку, що полегшує його виділення з реакційної маси і дозування при подальшому використанні.

До недоліків варто віднести більшу ємність апаратури внаслідок малої щільності натрію; труднощі відведення теплоти при високій швидкості екзотермічного процесу і більш жорсткі вимоги відносно дотримання правил техніки безпеки через високу хімічну активність натрію, який легко самозаймається на повітрі.

У невеликих кількостях титан також можна одержати *прямим кальцієтермічним відновленням*. Сировиною для цього процесу служать чисті рутилові концентрати та TiO_2, вилучений сірчанокислотним способом з ільменіту, або одержаний $TiCl_4$.

Метод базується на тому, що з доступних відновників, що можуть відновити TiO_2 до металу, найбільшу спорідненість до кисню має кальцій. Однак навіть у цьому випадку не вдається одержати титан, що містить менш 0,2% кисню.

Кальцієтермічні відновлення протікають за екзотермічною реакцією, але теплоти, що виділяється, недостатньо для автогенного протікання процесу, тому необхідним є зовнішній підігрів.

Відновлення ведуть в атмосфері аргону при 1000…1100 °С, коли кальцій перебуває у рідкому і частково в пароподібному стані. Для відновлення TiO_2 потрібно застосовувати очищений дистиляцією кальцій, щоб уникнути забруднення титану домішками азоту і вуглецю. У результаті відновлення TiO_2 кальцієм одержується дрібнодисперсний (2…3 мкм) порошок титану.

Кальцієтермічне відновлення TiO_2 проводять у герметичних ретортах з жаростійкої сталі. Шихту, що складається із суміші TiO_2, Ca і хлориду кальцію, перед завантаженням брикетують. Добавка $CaCl_2$ сприяє укрупненню зерен титану.

Продукт відновлення подрібнюють, обробляють спочатку водою, потім розведеною оцтовою, азотною або гідрохлоридною кислотою, знову промивають водою і сушать. Для зниження вмісту кисню до 0,2% і менше застосовують повторне відновлення титанового порошку кальцієм. У результаті, кількість титану у продукті після кальцієтермічного відновлення TiO_2 становить 98,5…99%.

Відновлення TiO_2 *гідридом кальцію* CaH_2 є різновидом кальцієтермічного процесу, в результаті реакції якого одержується не металевий титан, а його гідрид TiH_2. Це є певною перевагою технології тому, що порошок гідриду титану в меншому ступені окиснюється при відмиванні оксиду кальцію водою, ніж титановий порошок.

Порошок гідриду титану використовують у порошковій металургії.

Для одержання титану високої чистоти, в основному, використовують *йодидний спосіб рафінування*, заснований на оберненості реакції утворення і термічного розкладення газоподібного йодиду титану (TiI_4). При цьому, забруднений титан реагує при підвищеній температурі з парами йоду, утворює йодид, який також перебуває у пароподібному стані. Він контактує з розпеченим титановим дротом і дисоціює на чистий титан та йод. Титан відкладається на дроті, а йод знову вступає у взаємодію з титаном, що рафінується. На поверхні дроту поступово нарощується титан. В результаті, залежно від режиму проведення процесу, одержують цільні прутки або крупнокристалічні менш компактні відкладення.

Йодидне рафінування дозволяє підвищити вміст титану у продукті до 99,90…99,95% та вивести з нього ряд домішок, забезпечивши їх кількість у межах: 0,0015…0,002% *Mg*; 0,005…0,01% O_2; 0,001…0,004% N_2; 0,01…0,03% *C*.

У виробничих масштабах процес йодидного очищення ведуть у спеціальних апаратах (рисунок 1.23), виготовлених із хромнікілевого сплаву, стійкого проти дії пари йоду та йодиду титану.

Забруднений титан у вигляді губки або порошку завантажують у кільцевий зазор між стінкою реактора і молібденовою сіткою. Титановій дріт діаметром 3…4 мм (нитка розжарення) за допомогою розтяжок з молібденових гачків закріпляють на ізоляторах. Йод у скляній ампулі поміщають у термостат.

Після створення вакууму реактор від'єднують від вакуумної системи і пускають йод. Для подачі йоду спеціальним пристроєм розбивають ампулу. Пари йоду поширюються по всьому об'єму реактора і починають взаємодіяти з титаном. Йодид титану, що утворюється при цьому, також займає весь об'єм робочої камери. Коли крізь титанову нитку починають пропускати електричний струм, вона розжарюється, і на ній починається процес термічної дисоціації TiI_4. Практично до реактора вводять 7…10% йоду від теоретичної потреби для йодування всієї маси завантаженого титану.

Можливе також *електролітичне рафінування титану*. Анодом при електролізі служить забруднений домішками титан, занурений у розплавлений електроліт з хлоридів лужних металів (*NaCl* або суміш *NaCl+KCl*). У процесі електролізу титан переходить до

електроліту і осаджується на сталевому катоді. Електроліз ведуть в атмосфері аргону при 850 °С і катодній густині електричного струму 0,5…1,5 А/см^2.

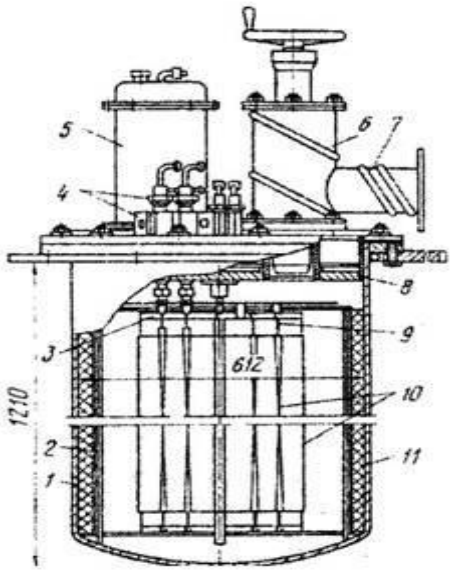


Рисунок 1.23 – Схема апарату для йодидного рафінування титану [19, 24]: 1 – реактор; 2 – молібденова сітка; 3 – підвіс; 4 – струмовідвід; 5 – термостат з ампулою йоду; 6 – вакуумний затвор; 7 – вакуумний патрубок; 8 – кришка; 9 – молібденові гачки; 10, 11 – титанові нитка та губка

Губчастий титан непридатний для безпосереднього використання в якості конструкційного металу. Для цього губку слід перетворити на компактний матеріал. Головною складністю при здійсненні відповідного переплаву є здатність титану реагувати з газами і з усіма вогнетривкими металами.

На ранніх стадіях розвитку та виробництва компактного металу губчастий титан плавили в індукційних печах з графітовим тиглем у вакуумі. Однак у цьому випадку одержували метал, що містить не менш 0,25% вуглецю, який різко погіршував фізико-механічні властивості титану через утворення його карбіду.

Основним сучасним промисловим способом одержання компактного титану є вакуумно-дугова плавка (ВДП). Цим способом одержують злитки діаметром 350…500 мм і масою до 10 тонн.

При виробництві компактного титану із застосуванням ВДП реалізують такі операції [19]:

- завантаження витратного електрода у кристалізатор;
- центрування електрода;
- установлення зібраного комплекту: «витратний електрод – кристалізатор» у піч та приварювання витратного електрода до контактного перехідника електричного живлення;
- плавлення електроду на злиток у полум’ї дуги, що виникає між витратним електродом і розплавленим металом;
- розділення кристалізатора та злитка;
- зварювання злитків.

«Горіння» дуги у вакуумі забезпечується присутністю у вузькому зазорі між розплавом і витратним електродом іонізованої пари титану. Для регулювання форми дуги і запобігання виникненню побічних дуг (наприклад, між стінкою тигля та електродом)

застосовують магнітну катушку (соленоїд), розташовану ексцентрично відносно кристалізатора.

Використовують силу електричного струму 8…9 кА при напрузі 25…30 В. Швидкість плавки коливається від 3,7 до 4,5 кг/хв. Виплавлений у дугових печах метал містить не менш 99,8% титану.

Плавку титанової губки в компактний злиток можна проводити також у вакуумних дугових печах з невитратним вольфрамовим електродом. Титанова губка в цьому випадку подається із шихтового бункера в зону горіння дуги.

Методом дугової вакуумної плавки одержують також леговані титанові сплави. Легуючі добавки вводять або в шихту при пресуванні електрода, або в зону «горіння» дуги. У кожному разі одержаний злиток вимагає повторного переплавлення з метою підвищення рівномірності складу сплаву. При переплавленні первинний злиток використовують як витратний електрод.

Різновидом дугової вакуумної плавки титану та низки інших тугоплавких кольорових металів є *дугова гарнісажна плавка* з розливанням металу у виливницю. За цим методом спочатку з витратного електрода у мідному кристалізаторі із зовнішнім соленоїдом наплавляють злиток. По його готовності витратний електрод замінюють на вольфрамовий і злиток розплавлюють таким чином, щоб на стінках кристалізатора залишався шар твердого металу (*гарнісаж*). Ванну розплаву витримують якийсь час для її дегазації і розкиснення. Потім за допомогою соленоїда і дуги розплав перегрівають, і за рахунок цього проплавляють отвір у донній частині гарнісажу, через який і розливають метал у злитки. Гарнісажна плавка забезпечує одержання однорідних за складом злитків з дрібнозернистою структурою.

Для одержання однорідних дрібнозернистих злитків титану та його сплавів знаходить застосування також *електрошлаковий переплав*. Розробляються процеси плавки титану в плазменно-дугових печах (*див. вище*).

Компактний титан може бути одержаний також методом порошкової металургії (*див. нижче*). Механічні властивості титану, одержаного цим способом, практично не відрізняються від титану, виплавленого у дугових печах. Однак через обмеженість розмірів заготовок метод порошкової металургії перспективний тільки у випадку масового виготовлення виробів невеликих розмірів.

Магнієтермічний спосіб одержання титану з тетрахлориду (*див. вище*) виявляється економічно і технологічно доцільним тільки при комбінуванні титанового і магнієвого виробництв, що забезпечує найбільш раціональне використання матеріалів.

Виробництво магнію

Магній – широко поширений у природі елемент. У періодичній системі елементів Д.І. Менделєєва він значиться під номером 12. Атомна маса – 24,305. Щільність 1,74 г/см^3. Магній відноситься до лужно-земельних металів. Він плавиться при 650 °С і кипить при 1105 °С. Помітну летючість магній при нормальних умовах має вже при температурах близько 600 °С; вакуум прискорює його сублімацію. За електрохімічними властивостям він належить до числа найбільш електронегативних елементів.

У сухому повітрі на поверхні металевого магнію утворюється оксидна плівка, яка має пористу структуру і тому слабо захищає метал від корозії.

Вологе середовище помітно знижує корозійну стійкість магнію, особливо, при температурі більше 380 °С. З холодною водою магній реагує вельми повільно, а з гарячою водою він взаємодіє з утворенням $Mg(OH)_2$ та H_2. Тому гасіння палаючого магнію водою неприпустимо. Горіння магнію продовжується і в атмосфері вуглекислого газу. Це суттєво ускладнює гасіння пожеж, при яких горять конструкції з магнію або його сплавів.

Магній добре протистоїть дії плавикової і хромової кислот та розчинів їдких лугів. Він дуже стійкий по відношенню до мінеральних масел, бензину і гасу. Однак магній добре розчиняється у більшості інших кислот і нестійкий у водних розчинах солей.

Хімічна активність магнію різко зростає при збільшенні в ньому вмісту домішок. Такі елементи як манган, цирконій, цинк, титан покращують корозійну стійкість магнію: при додаванні до магнієвого сплаву декількох десятих відсотків титану корозійна стійкість збільшується у 3 рази.

Магній у вигляді порошку або тонкої стрічки легко запалюється і горить на повітрі яскравим полум'ям. У вигляді злитків він стійкий до займання. Загорання компактного магнію може відбутися при температурах поблизу точки плавлення металу або вище неї. Охороняють розплавлений магній від загорання за допомогою покривних флюсів, які ізолюють його від контакту з киснем навколишньої атмосфери.

Основну кількість магнію споживають у вигляді сплавів [16]. Легування магнію алюмінієм і цинком підвищує механічні та технологічні, головним чином, ливарні властивості сплавів, а манган покращує його корозійну стійкість.

Поверхню магнієвих сплавів захищають від корозії нанесенням шарів лаку, плівкою стійкішого металу, або електрохімічною та хімічною обробкою, а іноді – нанесенням шарів емалі.

Збільшення чистоти магнію розширює сфери його застосування. Умовно можна розглядати *конструкційне* та *неконструкційне* застосування магнію.

Основна перевага металевого магнію при *конструкційному застосувані* – його легкість (магній – найлегший з конструкційних металів). Технічно чистий магній має невисоку механічну міцність, проте введення в нього невеликої кількості інших елементів (алюмінію, цинку, мангану) може значно поліпшити його механічні властивості майже без збільшення питомої щільності.

На основі цих властивостей був створений відомий сплав «Електрон», що містить, окрім магнію, 6% алюмінію, 1% цинку і 0,5% мангану (нині під технічною назвою «електрон» розуміються взагалі усі сплави, в яких магній є головною складовою частиною). Щільність цього сплаву – 1,8 г/см^3; міцність на розрив – до 320 Н/мм^2; твердість за Брінелем – 400…550 Н/мм^2. Цей, а також багато інших сплавів на основі магнію широко застосовувалися в авіа– і автобудуванні. Однак виявилось, що ці сплави різко погіршують свої механічні властивості при підвищенні температури.

В результаті, шляхом уведення добавок різних елементів: цирконію, торія, цинку, срібла, міді, берилія, титану й ін., – було створено безліч нових сплавів, що відрізняються значно кращими механічними і антикорозійними властивостями, а також підвищеною жароміцністю. Подібного роду сплави знайшли широке застосування в авіації і ракетобудуванні. Крім того, було створено велику кількість різноманітних сплавів, в яких магній не є головною складовою частиною. Найважливішим з таких сплавів є «магналій» – сплав алюмінію з 5…30% магнію. Магналій твердіше і міцніше за чистий алюміній, легше обробляється і полірується.

Як «магналій», так і «електрон» на повітрі покриваються захисною окисною плівкою, що оберігає їх від подальшого окиснення.

Багато магнієвих деталей застосовуються нині у різних областях електротехніки. Магнієві сплави перевершують сталь і алюміній за питомою жорсткістю і тому застосовуються для виготовлення деталей, що піддаються навантаженням (подовжнім і поперечним), що вигинають. Магнієві сплави немагнітні, не дають іскри при ударах і терті, легко обробляються різанням (у 6…7 разів легше за сталь, в 2…2,5 рази – ніж алюміній). Невелика вага виробів з магнієвих сплавів стала також важливою причиною застосування їх для виготовлення різних побутових предметів і апаратури.

Магнієві деталі дуже добре поглинають вібрацію, що важливо для різноманітних транспортних засобів. Питома вібраційна міцність магнію майже в 100 разів більше, ніж у кращих алюмінієвих сплавів, і в 20 разів більше, ніж у легованої сталі.

Магній і його сплави володіють дуже високою хладостійкістю.

На стійкості магнія у бромі та йоді засновано застосування його для виготовлення резервуарів для їх зберігання. Крім того з нього роблять бензобаки та ємності для зберігання нафти та нафтопродуктів.

Неконструкційне засосування магнію базується на його фізико-хімічних властивостях.

Завдяки великій хімічній спорідненості до кисню магній здатний віднімати його у багатьох оксидів. На цій властивості магнію заснована *магніетермія* – спосіб отримання інших металів витісненням їх магнієм зі з'єднань Прикладом є його застосування у виробництві титану (*див. вище*) і берилію. За допомогою магніетермії були також отримані такі важковідновлювані метали як ванадій, хром, цирконій та інші.

Магній використовується для рафінування вторинного алюмінію від домішків магнію шляхом переплавки металу з рідкими хлоридними флюсами, що містять кріоліт. В цьому випадку магній з металевої фази переходить до сольової форми фтористого магнію (*див. вище*).

Велика хімічна активність магнію по відношенню до кисню дозволяє застосовувати його в якості розкиснювача у виробництві сталі і кольорового лиття, а також (у порошкоподібному вигляді) для обезводнення органічних речовин (спирту, аніліну та ін.).

Важливе значення у сучасній хімічній технології отримав синтез складних речовин за допомогою магнійорганічних з'єднань. Таким шляхом був синтезований, зокрема, вітамін А.

Високий електронегативний електродний потенціал дав можливість з великим ефектом застосовувати магній в якості матеріалу для анодів при катодному захисті від корозії сталевих і залізних споруд, що знаходяться у вологому грунті.

Легка займистість дисперсного магнію і здатність його горіти сліпучим білим полум'ям довгий час використовувалася у фотографії.

Магнієвий порошок застосовують також в якості висококалорійного пального в сучасній ракетній техніці.

Уведення до 0,05% *Mg* до чавуну дозволило значно підвищити ковкість і опір розриву останнього.

Глибоке очищення магнію від домішок, досягнуте останнім часом, дозволило використати його в якості одного з компонентів при синтезі напівпровідникових сполучень.

У природі магній зустрічається тільки у вигляді численних природних хімічних сполук, утворюючи великі родовища магнієвих руд; його сполуки перебувають у великих кількостях у воді морів, океанів і соляних озер.

У даний час, при отриманні магнію використовують такі його мінерали: *магнезит*, *доломіт*, *карналіт* і *бішофіт*.

Металевий магній отримують двома способами: *електролітичним* і *термічним*.

В основі *електролітичного способу виробництва* лежить принцип електрохімічного виділення магнію з його розплавленого хлориду. Цей спосіб у даний час є основним у магнієвій промисловості всього світу.

Метод передбачає отримання магнію за три стадії: а) виробництво чистого безводного хлориду магнію $MgCl_2$; б) електроліз розплавленого хлориду; в) рафінування магнію.

Залежно від виду сировини, що переробляється і способу отримання хлориду можливі варіанти технологічних схем отримання електролітичного магнію з карноліту, бішофіту або магнезиту [16].

З *природного карналіту* шляхом гідрохімічного збагачення отримують штучний карналіт, який після зневоднення змішують з $MgCl_2$ з титанового вибництва (*див. рис. 1.21*) та віддають на електроліз.

З *бішофіту* після зневоднення отримують безводній хлорид магнію, який направляють на електроліз.

Магнезит піддають кальцинуючому відпалу з отриманням каустичного магнезиту; останній піддають хлоруванню, а отриманий $MgCl_2$ також відправляють на електроліз.

Електрохімічна сутність процесу електролітичного отримання магнію полягає в наступному. У хлоридному розплаві в результаті електролітичної дисоціації утворюються катіони металів Mg^{2+}, Na^{+}, K^{+} та аніони хлору Cl^{-}.

Під впливом постійного струму на катоді розряджаються тільки катіони Mg^{2+}.

Процес на аноді зводиться до розряду іонів хлору.

Отже продуктами електролізу є рідкий магній і газоподібний хлор.

У виробництві електролітного магнію у даний час застосовують два типи електролізерів: діафрагмові і бездіафрагмові.

Сучасний *діафрагмовий електролізер* складається з окремих електрохімічних осередків, які займають певні частини об'єму ванни з одним вугільним або графітованим анодом, заповнені електролітом і обмежені з двох боків сталевими катодними електродами.

Кількість осередків у промислових електролізерах може бути різною і визначається їх одиничною потужністю. Багаторічною практикою і рядом досліджень доведені переваги більш потужних електролізерів. До теперішнього часу створені магнієві електролізери на силу електричного струму до 120 кА.

Діафрагмові електролізери бувають з бічним, верхнім і нижнім розміщенням анодів.

Кожній осередок в діафрагмовому електролізері забезпечений у верхній частині *діафрагмою* ковпачкового типу, яка дозволяє роз'єднати бульбашки хлору та краплі магнію і герметизувати електролізер. Для запобігання викидів хлору до атмосфери цеху проводять примусове відсмоктування анодного газу.

Останнім часом все більшого поширення в магнієвій промисловості отримують *бездіафрагмові електролізери*, в яких аноди і катоди чергуються у загальному об'ємі електроліту. У міжелектродному просторі у таких електролізерах виникає спрямована циркуляція електроліту, крапель магнію і бульбашок хлору. Переміщаючись догори, цей потік виносить краплі магнію у збірний осередок, відокремлений від електролізних (робочих) осередків ванни електроліту гідравлічним затвором, утвореним зануреною в розплав перегородкою (шторою), що виконує ту ж роль, що і діафрагма у діафрагмових електролізерах.

У бездіафрагмових електролізерах робочий простір більш насичений електродами, ніж у діафрагмових. З цієї причини їх продуктивність у розрахунку на 1 $м^3$ об'єму електроліту в 1,4...1,5 рази вище. Перехід на бездіафрагмові електролізери дозволив забезпечити електричне навантаження на електролізер до 150 кА, знизити питомі енергетичні витрати, поліпшити умови праці персоналу і закласти основи для створення безперервного та автоматизованого процесу.

Склад електроліту при електролізі магнію вибирають у залежності від виду сировини. Наприклад, якщо вихідною сировиною є зневоднений карналіт, що містить хлориди магнію, калію і натрію, то електроліт, як правило, складається з тих же хлоридів. При цьому в процесі електролізу виходить велика кількість відпрацьованого електроліту.

При електролізі технічного $MgCl_2$ (90...95% $MgCl_2$) або більш чистої такої речовини, отриманої при відновленні тетрахлориду титану, в електроліт, крім зазначених компонентів, додають $CaC1_2$ і $BaC1_2$. Ці добавки сприяють відділенню магнію.

Концентрація $MgCl_2$ в електроліті між завантаженнями сировини повинна змінюватися від 12...14 до 5...6%.

Електроліз магнію ведуть при температурі 680...720 °С, анодній густині електричного струму 0,4...0,8 $А/см^2$ та напрузі 4,4...6,4 В. Утворений при цьому магній підіймається на поверхню електроліту і витягається з ванни 1 раз на добу вакуум-ковшем. Витрата електроенергії – 15...16,5 кВт·год на 1 кг магнію.

Електролітичний спосіб виробництва магнію складний і шкідливий, тому що в процесі бере участь газоподібний хлор. Простіше отримувати металевий магній прямим відновленням його оксиду, що утворюється при термічному розкладанні магнезитових або доломітових руд.

Термічні способи отримання магнію, освоєні на ряді заводів, засновані на відновленні його з оксидів або інших сполук більш активним металом, що має більшу спорідненість до кисню, ніж магній.

Оскільки магній має високу спорідненість до кисню, і його оксид належить до числа дуже міцних оксидів, вибір відновника і умов відновлення при отриманні магнію термічним способом – завдання досить важке, незважаючи на уявну простоту технології.

Можливі різні варіанти термічних методів виробництва магнію та їх апаратурного оформлення.

В якості відновника для оксиду магнію можна використовувати силіцій, алюміній, силікоалюміній, а також карбіди кальцію, алюмінію та інших металів, а також вуглець. При цьому, відновлення можливо тільки при температурах, коли магній знаходиться у пароподібному стані, тобто вище за точку його кипіння. У продуктах термічного процесу тільки магній знаходиться в пароподібному стані, що дозволяє відокремлювати його від твердих фаз шляхом сублімації парів і подальшої їх конденсації.

Натепер у промисловості використовується тільки *силікотермічний спосіб отримання магнію*. При цьому в якості відновника з економічних міркувань замість силіцію найчастіше використовують феросиліцій.

Силікотермія виробництва магнію включає підготовку вихідних матеріалів, відновлення магнію кремнієм, конденсацію парів магнію і сплавлення його кристалів з отриманням злитків.

Реакція відновлення зворотна, і при атмосферному тиску протікає у потрібному напряму тільки при температурі більше 2300 °С. Зі зниженням тиску температура початку взаємодії вихідних речовин знижується. При залишковому тиску 3...7 Па утворення магнію відбувається вже при 1500 °С. Присутність у вихідній шихті оксиду кальцію також сприяє зниженню температури утворення магнію. Внаслідок виведення із зони реакції одного з її продуктів реакція практично проходить до кінця.

Виробництво магнію силікотермічним способом складається з ряду наступних технологічних операцій.

Доломіт перед дозуванням піддають подрібненню і кальцинуючому випалу в шахтних печах з наступним подрібненням недогарка. Далі подрібнені доломіт і феросиліцій надходять на дозування і змішування. Готову шихту брикетують на валкових пресах. Брикети упаковують у паперові мішки і відправляють на відновлення.

Оксид магнію відновлюють до металу в горизонтальних вакуумних ретортних печах, де встановлено 20 реторт в один ряд. Печі опалюють газом. Повний цикл операції у реторті триває 10 год. Спалювання газу регулюють так, щоб до кінця операції в реторті температура була ~1165 °С.

Реторти виготовляють із жаростійкої високолегованої сталі, і складаються вони з двох частин. Основна частина, в якій відбувається відновлення (реакційна зона), знаходиться усередині печі і являє собою литу трубу з привареним сферичним днищем. До іншого кінця приварена водоохолоджувальна головка реторти. Ця частина реторти служить зоною конденсації.

Холодний кінець реторти герметично закривається кришкою, яка дозволяє проводити завантаження шихти, витягувати кристали магнію і видаляти залишок від дистиляції. У кожну реторту одноразово завантажують п'ять мішків шихти по 20...25 кг кожен.

Магній осідає на стінках конденсатора у вигляді компактного осаду кристалів (*друзи*). Найбільш компактними друзи виходять, коли в конденсаторі підтримується температура 475...550 °С. Добова продуктивність однієї печі (20 реторт) – близько 700 кг *Mg*.

Після вилучення з конденсатора магній переплавляють і відливають у чушки.

Магній, отриманий силікотермічним способом, дуже чистий. Вміст домішок значно нижчий, ніж у електролітичного магнію. Недоліком цього способу є періодичність процесу, порівняно невелика продуктивність печей і високі трудові затрати.

Інший спосіб «Магнетерм» передбачає отримання магнію з обпаленого доломіту ферросиліцієм (75% Si) у присутності глинозему. Присутність у шихті глинозему дозволяє проводити процес у рідкому шлаці – розплаві алюмосилікату кальцію.

Схема установки за цим способом показана на рисунку 1.24. Вона включає три основні вузли: завантажувальний комплекс, відновлювальну піч 8 і конденсатор 12 для магнію. Піч 8 для відновлення має вертикальний робочий простір висотою 5 м і діаметром 3 м. Подина печі викладена струмопровідними вугільними блоками і є, по суті, подовим електродом 10. Верхній електрод 6 герметично введений у піч через свід.

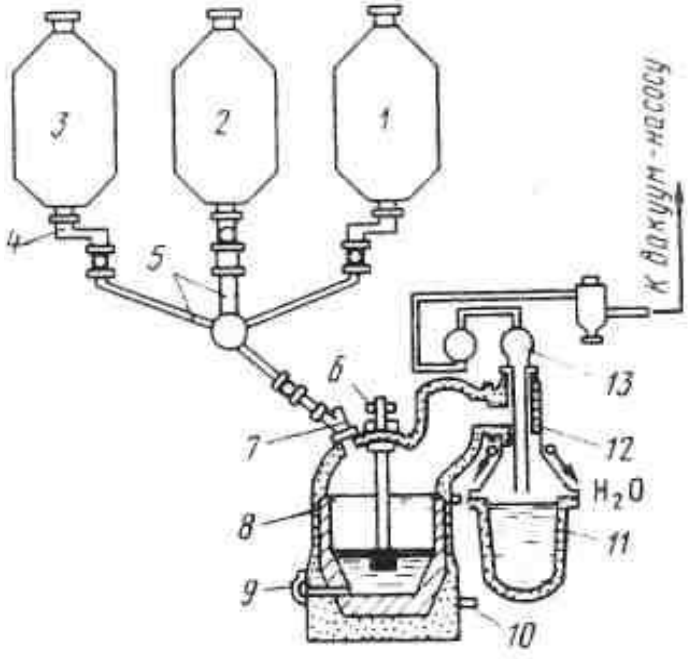


Рисунок 1.24 – Схема установки для силікотермічного відновлення магнію з доломіту [16]: *1...3* – контейнери з доломітом, глиноземом і ферросиліцієм відповідно; *4* – віброживильники; *5* – трубопроводи; *6* – центральний електрод; *7* – завантажувальний отвір; *8* – піч відновлення; *9* – льотка; *10* – подовий електрод; *11* – тигель; *12* – конденсатор; *13* – уловлювач

Конденсатор 12 з'єднується з піччю 8 теплоізольованим роз'ємним патрубком, в якому закріплена труба для вакуумування системи. Пара магнію, що виходить з патрубка, конденсується у рідкий стан у тиглі 11. Патрубок, який виводить пару магнію з печі, і тигель 11 від водоохолоджувального конденсатора можна від'єднувати для зливу металу.

Процес ведуть періодично з тривалістю циклу 3 год. Завантаження шихтових матеріалів починають після створення у системі необхідного вакууму і нагріву резервуара для магнію до 650 °С. Завантаження печі протягом робочого циклу ведуть безперервно або періодично. За наплавленням максимального рівня шлаку до печі починають подавати аргон до створення у ній атмосферного тиску, після чого відключають конденсатор і перевозять тигель з магнієм у рафінувальне відділення. У цей час з печі зливають залишковий феросиліцій (45% Si) і шлак до мінімально допустимого рівня. Залишковий феросиліцій відправляють на розкиснення сталі на сталеплавильний завод, а шлак – на приготування «білого цементу».

Після приєднання до установки конденсатора у ній знову створюють вакуум, і цикл повторюється.

Вилучення магнію у конденсат за цим способом становить близько 85%, витрата електроенергії – 10...11 кВт·год на 1 кг магнію, продуктивність установки по магнію 2,4 т/добу.

Магній, одержуваний термічним способом, містить 99,6 ... 99,9% *Mg*.

Стандартами (*див. Додаток А*) передбачено три марки первинного магнію: Мг96, Мг95 і Мг90. У них вміст домішок не повинен перевищувати відповідно 0,03; 0,035 і 0,1%. Магній-сирець цим вимогам, як правило, не задовольняє, і його необхідно рафінувати. Очищення магнію від домішок проводять плавкою з флюсами, сублімацією або електролізом.

Плавка з флюсами застосовується найбільш широко. Цей спосіб дозволяє очистити магній від неметалевих домішок і частково – від заліза, розчинність якого у магнії зменшується при зниженні температури.

Рафінування магнію флюсами проводять при 700...710 °С в тигельних печах з електричним або полум'яним нагріванням (періодичний процес) або в печах безперервної дії. При тигельній плавці рафінуванню піддають одночасно до 1000...1500 кг магнію.

В останні роки все частіше для рафінування магнію починають застосовувати печі безперервної дії. Піч, насос і розливний конвеєр представляють собою високопродуктивний механізований рафінувально-ливарний комплекс, який є одним з ланок автоматизованої потокової лінії для виробництва магнію та первинних сплавів на його основі.

Піч складається з трьох камер, футерованих вогнетривкою цеглою. Камери розділені перегородками з магнезитової цегли з переливними отворами. Магній-сирець з вакуум-ковша заливають у першу камеру. Тут при 680...700 °С осідає основна кількість сольових і оксидних включень, а також частина заліза. При наступному заливанні частково очищений магній переливається до другої камери, у якій метал на шляху його просування у бік третьої камери остаточно звільняється від механічних домішок. З цієї камери магній за допомогою електромагнітного насоса перекачується на розливну машину.

Необхідна температура в печі підтримується за допомогою занурених у розплав електричних трубчастих нагрівачів з сольовими термоелементами. Піч безперервної дії дозволяє здійснювати рафінування під захисним флюсовим шаром або в атмосфері інертного газу.

Рафінування магнію сублімацією засноване на відмінності величин пружності парів магнію і домішок, які зазвичай у ньому присутні. Такі домішки як залізо, мідь, силіцій, алюміній і кальцій є менш летючими, ніж магній. Тому при випаровуванні магнію при зниженому тиску вони залишаються у твердому стані, а пара складається переважно з чистого магнію.

Сублімацію проводять у вакуумі в печах опору з вертикальним робочим простором. Магній (до 250 кг) завантажують у реторту, що складається з двох частин. Нижня частина реторти розміщується у печі і виконує функції випарника. Верхня частина (конденсатор) розташована поза піччю і охолоджується повітрям. У робочому стані реторта вакуумується. Температура у реторті складає близько 600 °С, а в конденсаторі – 400 °С. Залишковий тиск у реторті 7...10 Па. Процес періодичний. Він включає операції розігріву печі, сублімації (до 20 год.), охолодження реторти, її розвантаження і завантаження. Магній у вигляді друзи розплавляють у вакуумній печі, сполученій з приймачем-кристалізатором. Отриманий сублімацією магній містить не менше 99,99% *Mg*.

Електролітичне рафінування магнію випробувано в дослідно-промисловому масштабі. Електроліз проводять за тришаровим методом з електролітом, що складається з $MgCl_2$, $BaC1_2$, *NaCl, KC1*. Анодним сплавом служить покритий міддю або свинцем магній-сирець. Чистий магній, що виділяється на катоді, плаває на поверхні електроліту і вилучається з електролізера вакуум-ковшем [16].

Виробництво нікелю

Нікель – це блискучий, твердий метал сріблясто-білого кольору з атомним номером 28 в періодичній таблиці Д.І.Менделєєва [16, 25, 26]. Його щільність 8,9 г/см^3; температура плавлення 1455 °С; температура кипіння 2900 °С. Він має досить велику міцність і пластичність, добре піддається куванню і поліруванню. З нього можна волочінням виготовити дріт діаметром до 0,01 мм, опір якого розриву не менше, як у заліза, а шляхом прокатки можна отримати листи металу товщиною до 0,02 мм. Як і залізо, нікель є феромагнетиком (до температури 357,6 ºС).

У хімічному відношенні нікель – малоактивний метал. У найбільш стійких хімічних сполуках він двовалентний, хоча іноді зустрічається і в трьохвалентному стані. Він має високу корозійну стійкість в атмосфері повітря, стійкий до впливу води і багатьох агресивних середовищ, наприклад, лугів. Помітне окиснення нікелю на повітрі спостерігається при температурах вище 700…800 ºС. Сірчана і соляна кислоти розчиняють нікель повільно, а в азотній він розчиняється легко.

З киснем нікель утворює два основних оксиди: *NiO* і Ni_2O_3. Останній при нагріванні розкладається з утворенням Ni_3O_4. Солі нікелю, в основному, мають зелений колір і при розчиненні дають зелені розчини. Із солей нікелю найчастіше вживають сірчанокислий нікель (*нікелевий купорос*), який створює красиві смарагдово-зелені кристали. При нагріванні до 230 ºС ці кристали, втративши воду, набувають нечистого сіро-жовтого кольору.

Нікель не взаємодіє з інертними газами, літієм, натрієм, калієм, кальцієм, барієм, рубідієм, цезієм, францієм, стронцієм і іридієм.

За рівнями виробництва і споживання нікель займає п'яте місце серед усіх кольорових металів.

Орієнтовно, можна вважати, що у світі 40% нікелю використовується для виготовлення нержавких (корозійностійких) сталей, 17% – для сплавів на нікелевій основі, 12% – для конструкційних сталей, 11% – для покращення якості сталевих та чавунних виливків, 13% – для нікелювання, 7% – для інших потреб.

З металами нікель утворює велику кількість конструкційних, нержавких і жароміцних сплавів, з яких найбільший інтерес представляють сплави із залізом, кобальтом, міддю, цинком, хромом і молібденом.

На теперішній час відомо більше 3 тисячі сплавів, що містять нікель. Він надає їм жароміцність, кислотостійкість, в'язкість, покращені магнітні властивості, красивий зовнішній вигляд та ін.

Завдяки хорошій пластичності з нікелю можна отримувати різноманітні вироби методом деформації в гарячому і холодному стані. Тому спектр нікелевої продукції досить широкий: анодні і катодні полоси, зливки, пластини, стрічки, дроти, труби та ін.

Цікаво, що сплав із залізом, що містить близько 28% нікелю нездібний до намагнічення, а при близько 35% нікелю (сплав – *інвар*) проявляється коефіцієнт лінійного розширення, менший, ніж у сплава 10% іридію з 90% платини, з якого зроблені еталони довжини. Ця властивість зробила його корисним матеріалом для багатьох наукових цілей.

Велику групу матеріалів представляють сплави нікелю на мідній основі: *монель*, *нейзільбер*, *латунь* і *бронза*. Зокрема, міднонікелевий сплав *монель*, що містить 68…70% *Ni*, проявляє високу корозійну стійкість в кислотах і лугах, у вологій і морській атмосфері і тому використовується в медицині, хімічній та електротехнічній промисловості, в морському устаткуванні, при виробництві і зберіганні харчових продуктів тощо.

Нікель і сплави на нікелевій основі відіграють важливу роль в конструкціях деяких типів атомних реакторів. Там вони застосовуються в захисних високотемпературних оболонках для оберігання від корозії уранових стрижнів.

Із сплавів, що мають важливе значення, можна також відзначити *ніхром*, *платініт*, *никелін*. Зокрема, ніхром – сплав нікелю з хромом має великий питомий електричний опір, і застосовується для виготовлення реостатів і різних нагрівальних приладів.

Нормативні вимоги до нікелю та його сплавів викладені у стандартах (*див. табл. А1 у Додатку А*).

З чистого нікелю виготовляють хімічний посуд, різні апарати, прилади, казани з високою корозійною стійкістю і постійністю фізичних властивостей, а з нікелевих матеріалів – труби, резервуари і цистерни для транспортування та зберігання харчових продуктів, хімічних реагентів, ефірних масел.

Для хімічної промисловості подрібнений чистий нікель важливий як один з найактивніших каталізаторів, широко вживаний при багатьох хімічних процесах. Каталітичні властивості нікелю аналогічні таким же властивостям платини і паладію, що дає можливість широко застосовувати його замість цих металів, зокрема, як каталізатор у процесах гідрогенізації.

Нікелеві хімічно стійкі інструменти широко використовують у медицині і науково-дослідній роботі. Нікель застосовується для приладів радіолокації, телебачення, дистанційного керування процесами в атомній техніці.

Красивий колір нікелю, блискуча політура, яку він може приймати і яку зберігає на повітрі, роблять його придатним для покращення вигляду багатьох металевих споживчих товарів. У той же час, не можна рекомендувати заміну столового срібла нікелем тому, що нікель окиснюється легше за срібло, а *солі нікелю отруйні*.

На основі порошків чистого нікелю виготовляють пористі фільтри для очищення газів, палива й інших продуктів у хімічній промисловості. Порошкоподібний нікель споживають також у виробництві нікелевих сплавів і як в′яжучу речовину при виготовленні твердих і надтвердих матеріалів.

У природі нікель існує, здебільшого, у вигляді руд і лише у поєднанні з іншими елементами, наприклад, з миш'яком. Відомо понад 100 мінералів нікелю. Як вільний метал іноді він зустрічається в залізонікелевих метеоритах.

В Україні підтверджені запаси нікелю складають більше 200 тис. тонн, що становить лише 0,4% світових. Родовища силікатного нікелю в Україні виявлені у двох регіонах: Середнє Побужжя (понад 60 тис. тонн) та Середнє Подніпров’я.

Побузький нікелевий завод (Кіровоградська обл.) переробляє місцеві окиснені залізо-нікелеві руди. Основна його продукція – нікель і феронікель – використовуються на металургійних і машинобудівних заводах Придніпров'я і Донбасу. Передумови виявлення нових промислових родовищ сульфідного нікелю є у Красногірсько-Житомирській зоні українського щита та в Приазов’ї.

Нині нікелеві заводи переробляють, в основному, два типи руд, що різко вирізняються за хімічним складом і властивостями: *окиснені нікелеві* (здебільшого – зарубіжжя) і *сульфідні мідно-нікелеві* (здебільшого, в Україні).

Окиснені нікелеві руди є гірськими породами, що містять, здебільшого, гідратовані магнезійні силікати, алюмосилікати і оксид заліза. Нікелеві мінерали у них складають незначну частину рудної маси. Найчастіше нікель тут знаходиться у вигляді *бунзениту* (*Ni0*), *гарнієриту* або *ревденскиту*.

Окиснені нікелеві руди характеризуються винятковою непостійністю складу за вмістом як цінних компонентів, так і порожньої породи. Можливі межі концентрацій компонентів такої руди відзначаються наступними даними, у мас. %: 0,7…4 *Ni*; 0,04…0,16 *Co*; 15…75 SiO_2; 5…65 Fe_2O_3; 2…25 Al_2O_3; 1…4 Cr_2O_3; 2…25 *MgO*; 0,5…2 *CaO*; до 10…15% вологи. На вигляд окиснені нікелеві руди схожі на глину з рихлою будовою, малою міцністю часток та високою гігроскопічністю (до 40 %).

У сульфідних рудах нікель є присутнім, головним чином, у вигляді *пентландита*, що представляє собою суміш сульфідів нікелю і заліза змінного співвідношення, і

частково – у формі твердого розчину в *піротині* (Fe_7S_8). Основним супутником нікелю в сульфідних рудах є мідь, що міститься, головним чином, в *халькопіриті*.

Через високий вміст міді ці руди називають *мідно-нікелевими*. Окрім нікелю і міді, у мідно-нікелевих рудах обов'язково є присутніми кобальт, метали платинової групи, золото, срібло, селен і теллур, а також сірка і залізо. Таким чином, сульфідні мідно-нікелеві руди є поліметаллічною сировиною дуже складного хімічного складу. При їх металургійній переробці отримують 14 цінних компонентів (включаючи сірку). Базовий хімічний склад сульфідних мідно-нікелевих руд наступний, мас. %: 0,3…5,5 *Ni*; 0,2…1,9 *Cu*; 0,02…0,2 *Co*; 30…40 *Fe*; 17…28 *S*; 10…30 SiO_2; 1…10 *MgO*; 5…8 $A1_20_3$.

На відміну від окиснених нікелевих руд сульфідні мідно-нікелеві руди характеризуються високою механічною міцністю, негігроскопічні і можуть піддаватися збагаченню.

Цій операції зазвичай підлягають тільки порівняно бідні руди (не більше 1,5…2,5% *Ni*). Головним способом збагачення сульфідних мідно-нікелевих руд є флотація. Іноді збагаченню флотацією передує магнітна сепарація, спрямована на виділення пірротину в самостійний концентрат.

У мідно-нікелевих і нікелевих концентратах співвідношення нікелю і міді знаходиться у межах від (2:1) до (1:2). Такі концентрати можна переробляти за однаковою технологією.

Окрім окиснених нікелевих і сульфідних мідно-нікелевих руд, сировиною для отримання нікелю можуть служити також миш'яковисті руди.

У технологічних схемах переробки руд багато уявної спільності, наприклад, використовують однакові назви процесів і апаратів, отримують однотипні продукти. Проте, у цілому, вони принципово відрізняються. На це впливає не лише склад вихідної сировини, але й кінцева мета її переробки.

Переробка *окиснених нікелевих руд* закінчується отриманням, як правило, так званого *вогневого нікелю*, що відправляється споживачеві без додаткового рафінування. Цей нікель за стандартом відповідає маркам Н-3 та Н-4.

Технологічна схема переробки *сульфідних мідно-нікелевих руд* закінчується обов'язковим рафінуванням *чорнового* (вогневого) нікелю.

Для отримання нікелю з усіх видів рудної сировини використовують як піро-, так і гідрометалургійні процеси.

Значно більш поширеними є *гідрометалургійні методи*. Нині їх застосовують для переробки окиснених нікелевих руд, нікелевих сульфідних концентратів, пірротинових концентратів, сульфідних напівпродуктів (штейнов, файнштейнов та ін.) з використанням сірчанокислих, аміачних і солянокислих розчинів.

Маючи ряд переваг при переробці бідних руд, ці схеми у той же час дуже громіздкі, складні і застосовні лише для обмеженого складу руд.

Принципова схема *отримання нікелю з окиснених руд* наведена на рисунку 1.25.

Вміст нікелю у шлаках залежить від багатьох чинників і, значною мірою, від вмісту оксиду заліза у шлаці, і нікелю – у штейні. Чим більше у шлаці вміст *FeO* і чим багатіше нікелем буде отримуваний штейн, тим більше нікелю перейде у шлак.

Шахтні печі нікелевої плавки мають ті ж конструктивні елементи, що й інші шахтні печі заводів кольорової металургії.

Вживані у нікелевій промисловості шахтні печі в області фурм мають площу поперечного перерізу 13,5…25 м^2, довжину до 15 м і висоту шахти 4,5…6 м. Поперечний профіль печей характеризується або паралельністю бічних стін, або розширенням їх донизу.

Розділення рідких продуктів плавки – нікелевого штейну і шлаку – можна проводити як у внутрішньому горні, так і з використанням зовнішніх відстійників.

У першому випадку піч обладнують спеціальним отвором («*шпуром*») для періодичного випуску штейна і шлаковою льоткою майже безперервної дії, які розташовані на протилежних сторонах печі.

При використанні зовнішнього відстійного горна штейн і шлак спільно поступають до нього по закритому похилому каналу. Шлак у цьому випадку, спливаючи на поверхню розплаву, проходить через шар штейну, підігріває його і обідняється в результаті захоплення зважених у шлаці сульфідних включень штейновым розплавом. Відстійник також обладнують шпуром і льоткою.

При *конвертації нікелевих штейнів* отримують нікелевий *файнштейн* за рахунок окиснення заліза і сірки. При цьому одночасно ставиться завдання щодо максимального окиснення кобальту і переведення його до конвертерного шлаку.

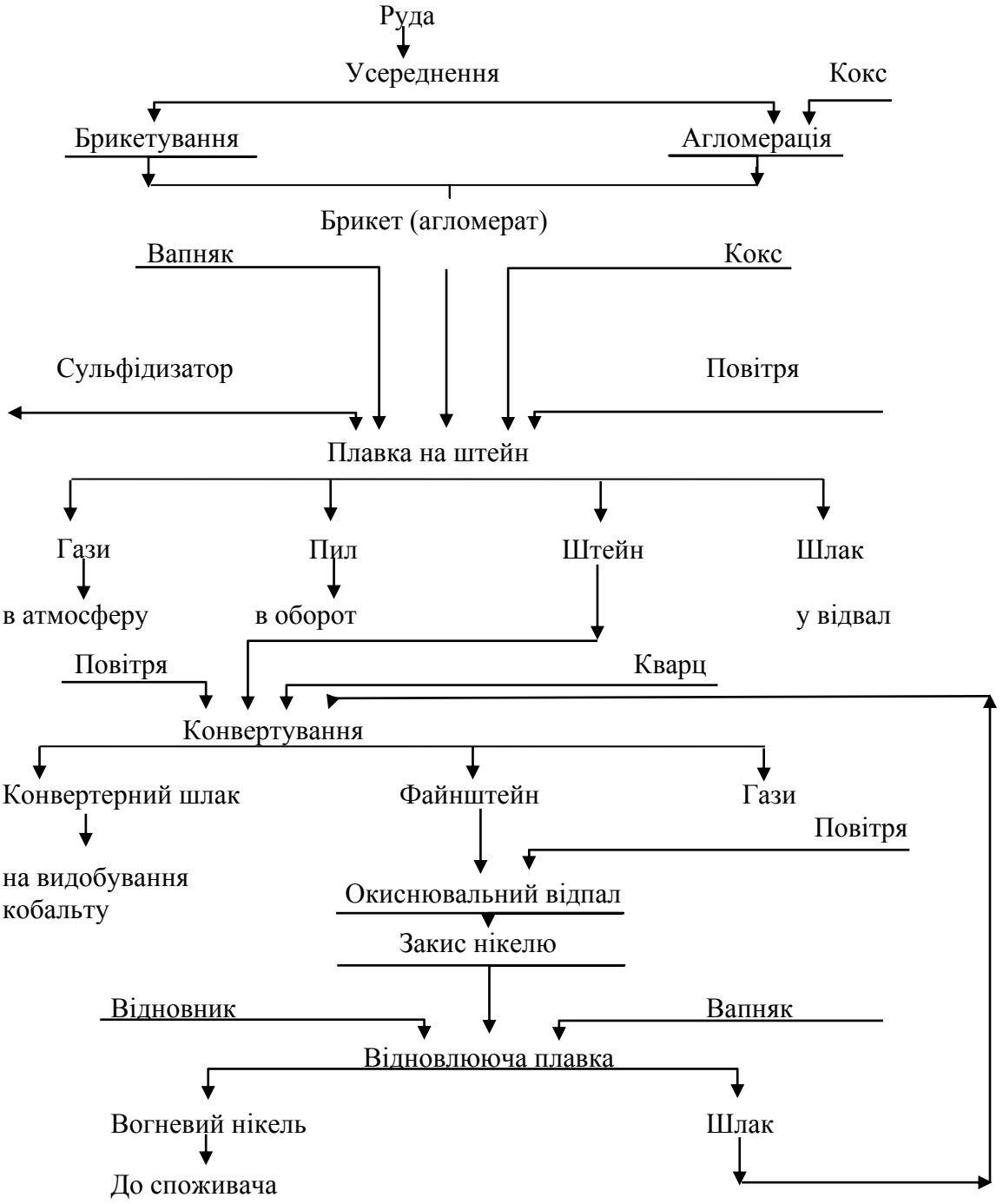


Рисунок 1.25 – Схема отримання нікелю з окиснених руд [16, 25]

Присутні у нікелевих штейнах метали мають різну хімічну активність, Їх спорідненість до кисню убуває у ряді *Fe – Co – Ni*. Отже, при продуванні штейна киснем в конвертері за присутності кварцевого флюсу, спочатку окиснюється і ошлаковується вільне залізо та його сульфід.

Для конвертації нікелевих штейнів використовують горизонтальні конвертери місткістю 20 і 30 т. Продукти процесу: нікелевий файнштейн, конвертерний шлак і сірчаністі гази.

Нікелевий файнштейн зазвичай містить, у мас. %: 76…78 *Ni*; 19…21 *S*; 0,2…0,4 *Fe*; 0,3…0,5 *Co* та до 2,0 *Cu*. Повніше видалення із файнштейна заліза і кобальту на стадії конвертації недоцільно, оскільки це призводить до інтенсивного окиснення нікелю і збільшення його переходу до шлаку.

Технологія *отримання вогневого нікелю з файнштейну* включає стадії окиснювального випалення і відновну плавку закису нікелю на метал. На першій стадії випалення видаляється сірка до залишкового вмісту не вище 0,02 %, а нікель переходить у *NiO*.

Для підвищення тугоплавкості шихти подрібнений файнштейн змішують з оборотним пилом. Це разом з роз'єднаністю часток, що рухаються у киплячому шарі, дозволяє вести першу стадію технології при 950…1000 ºС. Внаслідок окиснення файнштейна киснем отримують NiO та SO_2.

Печі з площею поду 7…8 м² для першої стадії випалення нікелевого файнштейна мають збільшений діаметр вгорі, що знижує швидкість газів на їх виході і зменшує пилевиніс багатого нікелем огарка. Крім того, розвантаження огарка робиться не через зливний поріг, а з рівня поду і регулюється стопорним або дисковим затвором. До гарячого огарка (при 700…800 °С) після виходу з печі підмішують 10…15% природного сильвініту, і суміш піддають сульфат-хлоруючому випаленню в трубчастому реакторі–холодильнику. Процес йде за рахунок фізичного тепла огарка.

З реактора огарок направляють на вилуговування гарячої міді методом просочування.

Після вилуговування огарок із залишковим вмістом 0,3…0,4% *Cu* направляють на другу стадію – остаточне випалювання в трубчасту піч (рисунок 1.26), що обертається. Піч опалюється природним газом або мазутом, які з метою створення у печі окиснювальної атмосфери спалюють з великим надлишком повітря.

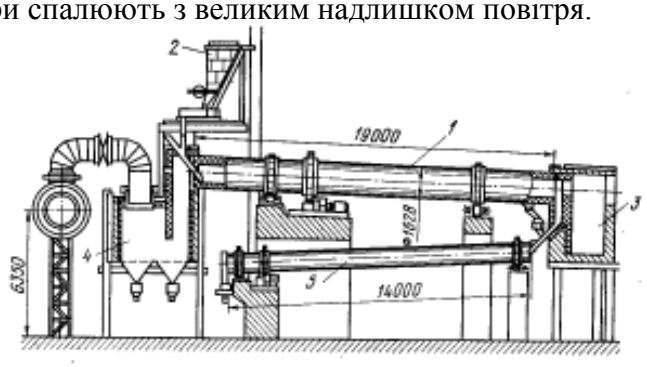


Рисунок 1.26 – Установка для другої стадії випалу нікелевого огарка [16, 25]: 1 – трубчата піч; 2 – бункер з живильником; 3 – топочна камера; 4 – пилова камера; 5 – трубчатий холодильник

Огарок з бункера подається до хвостової частини печі з температурою близько 800 ºС. Далі він рухається назустріч паливним газам, що містять 8…10% кисню, нагрітим до 1200…1300 °С. З опалювальної печі закис нікелю з температурою 900…1000 ºС по жолобу зсипається в трубчастий реактор, куди вводять також 4…8% нафтового коксу. Закис нікелю частково (до 40…50 %) відновлюється, і з реактора виходить металізований

огарок з вмістом нікелю 82…86%, що прискорює і здешевлює його подальшу переробку в електропечах.

Процес *відновної плавки* здійснюють у дугових електричних печах за рахунок тепла, що виділяється при горінні дуги між вугільними (графітовими) електродами і металом.

Для отримання нікелю з окиснених руд застосовують триелектродні круглі печі місткістю 4,5…10 т (*див. рис. 1.5*). Вони працюють періодично з тривалістю циклу від 6 до 8 год.

Технологічний процес електроплавлення закису нікелю складається з ряду операцій:

1) шихтовка закису нікелю з відновником;

2) завантаження шихти та її розплавлення;

3) доведення металу;

4) випуск і грануляція нікелю.

Під час приготування шихти закис нікелю змішують у певній пропорції з твердим відновником, частіше за все – з нафтовим коксом, що містить 0,2…0,5 % *S*.

При *доведенні* у печі наводять вапняний шлак з метою запобігання вторинному окисненню нікелю киснем пічної атмосфери. Цей шлак дозволяє також очистити метал від сірки.

Готовий метал виливають в грануляційний басейн з проточною холодною водою, на дні якого встановлений дірчастий металевий кошик. Отримані гранули нікелю витягають з басейну, сушать, упаковують у фанерні бочки і відправляють споживачеві.

Вогневий нікель за стандартом повинен містити нікелю не менше 97,6 % (Н-4) і кобальту не більше 0,7 %.

При гідрометалургійній переробці окиснених нікелевих руд, що містять ~1,3% *Ni* і 0,8% *Co*, за *аміачною схемою* руду спочатку піддають селективному відновному відпалу, при якому нікель і кобальт відновлюються до металів, а залізо – переважно до Fe_2O_3.

Після очищення від заліза розчин нейтралізують і обробляють сірководнем в спеціальних автоклавах, внаслідок чого отримують сульфідний концентрат, що містить 55…60 % *Ni* і 5…6 % *Co*.

Вилуговування проводять як при атмосферному, так і підвищеному тиску з інтенсивним перемішуванням рідини. Високий тиск, у свою чергу, дозволяє вести процес і при підвищених температурах, що значно прискорює хімічні реакції і підвищує повноту їх протікання. Такі процеси дістали назву *автоклавних*, оскільки їх проводять у спеціальних герметичних апаратах-автоклавах [16, 25, 26]

В результаті автоклавної переробки сульфідних нікелевих концентратів отримують сульфід міді, нікелевий порошок, кобальтовий порошок і сульфат амонія.

Переробка піротинових концентратів, що містять, у мас. %: 3,5…3,9 *Ni*; 3,2…3,6 *Cu*; до 0,13 *Co*; 47…54 *Fe* і 28…32 *S* здійснюється в горизонтальних автоклавах з робочою місткістю 100 м³ при 108 ºС і тиску ~1,5 МПа. Мета процесу – розкладання пиротину з утворенням гідроксиду заліза і елементарної сірки. При цьому в розчин частково переходять кольорові метали у формі сульфатів. Продуктом процесу є окиснена пульпа, в твердій фазі якої містяться сульфіди, що не окислюються, гідроксид заліза, елементарна сірка і порожня порода, а у водній – розчинені кольорові метали.

Сіркосульфідна флотація має за мету відділення флотацією сульфідів і елементарної сірки від оксидів, а також порожньої породи, яка спрямовуються у відвал. Далі, отриманий флотацією сіркосульфідний концентрат направляють на розділення сірки і сульфідів також методом флотації з отриманням сульфідного і сірчаного концентратів. Автоклавний сульфідний концентрат у 3…4 рази більше збагачений кольоровими металами у порівнянні з початковим пірротиновим концентратом. Його виплавляють у складі шихти при плавці на мідно-нікелевий штейн.

У процесі наступного *вилуговування соляною кислотою* при 70 ºС сульфіди нікелю, кобальту і заліза розчиняються, а Cu_2S і платиноїди залишаються в осаді. Залізо у вигляді $HFeCl_4$ добувають екстракцією за допомогою розчину трибутилфосфата в гасі; кобальт екстрагують розчином триізооктиламіна в толуолі. З очищеного розчину кристалізують $NiCl_2 \cdot 6H_2O$. Цю сіль потім прожарюють, уловлюючи пари соляної кислоти, а отриманий закис нікелю відновлюють воднем. Метал плавлять і гранулюють. Його чистота складає 99,7%.

Розглянута технологічна схема добре освоєна на практиці. Але її суттєвими недоліками є складність (багатостадійність) технології, високі витраті дорогого і дефіцитного коксу, низький ступінь вилучення нікелю та, особливо – кобальту і, нарешті, повна втрата усього заліза окиснених нікелевих руд.

При *отриманні нікелю із сульфідних мідно-нікелевих руд з* реалізацією пірометалургійних процесів початковою сировиною при *плавці на штейн* можуть служити багаті руди та нікелеві або мідно-нікелеві концентрати. Плавку такої сировини можна вести в шахтних печах за методом *напівпіритової плавки* у відбивних або електричних печах і практично за будь-яким автогенним процесом.

Плавка в електричних печах вимагає ретельної підготовки шихти, що полягає, перш за усе, в її усереднюванні і сушці. Плавка вологої шихти в електропечах *неприпустима*, оскільки при контакті вологи з розплавленими сульфідами *відбувається розкладання води з вибухом*.

Технологія підготовки шихти до електроплавлення визначаються видом початкової сировини.

Сульфідні мідно-нікелеві руди з вмістом нікелю більше 1,5% зазвичай плавлять без збагачення. Їх підготовка до плавки зводиться до подрібнення, сушки і шихтовки.

Концентрати, отримувані флотацією, перед електроплавленням укрупнюють методами агломеруючого випалення або з подальшим окиснювальним випаленням. Для окиснювального випалення із спіканням застосовують стрічкові агломераційні машини.

При застосування окатишів їх термічну обробку для зміцнення здійснюють на стрічкових конвеєрних машинах, що відрізняються від звичайних агломераційних машин тільки системою газового тракту.

Термічна обробка включає три послідовні стадії: сушку, окиснювальне випалення і охолодження гранул, для чого по довжині стрічки конвеєрної машини створюються три відповідні зони. Робота конвеєрних машин організована з рециркуляцією частини газів, що підвищує ступінь використання тепла газів, що відходять.

При такому методі підготовки шихти рівень десульфуризації можна регулювати у межах від 30 до 55% шляхом зміни температури в зоні випалення і швидкості руху стрічки.

Для електроплавлення сульфідних мідно-нікелевих руд і концентратів застосовують прямокутні рудотермічні печі з трьома або шістьма електродами, що самообпалюються За хімізмом електроплавлення сульфідної сировини є майже повним аналогом відбівної плавки шлаку (*див. вище*).

Шихту до печі завантажують через бічні і центральні завантажувальні отвори у своді, найчастіше «на електроди», де температура вища, а циркуляція шлаку найбільш інтенсивна.

Плавлення шихти здійснюється за рахунок тепла, що виділяється безпосередньо в шлаковому розплаві при пропусканні через нього електричного струму. Значна частина тепла (40…80%) виділяється в перехідному контакті «електрод – шлак», де внаслідок утворення тонкого газового шару виникають дрібні точкові мікродуги, а інша частина – в шлаковому розплаві, що є провідником струму з високим електричним опором. Максимальне перегрівання шлаку відбувається поблизу електродів. Тут же шлак стає найбільш насиченим газовими бульбашками. В результаті цього виникає різниця у густині шарів шлаку, прилеглих до електродів і віддалених від них. Легші маси перегрітого шлаку

безперервно піднімаються догори і розтікаються по дзеркалу ванни на всі боки від електродів.

Зустрічаючи на своєму шляху плаваючу шихту, потоки шлаку віддають їй надлишок свого тепла і підплавляють шихтову купу з поверхні, зануреної у шлак. Маси частково охолодженого шлаку основної ванни і розплаву, що утворився при плавленні шихти, опускаються донизу і замикають циркуляцію шлакового розплаву. В піделектродному шарі шлаку, де конвекція майже відсутня, завершується розділення штейна і шлаку.

Таким чином, циркуляційний рух шлаку – найважливіший робочий процес в руднотермічних печах – забезпечує досить хороший масо– і теплообмін у ванні. Це дозволяє розігрівати шлак до 1450 ºС і вище, що дає можливість переробляти в електропечах тугоплавку шихту, а плавку вести на шлаки з підвищеним вмістом оксиду магнію (до 24 %).

Рідкими продуктами електроплавлення є мідно-нікелевий штейн і шлак. Штейни плавки сульфідних руд і концентратів зазвичай містять, у мас. %: 7…16 *Ni*; 7…12 *Cu*; 0,3…0,5 *Co*; 47…55 *Fe*; 23…27 *S*.

Штейн з печі випускають при 1100…1150 °С через шпурові отвори, розташовані на одній з торцевих стін печі. У зв'язку з відсутністю в руднотермічних печах відстійної зони і наявністю на поверхні шлакової ванни плаваючої шихти випуск шлаку також здійснюють через шпури, розташовані на протилежній стороні печі на відстані 1350…1750 мм від подини (550… 900 мм від дзеркала розплавленої ванни).

Мідно-нікелевий файнштейн є, в основному, сплавом сульфідів Ni_3S_2 і Cu_2S з кобальтом, що містить, платиноїди і невелику кількість заліза. Якщо такий файнштейн по аналогії з нікелевим файнштейном (*див. вище*) відразу піддати окиснювальному відпалу з подальшою відновною плавкою огарку на метал, то це приведе до отримання дуже складного за вмістом металевого сплаву, розділення якого на самостійні метали технічно неможливе.

Тому мідно-нікелеві файнштени спочатку направляють на *розділення міді і нікелю*. Цей процес можна здійснити декількома методами. Найбільше поширення отримав метод *флотації*.

Флотацію ведуть у сильно лужному середовищі. Пінний продукт – багатий мідний концентрат – після переочищень направляють до мідного виробництва. Другим продуктом розділення флотацією є багатий нікелевий концентрат у вигляді «хвостів», які містять, мас. %: 68…72 *Ni*; 3…4 *Cu*; до 1 *Co*; 2…3 *Fe*; 22…23,5 *S*, а також значну долю платинових металів.

Іншим вживаним у сучасній практиці способом розділення міді і нікелю є *карбонільний процес*. Його використовують для переробки мідно-нікелевих файнштейнів, відновленого закису нікелю і рафінування чорнового нікелю. Цей процес заснований на здатності нікелю утворювати карбоніл-з'єднання металу із *CO*. Разом з нікелем утворюються карбоніли заліза та кобальта; мідь карбонілів не утворює.

Карбоніл нікелю $Ni(CO)_4$, плавиться при температурі 25 °С і кипить при 43 ºС. Температура кипіння карбонілу заліза 105 ºС. Карбоніл кобальту плавиться при 51 °С з розкладанням. При нагріванні до температури вище 180 ºС пари карбонілу нікелю розкладаються на *Ni* та *CO*. Цю реакцію можна прискорити, проводячи її під тиском 17…23 МПа і при температурі 190…220 ºС.

За цим способом у сталевий реактор завантажують матеріал, що переробляється, включаючи подрібнений металізований файнштейн з пониженим вмістом сірки. Карбоніл нікелю, забруднений карбонілом заліза, випаровується та конденсується, а вся мідь, платиноїди і кобальт залишаються в осаді.

При отриманні *чорнового нікелю з багатих нікелевих концентратів* нікелеві концентрати флотаційного процесу розділення міді і нікелю спочатку піддають одностадійному окиснювальному випалюванню при 1100…1200 °С. Отриманий закис

нікелю містить менше 0,5% *S*. Після випуску закис нікелю спочатку відновлюють у трубчастому відпалювальному реакторі, що істотно економить електроенергію при подальшій плавці на чорновий нікель.

Відновну плавку закису нікелю проводять у дугових електричних печах за технологією, близькою до переробки нікелевого файнштейна на вогневий нікель. Відмінність полягає лише в тому, що плавку ведуть без наведення шлаку, а готовий нікель розливають на карусельній розливній машині в аноди із заливкою в них «вушків» з нікелю.

Анодний нікель – складний за складом сплав, що містить, принаймні, дванадцять металів, включаючи залізо, і хімічні сполуки металів із селеном, телуром, киснем і сіркою.

Отриманий із сульфідних руд чорновий нікель гранулюють перед його карбонільним рафінуванням.

Мета *рафінування чорнового нікелю* полягає в отриманні чистого катодного нікелю не нижче марок Н-0 і Н-1 (згідно зі стандартом) і супутному отриманні присутніх в анодному металі цінних металів – кобальту, платиноїдів, золота, срібла, міді, селену і телура.

Рафінування нікелю майже всюди проводять методом електролізу.

Електролітичне рафінування нікелю – складний електрохімічний процес. Нікель є електронегативним металом, і тому такі домішки як кобальт, залізо, цинк, мідь, а також катіони водню можуть спільно з ним або раніше розряджатися на катоді.

Для запобігання можливому забрудненню катодного нікелю домішками і зниження виходу по струму через розряд іонів водню потрібне виконання наступних умов:

1) ретельне очищення електроліту від домішок;

2) застосування оптимального складу електроліту та електричного режиму електролізу;

3) розділення анодного і катодного просторів хімічно і механічно стійкою діафрагмою, що слабо фільтрує;

4) забезпечення оптимальної циркуляції електроліту.

На практиці електролітичне рафінування нікелю проводять у ваннах ящичного типу, об'єднаних по дві у блоки і розділених подовжною стінкою. Анодні і катодні основи, отримані електролітичним нарощуванням нікелю на титанових матрицях, навішують у ванни по черзі.

Для подання католіту у ванни служать гребінки з фаоліту або вініпласту з ніпелями, що калібруються, забезпеченими гумовими трубочками. По цих трубочках в кожну діафрагму подають католіт. Швидкість подання католіту регулюють за його рівнем в діафрагмовому осередку. Подачу католіту регулюють так, щоб його рівень в катодній діафрагмі перевищував рівень електроліту у ванні на 30…40 мм.

Анодний процес зводиться до електрохімічного розчинення нікелю, кобальту, заліза і міді, а благородні метали і нерозчинні в електроліті хімічні сполуки обсипаються у шлам.

Для електролізу нікелевих анодів застосовують сульфат-хлоридні електроліти, що містять невелику кількість вільних катіонів водню. Основними компонентами електроліту є сульфати нікелю і натрію та хлорид нікелю. Забруднений електроліт – *аноліт* – безперервно виводять з ванн на обов'язкове очищення від заліза, кобальту і міді та на періодичне очищення від ряду інших домішок.

На аноді електричний струм витрачається не лише на розчинення нікелю, але й інших металів. Така ж кількість електрики (електронів) має бути витрачена і на катоді, але тільки на один процес – розряд катіонів нікелю. В результаті, виходить, що кількість нікелю на катоді завжди перевищує його потрапляння з анода, тобто виникає дефіцит нікелю в катодному просторі, який посилюється його втратами під час очищення аноліту.

Очищення аноліту включає три основні операції: очищення від заліза, міді і кобальту.

При очищенні нікелевих розчинів прагнуть не забруднювати їх сторонніми реагентами. З цієї причини в якості реагентів зазвичай використовують нікельвмісні матеріали. Це дозволяє одночасно частково збагатити католіт нікелем. Після очищення від заліза розчин обробляють нікелевим порошком. При його дії на розчин мідь випадає в осад. Очищення від міді необхідно проводити у відсутності кисню; інакше можливо ее зворотне окиснення і розчинення. Цей процес ведуть у механічних мішалках або у спеціальних апаратах – *цементаторах*.

Цементатор (рисунок 1.27) – апарат з вертикальним робочим простором і змінним поперечним перерізом.

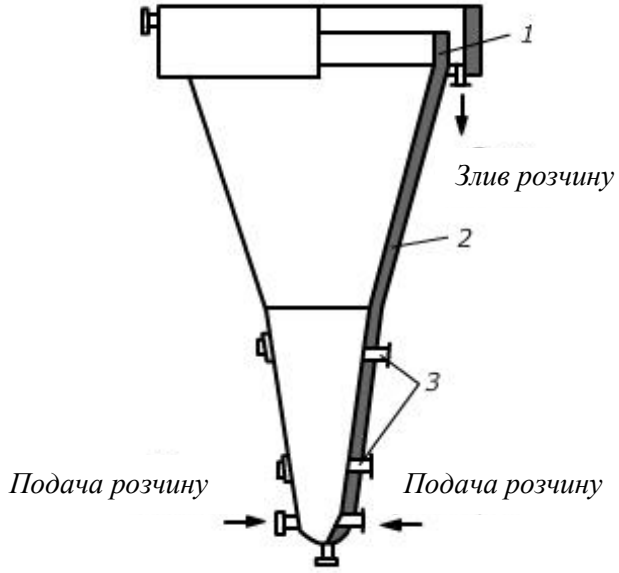


Рисунок 1.27 – Схема цементатора [16, 25]: 1 – виливний поріг; 2 – корпус; 3 – патрубки для випуску «цементованої» міді

Розчин, призначений для очищення, подається до нижньої частини цементатора, а зливається вгорі. Нікелевий порошок подається або на поверхню розчину, або на вхід нагнітальних насосів.

У верхній частині апарату швидкість вертикального потоку знижується через різке розширення корпусу, внаслідок чого частки твердих матеріалів утворюють чітко виражений киплячий шар, який утримується на глибині близько 2 м від зливного порогу. Очищення від кобальту проводять способом, аналогічним очищенню від заліза, але використовують як окисник газоподібний хлор.

Очищений від домішок електроліт (католіт) містить, у мас. %: менше 0,0003 *Fe*; менше 0,008 *Cu*; 0,008…0,012 *Co*. У разі потреби католіт додатково очищають від свинцю, цинку, органічних і деяких інших домішок.

Вживані нині при виробництві нікелю технологічні схеми побудовані переважно на поєднанні гідрометалургійних і пірометалургійних методів.

Виробництво свинцю

Хімічний елемент свинець у періодичній системі елементів Д.І. Менделєєва має атомний номер 82 і позначається символом *Pb* (від лат. *Plumbum*). Це блакитно-білий важкий метал (щільність 11,35 г/см^3) з металевим блиском у свіжому зрізі. Синюватий колір і металевий блиск на повітрі швидко зникають через те, що свинець покривається шаром окису та солей, які утворюються при доступі вологи з повітря або кислот. Його температура плавлення 327,5 °С, а кипіння 1750 °С. Свинець поганий провідник тепла й електрики. Його електропровідність майже в 10 разів нижче, ніж у срібла.

М'якість свинцю така, що він ріжеться навіть ножем, а при терті на твердій поверхні залишає сірий слід (колись в олівцях використовували свинцевий стрижень). Свинець легко прокатується в тонкі листи та стрічки, деформується на пресах у труби, з нього виготовляють дріт [16, 27].

Свинець добре протистоїть дії ряду міцних кислот, лугів і аміаку, але розчиняється в слабкій оцтовій та інших органічних кислотах; занурений у воду свинець майже не кородує, але за наявності у ній кисню швидко руйнується; сухе повітря на свинець не діє, а у вологому він швидко тьмяніє внаслідок утворення поверхневої плівки основного карбонату. Кращим розчинником свинцю є азотна кислота.

З киснем свинець утворює ряд оксидів, з яких найбільш важливими є *глет* (*PbO*) і *сурик* (Pb_3O_4). Найбільш стійким з них є *PbO*; всі інші оксиди при нагріванні розкладаються. Глет легко відновлюється до металу оксидом вуглецю *CO* й іншими відновниками.

Добавки вісмуту та цинку знижують кислототривкість свинцю. Модифікування натрієм, кальцієм і магнієм різко підвищує міцність і твердість свинцю, але знижує його хімічну стійкість. Уведення міді збільшує стійкість свинцю проти дії сірчаної кислоти. Сурма підвищує твердість і кислототривкість свинцю у сірчаній кислоті. Барій і літій підвищують твердість, а кадмій, телур і олово – твердість і опір втоми свинцю.

Із залізом свинець не сплавляється, що дозволяє застосовувати залізну апаратуру при його виробництві.

У металургійних процесах виробництва свинцю важливу роль відіграють, крім *PbO*, його сульфід *PbS*, силікати ($n{\cdot}PbO \bullet m{\cdot}SiO_2$), ферити ($n{\cdot}PbO \bullet m{\cdot}Fe_2O_3$).

Свинець, його сульфід і глет при підвищених температурах помітно випаровуються. Це веде до втрат свинцю у металургійному виробництві і вимагає заходів із захисту персоналу і населення, оскільки пари свинцю та його сполук отруйні.

Свинець – один з небагатьох металів, які знайшли практичне застосування вже в глибокій старовині. Археологічні знахідки показують, що його використовували для виготовлення монет та медальйонів ще в 5...7 тисячолітті до н.е. Легкоплавкість і пластичність свинцю дозволяли обробляти його самими примітивними методами. З нього виготовляли посуд, покрівельні листи, орнаментальні литі вироби та інше. Добре відомий, наприклад, свинцевий водопровід Стародавнього Риму.

У наш час потреба у свинці залишається дуже високою. Середньостатистичні дані щодо загального споживання свинцю характеризуються такими відомостями: для акумуляторів – 40..50%; для оболонок кабелів – 5...15%; для виготовлення листів і труб – 5...10%; для виготовлення сплавів і припоїв – 10...15%; при виготовленні барвників та хімікатів – до 30%.

За стандартами України (*див. Додаток А*) він випускається за хімічним складом марок: СО, С1С, С1, С2С, С2, С3, С3С, – які відрізняються вмістом свинцю (99,50…99,99%), *Ag, Cu, Zn, Bi, As, Sn, Sb, Fe, Mg, Ca* та *Na*.

Свинець входить до складу багатьох сплавів, наприклад, для підшипників (*бабіти* – антифрикційні свинцюваті сплави з добавками невеликих кількостей лужних і лужноземельних металів), типографського сплаву (*Pb + Sb*), свинцевоолов'яного припою, застосовується для виробництва фольги та ін. Він йде на виготовлення куль і дробу.

Сурик Pb_3O_4 використовується у хімічній промисловості як пігмент для виготовлення фарб. Крім того, завдяки своїй здатності захищати залізо від іржавіння він іноді використовується для нанесення первинного шару при фарбуванні залізних виробів.

Важкий свинець добре затримує згубні для людини випромінювання, і тому свинцеві екрани використовуються для захисту працівників рентгенівських кабінетів; у свинцевих контейнерах зберігають і перевозять радіоактивні препарати. Від радіоактивних випромінювань також захищає тетраетилсвинець, який використовують для різних споруд.

У сучасному будівництві свинець використовують для ущільнення швів і створення сейсмостійких фундаментів.

Важливими галузями застосування свинцю є хімічне машинобудування, де його у вигляді труб і листів застосовують для футеровки та ущільнення трубопроводів і різної апаратури, що працюють у контакті з агресивними середовищами. З нього виготовляють нерозчинні аноди, використовувані при електролізі цинку, міді та ін.

Суттєве значення має свинець високої чистоти, який застосовують у виробництві хімічно чистих реактивів та в наукових цілях.

У металургії свинець використовують у ряді важливих сплавів, зокрема – легкоплавких. Наприклад, сплави свинцю з вісмутом, кадмієм, оловом або ртуттю плавляться в інтервалі температур 48...94 °С.

У медицині свинець у вигляді свинцевої води застосвують для примочок від саден.

Основною сировиною при виробництви свинцю є сульфідні поліметалічні руди, з яких найбільше поширення мають свинцево-цинкові і мідно-свинцево-цинкові руди. Крім свинцю, в таких рудах зазвичай містяться цинк, мідь, кадмій, вісмут, золото, срібло, миш'як, сурма, талій, селен, телур, германій та індій. У природі зустрічаються також мішані і окиснені руди, які мають у даний час обмежене промислове значення.

Найважливішим свинцевим мінералом є *галенiт PbS*. У змішаних і окиснених рудах зустрічаються *церусит* $PbCO_3$ і *англезит* $PbSO_4$. Основні супутні метали в свинцевовмістних рудах присутні у формі *сфалериту ZnS*, *халькопіриту* $CuFeS_2$, *грінокиту CdS*, *арсенопіриту* $FeAsS_2$, *піриту* FeS_2 і *піротину* Fe_7S_8. Порожня порода представлена різними силікатами і карбонатами.

Основні родовища поліметалічних руд містяться в Казахстані, Росії, на Північному Кавказі. Багаті поклади поліметалічних комплексних руд є також у США, Канаді, Австралії, Іспанії, Німеччині. Найбільшими виробниками свинцю за кордоном (приблизно 70...80% від загального випуску) є США, Німеччина, Велика Британія, Японія, Австралія, Франція і Канада [16, 27].

До підприємств свинцево-цинкової підгалузі України належить: ВАТ «Укрцинк» (м. Костянтинівка), з якого виділено в окреме підприємство ЗАТ «Свинець», хоча завод спроєктовано для роботи на привізних цинкових концентратах, а виробництво цинку в Україні практично припинено через відсутність сировини та брак коштів.

Важливе місце в загальному балансі виробництва свинцю (до 40%) займає вторинна сировина – промислові лом і відходи: акумуляторний бій, оболонки кабелів, свинцеві сплави і т.д.

На свинцевих підприємствах в ролі сировинних матеріалів використовують також пил сірчанокислотних установок, мідеплавильних та цинкових заводів і заводів вторинної металургії.

Свинцеві руди, що містять менше 8...9% *Pb*, для безпосередньої металургійної переробки непридатні. З цієї причини практично всі руди, що видобуваються, піддають збагаченню методом селективної флотації.

При збагаченні свинцевовмісних руд відокремлюють більшу частину порожньої породи і одночасно розділяють основні цінні компоненти на самостійні концентрати. При цьому отримують, максимум, шість продуктів – свинцевий, цинковий, мідний, піритний і баритовий концентрати та відвальні хвости.

Виготовлені свинцеві концентрати містять, у мас.%: 30...80 *Pb*; 1...14 *Zn*, до 10 *Cu*, 2...15 *Fe*, 9...15 *S*, 2...13 SiO_2 та до 5 кг/т *Au +Ag*.

Для переробки сульфідних свинцевих концентратів можна застосовувати, в принципі, як пірометалургійні, так і гідрометалургійні технології. Однак, гідрометалургійні засоби видобутку свинцю внаслідок технологічної недосконалості не витримують конкуренції з пірометалургійними і до цього часу не знайшли застосування в промисловості.

За пірометалургійним способом можливі три методи отримання свинцю із сульфідних концентратів: *реакційною*, *осаджувальною* або *відновною* плавками.

Реакційна плавка відома з давніх часів. Класичний варіант цього способу – *горнова плавка* – придатна для переробки тільки дуже багатих свинцевих концентратів, що містять 75...78% *Pb*. В основі реакційної плавки свинцю лежить принцип часткового окисного відпалення концентрату з наступною взаємодією продуктів відпалення із залишком неокисненого сульфіду свинцю.

Осаджувальна плавка заснована на реакції витіснення свинцю з його сульфіду металевим залізом. Хоча у наш час осаджувальна плавка не застосовується в промислових масштабах, реакція, що лежить в її основі, частково реалізується при шахтній відновній плавці.

В результпті, сучасна металургія свинцю практично повністю базується на використанні технологічних схем, що включають *відновну плавку*. На рисунку 1.28 зображена відповідна принципова технологічна схема отримання металевого свинцю із сульфідних руд.

Основою цього процесу є легке відновлення оксиду свинцю (глету) при підвищенні температури навіть у слабо відновній атмосфері. Домішки з великою спорідненістю до кисню при плавці утворюють шлак, а з малою – відновлюються до металів і розчиняються у свинці.

Підготовчі операції перед відновною плавкою на чорновий свинець включають:

1) приготування компонентів шихти;

2) змішування компонентів шихти;

3) агломеруючий окиснювальний відпал зі спіканням.

При шихтовці прагнуть приготувати однорідну за крупністю та хімічним складом суміш, що задовольняє вимогам як агломеруючого відпалу, так і самої відновної плавки.

Отриманий агломерат повинен бути самоплавким, щоб при шахтній плавці не вводити флюси.

Шихту для агломерації формують із сульфідних концентратів, багатих окиснених руд, оборотних матеріалів свинцевого і цинкового виробництв. В якості флюсів застосовують залізну руду (піритовий недопалок), вапняк або кварц. Приготування шихти проводять методом штабелювання в механізованих шихтарниках або бункерним способом на транспортерній стрічці.

Готова шихта для агломерації повинна мати наступний приблизний хімічний склад, у мас.%: 45...50 *Pb*; 6...8 *S*; 10...20 *CaO*; 25...35 *FeO*; 20...25 *Si*. Обмеження вмісту свинцю у шихті зумовлені, в основному, тим, що збагачення шихти свинцем призводить до підвищених його втрат при випалюванні за рахунок випаровування, а відновна плавка бідного агломерату (менше за 45% *Pb*) характеризується гіршими техніко-економічними показниками.

Перед випалюванням шихту ретельно перемішують у барабанних змішувачах і одночасно зволожують до оптимальної вологості 8...10%.

Мета процесу агломеруючого випалювання – окиснити присутні у шихті сульфіди і отримати окускований матеріал, придатний для плавки у шахтних печах.

Для випалення зі спіканням свинцевих концентратів застосовують стрічкові агломераційні машини. У практиці роботи свинцевих заводів у даний час використовують агломераційні машини як з просочуваням повітря, так і з дуттям знизу. Робота машин з дуттям більш ефективна, і їх застосовують зараз на більшості заводів.

Паливом при агломеруючому випалюванні сульфідних матеріалів є присутні в шихті сульфіди.

На практиці свинцеві концентрати, які суттєво забруднені міддю і цинком, намагаються якомога повніше обпалити, щоб при наступному плавленні цинк максимально перейшов у шлак, а мідь – у чорновий свинець.

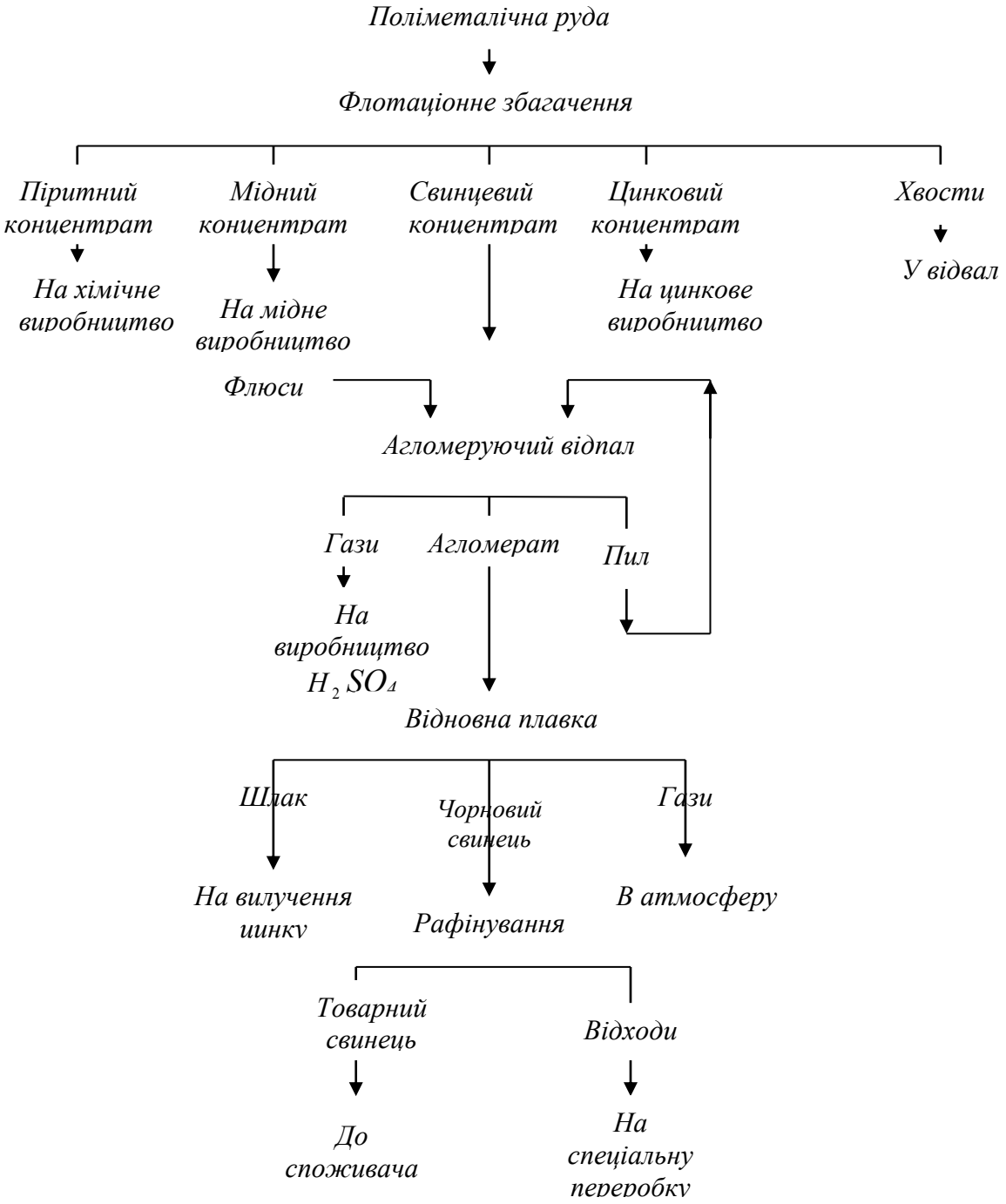


Рисунок 1.28 – Технологічна схема отримання металевого свинцю із сульфідних руд з використанням відновної плавки [16, 27]

На результати відпалу негативно впливає підвищений вміст у шихті сірки. При горінні надмірної кількості сульфідів виділяється багато надлишкової теплоти, матеріал швидко спікається, і сірка вигоряє не повністю.

Випалювання намагаються проводити з максимальним видаленням сірки у газову фазу для запобігання шкідливого впливу сульфіду цинку на наступну плавку. Необхідна ступінь десульфурації при випалюванні досягається або проведенням двоступінчастого випалу (у даний час майже не застосовується), або добавкою до шихти великої кількості (до 300% від маси первинної шихти) оборотного агломерату. При охолодженні рідка фаза обпаленої шихти твердне і зварює всю масу в міцний пористий кусковий матеріал – *агломерат*.

Шахтна відновна плавка свинцевого агломерату є основним способом отримання *чорнового свинцю*, який містить зазвичай не менше десяти домішок.

Свинець як головний компонент представлений в агломераті силікатами, феритом і глетом *PbO*, які можуть бути легко відновлені при температурах більше 1000 ^{0}C у слабовідновній атмосфері. Необхідні для плавки температура і відновна атмосфера у печі забезпечуються горінням коксу.

У цих умовах легше свинцю відновлюються лише оксидні сполуки міді. Відновлена мідь розчиняється у свинці. Сульфіди міді разом з сульфідами інших металів утворюють самостійну фазу – штейн.

Миш'як, сурма, золото, срібло, олово та вісмут, зазвичай, переходять у чорновий свинець. При підвищеному вмісті миш'яку і сурми може утворитися самостійний продукт – *шпейза*, що представляє собою сплав арсенидів і антимонідів металів. Шпейза є джерелом втрат цінних металів, включаючи золото і срібло, і отримання її небажано, оскільки раціональних методів її переробки до цього часу не знайдено.

Шахтні печі свинцевої плавки мають: внутрішній горн, сифон для безперервного випуску чорнового свинцю, шахту з двома рядами кесонів, дворядний фурменний пояс (не завжди) і зовнішній відстійник.

Внутрішній горн постійно заповнений розплавом. У нижній його частині збирається свинець, а вгорі – шлак. У разі утворення при плавці штейну він розміщується між свинцем і шлаком. По мірі накопичення у горні, свинець безупинно витікає в зовнішню сифонну чашу, і далі – у ковш. Сифонний випуск свинцю дозволяє регулювати рівень розплаву в печі шляхом зміни висоти зливного порогу в сифоні.

Шлаки випускають безперервно з внутрішнього горна через шлаковий сифон і періодично – крізь спеціальну льотку.

Шахта печі виконана зі сталевих водоохолоджувальних кесонів, встановлених в нижній частині печі під кутом 5...7° до вертикалі. Максимальна площа перерізу печей в області фурм 11...12 м. Висота шахти 5...6,5 м.

На свинцевих заводах широке поширення отримали шахтні печі з різко вираженим змінним перерізом та двома «поясами» фурм для подачі дуття на відстані близько 1 м одна від одної по висоті. Фурми (у кількості 30...40) у «поясі» зазвичай розташовуються у шаховому порядку. Таке розташування фурм сприяє рівномірному розподілу дуття по всьому перетину печі і покращує умови спалювання палива.

Зовнішній відстійник призначений для розділення рідких шлаку і штейна, а також – відокремлення зважених у них крапель свинцю. На практиці застосовують як пересувні, так і стаціонарні електрообігрівні відстійники.

Продуктами відновної плавки свинцевого агломерату є чорновий свинець, шлаки, штейн, пил і гази. Дуже рідко при плавці утворюється шпейза.

Гази шахтних печей, що складаються з CO, CO_2, N_2 і пари H_2O, забирають значну кількість пилу (4...6% від маси агломерату). Пил шахтних печей містить, у мас.%: 45...55 *Pb*; 10...20 *Zn*; 2...3 *Cd*, а також невелику кількість (соті або тисячні частки відсотка) селену, телуру, германію, індію та талію.

Після очищення від пилу гази випускають в атмосферу.

У шлаки шахтної плавки з шихти переходить до 90% *Zn*, до 20% *Cu*, до 3% *Pb*, невеликі кількості індію, германію, олова, коштовних та інших металів.

Сучасна переробка свинцевих шлаків є обов'язковою стадією замкненої технологічної схеми свинцевого виробництва і дозволяє довести загальне вилучення свинцю до 97...98%.

Для переробки шлаків відновної плавки свинцю з метою вилучення з них більшої частини цінних компонентів застосовують *ф'юмінгування*, *вельцевання* і *електротермію*.

Ф'юмінгуванням («шлакосублімацією») називається процес відновної обробки рідких шлаків продувкою у печі сумішшю повітря з відновником (природним газом або вугільним пилом) у розрідженій атмосфері та при температурі 1200...1300 °С.

Вміщені в шлаці мідь і коштовні метали після ф'юмінгування можуть бути вилучені шляхом обробки рідких шлаків сульфідами у присутності відновника з метою утворення штейну. У штейн вилучаються мідь, золото і срібло.

Цей періодичний процес включає чотири стадії: заливку, розігрів, відновну обробку і випуск шлаку. Пропускна можливість печі за один прийом коливається від 35 до 90 т і залежить від розмірів печі.

Вельцевання шлаків – це процес відновної обробки твердих гранульованих шлаків без їх розплавлення при 1100...1200 °С. Він проводиться в трубчастих обертових печах. Відновником служать кокс і топкові (пічні) гази, що містять *CO*. Хімічні процеси, що протікають при вельцеванні, аналогічні ф'юмінгуванню.

Електротермічна переробка свинцевих шлаків також є відновлювальним сублімаційним процесом, при якому шлаковий розплав реагує з розміщеним на його поверхні коксом.

Шлакосублімаційна руднотермічна піч дозволяє за одну операцію отримати рідкий металевий цинк, свинець, штейн і відвальний шлак. Це є її важливою перевагою у порівнянні з ф'юмінгуванням і вельцеванням [16, 27].

Чорнової свинець містить 90...98% *Pb*, решта – численні домішки. У числі домішок можуть бути мідь, сурма, миш'як, вісмут, золото, срібло та ін. Відповідно до стандарту, вища марка свинцю СО повинна містити не більше 0,008% суми домішок. Деякі домішки у свинці виключають можливість його використання за призначенням, а інші, наприклад, срібло, золото і вісмут, представляють самостійну велику цінність. З цих причин чорновий свинець обов'язково рафінують.

Рафінування чорнового свинцю проводиться переважно пірометаллургійним (вогневим) способом, хоча на деяких заводах для цього використовують електроліз.

Пірометалургійне рафінування чорнового свинцю передбачає послідовне виділення (з урахуванням хімічних властивостей) домішок або їх сполук. На кожній стадії рафінування утворюються проміжні продукти (*«знімання»*), в які переходять домішки і частина свинцю. Знімання піддають додатковій переробці.

Технологія вогневого рафінування чорнового свинцю включає наступні стадії: обезміднення (очищення від міді); обезтелурування; видалення миш'яку, сурми і олова; обезсрібнення (витяг срібла і золота); обезцинкування; обезвісмучування; якісне (остаточне) рафінування від кальцію, магнію, сурми і – іноді – цинку.

Тривалість усього циклу рафінування залежить від багатьох чинників і становить до 100 годин.

Процес *електролітичного рафінування* полягає в електрохімічному розчиненні анодів, відлитих з попередньо обезмідненого вогневим способом свинцю, і осадженні чистого свинцю на катоді. Цим методом у даний час рафінують не більше 20% виробленого у світі свинцю, оскільки відповідна економічна доцільність проявляється тільки при невеликому вмісті у свинці домішок. Стримують широке розповсюдження цього методу мала інтенсивність процесу, складна схема переробки анодних шламів і труднощі підбору електроліту для його здійснення. Але частка електролітного свинцю весь час зростає. Це стимулюється можливістю отримання свинцю високої чистоти (99,995...99,997%) в одну-дві стадії.

Виробництво цинку

Елемент цинк (*Zn*) у періодичній системі елементів Д.І. Менделеєва значиться за номером 30. Це – блакитно-сріблястий блискучий метал середньої твердості, у сухому повітрі тьмяніє, покриваючись тонкою плівкою оксиду, яка захищає метал від подальшого окиснення. Метал високої чистоти є пластичним, і його можна деформувати у листи і фольгу. Технічний цинк досить ламкий при звичайній температурі, але при 100…150 °С стає пластичним і може прокатуватись у листи і витягуватись у дріт.

Вище 200 °С цинк перетворюється в іншу алотропну форму і знову стає крихким настільки, що його можна розтерти в порошок.

Температури плавлення і кипіння цинку дорівнюють 419,5 і 906 °С відповідно. Він кристалізується в гексагональній решітці [16, 27]. Пружність парів цинку надзвичайно висока: він починає помітно випаровуватися вже при 500...600 °С. Цим цинк відрізняється від інших важких кольорових металів.

Для цинку характерні низька межа повзучості; значення межі текучості та межі міцності 104 та 118 МПа відповідно; відносне видовження 25%; твердість за Бринелем 412 та за Віккерсом 903 МПа при 20 °С відповідно [28, 29]. Для нього характерна значна зміна механічних властивостей і розмірів виробів при природному старінні. Ще однією особливістю цинку є висока анізотропність механічних властивостей з переважним орієнтуванням кристалів уздовж напрямку основної деформації.

У вологому повітрі і воді цинк стійкий до 200 °С, окисненню перешкоджає поверхнева плівка гідроксокарбонатів; він реагує з кислотами і лугами, аміаком та солями амонію, з вологим хлором і бромом, при нагріванні – з киснем. Цинк – сильний відновник.

При розчиненні цинку в азотній кислоті водень не виділяється, а йде на відновлення кислоти; при цьому, концентрована кислота відновлюється до оксидів азоту, розбавлена – до аміаку. Розчинення у концентрованій сірчаній кислоті супроводжується виділенням не водню, а діоксиду сірки. Чим менше цинк містить елементів, що мають позитивні електродні потенціали, наприклад, заліза, міді, нікелю, сурми й ін., тим важче йде його розчинення. Відносно слабкий вплив на корозійну стійкість цинку в сірчаній та соляній кислотах надають домішки олова та кадмію. Домішки свинцю і ртуті уповільнюють процес розчинення цинку в зазначених кислотах.

У розплавленому стані цинк необмежено змішується з багатьма металами: *Cu, Ag, Au, Cd, Hg, Ca, Mg, Mn, Fe, Co, Ni, Al, Sn*; у твердому стані утворює гомогенні суміші у дуже обмеженій мірі. Крім цього, з багатьма металами цинк утворює сполуки, наприклад, з *Cu, Ag, Au, Mn, Fe, Co, Ni, Pt, Pd, Rh, Sb, Mg, Ca, Li, Na, K*.

Суміш порошку цинку із сіркою при нагріванні реагує з вибухом.

З киснем цинк утворює міцну хімічну сполуку – оксид цинку *ZnO*. Останній широко застосовується в лакофарбовій і гумовій промисловості.

Забруднений цинк кородує в сотні і тисячі разів швидше, ніж його чисті зразки.

Цинк знаходить широке застосування в промисловості для різних цілей.

В Україні, згідно зі стандартом, цинк виготовляють марок: ЦВ0; ЦВ; Ц0А; Ц0…Ц3, які вдрізняються вмістом (від 0,00001 до 2 мас.%) домішок свинцю, кадмію, заліза міді, олова, миш’яку та алюмінію. Види продукції, при виготовленні якої використовують цинк, зокрема, сплави з нього та відповідні нормативні документи наведено у таблиці А1 Додатку А.

Найбільшими споживачами цинку у світі є США (більше 1,3 млн т/рік), Японія (більше 0,8), Німеччина (більше 0,4), Велика Британія (більше 0,3), Франція (більше 0,24), Бельгія, Канада, Італія, Австралія і Індія (кожна 0,17).

Значна частка (від 30 до 50%) споживаного цинку витрачається на оцинкування сталі. Антикорозійні цинкові покриття наносять на листи, труби, дріт. Оцинковують також апаратуру, ферми мостів, перекриття будівель та інші конструкції.

При використанні цинкового покриття стартових конструкцій при запуску космічних ракет він, випаровуючись, поглинає значну частку тепла, що виділяється при згоранні палива у ракеті. Це запобігає руйнуванню металевих частин стартових конструкцій.

Широко використовують сплави цинку з різними металами, що мають специфічні властивості: з міддю – *латунь*; з міддю й оловом – *бронза*; з міддю і нікелем – *мельхіор* і *нейзильбер*. Значну частку цинку використовують для сплавів, які добре відливаються під тиском, що зумовлює їх широке застосування в авіаційній, автомобільній та інших галузях промисловості.

Досить широко використовуються антифрикційні сплави цинку з вмістом 5…10% *Al* та 5…10% *Cu*, а також друкарські сплави для відливання шрифтів.

Деякі із сполучень цинку служать фарбами: наприклад, оксид цинку («*цинкові білила*»), суміш сульфату барію і сульфата цинку («*літопон*»). Сульфід цинку, легований міддю та сріблом, має люмінесцентні властивості і в суміші з сульфідом кадмію широко застосовувався для виготовлення телевізійних трубок і екранів.

Сульфат і хлорид цинку застосовують у медицині як антисептичні засоби. Гідратований сульфат цинку – це поширений хімічний продукт, який використовують у виробництві синтетичного волокна. Безводний хлорид цинку часто застосувують як дегідратуючий засіб при проведенні різноманітних реакцій конденсації в органічній хімії, його широко застосовують у виробництві органічних барвників, ситцедрукуванні, для просочування деревини. Оксид цинку застосовують у вигляді паст, мазей і присипок при шкірних захворюваннях.

Цинковий прокат, на який витрачається 5…10% цинку, застосовують для виготовлення сухих батарей, цинк-срібних акумуляторів, друкарських плит і будівельних конструкцій.

Цинк у вигляді цинкового пилу застосовують як реагент у виробництві свинцю, коштовних та інших кольорових металів, а також у хімічній промисловості.

Слід мати також на увазі, що під дією органічних речовин, наприклад, кислих харчових продуктів, цинк утворює токсичні солі, тому уникають застосування цинкових виробів у харчовій промисловості.

Основним джерелом отримання цинку є сульфідні мідно-свинцево-цинкові, мідно-цинкові і свинцево-цинкові руди. Цинк отримують, у значній мірі, з тих же руд, що і свинець (*див. вище*).

У сульфідних поліметалічних рудах склад цинку зазвичай складає 1…4%, і присутній він у вигляді *сфалериту* або *вуртциту*, склад яких відповідає формулі *ZnS*, а також *марматіту nZn·mFeS*. Ця сировина також містить зазвичай *Cu, Pb, Ag, Au, Cd, Bi*.

Руди збагачують селективною флотацією, отримуючи цинкові концентрати та одночасно – свинцеві, мідні, а іноді також піритні концентрати.

Цинкові концентрати селективного флотаційного збагачення поліметалічних руд містять, у мас.%: 48...60 *Zn*; 1,5...2,5 *Pb*; 1...3 *Cu*; до 0,25 *Cd*; 3...10 *Fe*; 30... 38 *S*, порожньої породи до 10 (SiO_2, CaO, Al_2O_3 та ін.)

Цинкові концентрати – комплексна, вартісна сировина. З неї вилучають, окрім цинку, свинець, мідь, кадмій, сірку, золото, срібло, ртуть, галій, індій, талій, селен, телур та ін.

Цинкові концентрати випалюють у печах у киплячому шарі, переводячи сульфід цинку в оксид *ZnO*. При цьому утворюється сірчаний газ SO_2, який витрачається на виробництво сірчаної кислоти. Переробку цинкових концентратів здійснюють одним з методів: пірометалургійним (дистиляційним) і гідрометалургійним.

За *пірометалургійним (дистиляційним) способом* (рисунок 1.29), який відомий здавна, випалений концентрат піддають спіканню для додання зернистості і газопроникності, а потім відновлюють вугіллям або коксом при 1000…1300 °С. Утворені при цьому пари цинку конденсують, а конденсат розливають у виливниці.

Можливі декілька варіантів апаратного оформлення пірометалургійного способу отримання цинку:

– в горизонтальних та вертикальних *ретортах* – вогнетривких посудинах різних форм, що обігріваються ззовні топковими газами та іншими теплоносіями в промислових *ретортних печах*;

– в *шахтних печах*, які широко застосовують на заводах кольорової металургії для плавки кускової руди, брикетів, агломерату та різних проміжних продуктів металургійного виробництва, що мають кускоподібну форму;

– в *електричних плавильних печах*, які поділяються на дугові та індукційні.

Принципово, вказане обладнання подібне тому, що вже представлене вище.

Зокрема, індукційні печі, в яких процес зводиться до розплавлення шихти, розкиснювання металу і випуску, мають продуктивність від 10 до 600 т/добу і більше. При цьому є тенденція збільшення потужності печей до 4000 кВт. Питома витрата електроенергії на плавку 1 т цинку складає 110…125 кВт·год при ємності печі 20…110 т.

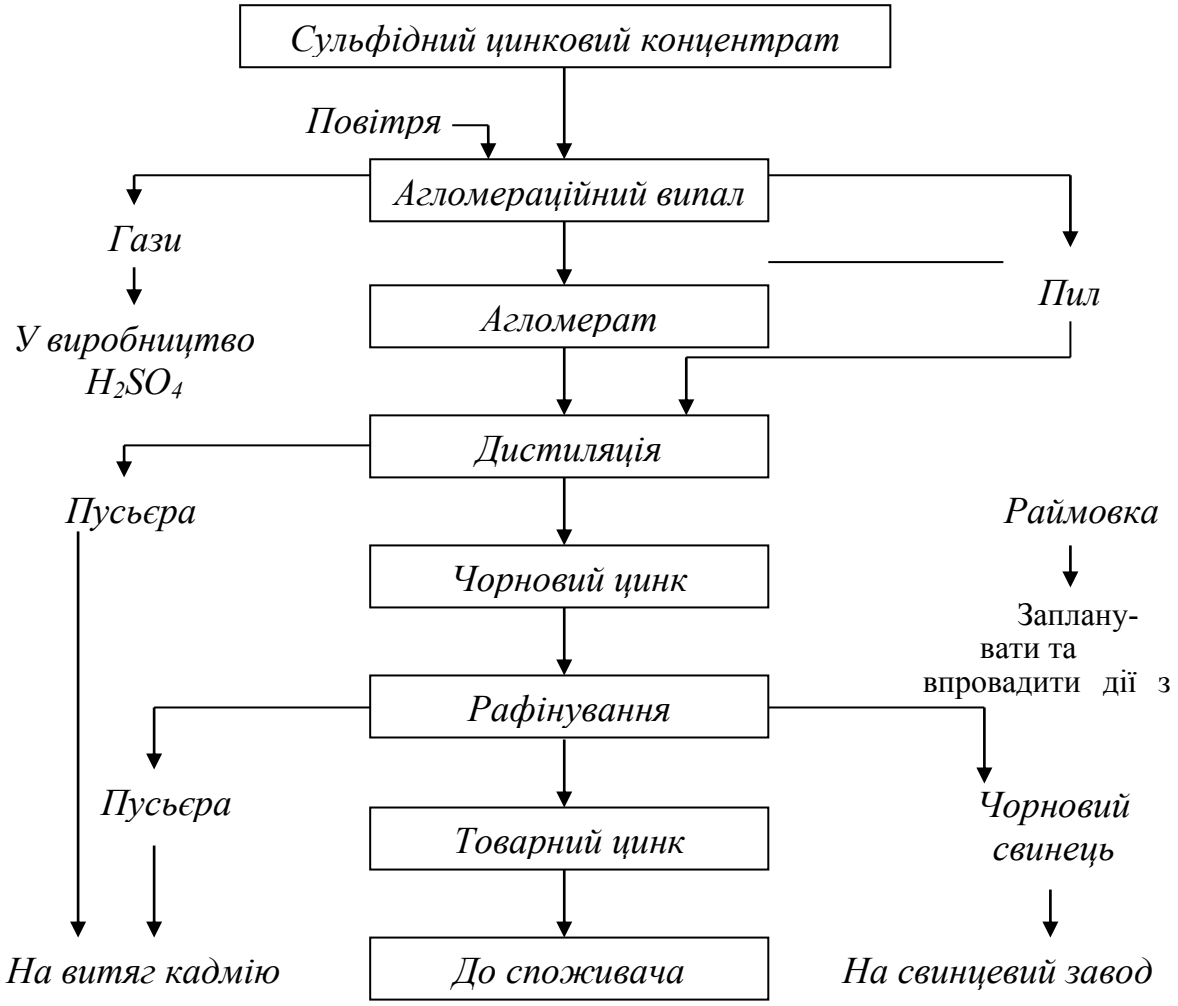


Рисунок 1.29 – Технологічна схема переробки сульфідних цинкових концентратів за пірометалургійним способом [16, 27]

Втрати цинку на угар сягають 0,3…0,4%; у дросси (порошкоподібний шар товщиною 100…150 мм на поверхні розплавленого цинку) і пил переходить до 2% цинку.

Цинк, отриманий одним з пірометалургійних способів, зазвичай, містить велику кількість металів-домішок (*Pb, Cu, Cd, Fe* й ін.), які переганяються разом з ним або виносяться газами у вигляді пилу. Тому дистиляційний цинк, як і всякий чорновий метал, потребує рафінування.

Дистиляційний цинк очищають ліквацією (тобто відстоюванням рідкого металу з відокремленням заліза і частини свинцю при 500 °С), досягаючи чистоти 98,7%.

Застосовується іноді більш складне і вартісне очищення *ректифікацією*, що дає цинк чистотою 99,995% і дозволяє вилучати кадмій. Частка випуску цинку цим способом з року в рік скорочується і на даний час складає не більше 20%.

Основний спосіб отримання цинку – *електролітичний (гідрометалургійний)*, який відображено на рисунку 1.30 [27].

Широке поширення гідрометалургії при виробництві цинку обумовлено її значними перевагами у порівнянні з дистиляцією. До них відносяться:

– більш повне вилучення цинку та супутніх елементів;
– висока якість цинку;
– можливість механізації трудомістких процесів.

Першою стадією цієї технологічної схеми з одержання цинку є випалення цинкових концентратів у *печах киплячого шару.*

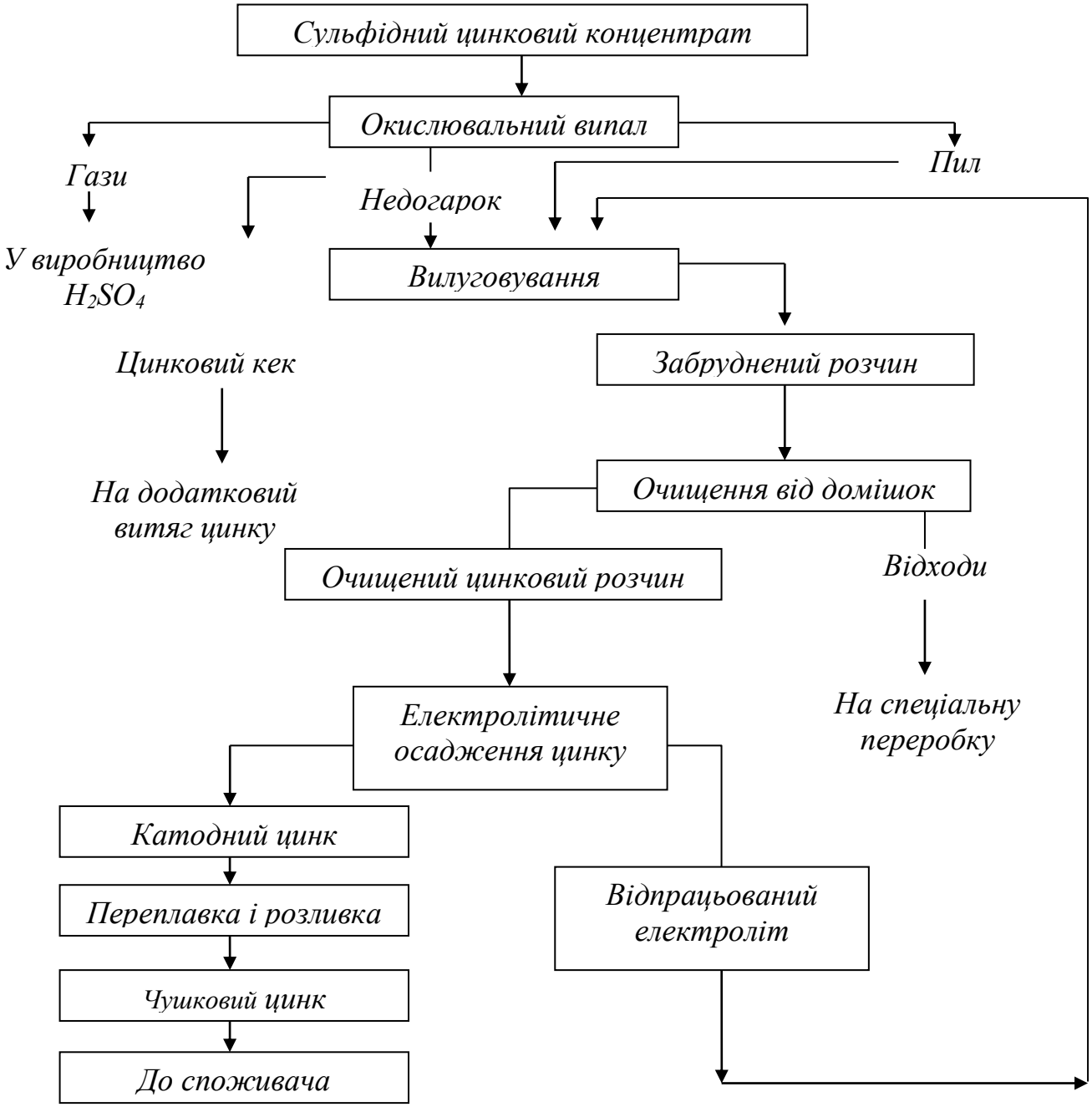


Рисунок 1.30 – Технологічна схема переробки сульфідних цинкових концентратів за гідрометалургійним способом

Киплячий шар характеризується постійністю температури (940…980 °С) у всіх його точках і інтенсивним теплообміном. Дуже важливо, щоб продукт випалення був порошкоподібним.

Піч для випалення цинкових концентратів в киплячому шарі являє собою циліндричну вертикальну шахту іноді змінного перерізу, діаметром 6…8 м і заввишки 9…11 м.

Шахту, зварену зі сталевих листів товщиною 10…12мм, футерують шамотною цеглою. Товщина футеровки 500 мм. Найбільш відповідальною частиною печі є повітророзподільна подина з повітряною коробкою. Подина має бути безпровальною, жаростійкою, простою у виготовленні і забезпечувати рівномірний розподіл повітря, що поступає по всьому перетину печі.

Вихідний концентрат безперервно завантажують у робочу зону печі, а продукт випалення самоплином видаляється з печі.

При такому випаленні нерозчинний сульфід цинку переводиться у водорозчинний оксид цинку при температурах 950…970 °С з отриманням *цинкового недогарка* і пилу. Висококиплячі компоненти (*Pb, Fe, Co, Cu, Ga, In, Tl, Au, Ni, Ag*) також переходять в недогарок і пил. Ртуть практично повністю видаляється з газами. З газами також видаляються у вигляді діоксидів більша частина сірки, миш'яку, сурми, хлору та фтору. У продуктах випалення цинкових концентратів також містяться продукти окиснення і взаємодії компонентів: оксид цинку, сульфат цинку, сульфід цинку, ферит цинку, оксиди заліза, силікат цинку, алюмінат цинку, оксид алюмінію, оксид кадмію, оксиди миш'яку, сурми, нікелю, кобальту, сполуки свинцю, міді, хлориди металів, сульфати і карбонати кальцію і барію, сульфати і сульфіди срібла, золота, рідкісноземельні метали, тобто практично всі елементи, наявні у випалюваному цинковому концентраті.

Недогарок випалення цинкових концентратів і пилу витравлюють відпрацьованим електролітом електролізних цинкових ванн, що містить 100…175 г/л вільної сірчаної кислоти. У процесі вилуговування відбувається перехід у розчин розчинних компонентів недогарка і пилу, перш за все – оксидів металів. Слід мати на увазі, що розчинність ряду компонентів недогарка і пилу залежить від температури випалу.

Завершальною стадією гідрометалургійного способу з отримання цинку є *електроліз* з одержанням катодного цинку. Показники електролізу, в значній мірі, залежать від ступеня чистоти цинкових розчинів, що забезпечується виконанням попередніх технологічних операцій. Отже необхідним стає очищення цинкового розчину від металевих і неметалевих домішок, оскільки вони можуть забруднювати катодний метал, знижувати вихід цинку за рівнем електричного струму, руйнувати поверхню алюмінієвих катодів, на яких осідає цинк, призводити до прискореного зносу свинцевих анодів.

Зазвичай очищення цинкових розчинів від небажаних домішок здійснюють постадійно гідролітичним, хімічним (осаджувальним) і цементаційним методами.

Гідролітичну очистку цинкового розчину проводять при температурі до 80…85 °С. При цьому відбувається співосадження гідроксидів, чи основних солей металів, *pH* гідратоутворення яких менше, ніж у гідроксиду цинку.

Хімічні методи використовують для очищення цинкових розчинів, насамперед, від іонів хлору, фтору і кобальту.

Цинковий розчин (*pH*=5,0…5,4), отриманий у результаті гідролітичного (хімічного) очищення, поступає на *цементаційне очищення* цинковим пилом від міді, кадмію, нікелю і кобальту, а також від деяких інших домішок.

Після цього цинковий розчин, що містить 120…150 г/л *Zn*, направляють до циклу *електролізу* цинку.

На багатьох цинк-електролітних заводах встановлені «стандартні» електролізні ванни з розмірами (2,5…3,0)х1,0х1,5 м. Зазвичай їх виконують з бетону або армованого бетону з футеровкою поліхлорвінілом, гумою або паралайнером.

Останнім часом на всіх нових і реконструйованих підприємствах прагнуть до використання ванн збільшених габаритів.

Кількість однойменних електродів, що встановлюють у ваннах, залежить від довжини ванн, і може складати від 30 до 80 і більше. Відстань між різнополюсними електродами становить 40…45 мм. Від кількості електродів і густини електричного струму на них залежить сумарне струмове навантаження на ванну та її продуктивність.

Підведення струму до полотна катода здійснюють через алюмінієві штанги Т-подібного перетину. Електролізні ванни встановлюють на ізолятори. У торцях ванн є кишені для зливу відпрацьованого електроліту. Для випуску анодного шламу під час очищення ванни, а також для аварійного випуску електроліту в днищі є спеціальні отвори. Термін служби ванн становить 15 років і більше.

Для видалення шламу з електролізних ванн і сульфатних відкладень із системи циркуляційних жолобів сульфатних цинкових розчинів використовується вакуумна система.

Для переміщення анодів і катодів цинкових ванн, а також здирки катодного цинку з алюмінієвих катодів передбачені дві основні схеми:

- зі стикуванням ванн довгими торцями;
- здвоєними рядами, -

що зумовлено особливостями підводу електричного струму до електродів, мінімізацією витрат міді для шин та зручністю обслуговування.

На електроліз надходять нейтральні очищені розчини сульфату цинку, склад яких різний для різних заводів і знаходиться в таких межах, г/л: 120…180 *Zn*; 2…10 *Mn*; 20…300 Cl^-; 20…50 F^-; 0,2…40 *Fe*; 0,1…0,5 *Co*; 0,1…2,0 *Cd*; 0,05…0,2 *As*; 0,01…0,15 *Sb*; 0,01…0,5 *Ni*; 0,05…0,1 *Cu*; 0,05…0,1 *Ge*; <50 SiO_2. Крім того, в очищених розчинах містяться іони лужних і лужноземельних металів: *Na, K, Mg, Ca*, а також може міститися Al^{3+}.

За сучасними технологіями, нейтральний розчин змішується з розчином відпрацьованого цинкового електроліту. При цьому, в розчині, який після змішування подається до ванн, міститься 100…200 г/л H_2SO_4 і 40…70 г/л *Zn*.

Вміст сірчаної кислоти у цинкових ваннах зростає протягом переробки цинкового електроліту, сягаючи 100…170 г/л.

У цинковий електроліт для поліпшення показників роботи цинкових ванн часто вводять різні поверхнево-активні речовини: столярний клей (100…300 г/т цинку), желатин та ін.

Електроліз найчастіше проводять при щільності електричного струму 400…645 А/м^2 з використанням алюмінієвих катодів і свинцевих анодів, на яких, відповідно протікають катодні і анодні процеси. При цьому, *катодний процес* повинен забезпечити отримання катодного металу (цинку) необхідної якості і достатньої щільності, а також необхідне зчеплення катодного осаду з алюмінієвою матрицею, а при реалізації *анодного процесу* основна увага має бути приділена забезпеченню стійкості анода та мінімізації шламоутворення на ньому.

Час нарощування катодного цинку залежить від густини струму електролізу і зазвичай становить 24, 48 або 72 год.

Перед здиркою цинку катоди миють на мийних машинах.

Щодоби здирку цинку з катодів здійснюють на здирочних комплексах, кількість яких залежить від продуктивності цих комплексів і потужності цеху.

Після здирки катодний цинк транспортується у відділення плавки катодного цинку, а звільнені від цинку алюмінієві катоди направляться на візуальний огляд і, в разі відсутності пошкоджень, повертаються до електролізних ванн.

Здерті з алюмінієвих катодів цинкові листи не задовольняють товарним вимогам за товщиною, їх не можна довго зберігати через окиснення поверхні, і, крім того, на поверхні цинкових листів можуть бути забруднення цинковим електролітом. Тому катодний цинк піддають переплавці.

Переплавку катодного цинку, як правило, здійснюють у низькочастотних індукційних печах. Температура плавки цинку становить 500…520 °С. При плавці цинку додають хлорид амонію в кількості 0,5…0,6% від маси розплаву. Хлорид амонію потрапляючи в розплав ванни, переганяється, і його пари вступають у реакцію із забруднюючим оксидом цинку. У результаті протікання реакцій на поверхні

розплавленого цинку утворюються *дроси,* які захищають його від окиснення. Вони вбирають у себе домішки цинку, очищаючи його. Цинк у дросах знаходиться у вигляді металу (35…40%), *ZnO, $ZnCl_2$, $ZnCl_2$, $ZnS0_4$* та *ZnS*. Крім того, дроси містять оксиди марганцю і заліза.

Дроси знімають з поверхні цинкового розплаву, після чого цинк направляють на розливання в чушки.

Для розливу цинку використовують, в основному, *стрічкові машини*. Їх застосування особливо вигідно при плавці цинку в печах великої потужності.

Стрічкова розливочна машина являє собою похилий конвеєр з двох паралельних нескінченних ланцюгів, до яких прикріплені виливниці, що примикають одна до одної, причому кожна виливниця одним своїм краєм трохи перекриває сусідню, щоб рідкий метал не проливався у зазори між ними. До нижнього кінця машини подається ківш з металом, який при нахилі ковша через жолоб заливається у виливниці.

На деяких заводах використовують карусельні розливочні машини.

Зазвичай чистота електролітного цинку 99,95%, повнота вилучення його з концентрату (при урахуванні переробки відходів) 93…94%. З відходів такого виробництва отримують також цинковий купорос, *Pb, Cu, Cd, Au, Ag*; іноді також *In, Ga, Ge, Tl*.

Комплексне розв'язання задачі підвищення техніко-економічних показників електролізу включає підвищення якості розчинів, забезпечення досягнення високого виходу по струму при електролізі, зниження вмісту домішок у цинку, застосування покращених конструкцій електролізерів, контактів, міжванної ошиновки, підвищення організації і культури виробництва. Зниженню витрат електроенергії, в значній мірі, сприяє робота при відносно низькій густині електричного струму 350…450 А/м^2.

Виробництво вольфраму

Вольфрам – хімічний елемент за номером 74, який має позначку *W* в періодичній системі елементів Д.І. Менделєєва. В земній корі його вміст складає 10^{-4} мас.%. На вигляд вольфрам схожий на сталь [16]. Це світлосірий тугоплавкий метал ($t_{пл}$ = 3410 °С) з точкою кипіння 5930 °С і дуже малою швидкістю випаровування. Він зберігає свою міцність при високих температурах. Механічній обробці (куванню, прокатці та волочінню) вольфрам піддається тільки при нагріванні. Електропровідність вольфраму $5{,}5 \cdot 10^{-6}$ Ом·см. Його щільність 19,3 г/см^3. Для нього характерні малий коефіцієнт термічного розширення та висока електронна емісія. Твердість за Бринелем 2000…2500 Н/мм^2 у спеченому стані та 3500…4000 Н/мм^2 після обробки тиском. У відпаленому стані межа міцності 1100 Н/мм^2 , і межа текучості 714…825 Н/мм^2. Для вольфрамового дроту без відпалу межа міцності 1800…4150 Н/мм2. За хімічними властивостями вольфрам близький до молібдену (див. нижче). Проявляє валентність 2…6.

У звичайних умовах вольфрам досить стійкий метал, але при нагріванні на повітрі до 400…500 °С окиснюється з утворенням триокису *WO_3*, здатного з основними оксидами утворювати вольфрамати *$MeWO_4$*. Крім *WO_3*, відомі й оксиди *WO_2*.

Пари води інтенсивно окиснюють вольфрам при температурі вище 600 °С з утворенням *WO_3* і *WO_2*. З галогенами при нагріванні він може з'єднуватися безпосередньо, утворюючи сполуки *WCl_6*, *WO_2Cl_2* і *$WOCl_4$*. З воднем вольфрам не взаємодіє аж до температури плавлення.

З вуглецем вольфрам утворює тугоплавкий карбід *WC*, що має температуру плавлення близько 2780 °С.

У присутності повітря або інших окиснювачів вольфрам розчиняється в розплавлених лугах, утворюючи вольфрамати, і роз'їдається гарячими водними розчинами лугів. Вольфрам слабко піддається дії кислот і «царської горілки», але швидко розчиняється у суміші плавикової та азотної кислот.

Сучасне світове виробництво вольфраму складає приблизно 30 тис. тонн на рік. Оскільки вольфрам є стратегічним металом, збільшення його виробництва співпадає з періодами міждержавного напруження.

У чистому вигляді вольфрам у вигляді дроту, стрічки і різних деталей застосовують в електротехнічній та радіоелектронній промисловості, де використовують низьку пружність його парів при високих робочих температурах (2200…2500 °С).

З початку XX ст. вольфрамову нитку застосовують в електричних лампах освітлення, де накал доводиться до 2200 °С, що забезпечує велику світловіддачу.

Вольфрам застосовують для виготовлення катодів, підігрівачів і контактів в радіоелектронних приладах, рентгенівських і газорозрядних трубках. Вольфрамові нитки діаметром 0,018 мм внаслідок їхньої високої пружності є матеріалом для виготовлення підвісок рухомих котушок гальванометрів та інших подібних їм приладів.

Вольфрамові дроти, трубки і прутки використовують для виготовлення елементів опору в нагрівальних печах, що працюють в атмосфері водню, нейтрального газу або у вакуумі при температурах до 3000 °С. Зокрема, за стандартом (*див. Додаток А*) виготовляють вольфрамовий дріт діаметром від 10 до 1500 мкм для джерел світла марок: ВА, ВРН, ВМ, ВТ-7, ВТ-10, ВТ-15, які відрізняються вмістом *Fe, Ca* та *Mo*, вольфрамовий дріт з чорною поверхнею того ж діапазону діаметрів декілька розширеного застосування марок: ВА, ВМ, ВРН, прутки з ітритового вольфраму марки СВІ-1 діаметрами 2…10 мм, вольфрамові зварювальні неплавкі електроди марок: ЕВЧ з чистого вольфраму, ЕВЛ – з присадкою окису лантану, ЕВИ-1, ЕВИ-2, ЕВИ-3 з присадкою окиси ітрію, ЕВТ-15 – з присадкою двоокису торію діаметрами від 0,5 до 10 мм.

У цілому, металургія споживає майже 95% усього виробленого вольфраму. Характерно, що тут широко використовується не тільки чистий вольфрам, але, головним чином, більш дешевий феровольфрам – сплав, у якому 80% *W* і близько 20% *Fe* (*див. далі*).

Середньостатичне розподілення вольфраму між галузями металургії приблизно наступне: карбід вольфраму і тверді сплави на його основі – 55%, інструментальні сталі – 20%, металічний вольфрам – 15%, жароміцні сплави та ін. – 10%.

З усіх сплавів вольфраму найбільше значення отримали вольфрамовмісні сталі. Вони стійкі до стирання, не дають тріщин, зберігають твердість аж до температури червоного розжарювання. Інструмент з них не тільки дозволяє підвищити швидкість обробки металевих виробів в 10…15 разів, але й служить набагато довше за аналогічні вироби з іншої сталі.

Найбільш важливими вольфрамовмісними сталями є *швидкорізальні* (8…20% *W*), *інструментальні* (1…6% *W* і 0,4…2% *Cr*), *магнітні* (5…9% *W* і 30…40% *Co*).

Суттєві зміни у структурі застосування вольфраму в останні десятиліття зводяться до зменшення частки, що використовується у виробництві сталі, за рахунок збільшення використання вольфраму у виробництві твердих сплавів та виробів з металічного вольфраму.

Ряд твердих сплавів вольфраму містить також карбіди титану, танталу і ніобію. Тверді сплави на основі карбіду вольфраму мають високу твердість, зносостійкість і тугоплавкість. На основі карбіду вольфраму створені найбільш ефективні інструментальні сплави ВК (85…95% *WC* і 5…10% *Co*). Такі металокерамічні сплави одержують методами порошкової металургії (*див. нижче*). Знаходять застосування також литі карбіди вольфраму.

З вольфрамової сталі та інших сплавів, що містять вольфрам або його карбіди, виготовляють танкову броню, оболонки торпед і сердечники снарядів, найбільш важливі деталі літаків і двигунів.

З хромом і молібденом, ніобієм і танталом вольфрам дає звичайні (гомогенні) сплави при будь-яких співвідношеннях. Вже невеликі добавки вольфраму підвищують твердість цих металів та їх стійкість до окиснення.

Сплави вольфраму із залізом, нікелем і кобальтом більш складні. Тут, у залежності від співвідношення компонентів, утворюються або тверді розчини, або інтерметалідні з'єднання (хімічні сполуки металів), а у присутності вуглецю (який завжди є в сталі) – змішані карбіди вольфраму і заліза, які надають металу ще більшу твердість.

Дуже складні сполуки утворюються під час сплавлення вольфраму з алюмінієм, берилієм і титаном. Ці сплави відрізняються жароміцністю і стійкістю до окиснення при високій температурі.

До поширених жароміцних і зносостійких сплавів відносяться сплави вольфраму з кобальтом і хромом – *стеліти*. Їх застосовують, головним чином, для покриттів швидкозношуваних деталей, наприклад клапанів двигунів для літаків, лопатей турбін, штампів та ін.

Сплави вольфраму з міддю і сріблом використовують для виготовлення контактів в рубильниках, вимикачах і електродах точкового зварювання. Вони служать у шість разів довше звичайних мідних контактів.

На практиці найчастіше застосовують сплави вольфраму не з одним якимось металом, а з кількома. Такими є кислотостійкі сплави вольфраму з хромом і кобальтом або нікелем, з них роблять хірургічні інструменти. Кращі марки магнітної сталі містять вольфрам, залізо і кобальт. У спеціальних жароміцних сплавах, крім вольфраму, є хром, нікель і алюміній.

В останні роки важливе практичне значення набули хімічні сполуки вольфраму. Зокрема, фосфорно-вольфрамова гетерополікислота застосовується для виробництва лаків і яскравих та стійких до світла фарб. Розчин вольфрамату натрію Na_2WO_4 надає тканинам вогнестійкість і водонепроникність, а вольфрамати лужноземельних металів, кадмію та рідкісноземельних елементів застосовуються при виготовленні лазерів і стійких на світлі фарб.

Вольфрам зустрічається у природі, головним чином, у вигляді окиснених складних сполук, утворених триокисом вольфраму WO_3 і оксидами заліза та мангану або кальцію, а іноді – свинцю, міді, торію і рідкісноземельних елементів. Відомо близько 15 мінералів вольфраму. З них тільки *вольфраміт* і *шеєліт* мають промислове значення.

Найбільш поширений мінерал – вольфраміт являє собою твердий розчин вольфраматів (солей заліза і мангану вольфрамової кислоти): $mFeWO_4 \bullet nMnWO_4$. Ця сполука має вигляд важких та твердих кристалів коричневого або чорного кольору (в залежності від того, яка складова домінує). Якщо більше з'єднань мангану (*гюбнеріта*), кристали чорні, якщо ж переважає залізовмісний *ферберит* – коричневі. Вольфраміт парамагнітний і добре проводить електричний струм.

З інших мінералів вольфраму промислове значення має шеєліт – вольфрамат кальцію $CaWO_4$. Він утворює блискучі, як скло, кристали світло-жовтого, іноді майже білого кольору. Шеєліт немагнітний, але він має іншу характерну особливість: здатність до люмінесценції при ультрафіолетовому випромінюванні яскраво-синім кольором. За наявності домішок молібдену забарвлення світіння шеєліту змінюється: воно стає блідо-синім, а іноді навіть кремовим. Ця властивість шеєліту використовується в геологічній розвідці та служить пошуковою ознакою, що дозволяє виявити поклади мінералу.

Крупні родовища вольфрамових руд знаходяться в Китаї, Росії, США, Болівії, Кореї та Бірмі.

До підприємств твердосплавної підгалузі України належать: Світловодський казенний комбінат твердих сплавів і тугоплавких матеріалів, ВАТ «Торезтвердосплав», Державний інженерний центр твердих сплавів «Світкермет», концерн «АЛКОН» Національної Академії наук, Державне спеціальне виробничо-технологічне бюро «Інос», Державне підприємство «ІНМА», дільниці твердих сплавів великих машинобудівних заводів. На всіх підприємствах спостерігається значний спад обсягів виробництва у зв'язку з відсутністю вітчизняної сировинної бази.

Найбільш багаті вольфрамові руди містять зазвичай 0,2…2% *W*. Тому їх обов'язково збагачують. При їх збагаченні виникають значні труднощі, зумовлені складністю і різноманітністю складу руд, низьким вмістом вольфраму, високими вимогами до складу концентратів і необхідністю комплексної переробки рудної сировини.

Для збагачення вольфрамових руд застосовують гравітацію і флотацію, магнітну і електростатичну сепарацію.

Вольфраміт флотується значно гірше шеєліту.

З цієї причини основним способом збагачення вольфрамітових руд є гравітація. Вилученню слабомагнітного вольфраміту сприяє електромагнітна сепарація.

Основним методом збагачення шеєлітових руд є флотація.

Під час збагачення вольфрамових руд одержують концентрати з вмістом 55…65% WO_3. Склад і якість таких концентратів регламентуються стандартом, який передбачає вміст WO_3 у концентратах 1-го сорту не нижче 65%. Деякі види вольфрамових концентратів містять до 3…4% Мо. У вольфрамових концентратах обмежується вміст фосфору, сірки, миш'яку, олова, міді, сурми і вісмуту.

Для додаткового видалення домішок вольфрамові концентрати піддають *доведенню* шляхом окиснювального випалювання або обробкою кислотами. При випалюванні видаляють сірку і миш'як, а кислотною обробкою сировину очищають від фосфору, молібдену, заліза та інших домішок.

Усі використовувані в промисловості способи переробки вольфрамових концентратів включають основні технологічні стадії, відображені на рисунку 1.31:

1) розкладання концентратів;

2) вилуговування сплаву або спеку;

3) очищення розчинів вольфрамату натрію від домішок;

4) отримання технічної вольфрамової кислоти;

5) очищення технічної вольфрамової кислоти;

6) отримання вольфрамового ангідриду (триокису вольфраму), який служить вихідною сировиною для виробництва металевого вольфраму або його карбіду.

Реальні технологічні схеми отримання вольфрамового ангідриду WO_3 відрізняються одна від одної тільки способами отримання вольфрамової кислоти.

Для розтину вольфрамових концентратів у залежності від виду сировини та масштабів виробництва застосовують лужну або кислотну обробку.

Найбільшого поширення у сучасній вольфрамовій промисловості одержали лужні способи. Кислотне розкладання успішно застосовують тільки для обробки шеєлітових концентратів.

Застосовують також розкладання спіканням або сплавленням із содою, засноване на реакціях утворення водорозчинних вольфраматів натрію Na_2WO_4. Шихта для спікання вольфрамату включає концентрат, соду та іноді – селітру.

Соду вводять з надлишком 10…15% від теоретично необхідної кількості. Добавка селітри у кількості 1…4% від маси концентрату дозволяє прискорити окиснення заліза і мангану. Реакцію проводять при 800…1000 °С. У залежності від температури реакційна речовина являє собою напіврозплавлену масу (*спек*) або рідкотекучий розплав (*плав*), що забезпечує розкладання вольфрамату на 98…95%.

Для спікання вольфраматових концентратів в безперервному режимі використовують трубчасті обертові печі довжиною до 20 м і діаметром близько 2,2 м. Спек при виході з печі пропускають через валкові дробарки і потім подрібнюють у млинах мокрого розмелювання, пульпу яких направляють на вилуговування.

Для отримання високосортних вольфраматових концентратів (60…70% WO_3) можна використовувати їх обробку розчинами їдкого натру, при якій утворюється вольфрамат натрію Na_2WO_4 , гідроксид заліза і мангану.

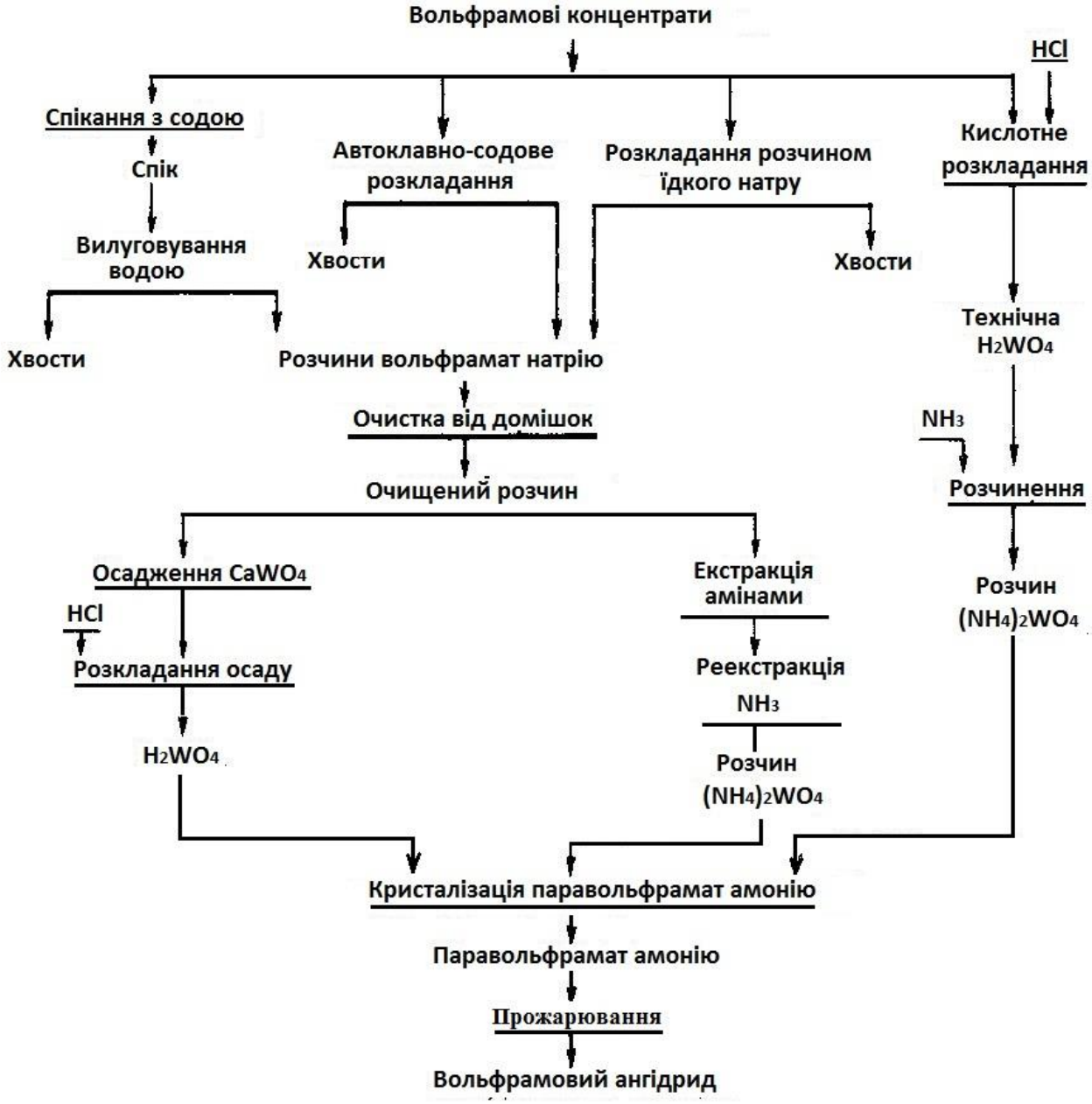


Рисунок 1.31 – Технологічна схема отримання вольфрамового ангідриду з вольфрамових концентратів [16]

Недоліком такого способу є отримання забруднених розчинів і осаду, що важко фільтруються.

При *спіканні шеєлітових концентратів із содою* одночасно з вольфраматом натрію утворюються $CaCO_3$ або CaO. При подальшому вилуговуванні содою гідроксид кальцію здатний переводити вольфрам у форму нерозчинного у воді вольфрамату кальцію $CaWO_4$. Це значно знижує вилучення вольфраму до розчину.

З метою запобігання утворення вільного оксиду кальцію при спікання шеєлітових концентратів до шихти уводять кварцевий пісок для переведення кальцію у важкорозчинний силікат Ca_2SiO_4.

Автоклавно-содовий процес ведуть у трубчастих обертових печах зі значним надлишком соди (50…100%) при 225…250 °С і тиску 2,5…2,7 МПа в автоклавах з перемішуванням механічним і парою. У розчин переходить 98…99% вольфраму.

Безпосереднє *розкладання шеєлітових концентратів кислотним способом* полягає в обробці вихідного матеріалу концентрованою соляною кислотою з отриманням одразу технічної вольфрамової кислоти H_2WO_4, що є найважливішою перевагою методу.

Процес ведуть у футерованих залізних чанах при 90…100 °С протягом 6…8 годин з надлишком кислоти 150…200% проти теоретично необхідного.

На наступній операції спек або плав, що містять вольфрамат натрію, витравлюють гарячою водою (70…90 °С) з метою переведення Na_2WO_4 до розчину. Вилуговування проводять у нагрітих чанах з механічним перемішуванням. Розчини відокремлюють від кеків фільтруванням.

Кінцевою метою переробки розчинів вольфрамату натрію є отримання вольфрамового ангідриду WO_3 із сумарним вмістом домішок не більше 0,05…0,1%, придатного для виробництва металевого вольфраму або його карбіду.

Вихідні розчини вольфрамату натрію, отримані при вилуговуванні спеків або плавів, а також автоклавно-содовим процесом, містять 80…150 г/л WO_3. Домішками вольфраматних розчинів є, в основному, розчинні натрієві солі, кислоти кремнію, фтор, фосфор, миш'як, молібден та сірка. Попереднє очищення розчинів від домішок дозволяє одержати вольфрамову кислоту достатньо чистою.

Очищення від кремнію засноване на осадженні кремнієвої кислоти при pH = 8…9 у результаті гідролізу силікату натрію.

Осадження кремнієвої кислоти проводять у механічних мішалках з паровим обігрівом. Розчини після нейтралізації соляною кислотою кип'ятять (при кип'ятінні кремнієва кислота коагулює і випадає в осад) і тривало ретельно відстоюють. Освітлений розчин відділяють від осаду фільтруванням.

Для очищення від фтору до розчину вольфрамату натрію додають хлористий магній. Фтор при цьому випадає до осаду у вигляді MgF_2.

Очищення від фосфору і миш'яку здійснюють шляхом їх виділення з розчину у вигляді фосфатів і арсенатів магнію. Найбільшою ефективністю відрізняється амонійно-магнієве очищення, спрямоване на осадження з розчину малорозчинних солей.

Очищення від молібдену як самостійну стадію проводять тільки при його високому вмісті (не менше 0,3 г/л). Якщо молібдену в розчинах більше 8…10%, то важливе значення набуває його виділення у вигляді сульфіду в молібденовий хімічний концентрат. Ступінь осадження молібдену при цьому не нижче 98%.

Очищений від домішок розчин вольфрамату натрію направляють на осадження кристалічної вольфрамової кислоти H_2WO_4, яка може бути отримана безпосереднім осадженням або шляхом осадження вольфрамату кальцію з наступним його розкладанням.

Пряме осадження H_2WO_4 є технологічно більш простим способом. Для цього необхідно лише підкислити розчин вольфрамату натрію Na_2WO_4 соляною кислотою.

Однак безпосереднє отримання вольфрамової кислоти пов'язано з утворенням колоїдних осадів, які важко фільтруються.

Більш поширеним способом виділення вольфраму з розчинів є попереднє осадження вольфрамату кальцію Ca_2WO_4, який внаслідок малої розчинності у воді дозволяє отримувати грубозернистий осад з досить високим вилученням вольфраму з розчину.

Повнота осадження Ca_2WO_4 залежить від складу розчину. Рекомендується вести осадження з нагрітих до кипіння розчинів при вмісті у них 120…130 г/л WO_3 і 0,3…0,7 г/л лугу. З розчину осідає 99…99,5% вольфраму. Відмитий гарячою водою осад вольфрамату кальцію у вигляді пасти або пульпи розкладають гарячої соляною кислотою при 90…100 °С з отриманням технічної вольфрамової кислоти, минаючи стадію переведення вольфраму в розчин.

Розкладання Ca_2WO_4 проводять в сталевих реакторах, футерованих кислототривкою плиткою або гумою і забезпечених гумовою мішалкою. Осаджену

вольфрамову кислоту промивають на фільтрі. Відфільтрована і висушена, вона містить зазвичай 0,2…0,3% домішок.

Кислотний спосіб відрізняється від лужного меншим числом технологічних операцій. Однак його застосування стає найбільш ефективним при переробці багатих (до 75% WO_3) і чистих шеєлітових концентратів. При обробці забруднених концентратів спосіб стає неекономічним через необхідність дво– або триразового очищення вольфрамової кислоти.

На наступній операції *очищення технічної вольфрамової кислоти від домішок* її розчиняють в аміачній воді з переведенням вольфрамату до розчину у формі вольфрамату амонію $(NH_4)_2WO_4$.

Розчинення технічної вольфрамової кислоти здійснюють у фарфорових або гумованих залізних чанах з мішалками. У чани подають 25%-й розчин аміаку, що відповідає витраті 115 л аміаку щільністю 0,91 г/м^3 на 100 кг WO_3.

Розчин $(NH_4)_2WO_4$ після відстоювання 8…12 годин відокремлюють від осаду фільтрацією і направляють на виділення вольфраму, який можна брати до обробки у вигляді чистої вольфрамової кислоти або паравольфрамату амонію.

Для виділення з аміачних розчинів паравольфрамату застосовують методи випарювання та нейтралізації.

При *випаровуванні* з розчину видаляється частина аміаку зі зменшенням об'єму розчину приблизно в п'ять разів. В результаті, утворюється паравольфрамат амонію $5(NH_4)_2O•12WO_3•5H_2O$, пластинчасті кристали якого випадають при наступному охолодженні розчину. Кристали зневоднюють на фільтрі, потім – на центрифузі, промивають водою і сушать. При випаровуванні необхідно забезпечити переведення до паравольфрамату не більше 80% вольфраму. Це запобігає його забрудненню домішками.

Випаровування проводять в апаратах періодичної або безперервної дії. Виділені пари аміаку уловлюють у скрубері з отриманням аміачної води, використовуваної для розчинення вольфрамової кислоти. Отримані кристали паравольфрамату амонію містять близько 0,04% домішок.

При вилученні вольфраму *нейтралізацією* розчинів виділяються кристали паравольфрамату амонію голчастої модифікації (з 11 молекулами H_2O). Процес проводять повільним обережним додаванням соляної кислоти до вихідного холодного розчину. Після відстоювання до 24 годин вилучається 85…90% W у кристалічний паравольфрамат.

Для виробництва металевого вольфраму або твердих сплавів на його основі потрібний вольфрамовий ангідрид WO_3. Для його отримання вольфрамову кислоту H_2WO_4 або паравольфрамат амонію $5(NH_4)_2O•12WO_3•nH_2O$ прожарюють у трубчастих обертових печах з електричним обігрівом при 500…850 °С. Температуру вибирають у залежності від виду матеріалу, що прожарюється, і необхідної зернистості одержуваного ангідриду.

Продукт прожарювання повинен містити не менш 99,9…99,95% WO_3, що регламентується нормативними документами.

Отримання металевого вольфрамового порошку відбувається у результаті відновлення вольфрамового ангідриду воднем. У залежності від температури (до 585 °С) та вмісту в реакційному газі водню і парів води відновлення проходить у три або чотири стадії. При проведенні відновлення необхідно враховувати умови з одержання необхідних розмірів частинок порошку, що важливо для реалізації методів порошкової металургії (*див. нижче*), де потрібні частинки різної величини. Укрупненню частинок порошку сприяють швидко наростаючі температура та вологість реакційного середовища і мала швидкість подачі водню.

Для промислового відновлення WO_3 воднем використовують стаціонарні багатотрубні печі з періодичним або безперервним пересуванням нікелевих ємностей («човників») з вольфрамовим ангідридом уздовж труби, а також трубчасті обертові печі.

Найбільше поширення та продуктивність мають багатотрубні печі з трубами, що виготовлені із жароміцної сталі, які одночасно обігріваються електричним струмом (рисунок 1.32).

Вольфрамовий ангідрид у човниках за допомогою штовхачів пересувають назустріч потоку водню. Кожний човник послідовно проходить всі температурні зони, просуваючись у бік більш високих температур і більш сухого водню. У розвантажувальному кінці труби човник охолоджується у холодильнику.

Відновлення можна вести в одній печі або у двох, послідовно розташованих, у яких спочатку оксиди нагрівають до 750 °С, а потім до 900 °С. Двостадійність відновлення більш громіздка і менш продуктивна, але дозволяє точніше регулювати крупність вольфрамового порошку.

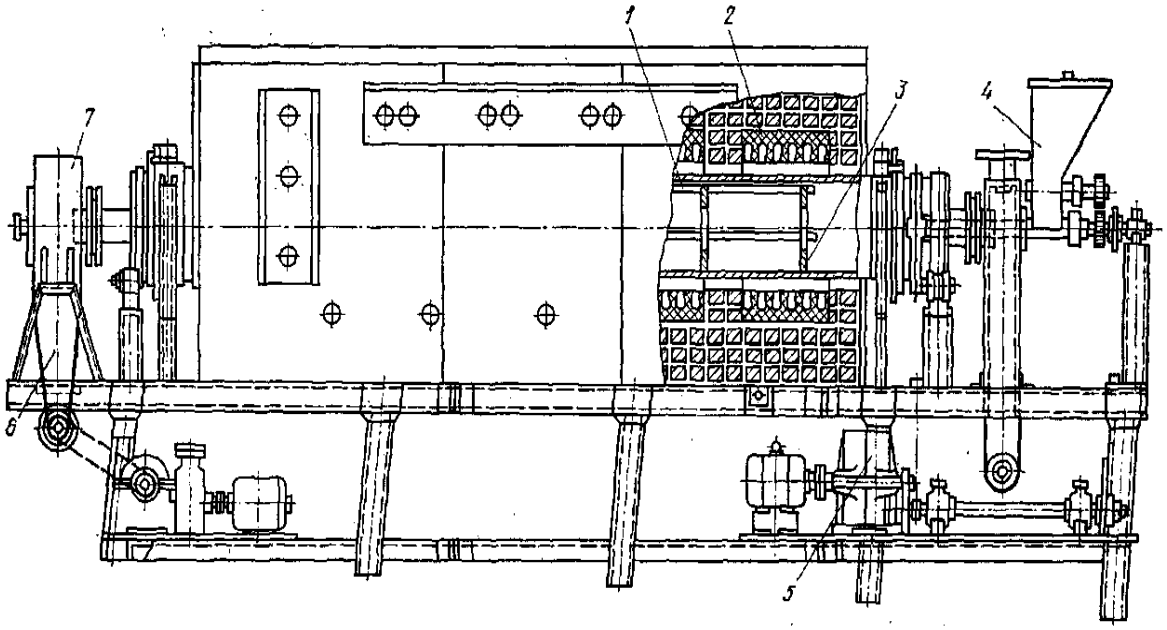


Рисунок 1.32 – Схема трубчатої печі, що обертається, для відновлення WO_3 [16]: 1 – залізна робоча труба; 2 – корпус печі з нагрівачем; 3 – залізні диски з отворами; 4, 6 – завантажувальний та розвантажувальний бункери відповідно; 5 – привід; 7 – камера подачі водню

Продуктивність однієї одинадцятитрубної печі складає для першої стадії відновлення WO_3 близько 10,5 кг/год, а для другої стадії – приблизно 5,5 кг/год.

На сучасних заводах замість круглих труб застосовують труби-муфелі прямокутного перерізу (40×160 мм або 70×160 мм) з механізованим завантаженням і розвантаженням човників. Відновлення WO_3 проводять у прямокутних човниках з молібден-нікелевого сплаву розміром 300×145×30 мм (при низькому муфелі). У печах з високим муфелем застосовують трирівневі човники, в яких вольфрамовий ангідрид розміщений трьома тонкими шарами.

Печі по довжині муфеля мають 4…5 теплові зони. У залежності від застосовуваного режиму відновлення човники перебувають у гарячій зоні від 2,5 до 3,5 годин. Продуктивність муфельної печі з чотирма муфелями становить близько 16 кг/год.

Електропіч безперервної дії має одну робочу обертову трубу діаметром 400 мм і довжиною 4 м. Усередині труби розміщені сталеві дірчасті диски (діафрагми) і поздовжні ребра з кутикової сталі. Цей пристрій запобігає швидкому переміщенню важкого порошку і сприяє поліпшенню його контакту з газами. Рух оксидів та водню в таких печах противоточний.

Відновлення WO_3 проводять при надлишку водню в 5…10 разів вище теоретично необхідного. Після виходу з печей його регенерують шляхом видалення вологи в холодильнику і спеціальному осушувачі.

Іноді для відновлення вольфраму використовують вуглець у вигляді газової сажі. Цей більш простий і дешевий спосіб застосовується, коли споживачі не заперечують проти присутності домішку карбідів, наприклад, при виробництві твердих сплавів. Таке відновлення проводять при 1500 °С в електричних трубчастих печах з трубою із графіту, яка служить одночасно нагрівачем. Шихту з вольфрамового ангідриду і відновника брикетують або завантажують у циліндричні патрони з графіту, які переміщують уздовж розпеченої графітової труби.

Компактний вольфрам одержують методами порошкової металургії (*див. нижче*) та плавкою.

Для отримання великих заготовок вольфраму і його сплавів масою до 3000 кг знайшла промислове застосування плавка в електричних дугових печах з електродом, що витрачається (*див. рис. 1.5*) і електронно-променева плавка (*див. рис. 1.11*).

У більшості випадків плавку ведуть у вакуумі або у розрідженій атмосфері водню, що забезпечує найкращі умови для очищення вольфраму від домішок.

Злитки вольфраму, отримані *дуговою плавкою*, мають крупнокристалічну структуру і підвищену крихкість, що зумовлено виділенням у міжкристалічних межах домішок у вигляді оксидів, карбідів і нітридів.

Електронно-променева плавка дозволяє тривалий час витримувати рідкий метал у глибокому вакуумі і позбутися в результаті цього багатьох летючих домішок. Великі злитки можна отримувати поступово, опускаючи дно кристалізатора. Однак, такі злитки виходять дуже крупнокристалічними, і їх наступна пластична деформація ускладнена. У більшості випадків їх переплавляють у дугових печах з добавкою в якості модифікаторів (для подрібнення зерна) невеликих кількостей карбідів цирконію або ніобію.

Виробництво молібдену

Химічний елемент молібден *Mo* в періодичній системі елементів Д.І. Менделєєва має порядковий номер 42; щільність при кімнатній температурі 10,2 г/см^3. Найбільш характерний для нього шестивалентний стан, хоча відомі сполуки, в яких молібден має валентності 2…5. Молібден плавиться при 2620±10 °С і кипить приблизно при 4800 °С.

Молібден – світло-сірий парамагнітний метал з твердістю за шкалою Мооса 5,5 бали. Він має низький коефіцієнт теплового розширення, питомий електроопір $4{,}8\cdot10^{-6}$ Ом·см. Його твердість 1500…1600 Н/мм^2 за Бринелем у спеченому стані та 2000…2300 Н/мм^2 у кованому стані. Властивості, як і у більшості металів, визначаються чистотою металу і попередньою механічною та термічною обробкою (чим чистіше метал, тим він м'якіше).

В абсолютно чистому стані компактний молібден пластичний, ковкий, в’язкий, досить легко піддається штампуванню та прокатці. При високих порівняльних температурах міцність молібдену перевершує міцність більшості інших металів. Зокрема, його межа міцності для відпаленого дроту знаходиться у межах 800…1200 Н/мм^2 та 1400…2600 Н/мм^2 – для нагартованого дроту. Він більш пластичний, ніж вольфрам, а його відпал не приводить до крихкості.

При забрудненні вуглецем, азотом або сіркою молібден, подібно хрому, стає крихким, твердим і ламким, що істотно ускладнює його обробку. Водень дуже мало розчинний у молібдені, тому не може помітно впливати на його властивості. У звичайних умовах молібден стійкий навіть у вологому повітрі.

Молібдену властива висока корозійна стійкість. У більшій частині лужних розчинів, а також у сірчаній, соляній і плавиковій кислотах молібден стійкий при різних температурах і концентраціях. Швидко роз'їдають молібден азотна кислота, царська горілка, розплавлені луги, суміш плавикової і азотної кислот, а також суміш азотної і сірчаної кислот з водою.

При звичайній температурі молібден стійкий на повітрі; невелике окиснення з проявом кольорів мінливості (*див. нижче*) спостерігається при 400 °С. Починаючи з 600 °С, атмосферне повітря енергійно окислює молібден до MoO_3. У чистому кисні при 500…600 °С молібден горить. При температурі вище за 700 °С пари води інтенсивно окиснюють молібден.

Температура плавлення MoO_3 795 °С, температура кипіння 1155 °С. При температурі вище 600…650 °С MoO_3 помітно випаровується. Ці специфічні властивості MoO_3 важливі для металургії молібдену і успішно використовуються при переробці молібденової сировини.

Із сульфідів практичне значення мають MoS_2 і MoS_3.

Близько 80% загального випуску молібдену марок МЧ, МС, МК, МРН, МЧК, які відрізняються вмістом *Al, Fe, Ni, Si, Ca, Mg, C* та інших домішок, використовується в чорній металургії для виробництва легованих сталей та чавунів. Це здійснюється за рахунок використання феромолібдену (50…70% Mo), молібдату кальцію ($CaMoO_4$) або триокису молібдену MoO_3.

Домішок молібдену до чавуну дозволяє отримати його дрібнокристалічну структуру, підвищити міцність та зносостійкість.

Присадка молібдену до сталей значно підвищує їх прожарюваність. Невеликі домішки молібдену (0,15…0,8%) у конструкційних сталях настільки підвищують їх міцність, в'язкість і корозійну стійкість, що вони використовуються при виготовленні найвідповідальніших деталей і виробів. Вміст 0,15…0,30% *Mo* в сталі надає їй властивість самозагартовуватися при зварюванні на повітрі.

Сталі, леговані молібденом, застосовують для виготовлення ріжучого інструменту, штампів, а багато марок з них відноситься до нержавких. З хромомолібденових і нікельмолібденових сталей, що вирізняються високою межею пружності і в той же час піддаються токарній обробці з високим ступенем точності, виготовляють гарматні та гвинтівкові стволи, бронебійні снаряди, суднові вали, великі кулькові і роликові підшипники й інші важливі деталі.

За стандпртом виготовляють дріт молібденовий діаметром від 15 до 2500 мкм для кернів, сіток електронних приладів, спіралей, траверс, крючків тощо, дріт молібденовий для джерел світла, смуги молібденові відпалені для глибокої витяжки тощо (*див. табл. А1 у Додатку А*).

Сплав молібдену з чистим вольфрамом можна використовувати для різних цілей до 2900 °С у відновній атмосфері. Зокрема, молібденовий дріт може служити обмоткою високотемпературних (до 2200 °С) індукційних печей, але знову-таки – тільки не в окиснювальному середовищі.

Мізерно малий коефіцієнт теплового розширення молібдену зумовив його використання в електровакуумних приладах в якості конструкційного елементу.

У техніці використовують і шкідливу, в принципі, властивість молібдену окиснюватися при підвищеній температурі: ним користуються для очищення благородних газів від домішків кисню. Для цього аргон або неон пропускають над нагрітою до 600…900 °С молібденової поверхнею.

Тугоплавкий, ковкий, що не тьмяніє та має приємний колір, молібден отримав визнання у ювелірів. Ним іноді замінюють дорогоцінну платину.

У хімічній промисловості молібден і солі молібденової кислоти застосовують як каталізатор. Кожівники додають деякі сполуки молібдену до дубильних розчинів, щоб поліпшити якість шкіри.

Молібденіт іноді застосовують як високотемпературне мастило.

Молібден (так само, як бор, мідь манган, цинк) – життєво необхідний мікроелемент, що специфічно впливає на рослинні та тваринні організми.

Зокрема, мікрокількість молібдену сприяє кращому засвоєнню азоту рослинами. Було також встановлено, що молібден входить до складу важливого ферменту

ксантиноксидази. Ця сполука прискорює азотистий обмін в організмі людини, зокрема, пуриновий обмін. У результаті розпаду пуринів утворюється сечова кислота. Якщо цієї кислоти занадто багато, то нирки не встигають виводити її з організму; тоді в суглобах і м'язових сухожиллях скупчуються розчинені в цій кислоті солі, і може початися подагра.

Молібдат амонію знайшов й інше застосування. Виявилося, що він згубно діє на мікроорганізми, і його почали застосовувати в якості дезинфікуючого засобу.

Спочатку шовкові і бавовняні тканини просочували цією речовиною тільки заради того, щоб продовжити термін їх служби. Пізніше відкрилася ще одна особливість впливу цієї речовини на тканину. Якщо просочену молібдатом амонію тканину протягнути крізь розчин відновника (хлористого олова), то вона у залежності від концентрації реактивів забарвлюється в небесно-блакитний чи синій колір. Таку фарбу називають «*молібденовою синню*», або «*мінеральним індиго*». Було складено багато рецептів для фарбування тканин молібденовими солями не тільки у синій, але й у червоний, жовтий, чорний, бурий кольори. Фарбують цими солями вовна, хутро, шкіру, дерево і гуму.

Використовують молібденові сполуки для приготування лаків і для фарбування кераміки. Наприклад, фарфор забарвлюється у блакитний колір молібдатом натрію, а у жовтий – молібдатом амонію. Дуже цінується помаранчева фарба з молібдата і хромату свинцю. А сірчанистий молібден, з якого у давнину робили олівці, стали додавати до глини, забарвлюючи керамічні вироби у жовтий або червоний колір при випалюванні (залежно від кількості MoS_2).

У вільному вигляді у природі молібден зустрічається рідко. В земній корі (3×10^{-4} % за масою) він поширений відносно рівномірно. Концентрація молібдену в породах підвищується у міру збільшення SiO_2. Ультраосновні і карбонатні породи містять молібден у кількості 0,4…0,5 г/т. Молібден знаходиться також у морській і річковій воді, в попелі рослин, у вугіллі та нафті.

Відомо близько 20 *мінералів* молібдену [16]. Найважливішим з них є *молібденіт* («молібденовий блиск») MoS_2 , що містить 60% *Mo*. Цікавими для вилучення молібдену також є *повелліт* $CaMoO_4$ (48% *Mo*), *молібден* $Fe(MoO_4)_3{\bullet}nH_2O$ (60% *Mo*) і *вульфеніт* $PbMoO_4$.

Щорічно з надр Землі добувають мільйони тонн молібденових руд. Близько 99% усього молібдену отримують з руд, що містять молібденіт. В основному, це *мідно-молібденові руди*, в яких молібденіт знаходиться разом з сульфідами міді та заліза. Частіше у таких рудах вміст міді вищий, ніж молібдену, але буває і навпаки. При цьому, вміст молібдену в рудах зазвичай складає соті і навіть тисячні, і дуже рідко – десяті долі відсотка. Коштовним супутником молібдену в мідно-молібденових рудах є *реній*. З цієї причини, не дивлячись на дуже низький вміст у таких рудах ренію (10^{-2}…10^{-5}%), його досить ефективно вилучають при флотації молібденіту.

Окрім мідно-молібденових руд, переробляють також *кварцево-молібденові*, *кварцево-молібдено-вольфрамітові* та *скарнові* руди, в яких молібденіт існую поряд з шеєлітом, піритом і халькопіритом, а порожня порода представлена кварцем і вапняком.

Розробляються родовища молібденових руд у Казахстані, на Північному Кавказі, в Росії. За кордоном найбільш значні родовища молібдену зосереджені в США, Мексиці, Чилі, Канаді, Норвегії і Австралії.

Пряма переробка молібденомістких руд з метою одержання з них молібдену – завдання досить складне. Тому такі руди обов'язково піддають збагаченню флотацією.

Молібденіт належить до мінералів, що легко флотуються. Це дозволяє на практиці з дуже бідної молібденом сировини отримувати концентрати із вмістом 90…95 % MoS_2 при вилученні мінералу з руди до 90 %.

За технічними умовами вітчизняні молібденітові концентрати випускають трьох марок: КМ1, КМ2 і КМ3, у яких вміст молібдену має бути відповідно не нижче 50, 48 і 47%. При цьому регламентується граничний вміст п'яти домішок: фосфору, миш'яку, міді, кремнезему і олова.

При збагаченні поліметалічних молібденових руд часто отримують низькосортні концентрати та проміжні продукти, що містять 15…20% молібдену та значні кількості заліза, міді, кремнезему й інших домішок.

Металургійну переробку молібденітових концентратів можна вести з одержанням феромолібдену для чорної металургії (*див. далі*) або хімічних сполук різної чистоти – триокису молібдену MoO_3, парамолібдата амонія, молібдатів натрію і кальцію (Na_2MoO_4 і $CaMoO_4$), використовуваних у виробництві легованих сталей і чавунів, компактного молібдену або в хімічній промисловості.

Неодмінною складовою частиною загальноприйнятих технологічних схем переробки молібденітових концентратів є їх випалювання в атмосфері кисню з метою переведення молібдену із сульфідної форми до оксидної MoO_3.

Одночасно з сульфідом молібдену при випалюванні окиснюються сульфіди інших металів, присутніх у концентратах, з утворенням ряду інших молібденомісних сполук: MoO_2, $CaMoO_4$, $CuMoO_4$, $FeMoO_4$ та ін. Їх присутність найчастіше небажана, оскільки вони є джерелами втрат молібдену при подальших гідрометалургійних переробленнях.

Супутник молібдену в молібденітових концентратах – *реній* – при випалюванні окиснюється до Re_2O_7 з температурою кипіння 363 °С, що зумовлює високу ефективність відокремлення ренію.

Міра десульфуризації при випалюванні молібденітових концентратів або залишковий вміст сірки в огарку визначається вимогами подальшої його переробки, а також методом і режимом проведення процесу. Якщо огарок призначений для виплавки феромолібдену, то при випалюванні необхідно якомога повніше видалити сірку без істотної сублімації MoO_3, оскільки сірка забруднює сталь і чавун. Кількість молібдатів, що утворилися, не є важливою, оскільки вони не впливають на показники плавки і якість продукції.

Випалювання здійснюють у багатоподових печах, при температурі не вище 680…750 °С (щоб запобігти суттєвій сублімації MoO_3), чим забезпечують отримання огарка із залишковим вмістом сірки 0,05…0,12%. Можливе також випалювання у печах киплячого шару, в електропечах з обертовим кільцевим подом (при температурах до 1000…1150 °С та з організацією уловлювання сублімату MoO_3).

Подальша переробка огарка залежить від призначення і бажаного виду кінцевого продукту.

Технологія одержання компактного ковкого молібдену з випалених концентратів складається з наступних операцій:

1) виготовлення чистого триокису молібдену;

2) виготовлення молібденового порошку шляхом відновлення MoO_3 воднем або вуглецем;

3) переведення молібдену до компактного стану плавкою або методами порошкової металургії.

Для одержання чистого триокису молібдену застосовують сублімацію (завдяки високій летючості молібденового ангідриду при температурі вище за плавлення 795 °С, здебільшого, при 900…1100 °С) або гідрометалургійну (хімічну) переробку огарка.

Сублімація прискорюється при безперервному видаленні пару MoO_3 струменем повітря або з використанням вакууму.

Сублімаційний процес застосовують, переважно, на заводах США та Австрії.

На підприємствах США застосовують круглі печі з кільцевим подом, що обертається (рисунок 1.33). Під впливом високої температури технічний MoO_3 розплавляється, вбирається в пісок і переганяється. Над подом з певною швидкістю просмоктується повітря, що відносить пари MoO_3 і прискорює його сублімацію. Гази, що відходять, проходять через систему холодильників і фільтруються.

За один оберт поду печі переганяється близько 60…65% MoO_3. Сублімований триокис молібдену має чистоту не менше 99,975% *Mo* і характеризується високою

дисперсністю. Подові залишки видаляють шнековим скребком і переробляють гідрометалургійним методом або передають на виплавку феромолібдену.

В Австрії при менших масштабах виробництва сублімацію MoO_3 здійснюють з використанням невеликих електричних печей періодичної дії. Така піч представляє із себе похило розташований кварцевий тигель, що обертається, в який завантажують порцію обпаленого молібденового концентрату. З торця у тигель подається повітря, яке видуває пари MoO_3 у розташований над тиглем конус. Пари за допомогою вентилятора просмоктуються через рукавний фільтр.

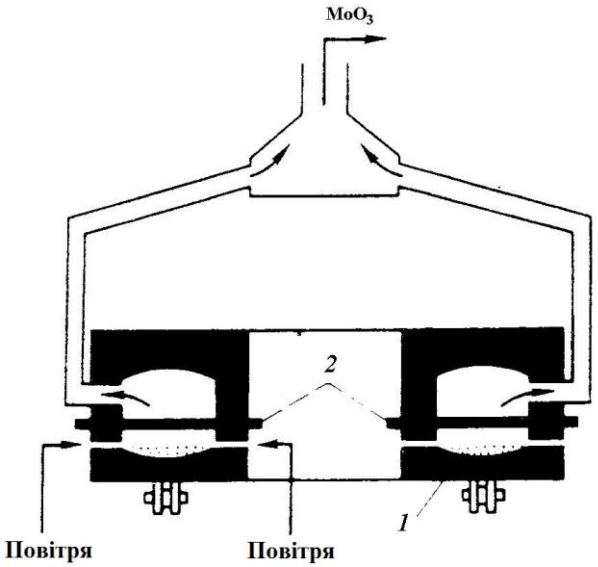


Рисунок 1.33 – Схема печі для сублімації MoO_3 [16]: 1 – кільцевий под, що обертається; 2 – силітові нагрівачі

Сублімаційний спосіб одержання молібденового ангідриду простий і не вимагає витрат реагентів. Але пряме вилучення молібдену малоефективне і залежить від кількості домішок в огарку.

Більш поширеним є *гідрометалургійний спосіб* одержання чистого триокису молібдену. Він заснований на обробці обпаленого концентрату розчинами аміаку і зазвичай називається *аміачним способом* (рисунок 1.34).

Цей спосіб включає вилуговування огарка з одержанням розчинів парамолібдату амонія, очищення розчинів від домішок, осадження і термічне розкладання полімолібдатів (пара– або тетрамолібдату) амонія.

Аміачне вилуговування може бути застосовним до багатих концентратів, що містять мало домішок, які зв'язують при випаленні значну частину молібдену в молібдати та не розкладаються аміаком. При цьому, молібден переходить у розчин з утворенням $(NH_4)_2MoO_4$. У хвостах вилуговування залишаються молібдат кальцію, молібденіт, що не окиснюється, оксид молібдену (II), практично нерозчинні в аміаку, порожня порода, а також частково – молібдат міді, оксид заліза й інші домішки.

При такій обробці залежно від чистоти початкового концентрату вилуговується 80…95 % молібдену. Вихід хвостів складає 10…25 % від маси огарка.

Вилуговування огарків аміачною водою (8…10% NH_3) проводять у сталевих реакторах з механічним перемішуванням або в трубчастих вилуговувальниках, що обертаються. Процес ведуть в трьох-чотирьох послідовно працюючих апаратах за принципом протитечії. Міцні розчини перших двох вилуговувальників із вмістом молібдену 120…140 г/л виводять на очищення від домішок, а слабкі з наступних стадій використовують для обробки вихідного огарка.

Такий вилуговувач представляє собою колону зі змінним діаметром по висоті. Розчин аміаку в апарат надходить знизу, а водяна пульпа огарка – зверху. З верхньої розширеної частини виходить освітлений розчин. З розташованих на різних висотах патрубків випускаються шлами та пісок.

Для очищення молібдатного розчину від заліза і міді застосовують осадження їх сульфатів *FeS* та *CuS* за допомогою сірчанистого амонію. Цинк практично повністю залишається в розчині.

Суттєва інтенсифікація процесу вилуговування досягається в апаратах безперервної дії (рисунок 1.35).

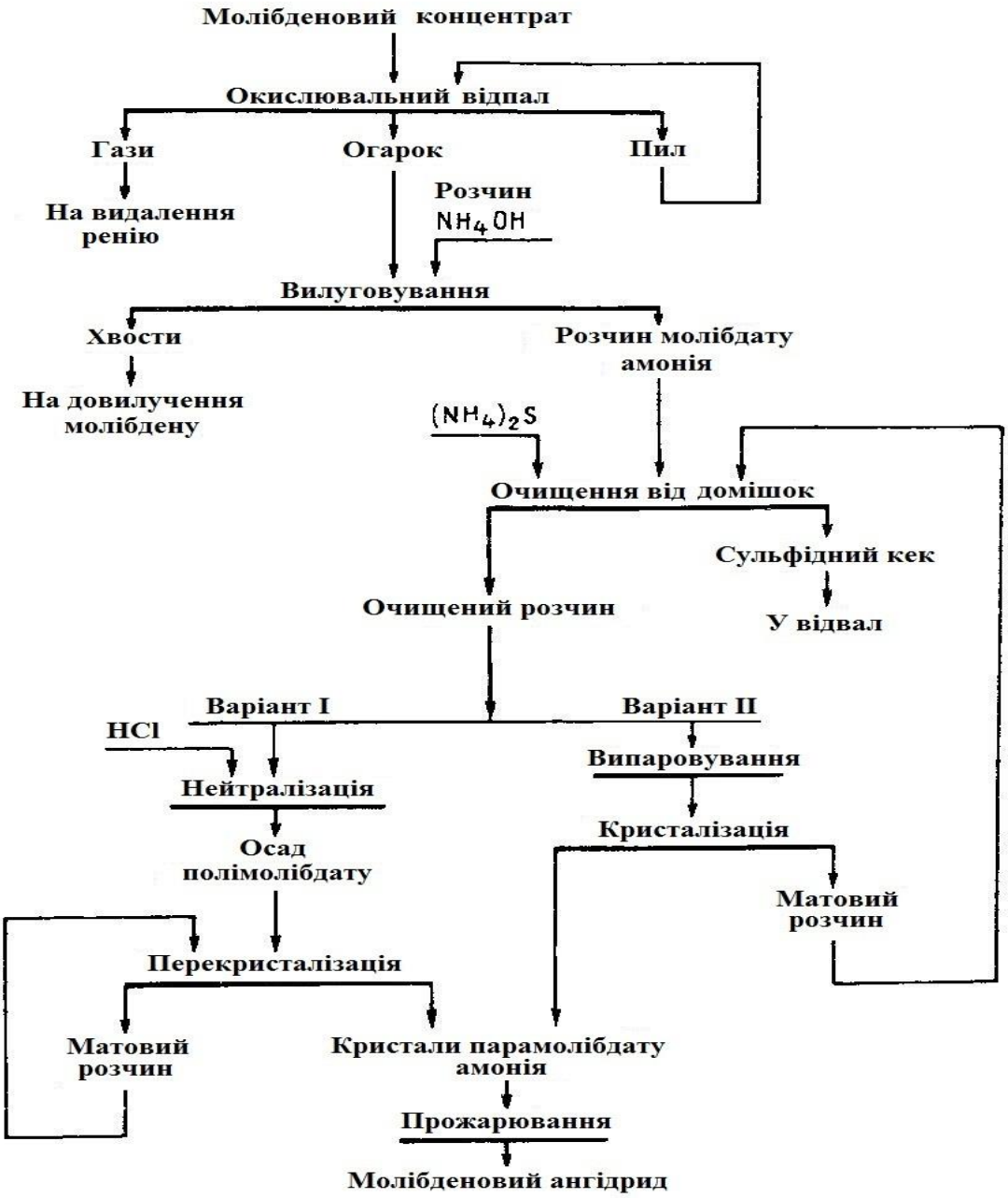


Рисунок 1.34 – Технологічна схема переробки молібденових концентратів аміачним способом [16]

Сульфіди осаджують у сталевих гумованих чанах з перемішуванням. Очищений від домішок розчин поступає на виділення молібдену у вигляді пара– або тетрамолібдата амонія.

Осадження полімолібдатів можна проводити випаровуванням або нейтралізацією розчинів.

Перший спосіб – *випаровування* застосовується рідко, і на вітчизняних заводах зовсім не набув поширення.

Нейтралізація частини аміаку соляною кислотою, що сприяє випадінню в осад двохводного тетрамолібдата амонія, дає вищу ступінь вилучення молібдену і одержання досить чистого продукту. На обробку при інтенсивному перемішуванні та *pH*=2…2,5 має поступати розчин з концентрацією не нижче 280…300 г/л MoO_3. Це дозволяє видалити в осад до 96…97 % молібдену.

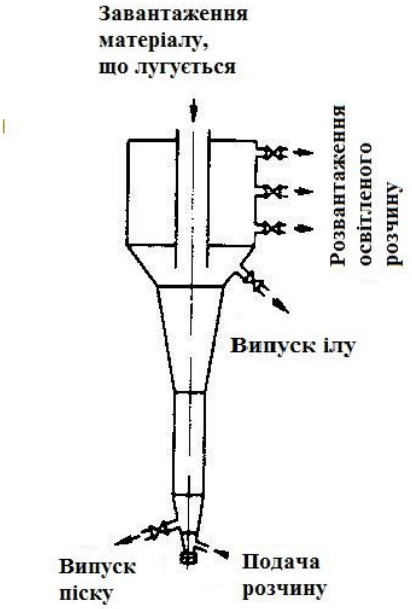


Рисунок 1.35 – Схема апарату для вилуговування молібденових випалених концентратів [17]

Осади тетрамолібдата характерні низьким вмістом лужних і лужноземельних металів, але містять підвищену (до 0,2…0,4%) кількість іонів хлору, які важко відмиваються.

Очищення від хлору проводять перекристалізацією осаду. Для цього сіль розчиняють в аміачній воді при 70…80 °С до насичення розчину. Подальше охолодження таких розчинів до 15…20 °С призводить до виділення близько 60% молібдену у формі кристалів парамолібдата амонія. Залишковий розчин використовують для перекристалізації тетрамолібдата амонія. Поступово в ньому накопичуються домішки, і його виводять на очищення.

Отриманий методом нейтралізації у поєднанні з подальшою перекристалізацією парамолібдат амонія має високу чистоту: вміст домішок не перевищує 0,001…0,005%.

Для одержання блідо-зелено-жовтого порошка MoO_3 використовують термічне (при 450…500 °С) розкладання парамолібдата в електричних печах у тиглі, що обертається, за наступною схемою: $(NH_4)_6Mo_7O_{24} \cdot 4H_2O \rightarrow NH_4)_6Mo_7O_{24}$ (при 90…110 °С) → $(NH)_4Mo_4O_{13}$ (при~200 °С) → MoO_3 (при 280…380 °С).

Для вилучення молібдену з обпалених низькосортних концентратів і хвостів аміачного вилуговування, що містять 5…20% *Mo*, застосовують вилуговування розчинами соди при атмосферному тиску або в автоклавах, а також спікання із содою при подальшому вилуговуванні спека водою. З отриманих розчинів молібдату натрію одержують молібдат кальцію і заліза, які можуть служити вихідною сировиною при виробництві феромолібдену (*див. нижче*).

Розкладання молібденітових концентратів можна також здійснити методами, що виключають попереднє окиснювальне випалення, наприклад, азотною кислотою, автоклавним вилуговуванням у лужному розчині й ін. Деякі з них використовують у промисловості.

Виробництво металевого молібдену складається з попереднього одержання чистого молібденового порошку, який потім переробляється на компактний метал.

Відновлення чистого MoO_3 до металевого порошку в промисловості ведуть воднем у три стадії. Кожну стадію проводять в окремих печах – багатотрубних або трубчастих, що обертаються, які подібні тим, що використовуються при відновленні вольфраму (*див. вище опис та рис. 1.32*). Спочатку емність (*«човник»*) з початковим MoO_3, поступово переміщаючи по трубі печі, нагрівають до 450…650 °С. При цьому, MoO_3 відновлюється до MoO_2.

На другій стадії температуру в човнику доводять до 950 °С. Проте повного відновлення досягти в цих умовах не вдається, і молібденовий порошок містить 0,5…1,5% кисню.

Третю, високотемпературну стадію (1000…1100 °С) проводять в трубчастих печах з герметичним кожухом, заповненим воднем для захисту труб і нагрівачів від окиснення. Це робиться для зниження вмісту кисню нижче 0,25…0,3%.

Молібденові порошки (як і вольфрамові – *див. вище*) можуть бути отримані також відновленням галогенідів $MoCl_5$ або MoF_6 воднем, термічним розкладанням гексакарбонілу молібдену $Mo(CO)_6$ і електролізом у розплавлених середовищах. Порошки молібдену мають середню величину зерен 0,5…2 мкм.

Компактний молібден, (як і компактний вольфрам – *див. вище*) у вигляді заготовок масою до 2000 кг, отримують методами порошкової металургії (*див. нижче*) і способом дугової і електронно-променевої плавки.

У молібденовій промисловості з числа відомих конструкцій дугових печей поширені печі, в яких електрод, що витрачається, заздалегідь готують шляхом зварювання молібденових штабиків у пруток завдовжки 1…2,5 м. Потім прутки поєднують у пакет, що складається залежно від розміру кристалізатора з 4…16 і більше прутків.

Плавку ведуть з кристалізатором, закритим знизу, або з витягуванням злитка шляхом опускання піддону кристалізатора.

Для отримання плавленого молібдену, що містить не більше 0,002% кисню, проводять розкиснювання металу цирконієм, титаном або вуглецем. Розкиснювач уводять до складу електроду, що витрачається, при його виготовленні. Легуючі добавки у разі потреби також уводять до складу електроду або подають до зони дуги. Рівномірність розподілу легуючих елементів досягається повторною плавкою злитка, використовуваного в цьому випадку як електрод, що витрачається.

Злитки молібдену і його сплавів після дугової плавки містять приблизно, у мас. %: $(1…3)\times10^{-4}$ O_2; $(1…2)\times10^{-5}$ H_2 і $(10^{-3}…10^{-4})$ N_2. В результаті електронно-променевої плавки молібден звільняється від переважної частини домішок (*O, N, C, Fe, Cu, Ni, Mn, Co*).

1.2.1.5 Виробництво феросплавів

Вище неодноразово згадувалися *феросплави* – сплави заліза із силіцієм, манганом (марганцем), нікелем, хромом, вольфрамом та іншими елементами, які застосовують при виробництві сталі для легування та покращення її властивостей.

Уводити до сталі таку складову у вигляді не самого металу, а як її сплав із залізом зручніше внаслідок більш низької температури його плавлення та вигідніше, оскільки вартість легуючого елемента у сплаві із залізом нижче порівняно з технічно чистим металом.

Феросплавна галузь України представлена трьома основними підприємствами: АТ «Нікопольський завод феросплавів», АТ «Запорізький завод феросплавів» і ПАТ

«Стахановський завод феросплавів», які розташовані у південно-східній частині України і переважно орієнтовані на експорт.

Початковою сировиною для виробництва феросплавів слугують руди або концентрати.

Для виготовлення основних сплавів: феросиліція, феромарганця; силікомарганця і ферохрома, – використовують руди, оскільки у них високий вміст оксидів елемента, який підлягає відновленню.

При виробництві феровольфрама, феромолібдена, ферованадія, феротитану та інших сплавів руду збагачують та отримують концентрат з достатньо високим вмістом основного елемента.

Феросплави отримують відновленням оксидів відповідних металів. Для цього слід обрати належний відновлювач і створити умови для його ефективного використання. Таким відновником може бути елемент, який володіє більш високою хімічною спорідненістю до кисню, ніж потрібний елемент.

Відновлювальні процеси полегшуються, якщо вони проходять у присутності заліза або його оксидів: при розчиненні відновленого елемента або утворенні з ним хімічної сполуки зменшується його активність, елемент виводиться із зони реакції, що перешкоджає зворотній реакції – окисненню.

У залежності від виду відновника розрізняють три основних способи отримання феросплавів [12, 13, 29…31]: вуглецевовідновлювальний, силікотермічний та алюмотермічний.

Найбільш дешевим відновником являється вуглець, тому його використовують при виробництві вуглецевих феромарганцю та и ферохрома, а також усіх сплавів із силіцієм (останній перешкоджає переходу вуглеця до сплаву). Реакції відновлення металів з їх оксидів вуглецем ендотермічні, тому *вуглецевовідновлювальний* процес потребує підводу тепла. Виплавку феросплавів таким процесом здійснюють у так званих відновлювальних (рудовідновлювальних) феросплавних печах, в яких тепло виділяється електричними дугами, з безперервним завантаженням шихти та періодичним випуском продуктів плавки.

Силікотермічним та *алюмотермічним* способами отримують феросплави з пониженим або дуже низьким вмістом вуглецю: середньовуглецеві та низьковуглецеві феромарганець і ферохром, безвуглецевий ферохром, металічні хром і марганець, феросплави та лігатури з титаном, ванадієм, вольфрамом, молібденом, цирконієм, бором та іншими металами. Ці сплави виплавляють у рафіновочних феросплавних печах, що працюють у періодичному режимі з випуском із печі металу і шлака по закінченні плавки. Якщо тепла, що виділяється при екзотермічних реакціях, достатньо для отримання металу та шлака у рідкому стані, плавку проводять у футерованих шахтах (горнах).

У *відновлювальній феросплавній печі* електроди занурюють у тверду шихту, і дуга горить під її шаром. Шихту доповнюють по мірі її проплавлення. Печі цього типу споживають потужність 10…115 МВ·А (мегавольтампер). Їх виконують стаціонарними або обертовими навкруги вертикальної осі. Раніш печі виготовляли відкритими, а нові печі роблять з робочим простором, який закритий зверху водоохолоджувальним зводом.

Більша частина феросплавних печей має поперечний круглий переріз, а нові потужні печі мають прямокутну форму.

Переважна кількість печей обладнана трьомя електродами, а печі великої потужності іноді мають шість електродів. У круглих печах електроди розміщені по вершинах рівностороннього трикутника, а у прямокутних – у лінію.

Для випуску продуктів плавки пічь має одну-дві, а іноді три льотки. Якщо технологічний процес пов’язаний з роздільним випуском металу і шлака, виконуються дві льотки (металева і шлакова), розміщені на різних рівнях.

Кожух печей виконують з листової сталі товщиною 30 мм і зміцнюють іззовні вертикальними ребрами та горизонтальними поясами жорсткості, днище кожуха роблять

плоским.

Матеріали для футеровки печі обирають у залежності від сплава, який виплавляється. Так, для виробництва силіцієвих сплавів та вуглецевого феромарганцю робочий простір печі футерують вугільними блоками; для виплавки вуглецевого ферохрома – магнезитовою цеглою. Верхню частину стін викладають шамотною цеглою.

У більшості феросплавних печей робочим шаром футеровки слугує *гарнісаж*, тобто шар, утворений рудою, шлаком і сплавом, які проплавляються.

У зводі печі мають місце отвори для електродів, а за необхідності – також для завантажувальних воронок і відведення пічних газів на газоочищення. Є також декілька отворів, обладнаних запобіжними клапанами, оскільки газ у печі, що містить багато *CO*, при змішуванні з повітрям стає вибухонебезпечним.

Реверсивним обертанням ванни (від зовнішнього електродвигуна з механічною передачею) у секторі 130° зі швидкістю один оберт за 35…130 годин запобігають «зависанню» шихти. При такому русі печі її звід залишається нерухомим.

У відновлюваних феросплавних печах використовують безперервні самоспечені електроди, причому формування електрода шляхом обпалення та спікання електродної маси здійснюється в процесі роботи печі. Такі електроди у три рази дешевше за графітизовані, які використовують у дугових сталеплавильних печах (*див. рис. 1.5*).

Самоспечений електрод представляє із себе заповнений електродною масою кожух із сталевого листа товщиною 1…3 мм з поздовжніми внутрішніми ребрами.

Електродну масу виготовляють з термоантрацита, кокса, кам’яновугільної смоли та пека. Допустима густина електричного струму у таких електродах складає 5…8,5 А/мм^2.

Електричне обладнання феросплавних печей схоже з аналогічним оснащенням дугових сталеплавильних печей (*див. рис. 1.5*).

Триелектродні феросплавні печі обладнані трифазним понижуючим печним трансформатором, а іноді – трьома однофазними трансформаторами, від яких струм подається на кожний електрод; шестиелектродні печі мають три однофазні трансформатори, до яких електроди підключені попарно.

Механізм переміщення електродів (на сучасних печах гідравлічний та керований автоматизованою системою) забезпечує за ходом плавки рух електродів донизу, щоб підтримувати довжину дуги та електричний режим у заданих межах, а за необхідності, переміщує електроди догори.

Рафінувальні феросплавні печі мають потужність 3,5…7 МВ·А і служать для виплавки феросплавів з низьким вмістом вуглецю. Вони мають круглу відкриту ванну, а в іншому за своїм пристроєм ближче до дугових сталеплавильних печей (*див. рис. 1.5*), на основі яких їх проєктують.

Такі печі роблять такими, що нахиляються, у зв’яку з чим ванну закріплюють на люльці з механізмом її нахилення; ванна оснащена механізмом обертання, який забезпечує її коловий або зворотно-обертальний рух у процесі плавки.

Механізм переміщення електродів та електроутримувачі такі ж, як у дугових сталеплавильних печах; ці механізми спираються на пол цеха, і при нахилі ванни електроди не нахиляються. Електроди використовують як самоспечені, так і графітизовані. Загрузка шихти така ж, як у відновлювальних феросплавних печах (*див. вище*).

Шихту до феросплавних печей завантажують зверху із спеціальних печних кишень (бункерів), розташованих над піччю та обладнаних затворами.

У закриті печі матеріали подають двома способами. Один з них передбачає потрапляння матеріалів з лотка (труботечки) до воронки, розташованої концентрично навкруги електрода, і далі – у пічь крізь кільцевий зазор між отвором у зводі та електродом. Тоді шихта розміщується у печі конусом навкруги електродів.

В іншому разі матеріали з труботечки потрапляють до печі крізь отвір у зводі і розміщуються осторонь електродів під завантажувальними течками.

До відкритих печей шихта з печних кишень також подається по труботечкам, які можна спрямувати до визначеного місця у ванні.

Застосовують також кидкові машини, які пересуваються по рейкам навкруги печі; робочий орган машини – лоток (лопата), яка вміщує порції по ~25 кг шихти і здійснює кидкові рухи.

Перед доставкою з шихтового відділення феросплавного цеха сирі матеріали проходять спеціальну переробку та підготовку: їх подрібнюють, сортують на фракції потрібної крупності, деякі матеріали миють та висушують. Далі у багатьох цехах матеріали нахиленим стрічковим конвеєром або скиповим підйомником доставляють до бункерів плавильного корпуса цеха, а з них порціями за допомогою дозуючого саморазвантажувального рейкового візка завантажують у пічні кишені. В ряді цехів матеріали з дозуючих бункерів шихтового відділення доставляють системой конвеєрів безпосередньо у пічні кишені.

Виробництво феросиліцію

Феросиліцій використовують для розкиснення та легування сталі та в якості відновника при виробництві деяких феросплавів.

В електричних печах виплавляють феросиліцій різних марок із вмістом силіцію від 19…23% (сплав ФС20) до 92…95% (сплав ФС92). Найбільш розповсюдженими є сплави ФС45 и ФС75, які містять відповідно близько 45 и 75% *Si*.

При вмісті силіцію у сплаві у межах 50…60% і при забрудненні його фосфором та алюмінієм феросиліцій розсипається у порошок з виділенням отруйних летючих сполучень. Тому сплав з таким складом заводи не випускають.

Окрім силіцію та заліза феросиліцій містить і ряд домішок. У сплавів з 41…47% *Si* і більше наявні до 0,1…0,2% *C*, до 0,2…0,6% *Mn*, до 0,05% *P*, до 0,02% *S* и 1,5…2,5% *Al*.

У малокремнистих сплавів (19…27% *Si*) вміст вуглецю сягає 0,6…1,0%.

Рудною складовою шихти являються кварцити, які містять не менше 95% *SiO*, не більше 0,02% P_2O_5 та якомога меньше шлакоутворюючих домішок (глинозема). Кварцит подрібнюють до кусків розміром 25…80 мм і відмивають від глини.

Для отримання заданого вмісту силіцію у сплаві до шихти вводять розраховану кількість заліза у вигляді стружки вуглецевої сталі; залізо, крім того, полегшує відновлення силіцію.

В якості відновника при виплавці феросиліцію застосовують металургійний коксик (відсів доменного кокса) кусками розміром 10…25 мм. Іноді для заміни частини кокса використовують дешевіші матеріали: напівкокс (продукт коксування вуглів при 700 °С) і матеріали, що містять карборунд *SiC* (відход електродного та абразивного виробництв).

Феросиліций виплавляють у круглих печах різних конструкцій: обертових і стаціонарних, відкритих і закритих потужністю 16,5…115 МВ·А при напрузі 130…250 В.

Робочий шар футеровки виконують з вуглецевих блоків. Піч має дві льотки: робочу і резервну.

Процес плавки здійснюється безперервно, готовним чином, побіля електродів. В зоні електричних дуг у шихті утворюється порожнина з високою температурою. Стінки такої порожнини безперервно оплавляються, кремнезем відновлюється вуглецем до силіцію (кремнію), який розчиняється у рідкому залізі; рідкий сплав опускається на подину, а нові порції шихти – до зони реакцій.

Теоретична температура початку відновлення силіцію дорівнює 1554 °С.

У присутності заліза відновлення полегшується і здійснюється при меньшій температурі. Залізо полегшує хід процесу також тим, що руйнує карбід силіцію *SiC*, який може утворюватись при надлишку відновника і, будучи тугоплавким ($T_{пл}$>2700 °С), накопичується знизу печі, захаращує її, що знижує продуктивність.

У зоні високих температур також йде часткове відновлення алюмінію та кальцію з

Al_2O_3 та CaO відповідно, які містяться у кварциті та золі кокса. Тому феросиліцій може містити до 2,5% *Al* та до 1,5% *Ca*.

У відновних умовах плавки больш 60% фосфора з шихтових матерілів переходить до сплава. Сірка цілком випаровується.

З оксидів шихти, які не відновилися, формується шлак у кількості 2…6% від маси сплава. Типовий склад шлака, у мас.%: 25…40 SiO_2, 20…40 Al_2O_3, 10…25 *CaO*, 2…10 *SiC*, 3…8 *BaO*, менше 2 *MgO* та *FeO*. Шлаки мають високу температуру плавлення (1500…1700 °С) і в'язкість.

Шлак виводять з печі крізь льотку разом зі сплавом. При підвищеній в'язкості частина шлака залишається у печі, що може супроводжуватись «заростанням» ванни.

При недостатньому прогріві та спіканнні матеріалів біля стін печі може сформуватися моноліт («гарнісаж»).

Відкриття льотки здійснюють пропалюванням електричною дугою або киснем, пробиванням залізним прутом або буром. По закінченні випуску льотку закривають конічною пробкою із суміші електродної маси та піску або вогнетривкої глини і коксика.

Сплав випускають 12…20 рази на добу у ковш, який футерований шамотною цеглою або графітовою плиткою, а потім розливають у плоскі виливниці або чушки на розливочній машині конвеєрного типу, що аналогічна машині для розливки чавуну (*див. вище*).

Виробництво вуглецевого феромарганцю

Феромарганець використовують для розкиснення і легування сталі.

У феросплавних печах виплавляють вуглецевий феромарганець двох марок: ФМн78 та ФМн70, які містять мангану відповідно 75…82 та 65…75%. У цих сплавах також містяться 5…7% *C*, 1…6% *Si*, 0,3…0,6% *P*, до 0,02% *S*.

Для виплавки феромарганцю використовують неофлюсований та офлюсований марганцевий агломерат і концентрати марганцевих руд, залізорудні окатиші або залізні руди чи залізну стружку, а іноді – вапняк. Марганцеві руди містять багато фосфору, тому й у феромарганці вміст цього шкідливого елемента високий.

У рудах манган знаходиться у вигляді MnO_2, Mn_2O_3, Mn_3O_4 та $MnCO_3$, а головною домішкою являється SiO_2. Вміст мангану в рудах складає 16…57%. Більша частина марганцевих руд бідні; їх збагачують з отриманням концентрату із вмістом 25…43% *Mn* і більше.

Вуглецевий феромарганець виплавляють з бідних руд з підвищеним вмістом кремнезема флюсовим (з додаванням вапна), а з багатих руд – безфлюсовим методом. У другому випадку процес ведуть без додавання вапна і отримують, окрім вуглецевого феромарганцю, ще безфосфористий марганцевий шлак (біля 50% *MnO* та менше 0,02% *P*). Такий шлак використовують замість марганцевої руди для виплавки силікомарганцю або малофосфористих марганцевих сплавів.

Виплавляють вуглецевий феромарганець у закритых круглих або прямокутних печах потужністю до 75 МВ·А з вугільною футеровкою.

При безфлюсовому процесі шихтою слугує марганцевий концентрат (агломерат), що містить більше 48% *Mn*, коксик і залізорудні окатиші або залізна стружка у кількостях відповідно: 2100…2600, 450…500 та 100…200 кг/т сплава.

У цьому процесі ступінь вилучення мангану до сплава складає приблизно 60%.

З оксидів, які не відновилися, формується шлак, який розсплавляється при 1300…1400 °С. Отриманий шлак (1,0…1,2 т/т сплава) містить 45…53% *MnO*, до 29% SiO_2, до 6% *CaO* та менше 0,02% *P*. Такий шлак можна використовувати при виготовленні силікомарганцю (*див. нижче*).

При флюсовій плавці флюс (*CaO*), який уводять до шихти, полегшує відновлення мангану, оскільки пов'язує оксид SiO_2, що міститься у великій кількості у шлаці, у силікат кальцію, вивільняючи *MnO* із сполук із SiO_2. Ступінь вилучення мангану приблизно

дорівнює 75%. Кількість шлака виходить 1,4…1,8 т/т сплава; він містить 8…20% *Mn*, до 33% SiO_2, до 38% *CaO*. Такий шлак відправляють до відвалу. Витрати матеріалів приблизно такі ж, як за попереднім способом, При цьому для отримання необхідної основності шлака використовують або офлюсований агломерат, або неофлюсований з додаванням вапняку (до 0,7…0,9 т/т сплава). Часто у піч уводять відходи феромарганцю.

Плавку ведуть безперервним процесом при невеликій напрузі 110…160 В, щоб уникнути перегріву ванни та втрати мангану через його випаровування. Електроди занурюють у шихту на глибину 1200…1500 мм.

Вищі оксиди мангану (MnO_2, Mn_2O_3 и Mn_3O_4) нестійкі і легко відновлюються оксидом вуглецю газів, що відходять, при низьких температурах зверху шару шихти. Оксид *MnO* відновлюється у високотемпературних зонах поблизу електродів до *Mn* або Mn_3C зі значним поглинанням тепла.

Теоретична температура початку цих реакцій дорівнює відповідно 1420 та 1227 °С, у зв'язку з чим переважний розвиток отримує відновлення за другим варіантом, і сплав тому містить багато вуглецю. Також має місце відновлення вуглецем заліза з окатишів.

Насичені вуглецем часточки мангану плавляться при температурі 1300…1350 °С, розчинюють залізо та опускаються на подину печі.

Із SiO_2 руди відновлюється небагато силіцію, а також біля 90% фосфору, який міститься в рудних матеріалах. Силіцій та значна кількість мангану відновлюються зі шлака.

Сплав і шлак випускають крізь льотку одночасно (три-шість разів на добу) у футерований ковш або в сталевий ошлакований зсередини ковш, забезпечуючи при цьому відокремлення шлака: сплав як больш важкий залишається у ковші, а шлак переливається через сливний носок ковша у чавунні виливниці. Сплав розливають у виливниці або на розливочній машині у чушки.

Окрім феросиліцію та феромарганцю за представленими вище схемами виготовляють ***феросилікомарганець*** – крихкий сплав заліза, силіцію і мангану, який використовують у чорній металургії як розкиснювач сталі. Він сприяє забезпеченню її ударостійкості та зниженню ламкості при вигині.

Феросилікомарганець поставляють подрібненим за нормованими класами крупності без упаковки або у спеціалізованих контейнерах кусками масою не больше 20 кг. При поставці феросилікомарганцю в кусках кількість дрібної фракції, що проходить крізь сито з отворами 20х20 мм, не повинна перевищувати 15% маси партії. Допускається наявність у партії кусків масою больше 20 кг у кількості, що не перевищує 5% маси партії.

Поверхня кусків феросилікомарганцю не повинна мати чужерідних матеріалів. Допускаються на ній лише *незначні залишки* протипригарних матеріалів (вапна, піску), шлакова плівка, одиничні включення шлака. Маса включень не повинна перевищувати 0,5% від маси партії.

Виробництво вуглецевого ферохрому

З усіх легуючих елементів у сталях найбільше застосування знаходить хром. Для легування сталі хромом в Україні виробляють 17 марок ферохрома, з яких вуглецевий ферохром – чотирьох марок: ФХ650, ФХ800, ФХ850 и ФХ900, які містять більше 65% *Cr* та відповідно вуглецю менше 6,5; 8; 8,5 та 9%. У них також міститься до 2% *Si*, до 0,05% *P* і до 0,06% *S*.

Для виплавки вуглецевого ферохрома використовують хромові руди, які містять 30…58% Cr_2O_3, інше – *FeO, MgO,* Al_2O_3, SiO_2. У зв'язку з виснаженням багатих родовищ останнім часом почали використовувати бідні руди (з вмістом до 30% Cr_2O_3), піддаючи їх збагаченню та іноді – агломерації.

До руд і концентратів пред'являють наступні вимоги: вміст Cr_2O_3 не менше 47%; відношення Cr_2O_3/FeO не менше 3,0 (таке співвідношення забезпечує отримання

ферохрома з кількістю хрома більше 60%), вміст SiO_2 не більше 7…9%.

Високий вміст Cr_2O_3 та малий вміст SiO_2 дозволяє зменшити кількість шлака та втрат хрома зі шлаком, знизити витрати електроенергії. Иноді до шихти додають шлак з виробництва середньовуглецевого ферохрома, який містить 27…32 Cr_2O_3, а інколи – обертові відходи сплава.

У якості флюса застосовують кварцит, необхідний для отримання потрібних властивостей і складу шлака, а в якості відновника – відсортований коксик розмірами 10…25 мм, що містить не більше 0,5% *S* та не більше 0,04% *P*.

Потрібну кількість заліза до шихти уводять оксидами заліза, які входять до складу хромової руди з вмістом магнохроміту $MgO{\cdot}Cr_2O_3$. Хромова руда відновлюється вуглецем при 1546 °С.

Приблизна пропорція між складовими шихти: хромова руда 700 кг, коксик 160…170 кг, кварцит до 250 кг; іноді – обертові відходи сплава до 180 кг.

Шлак має високу температуру плавлення (близько 1650 °С).

Вуглецевий ферохром виплавляють безперервним процесом у відкритих і закритих печах з магнезитовою футеровкою потужністю до 40 МВ·А і більше при напруженні 140…250 В. Шихту завантажують рівномірно по поверхні колошника.

Процес плавки зумовлюється такою будовою ванни по висоті: шар твердої шихти, де проходять процеси твердофазного відновлення; зона плавлення порожньої породи та металу, який відновлюється, із шаром рідкого шлака унизу (у кінця електродів); «рудний шар»; шар рідкого сплава. Газових порожнин під електродами немає.

Відновлення Cr_2O_3 до хрома та Cr_7C_3 забезпечується вуглецем з поглинанням тепла при температурах початку реакцій 1240 °С та 1130 °С відповідно. Як видно, легче йде відновлення з утворенням карбіда хрома Cr_7C_3, і ця реакція найвірогідніша. В результаті, сплав, що формується, містить до 8…12% *C*.

З оксидів заліза руди вуглецем легко відновлюється залізо, причому цей процес випереджує відновлення хрома; залізо, розчинюючись у карбіді хрома, полегшує відновлення останнього.

Процеси відновлення протікають, здебільшого, у твердій фазі, начинаючи з 1100…1200 °С, і зі швидкістю, що зростає, у більш гарячих зонах. Основна частина хрома відновлюється при 1400…1600 °С. Одночасно при цих температурах йде і відновлення силіцію.

При температурах приблизно 1550 °С здійснюється плавлення відновленого металу з утворенням ферохрома, краплі якого стікають донизу; при температурах біля 1650 °С починають розплавлятися невідновлені оксиди з утворенням рідкого шлака.

Завдяки тому, що хромова руда тугоплавка, важковідновлювана та погано розчиняється у шлаці, на границі розділення «шлак – рідкий ферохром» формується «рудний шар» – в'язкий шар шлакового розплаву з беззліччю шматочків руди. Під час проходження крапель сплава крізь «рудний шар» здійснюється часткове окиснення вуглецю та силіцію за рахунок реагування з киснем оксидів руди. Фосфор, який міститься у руді, відновлюється і переходить до сплава; основна частина сірки з кокса переходить у сплав, частина її випаровується. Кількість шлака дорівнює 0,8…1,3 т/т сплава.

Сплав і шлак випускають через одну льотку одночасно три-чотири рази на зміну у футерований ковш або у сталевий ковш зі шлаковим гарнісажем від попереднього випуску; надлишок шлака з ковша перетікає до чавунних шлаковань. Після цього сплав розливають у чавунні виливниці (товщина злитка повинна бути менше за 200 мм для зручності подрібнення) або у чушки на розливочних машинах конвеєрного типу.

Витрати матеріалів та електроенергії при виплавці 1 т вуглецевого ферохрома: хромової руди (з 50% Cr_2O_3) – 1900 кг, хромового шлака (30% Cr_2O_3) – 100 кг, коксика 450 кг, кварцита 40 кг, електроенергії 3300…3400 кВт·ч.

Виробництво феронікелю

Усунення більшості недоліків представленої вище технології з використання окиснених нікелевих руд досягається при їх переробці на феронікель – сплав заліза з нікелем, до якого переходить і кобальт. При цьому досягається значне спрощення технологічної схеми переробки, істотне підвищення вмісту нікелю і кобальту, поліпшення використання руди, а також економія палива. Одержаний феронікель можна застосовувати безпосередньо в чорній металургії при виготовленні легованих сталей або переробляти його на марочні сорти нікелю і кобальту.

Технологічна схема отримання феронікелю включає агломерацію або сушку, або прожарювання руди з частковим відновленням оксидів заліза і нікелю до металу в трубчастих печах, що обертаються, плавку огарка, нагрітого до 700…900 ºС, на феронікель в руднотермічних печах з відновником, рафінування і збагачення первинного феронікелю в конвертері з отриманням товарного продукту.

Склад отримуваного чорнового феронікелю визначається складом початкової руди і мірою відновлення заліза. Вихід нікелю при плавці складає 95…97%, кобальту 85…90%.

Товарний феронікель із вмістом 19…25% *Ni* і 1…1,2% *C* розливають у зливки масою по 45…50 кг. Вилучення нікелю і кобальту при рафінуванні складає близько 95…96%.

Одним з можливих способів отримання нікелю і кобальту з такого феронікелю є його переробка в якості присадок при конвертації штейнів на файнштейн.

Виробництво феротитану

Феротитан різних марок у відповідності до вітчизняних стандартів містить 20…40% *Ti*, менше 0,2% *C*, 1…12% *Si*, менше 3% *Cu*, 6…25% *AI*. Мідь, алюміній і силіцій – небажані, але неминучі домішки. Нормативними документами також передбачено можливість випуску сплавів із вмістом 65…78% *Ti*, які, на відміну від вказаних вище, отримують сплавленням титанових відходів або титанової губки зі сталевим ломом в індукційних печах.

Феротитан з 20…40% *Ti* виплавляють, здебільшого, алюмо-термічним процесом, коли алюмінієм відновлюються основні складові сплава: титан і залізо з оксидів концентрату титаномагнетитових руд (ільменітового концентрату). Алюміній використовують у вигляді крупки із зернами менше 2 мм. Частіше за все застосовують дешевіший вторинний алюміній, але він містить домішки кольорових металів, які, переважно, переходять до сплава.

Додавання до шихти оксидів заліза, наприклад, у вигляді залізної руди у кількості до 8% збільшує надходження тепла в процесі її відновлення. Це дозволяє вести процес поза піччю – у футерованій шахті (горні).

Шихту складають з концентрату ільменіту, залізної руди, алюмінію, вапна та феросиліцію. Концентрат ільменіту, який містить 40…42% *TiO* та 50…55% ($FeO+Fe_2O_3$), виділяють з титаномагнетитової руди методом магнітної сепарації. Для видалення сірки концентрат піддають окиснювальному випалюванню при 1000…1150 °С.

Свіжевипалене вапно з вмістом більше 90% *CaO* і крупністю менше 3 мм додають для забезпечення повнішого відновленя титану. Подрібнений 75%-й феросиліцій уводять до шихти у зв’зку з тим, що силіцій також сприяє повнішому відновленню титану та одночасно знижує вміст алюмінію у сплаві. Компоненти шихти дозують та змішують перед завантаженням у плавильну шахту.

Концентрат ільменіту на змішування подають безпосередньо після випалення при температурі 400…450 °С, що забезпечує необхідний нагрів шихти на 150…250 °С. Іноді до складу шихти уводять відходи титану та його сплавів (стружку, обрізь, куски), які завантажують на дно шахти.

Плавильна шахта (горн) представляє собою розбірний циліндричний чавунний кожух, футерований магнезито-хромитовою цеглою.

Дозовану та перемішану шихту подають до розміщеного над шахтою завантажувального (плавильного) бункера, а з нього – до шахти. На одну плавку витрачають 4…6 тонн концентрату ільменіту.

На дно шахти з бункера насипають біля 150 кг шихти і розпалюють її запальною сумішшю, яка складається з магнієвої стружки та селітри. Суміш розміщують у лунці в центрі шару шихти і підпалюють електричною іскрою. Від тепла запальної суміші починається екзотермічний процес відновлення спочатку частини шихти, яка міститься поряд з лункою, а потім від неї запалюється шихта у всій шахті. З бункера до шахти рівномірно потрапляє решта шихти. Як приклад, проплавлення 5 тонн концентрату продовжується 15…18 хв.

Протягом цього часу у шихті йде відновлення заліза та титану; останній розчиняється у залізі. Тепло екзотермічних реакцій відновлення забезпечує нагрів і плавлення сплава та шлака: температура процесу складає близько 1950 °С.

Краплі сплава, які формуються в об'ємі шахти, опускаються крізь шар шлака і накопичуються на її дні. Приблизний склад шлака, у мас. %: 11…14 TiO_2, 70…74 Al_2O_3, 10…14 CaO, 3…4 MgO, 0,8…2 FeO, менше 1,0 SiO_2.

Шлак, який містить біля 70% Al_2O_3, є тугоплавким і густим. Тому по закінченні плавки на поверхню шлака подають термітну осаджувальну суміш із залізної руди, алюмінієвого порошку, феросиліцію та вапна. Під дією додаткового тепла, що виділяється при взаємодії оксидів руди і відновників, шлак розріджується, і частинки феротитану отримують додаткову можливість осісти на дно та приєднатися до металу.

Після затвердіння блок шлака знімають, блок металу охолоджують у баці з проточною водою та подрібнюють на куски масою до 10 кг.

Під час плавки відновлюється та переходить до сплаву приблизно 77% титану та 99% заліза.

На 1 тонну феротитану, який містить 20% Ti, витрачається 1070 кг концентрату, 100 кг залізної руди, 470 кг алюмінієвого порошку, 20 кг 75%-го феросиліцію та 100 кг вапна. Вилучення титану складає 72…75%.

Виробництво феровольфраму

Феровольфрам – сплав заліза і вольфрама, який використовують у чорній металургії для легування сталі і сплавів. З його застосуванням отримують швидкоріжучі, жароміцні, магнітні, деякі конструкційні сталі; він збільшує межу міцності на розрив, межу текучесті і твердість сталі при кімнатній та високих температурах, збільшує інтенсивність намагнічування і покращує коерцитивні властивості магнітних сталей.

Феровольфрам згідно з нормативними документами (*див. Додаток А*) випускається марок ФВ 80(а), ФВ 75(а), ФВ 70(а), ФВ 72, ФВ 70 и ФВ 65 із вмістом 80…65% вольфрама відповідно і включає до 7 % молібдена, домішки алюмінію (до 6%), силіцій (до 2%), вуглець (до 0,7%), сірку (не більше 0,15%), фосфор (не більше 0,1%) та ін. елементи.

Руди вольфрама (*див. вище*) зазвичай містять 0,2…0,5 % WO_3; часто в них присутні мінерали молібдена, олова, міді, миш'яку та ін.

Для отримання феровольфрама руди збагачують різними методами з отриманням концентратів, які зазвичай містять 55…65 % WO_3. Руди, які містять велику кількість заліза, можуть бути піддані додатковому збагаченню у магнітних сепараторах. Для доведення концентратів до необхідного рівня вимог застосовують флотацію та електростатичну сепарацію.

Шеєлітові руди збагачують флотацією в жирних кислотах (олеїнова кислота, олеат натрію, рідке мило) з використанням соснової олії або креозола в якості вспінювача.

Оксиди вольфрама можуть бути відновлені до W вуглецем, силіцієм або алюмінієм з одночасним отриманням CO, SiO_2 або Al_2O_3 відповідно.

Якщо на першій стадії процесу відновлювати вольфрам вуглецем, а на другій — довилучати метал зі шлака силіцієм, можна отримати сплав з низьким вмістом вуглецю

при високому вилученні вольфрама.

Виплавку феровольфрама [31] як тугоплавкого сплаву, ведуть «на блок» або з вичерпуванням з печі металу у «тістоподібному» стані. При цьому використовують рудовідновлювальні печі потужністю 2,5…5,0 МВ·А, футеровані магнезитовою цеглою (в ході плавки також утворюється металічний гарнісаж).

Початкові матеріали для плавки – вольфрамовий концентрат, нафтовий та пековий кокс, гранульований феросиліцій, сталева стружка, вольфрамовмісний шлак. Основний відновлювач – вуглець кокса, який пов'язує до 60% кисню; решта кисню сполучається із силіцієм феросиліцію. Сталева стружка знижує вміст вольфрама у сплаві до заданого рівня та зменшує в'язкість сплава.

Плавку ведуть безперервно циклами; на подині печі завжди є шар металу.

Цикл плавки починається із заправки ванни напіврідким металом і твердими відходами дроблення готового сплава; одночасно опускають електроди.

Основний час циклу за характером процесів, що протікають, та операцій, які виконуються, можна умовно разділити на три періоди.

У першому періоді відбувається проплавлення шихти та рафінування металу попереднього циклу від силіцію, вуглецю і мангану за рахунок окиснення цих домішок киснем з концентрату.

Другий період – вичерпування з печі кондиційного (за вмістом домішок) сплава сталевими черпаками за допомогою спеціальної машини; при цьому продовжують завантаження залишків концентрату невеликими порціями.

Третій період – довідновлення WO_3 із шлака силіцієм феросиліцію. Одночасно відновлюються та переходять до сплава манган і залізо; крім того, збільшується вміст у сплаві силіцію та вуглецю. Після отримання шлака з вмістом WO_3 нижче за 0,25 % його витримують у печі 10…15 хвилин і випускають.

Гази, що відходять з печі, піддають очищенню від пилу в батарейних циклонах і електрофільтрах. Пил батарейних циклонів брикетують і повертають на плавлення, пил з електрофільтрів переплавляють в окремій електропечі, де отримують сплав з високим вмістом свинцю, вісмута і олова, а також шлак з високим вмістом WO_3.

Сплав відправляють на переробку на заводи кольорової металургії, а шлак повертають до печі для виплавки феровольфраму.

У деяких випадках феровольфрам виплавляють за двостадійою схемою:

1) відновлення WO_3 та FeO вуглецем у першій печі;

2) рафінування отриманого сплава – окиснення домішок киснем вольфрамового концентрату і залізної руди – у другій печі.

Феровольфрам і лігатури вольфраму з хромом або нікелем можуть бути отримані також *алюмотермічним способом*. При цьому, тепла, що виділяється при відновленні алюмінієм триоксиду вольфраму і оксидів домішок недостатньо для нормального протікання плавки. Тому процес ведуть в електропечі.

За одним з варіантів такого процесу до складу шихти уводять шеєлітовий концентрат, порошок алюмінію, залізну стружку, залізну окалину та вапно, а також кірки шлака, металеві відходи попередніх плавок, уловлений пил. Шихту перед плавкою брикетують.

Плавку починають з подачі на подину певної кількості брикетів; їх запалювання здійснюють запальною сумішшю із залізної окалини та алюмінієвого порошку. Після утворення розплаву опускають електроди, забезпечують електричне навантаження та починають завантаження шихти. Після проплавлення всієї шихти довідновлюють шлак алюмінієвою крупкою, витримують його у печі та випускають. У печі залишається злиток феровольфраму та шар сплава з підвищеним вмістом молібдена, силіцію та алюмінію. Цей сплав переплавляють і рафінують сумішшю залізної руди та вапна.

Виробництво феромолібдену

Феромолібден – сплав молібдена із залізом. Його використовують замість чистого молібдена при легуванні сталей, чавунів і сплавів. Молібден покращує загартуваність і прокалюваність сталі, збільшує її в'язкість, ліквідує відпускну крихкість хромонікелевої сталі, сприяє збереженню властивостей сталі при високих температурах. Добавка молібдену до чавуну збільшує його міцність та опір зносу.

Згідно зі стандартами (*див. Додаток А*) феромолібден випускається марок: ФМо60(нк), ФМо60, ФМо58(нк), ФМо58, ФМо55 та ФМо50 з вмістом від 60 до 50% молібдену відповідно і включає до 0,8% вольфраму, до 3% силіцію, до 0,5% вуглецю, не більше 0,1% фосфора, 0,5% сірки, 2% міді та інші домішки. Крім того, сплав може містити гази, сумарно до 100 см³ на 100 г сплава, у тому числі – кисень 0,02…0,05 %, азот 0,018…0,03 %, водень 10…25 см³. При зберіганні куски феромолібдена адсорбують вологу повітря.

Сировиною для виробництва феромолібдену слугують кварцево-молібденітові, мідно-молібденові та молібдено-вольфрамові руди, основним молібденвмісним мінералом яких є *молібденіт* MoS_2. Збагачують таку сировину переважно флотацією. У результаті збагачення отримують молібденові концентрати, які містять до 35 % сірки як у складі MoS_2, так і в сульфідах інших елементів: міді, заліза та ін. [27, 31].

Для переведення молібдену до оксидної форми (MoO_2, MoO_3) концентрат піддають окиснювальному випалюванню. При цьому окиснюються і сульфіди інших металів (заліза, міді, нікелю, цинку тощо). Процес супроводжується виділенням великої кількості тепла, зовнішній підігрів тут потрібний, переважно, наприкінці випалювання, коли сульфіда молібдена в огарку залишається небагато.

Випалювання здійснюють у багатоподових печах при температурі не вище 680…750 °С (для запобігання великих втрат молібдену досить летючим MoO_3). Можливим також є випалювання у печах киплячого шару, в електропечах з кільцевим подом, що обертається (при температурах до 1000…1150 °С та з уловлюванням парів MoO_3).

Можна побіжно відмітити, що молібденітові концентрати – одно із джерел отримання *ренію*. При випалюванні останній утворює летючий оксид Re_2O_7, який видаляється з пічними газами та накопичується в продуктах системи пиловловлювання.

Феромолібден отримують наступним чином.

Огарок від окиснювального випалювання молібденового концентрату відновлюють на феромолібден. При цьому, в принципі, можливо використовувати вуглецевий відновник, але утворення карбідів тут призводить до отримання високовуглецевого сплава, тоді як вміст вуглецю в товарному феромолібдені повинен бути не вище 0,05…0,5 %.

Тому частіше застосовують силікотермічне відновлення. За одним із способів в якості відновника при цьому використовують феросиліцій та (для забезпечення необхідної температури) алюміній, силікоалюміній або феросилікоалюміній.

Для розрідження висококремнеземистого шлака до шихти додають плавиковий шпат і вапно. Крім того, до шихти уводять залізну руду як флюс і джерело додаткового заліза і кисню.

Позапічне силікотермічне відновлення ведуть у горні, який футерований шамотом. Горн установлюють у піщану основу із заглибленням для сплава, що виплавляється. Над горном встановлюють зонт системи пилоуловлювання.

Плавку ведуть з верхнім або нижнім запалюванням (запальний матеріал — суміш стружки магнієвого сплава, алюмінієвої крупки та селітри).

Після завершення основної реакції розплав витримують у горні для відстоювання часток («*корольків*»).

По закінченні процесу шлак випускають і жолобом подають до басейну для грануляції, а блок феромолібдену охолоджують та подрібнюють. Відходи подрібнення

переплавляють у невеликій (2,5 МВ·А) електропечі.

Вилучення молібдена складає 98,7…99 %.

Куски феромолібдена можуть бути дуже неоднорідні за складом, тому іноді здійснюють їх додатковий рафінуючий переплав.

Відомий також метод прямого отримання феромолібдену з молібденіта без проміжного випалювання шляхом відновлення вугіллям у присутності вапна. Але сплав, який при цьому утворюється, сильно забруднений сіркою та вуглецем, і безпосередньо для легування сталі непридатний. Його рафінування ускладнює схему виробництва та більшує втрати молібдену. Тому у наявний час цей метод не застосовують.

Виробництво феровандію

Феровандій – сплав заліза з ванадієм, який за нормативною документацією (*див. Додаток А*) випускається таких марок: ФВд75У0,1, ФВд75У0,15, ФВд50У0,3, ФВд50У0,4, ФВд50У0,5, ФВд50У0,6, ФВд50У0,75, ФВд40У0,5, ФВд40У0,75, ФВд40У1, що містять від 70…80 до 35…48,5% ванадію та від 0,1 до 1,0% вуглецю відповідно, до 2% *Si*, до 2,5% *Al* (інше – *Fe* та домішки).

У чорній металургії феровандій використовують при легуванні сталей, сплавів і чавунів для отримання ними дрібнокристалічної структури, підвищення ударної в'язкості та стійкості матеріалу проти знакозмінних навантажень, підвищення прожарюваності.

Феровандій азотований призначений для легування ванадієм і азотом швидкоріжучих, низьколегованих, нержавких, морозостійких сталей.

Отримують феровандій силікотермічним або силікоалюмотермічним способом (*див. вище*) при відновлюванні технічного п'ятиокису ванадію силіцієм у дуговій електропечі (*див. вище*). Поставляється він у вигляді кусків масою 5…15 кг у сталевих бочках.

1.2.1.6 Виробництво коштовних («дорогоцінних», «благородних») металів

Виробництво золота

Хімічний елемент аурум (золото – *Au*) у періодичній системі елементів Д.І. Менделєєва має атомний номер 79. Його щільність 19,3 г/ см³, температура плавлення 1053 ºС, температура кипіння 2970 ºС. Це м'який яскраво-жовтий важкий метал, який є представником групи благородних металів [32]. Середній вміст його в земній корі $4{,}3\cdot10^{-7}$%. За *зростанням* концентрації золота вибудовується такий ряд золотовмістних природних утворень: морська вода $(1\ldots5)\cdot10^{-7}$%), осадові породи, кислі виверженні породи, середні виверженні породи, основні і ультраосновні виверженні породи, хроміти базальтоїдних порід, гідротермальні руди. Найбільший вміст золота є в гідротермальних розчинах у формі різних гідроксильних, гідроксохлоридних і гідросульфідних комплексів.

Подовж довгого періоду існувала думка про майже абсолютну інертність золота до хімічних реакцій. Це базувалося на тому, що у природі воно, здебільшого, зустрічається у вигляді самородного золота, а також у вигляді *твердих розчинів* зі сріблом (*електрум*), міддю (*купроаурид*), вісмутом (*вісмутоаурид*), родієм (*родит*), іридієм (*ірааурид*) і платиною (*платинисте золото*).

Але на сьогодні встановлено близько чотирьох десятків *сполук* золота, зокрема: *богдановит (Cu Fe)·(Au, Te, Pb)$_3$*; *анюйіт Au·(Pb, Sb)$_2$*; *амальгама золота (Au, Ag)·Hg – Au$_2$·Hg$_3$*; *вейсганіт (Au, Ag)$_3$·Hg$_2$* та ін. Ще з десяток сполук золота не мають назви (наприклад, сульфід золота та вісмута $AuBi_5S_4$ чи арсенотелурид золота $Au_3(Ag, Pb)\cdot As_2Te_3$ тощо)

Самородне золото за розміром частинок поділяється на тонкодисперсне (1…5 мкм), пилоподібне (5…50 мкм), дрібне (0,05…2 мм) і велике (більше 2 мм). Частинки масою більше 5 г відносяться до *самородків*. Вони зазвичай концентруються в гідротермальних

родовищах. Знахідки самородків відомі в багатьох районах Уралу та Сибіру. Вони іноді досягають маси 100 кг і більше (рисунок 1.37).

Рисунок 1.37 – Самородок золота «Плита Холтермана» масою 285 кг [32]

Золото володіє унікальним комплексом властивостей, якого не має жоден інший метал. Воно має саму високу стійкість до впливу агресивних середовищ; за електро– і теплопровідностю поступається лише сріблу і міді; має великий перетин захоплення нейтронів; здатність золота віддзеркалення інфрачервоних променів близька до 100%; у сплавах воно має каталітичні властивості. Золото дуже технологічно, з нього легко виготовляють надтонку фольгу і мікронний дріт. Покриття золота легко наносять на метали і кераміку. Золото добре паяється і зварюється під тиском.

Така сукупність корисних властивостей послужила причиною широкого використання золота із середини XX ст. у найважливіших галузях техніки, електроніки, техніці зв'язку, космічній та авіаційній техніці, хімії.

Електроніка та пов'язані з нею галузі машинобудування є основними споживачами золота в техніці. У цій області золото широко використовують для покриття електричних контактів, для виготовлення тонких дротяних провідників, для пайки електронних елементів вузлів в аерокосмічній промисловості, зварювання тиском або ультразвукового зварювання тощо.

Золото утворює легкоплавкі евтектики з галієм, силіцієм та іншими елементами, які стають напівпровідниками з провідністю певного типу. На його основі виготовляють пасти з різним електроопором.

У вимірювальній техніці для контролю температури і, особливо, для вимірювань низьких температур використовують сплави золота з кобальтом або хромом.

У хімічній промисловості золото, головним чином, використовують для покриття сталевих труб, призначених для транспортування агресивних речовин. Застосування золота у скляній промисловості відомо з кінця XVII ст.

Тисячоліттями золото використовувалося для виготовлення ювелірних виробів і монет. Золоті сплави застосовують у виробництві годинникових корпусів і пір'їв для авторучок.

Золоту фольгу, а пізніше – гальванопокриття золотом широко застосовували для золочення куполів церковних храмів. Золото застосовують для металізації шибок будівель: його тонка плівка (0,13 мкм) відбиває інфрачервоне випромінювання, і в приміщенні значно простіше регулювати температурний режим. Якщо через таке скло пропустити струм, то воно набуде протитуманні властивості. Покриті золотом оглядові скла судин, електровозів і т.д. ефективні у будь-який час року.

У медицині використовують не тільки зубопротезні золоті сплави, але й медичні препарати, що містять солі золота, для різних цілей, наприклад, при лікуванні туберкульозу. Радіоактивне золото використовують при лікуванні злоякісних пухлин.

У наукових дослідженнях золото використовують для захоплення повільних нейтронів. За допомогою радіоактивних ізотопів золота вивчають дифузійні процеси в металах і сплавах.

Родовища золота поділяються на корінні і розсипні. Вони формувалися в різні геологічні епохи на різних глибинах – від десятків метрів до 4…5 км від поверхні Землі.

Корінні родовища представлені жилами, системами жил, покладами і зонами прожилкового золота, вкраплених у руди, протяжністю від десятків до тисяч метрів.

Протягом тривалого періоду історії нашої планети гори руйнувалися, і вода забирала все, що в ній розчиняється та не розчиняється. Одночасно відділялися важкі мінерали від легших та накопичувалися в місцях, де швидкість течії річок мала. Так утворилися *розсипні родовища* з відносно великою концентрацією золота. Як правило, розсипи промислового значення утворюються відносно недалеко від корінних родовищ.

Частина мікроскопічних і колоїдних частинок золота несеться водними витоками в озера, моря й океани, де воно існує у вигляді найтонших суспензій або перебуває в осадах.

Добування золота із штучно або природно подрібнених мінералів шляхом *промивки* засноване на великій щільності золота. При цьому, за допомогою потоку води відносно легкі мінерали (майже всі мінерали земної кори), змиваються, а золото концентрується у важкій фракції піска, який називається *шліхом*. Відповідно, цей процес носить назву *шліхтування (промивка)*.

У невеликому об’ємі цей процес можна виконувати вручну за допомогою промивного лотка. У промислових масштабах (для розробки великих розсипних родовищ) для промивки використовують спеціальні технічні пристрої – драги (рисунок 1.38), оснащені відповідними промивними пристроями.

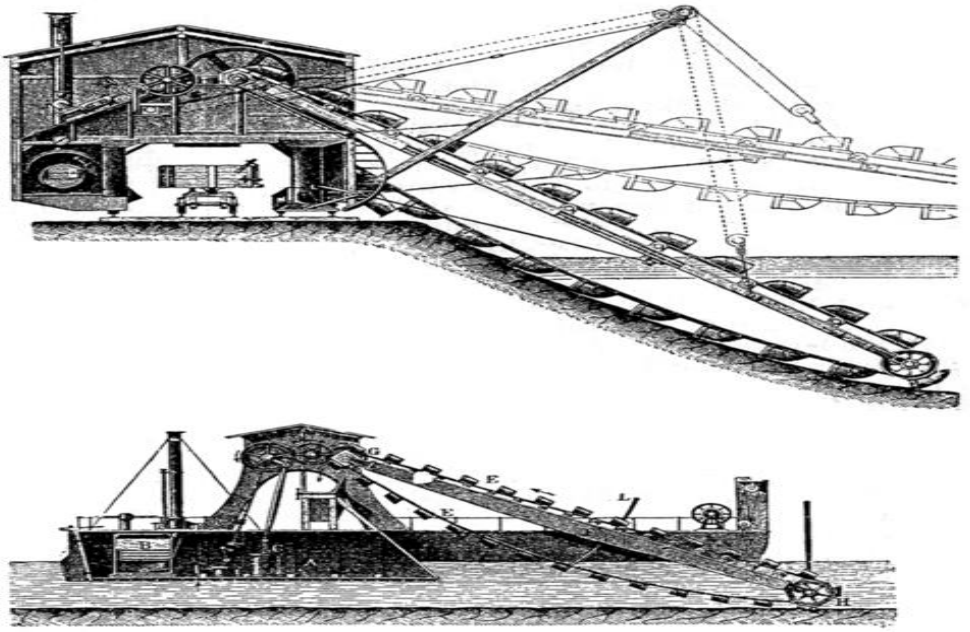


Рисунок 1.38 – Зовнішній вид драг [32]

На золотодобувних заводах використовується гравітаційне збагачення породи, що містить золото. Зокрема, реалізують вилучення золота за допомогою осадкових машин. Збагачення осадом засноване на розділенні мінеральних зерен по відношенню до щільності води. Головним технологічним параметром осадкової машини, що забезпечує вилучення золота і отримання концентрату, являються частота і амплітуда пульсацій та швидкість потоку води. Пульсація води в осадкових машинах утворюється різними способами, наприклад, покачуванням горизонтальної або вертикальної діафрагми. Число покачувань дорівнює 130…380 на хвилину, а амплітуда – не більше 40 мм.

Такі усадкові машини, що встановлені в лінії подрібнення золотоносних руд, забезпечують отримання чорнового концентрату із вмістом вільного золота 20…40% і більше залежно від крупності золота в руді.

Наступною операцією стає вилучення золота з концентратів. Для цього можна використовувати відомий із стародавніх часів метод *амальгамування* – розчинення

золота ртуттю у присутності води з подальшою перегонкою ртуті. Така *золота амальгама* представляє собою рідку ртуть із вмістом до 0,1% золота.

Використовуються для вилучення золота також сучасні біометоди, зокрема:

а) бактеріальне вилуговування (з переведенням золота до розчину);

б) біосорбція (селективне видалення золота з розчинів);

в) біофлотація (використання флорореагентів-мікробів).

Одержаний чорновий метал піддають очищенню (*рафінуванню*, або *афінажу*).

Методи афінажу залежать від складу чорнового золота і необхідної чистоти продукту. Вони поділяються на три основні групи, які інколи застосовують у комбінації:

– *сухі*, при яких розплавлене золото обробляють хімічними реагентами або ж переплавляють з різними флюсами;

– *мокрі*, засновані на розчиненні домішок у різних кислотах;

– *електролітичні.*

У зарубіжній практиці із сухих методів найбільш поширеним є продування газоподібного хлору крізь розплавлене золото. Металеві домішки в цьому випадку перетворюються на хлориди та у вигляді піни видаляються. Такий метод забезпечує чистоту золота, необхідну для валютних цілей. Більш високий ступінь очищення досягається при застосуванні електролізу, який дозволяє отримати золото чистотою 999,9 і навіть 9999,9.

Летючість розплавленого золота утрудняє усі процеси, пов'язані з його плавкою, оскільки вимагає спеціальних заходів для запобігання втратам, а отже, і дорожчання очищення.

Проте для більшості виробів золото високої чистоти непридатне. Часто споживачеві необхідний сплав золота з іншими металами, які забезпечують йому заздалегідь задані властивості. Тому промислове використання дорогоцінного металу найчастіше розпочинають з його «забруднення» іншими металами, зазвичай, сріблом або міддю. Ці метали в ювелірній промисловості прийнято називати *лігатурами*, а отримані сплави – *лігатурним золотом*. Підбираючи лігатуру, можна надавати йому потрібний колір. На будь-яких золотих виробах, у тому числі – на зливках, повинен стояти державний знак – *проба*, яка гарантує кількість чистого золота в сплаві.

В Україні завершується будівництво збагачувальної фабрики на Мужіївському родовищі (Закарпатській область), що дасть змогу переробляти до 60 тонн руди з одержанням сплаву золота на місці видобутку; поклади золотоносних руд виявлені на українському щиті (родовища: Сергіївське, Майське, Клинцівське, Юр'ївське, Балка Широка, Балка Золота та інші); продовжується спорудження дільниці першої черги Мужіївського золотополіметалевого комбінату. Але нестача на наявний час державного фінансування не дає змоги інтенсивно виконувати відповідні роботи у повному обсязі.

Виробництво срібла

Хімічний елемент *Argentum – Ag* (срібло) в періодичній системі елементів Д.І. Менделєєва знаходиться за номером 47. У хімічних сполуках срібло зазвичай одновалентно, хоча відомі його з'єднання з валентністю II та III.

За більшістю фізичних і хімічних властивостей срібло наближується до міді, золота та паладію. Фізико-хімічні властивості срібла у значній мірі залежать від його чистоти.

Металічне срібло – білий блискучий метал (часто покритий чорним нальотом) із щільністю 10,5 г/см^3, температурою плавлення 960,5 °С, температурою кипіння 2177 °С (пари жовтувато-сині); воно діамагнітно та є дуже гарним провідником тепла та електрики (питомий опір при 20 °С дорівнює 1,59 мкОм·см*)*. У числі фізико-механічних властивостей слід відзначити високу пластичність, малу міцність і відносну м'якість (твердість 2,5…3 бали за шкалою Мооса). Металлічне срібло володіє великою здібністю віддзеркалювати інфрачервоні та видимі промені та меншою – щодо ультрафіолетових променів. Срібло у вигляді тонких листочків (вони сприймаються синіми або фіолетовими

у проникненому світлі) володіє електричними та оптичними властивостями, які суттєво відрізняються від його властивостей у злитках [32].

Цей метал утвоює сплави типу твердих розчинів із золотом і паладієм, сплави типу евтектик з *Bi, Ge, Ni, Pb, Si, Na, Tl*, а також інтерметалічні сполуки з *Li, Mg, Ca, Sr, Ba, Zn, Cd, Hg, Al, Ga, In, Tl, Pr, Sn, Zr, Th, P, Sb, S, Se.*

Колоїдні розчини срібла забарвлені у рожевий (до коричневого) колір і можуть бути отримані відновленням суспензій Ag_2O воднем при 50 °С (або іншими відновниками, наприклад, цукром, оксидом вуглецю, цитратом заліза, цитратом амонію, хлоридом олова, пірогалолом, фенолом, фосфором в ефірі, фосфорноватистою кислотою, формальдегідом, гідразином, фенілгідразином та ін.), а також шляхом утворення електричної дуги у воді між двома срібними електродами.

Для стабілізації колоїдних розчинів срібла застосовують білки, желатину, гуміарабік, агар-агар та інші органічні речовини.

Легуванням срібла можна підвищити його міцність, зменшити м'якість та високу реакційну здібність по відношенню до сірки і сульфідів.

Деякі гази, наприклад, водень, кисень, окис та двоокис вуглецю розчиняються у сріблі. Зокрема, при 400…450 °С розчинність кисню у сріблі максимальна: 1 об'єм срібла поглинає до 5 об'ємів кисню). Тому охолодження срібла, насиченого киснем, може супроводжуватись виділенням цього газу та вибухом. При поглинанні кисню срібло стає крихким.

Кисень взаємодіє з металічним сріблом, нагрітим до 168 °С, при різних значеннях тиску з утворенням Ag_2O. Озон при 225 °С у присутності вологи (або перекису водню) діє на металічне срібло, утворюючи вищі оксиди цього металу.

Срібло не проявляє здібність до іонізації та легко витісняється із сполук з більш активним металом або воднем.

Металічне срібло легко взаємодіє з галогенами під дією вологи та світла, утворюючи відповідні галогеніди.

Соляна і бромистоводнева кислоти у концентрованих розчинах повільно реагують зі сріблом з виділенням H_2 та утворенням $H[AgCl_2]$ и $H[AgBr_2]$ відповідно.

Сірка реагує з нагрітим до 179 °С металічним сріблом з утворенням чорного сульфіду Ag_2S. Сірководень у присутності кисню повітря і води взаємодіє з металічним сріблом при кімнатній температурі з утворенням Ag_2S.

Металічне срібло розчиняється в H_2SO_4 при нагріванні, у розбавленій $HN0_3$ на холоді та у розчинах цианідів лужних металів у присутності кисню або іншого окиснювача з утворенням Ag_2SO_4:, $AgNO_3$ и $Na[Ag(CN)_2]$ відповідно. В солянокислому розчині срібло відновлює деякі солі металів, такі як $CuCl_2$, $HgCL_2$, FeI_2. $VOC1_2$.

Селен, телур, фосфор, миш'як і вуглець реагують з металічним сріблом при нагріванні та утворюють Ag_2Se, Ag_2Te, Ag_3P, Ag_3As, Ag_4C відповідно.

Азот зі сріблом безпосередньо не взаємодіє.

Органічні кислоти і розплавлені луги або солі лужних металів з металічним сріблом не реагують. Хлорид натрію в концентрованих розчинах і у присутності кисню повільно взаємодіє зі сріблом та утворює його хлорид.

У нейтральних або слабо лужних розчинах гідрозоль срібла поводиться як негативний колоїд, а в слабо кислих розчинах – як позитивний. Колоїдне срібло є енергійним відновником по відношенню до Fe_2Cl_6, $HgCl_2$, $KMn0_4$, разбавленої $HN0_3$, володіє доброю адсорбційною здібністю (стосовно кисню, водню, метану, етану й ін.).

Суттєву долю срібла споживає електротехнічна та електронна промисловість при виготовленні високочастотних волноводів, виробництві мікросхем та інших радіоелектронних компонентів, для серебрення мідних провідників.

Металічне срібло слугує для виготовлення високоякісних оптичних дзеркал. Бруски (або електролітичні порошки) срібла служать анодами в акумуляторах, у яких негативними електродами являються пластини з окису цинку, а електролітом – *KOH*.

У хімічній промисловості застосовують срібні апарати (для отримання крижаної оцтової кислоти, фенола), лабораторний посуд (тиглі, в яких плавляться чисті луги або солі лужних металів, лабораторні інструменти (шпателі, щипці, сита та ін.).

Срібло та його сполуки застосовують в якості каталізаторов у реакціях обміну «водень – дейтерій», детонації суміші «повітря – ацетилен», при спалюванні окису вуглецю, окисненні спиртів до альдегидів кислот тощо.

У харчовій промисловості застосовують срібні апарати, в яких готують фруктові соки та інші напої. Вода, що зберігається у срібних посудинах, стерилізується і не псується тривалий час завдяки навності іона Ag^+.

У медицині відомий ряд фармацевтичних препаратів (наприклад, протаргол і коларгол), які містять колоїдне срібло і є сильнимим бактерицидами.

З давніх давен срібло використовували для виготовлення прикрас і засобів платежів у вигляді монет, злитків і ювелірних виробів.

Вміст срібла у земній корі дорівнює $1 \cdot 10^{-5}$%. У природі срібло зустрічається як саморідне, так і у вигляді сплук – сульфидів, селенатів, телуратів або галогенидів у різних мінералах. Срібло також зустрічається в метеорітах і міститься в морскій воді.

У вигляді самородків срібло зустрічається у природі рідше за саморідну мідь або золото, і часто це бувають сплави із золотом, міддю («мідьвмісне срібло»), сурмою («сурмавмісне срібло»), ртуттю та платиною. Утворення саморідного срібла пов'язано з дією води або водню на сульфід срібла.

Поклади саморідного срібла знаходяться у Норвегії, Канаді, Чилі, Німеччині, Росії та інших країнах.

Найбільш важливими мінералами срібла є наступні:

– *кантпіт* (Ag_2S) – сірі ромбічні кристали, стійкі при температурі нижче 179 °С та *аргентит* (Ag_2S) – сірі кубичні кристали, стійкі при температурі вище 179 °С. Обидві модифікації природного сульфіду срібла містять 87,1% *Ag*, мають щільність 7,2…7,4 г/см^3 і твердість 2…2,5 одиниці за шкалю Мооса;

– *галеніт* (*AgS*), поклади якого знайдені в Румунії та Франції;

– *прустит* (Ag_3AsS_3) із вмістом 65,4% срібла;

– *піраргерит* (Ag_3SbS_3) із вмістом 68,4% срібла;

– *стефаніт* ($8(Ag, Cu)_2S - Sb_2S_3$), який містить 62,1…74,9% *Ag*;

– *кераргірит* (*AgCl*), який містить 75,3% срібла.

Аргентит – основне джерело срібла. В природі він є супутнім саморідному сріблу, кераргіриту, арсенідам та антимонідам срібла; його поклади часто розміщуються поряд із сульфідами свинцю, цинку та міді. Такі руди знаходяться в Норвегії, Мексиці, Перу, Росіїї, Чилі.

Приблизно 80% від загальної світової кількості срібла, що видобувається, отримують як побічний продукт переробки комплексних сульфідів важких кольорових металів (міді, цинку, свинцю – *див. вище*), які містять сульфід срібла Ag_2S. При відповідній пірометалургійній переробці поліметалічних сульфідів срібло вилучається разом з основним металом. Для збагачення срібловмісного свинцю сріблом використовують, зокрема, процес Паркеса або Паттинсона.

Процес Паркеса базується на більш високій розчинності срібла в цинку, ніж у свинцю, та на різних температурах застигання (плавлення) складових конгломерату «свинець-срібло-цинк». Відповідним чином срібловмісний свинець плавлять разом з металевим цинком. При охолодженні потрійного сплава нижче 400 °С відокремлюється нижній шар, що складається з рідкого свинцю і який містить невелику кількість цинку і срібла, а також верхній твердий шар, який складається з кристалів «цинк-срібло» з невеликою кількістю свинцю.

При возгонці цинку (температура кипіння якого 907 °С) з отриманого сплава залишається свинець, який містить 8…12% срібла і є вихідним матеріалом для отримання

чорнового срібла шляхом купелювання (*див. нижче*). З потрійного сплава «свинець-цинк-срібло» цинк може бути видаленим у вигляді Na_2Zn0_2 плавленнням з Na_2C0_3.

За *процесом Паттинсона* розплавлений срібловмісний свинець повільно охолоджують. Свинець, який кристалізується першим, відокремлюється до тих пір, поки розплав не досягне складу евтектики із вмістом 2,25% срібла. Така евтектика твердне при 304 °С і слугує вихідним матеріалом для отримання сирого срібла методом купелювання.

Взагалі, купелювання – це очищення (здебільшого, благородних металів) від свинцю та інших домішок окиснювальним плавленням у «купелях» (чашечках з вогнестійких матеріалів) або полуменевих печах.

При *купелюванні* свинець, що містить 2,25…12% срібла, плавиться у купелях у печі, куди подають повітря або кисень на поверхню розплавленого металу. Окис свинцю («свинцовий глет») *PbO* разом з оксидами миш'яку, сурми, цинку і міді, які утворюються при повному окисненні срібловмісного свинцю, видаляють з поверхні сирого срібла, який містить приблизно 95% *Ag*.

Вилучення срібла із срібловмісного свинцю також можливо *електролітичним шляхом*. При цьому застосовують аноди із срібловмісного свинцю, а в якості електроліту – гексафторокремнієву кислоту $H_2[SiF_6]$ з гексафторосилікатом свинцю $Pb[SiF_6]$. При електролізі свинець осідає на катоді, а срібло разом із золотом, платиною та платиновими металами переходить до анодного шламу.

Аналогічно, при електролітичному рафінуванні *срібловмісної міді*, яку використовують в якості анодів (застосовуючи при цьому розбавлену сірчану кислоту як електроліт), на катоді осідає мідь, а срібло і золото разом з платиновими металами переходить до анодного шламу.

Вилучення останніх з анодного шламу легко здійснюється хімічним шляхом.

На відміну від золота і платинових металів (*див. нижче*) срібло легко розчиняється в азотній кислоті. З нитрата срібла $AgNO_3$ металічне срібло можна осадити сульфатом заліза (II), металічним цинком, формальдегідом в аміачному середовищі або нітратом мангану (II) у лужному середовищі.

Приблизно 20% світової кількості срібла отримують переробкою безпосередньо руд срібла, а також виробів або лома зі срібла.

Подрібнену та збагачену (у разі низького вмісту срібла) руду переробляють методами: ціанування, амальгамування, хлорування та ін.

При *ціануванні* тонко подрібнену руду (природниче срібло, аргентит або кераргірит) у дерев'яних чанах діаметром 10…12 м змішують з 0,4%-ним розчином *NaCN* та перемішують струменем. При цьому отримують розчин комплексного ціаніду $Na[Ag(CN)_2]$. З останнього срібло може бути осадженим у вигляді металу тонко подрібненим цинком або алюмінієм.

Далі, «сире» срібло плавиться, відливається у вигляді брусків, а потім рафінується електролітичним або хімічним методом.

Можливо також вилучення комплексного аніона $[Ag(CN)_2]$ у кислому середовищі з pH=3,5 за допомогою аніонообмінних сульфінованих смол R_2S0_4 (попередньо оброблених 5%-ним водним розчином сірчаної кислоти). У подальшому, комплексні ціаніди витягують з аніонообмінної смоли селективним елементом, наприклад, розчином ціаніду калію або натрію.

Процес *амальгамування* базується на утворенні амальгами срібла. Його застосовують до руд, що містять саморідне срібло, аргентит або кераргірит.

Для цього тонко подрібнені руди срібла обробляють невеликою кількістю води і ртуттю (1:6 за масою ртуті до срібла). В результаті, сульфід срібла Ag_2S у присутності хлорида міді перетворюється на хлорид срібла. Останній під дією ртуті та хлорида міді відновлюється до металічного срібла, яке утворює амальгаму з ртуттю. Цю амальгаму фільтрують під тиском. При сублімації ртуті залишається сире срібло, яке очищують хімічним або електрохімічним способом.

При *прокалюванні суміші сульфіду срібла та хлориду натрію* (при температурі 500…600 °С) в окиснювальній атмосфері утворюється хлорид срібла. Для вилучення срібла з *AgCl* або з $Na[AgCl_2]$ використовують амальгамування, осадження металічного срібла міддю та осадження сульфіду срібла зі сполуки $Na_2[Ag_2(S_20_3)_2]$. Потім сульфід срібла Ag_2S переробляють з метою отримання срібла.

Сире срібло можна рафінувати хімічним або електролітичним шляхом.

При *хімічному рафінуванні* сире металічне срібло розчиняють в азотній кислоті, очищений перекристалізацією нитрат срібла обробляють аміаком, перетворючи його у гідроокис діаміносрібла. Останній відновлюють сульфітом амонія при 70 °С до чистого металу. Срібло плавлять над негашеним вапном у потоці водню, а потім у – вакуумі.

При *електролітичному рафінуванні* застосовують аноди із сирого срібла, а в якості електроліту беруть розчин нітрату срібла. Упродовж пропускання постійного струму крізь електроліт чисте срібло осаджується на катодах, а больш активні метали переходять до розчину іонов. При цьому, золото, платина і платинові метали залишаються в анодному шламі.

Виробництво платини та платиноїдів

До групи платинових металів («платиноїдів») відносяться хімічні елементи VIII групи періодичної системи Д.І. Менделеєва: *рутеній Ru* (№ 44, щільність 12,5 г/см^3; температура плавлення 2334 °С; температура кипіння 4077 °С), *родій Rh* (№ 45; щільність 12,4 г/см^3; температура плавлення 1963 °С; температура кипіння 3727 °С), *паладій Pd* (№ 46, щільність 12,02 г/см^3; температура плавлення 1554 °С; температура кипіння 2937 °С; питомий електричний опір 0,0996 мкОм·м), *осмій Os* (№ 76, щільність 22,6 г/см^3; температура плавлення 3027 °С; температура кипіння 5027 °С), *іридій Ir* (№ 77, щільність 22,7 г/см^3; температура плавлення 2447 °С; температура кипіння 4380 °С) і *платина Pt* (№ 78, щільність 21,4 г/см^3; температура плавлення 1769 °С; температура кипіння 3800 °С; питомий електричний опір 0,098 мкОм·м). Це сріблясто білі метали з різними відтінками. Завдяки високій хімічній стійкості (інертності), тугоплавкості та красивому зовнішньому вигляду вони, поряд із золотом і сріблом, відносяться до коштовних (*благородних)* металів. Платина та паладій пластичні, осмій та рутеній крихкі.

Іноді платиноїди поділяють на дві «триади»: рутеній, родій та паладій – *легкі платинові метали*, а платина, іридій та осмій – *важкі платинові метали* [18. 32, 34…36].

Для платиноїдів характерна висока розчинність у них водню. Так, паладій здібний розчинити у собі до 800…900 об'ємів водню, платина – до 100.

Усі платинові метали хімічно досить інертні, особливо, платина. При окисненні цих металів киснем повітря утворюються оксиди різного складу. При нагріванні усі платиноїди реагують з хлором і фтором. У розчинах платинові метали існують тільки у вигляді комплексних сполучень.

Платиноїди проявляють високу *каталітичну* активність у реакціях.

Найбільш відомим та використовуваним представником підгрупи важких платиноїдів є ***платина*** – тугоплавкий і майже нелетючий метал, який кристалізується у гранецентровані кубічні решітки. Її твердість за Бринелем 390…420 МПа; модуль пружності 173 ГПа. Платина у гарячому стані добре деформується та зварюється.

При впливі на розчини її солей відновлювачами платина може бути отриманою у вигляді «*черні*». *Платинова чернь* – дрібнодисперсний порошок основного металу з розмірами часток 25…40 мкм, яка володіє високою каталітичною активністю. Її отримують, наприклад, при дії формальдегідом або іншими відновниками на розчин комплексної гексахлорплатинової кислоти $H_2[PtCl_6]$.

При кімнатній температурі платина не взаємодіє з мінеральними та органічними кислотами. Платина повільно розчиняється у гарячій сірчаній кислоті та рідкому бромі. Повністю платина розчиняється у царській горілці (суміші азотної та соляної кислот).

Гексахлороплатинова, або платинохлористоводнева кислота $H_2[PtCl_6]$ при випарюванні розчину виділяється у вигляді червоно-бурих кристалів зі складом $H_2[PtCl_6]\cdot H_2O$.

При нагріванні платина стає більш реакційноздібною, реагує із сіркою, селеном, телуром, фосфором, вуглецем, силіцієм та їдкими лугами.

З киснем платина утворює оксиди, проявляючи різну валентність: PtO, Pt_20_3, PtO_2, Pt_3O_4 та PtO_3. Оксид PtO отримують при нагріванні порошку платини до 430 °С в атмосфері кисню при тиску 0,8 МПа. Оксид Pt_2O_3 можна отримати при окисненні порошку металічної платини розплавленим пероксидом натрию. Оксид PtO_2 отримується при киплячінні гідроксиду платини з лугом.

У сполуках платини найбільш стійкі ступені окиснення +2 та +4.

Для платини відомі гідроксиди $Pt(OH)_2$ та $Pt(OH)_4$. Зокрема, гідроксид платини можна отримати обережним додаванням лугу до розчину хлороплатинату калию $K_2[PtCl_6]$.

Сірчаніста сполука PtS не розчиняється в кислотах і царській горілці, а PtS_2 розчиняється у ній.

Розчиненням $PtCl_4$ у соляній кислоті отримують платинохлористоводневі кислоти $H[PtCl_5]$ та $H_2[PtCl_6]$. Синтезовані такі галогеніди платины як $PtBr_4$, $PtCl_2$, $PtCl_2\cdot 2PtCl_3$, $PtBr_2$ и PtI_2. Для платини характерним є утворення деяких комплексних сполучень.

Цікавим є те, що при 360 °С впливом хлора на платину можна отримати тетрахлорид $PtCl_4$, який при температурі выще 370 °С перетворюється на трихлорид $PtCl_3$, а при 435 °С розпадається на хлор і металічну платину.

$PtCl_2$ розчиняється у неконцентрованій соляній кислоті з утворенням платинисто-хлористоводневої кислоти $H_2[PtCl_4]$, при дії на яку деяких солей металів отримують хлороплатинати $Me_2[PtCl_4]$ (где Me – K, Na, NH_4 тощо).

Тетрахлорид платини з водою утворює гідрати $PtCl_4\cdot nH_2O$, де n = 1, 4, 5 и 7. Безводний $PtCl_4$ при дії соляної кислоти створює платинохлористоводневу кислоту $H_2[PtCl_6]$.

Практичний інтерес представляє, зокрема, хлороплатинат амонію $(NH_4)_2[PtCl]_6$ – кристали жовтого кольору, малорозчинні у воді, спирті та концентрованих розчинах хлористого амонію. Тому при афінажі платину відокремлюють від інших платинових металів (*див. нижче*), осаджуваннямі застосуванням $(NH_4)_2[PtCl_6]$.

Гексафторид платини PtF_6 є одним із найсильніших окиснювачів серед усіх відомих хімічних сполук, здібний окиснити молекули кисню (!), ксенона або NO. За його допомогою, зокрема, канадський хімік Нейл Бартлет у 1962 році отримав перше істинне хімічне сполучення ксенона $XePtF_6$.

Фторування платини при нормальному тиску та температурі 350…400 °С дає фторид PtF_4. Фториди платини гігроскопічні і розкладаються водою.

У водних розчинах сульфати платини легко гідролізуються, продукти гідролизу у широкому інтервалі pH знаходяться у колоїдному стані. У присутності хлорид-іонів сульфати платини переходять у хлороплатинати.

Завдяки здібності щодо абсорбції газів платину використовують в якості каталізаторів при реакціях гідрогенізації та окиснення. При цьому, каталітична активність збільшується при використанні платинової черні. Наприклад, платинова чернь окиснює пари винного спирту до оцтової кислоти вже при кімнатній температурі.

Відома також відкрита Деберейнером здібність губчатої платини при кімнатній температурі запалювати водень. Спочатку йде порівняно спокійна реакція горіння. Але оскільки ця реакція супроводжуєься виділенням великої кількості теплоти, платинова губка розжарюється, що викликає вибух гримучого газу.

Типовим представником підгрупи легких платиноїдів є ***паладій***. Безпосередня речовина «паладій» – пластичний перехідний метал сріблясто-білого кольору з гранецентрованою кубічною решіткою. За зовнішнім виглядом паладій займає проміжне

місце між сріблом і платиною. Паладій відмінно полірується, не тьмяніє і не піддається корозії. Його твердість лише небагато більше за твердість чистої платини; він володіє також декілька більшою в'язкістю. Здібність до деформування у нього нижче за платину.

Перед плавленням паладій разм'ягчується і тому може бути підданий ковці та зварюванню. Його твердість збільшується у 2...2,5 рази після холодної обробки тиском. Мікродобавки нікелю, кобальта, родію або рутенію збільшують його твердість.

Паладій утворює сплави з більшістю металів. При легуванні паладию 4%-м рутенієм та 1%-м родієм його межа міцності подвоюється.

В особливих умовах цей метал утворює *колоїдний паладій* і *паладієву чернь*.

Водень розчиняється в металічному паладії, головним чином, в атомарному стані, тому паладій сильно активує цей елемент.

Паладій, розплавлений в атмосфері кисню, подібно сріблу, разбризкується при затвердінні, оскільки у розплавленому стані він містить кисню набагато більше, ніж у твердому.

Паладій єдиний метал, у якого гранично заповнена зовнішня електронна оболонка: на зовнішній орбіті атома паладію міститься 18 електронів. Це зумовлює надзвичайно велику хімічну стійкість: при нормальній температурі на нього не діє навіть фтор.

При температурі темночервоного розжарювання паладій окиснюється киснем повітря до *PdO*, який при подальшому нагріванні знову розкладається. При температурах від 400 °С до 850 °С паладій покривається світлофіолетовим оксидним шаром, який зникає при більш високих температурах.

Як легуючий метал паладій покращує властивості платини, освітлює її забарвлення, а також сприяє відбілюванню сплава при отриманні «білого золота».

Паладій не реагує з волою, розбавленими кислотами, лугами, гідратом аміаку. Реагує з концентрованою сірчаною та азотною кислотами, «царскою горілкою», галогенами, сіркою.

При розчиненні у царській горілці паладій утворює хлористий паладій, який із соляною кислотою дає паладохлористоводневу кислоту H_2PdCl_6. Соль – хлорпаладозамін $[Pd(NH_3)_2Cl_2]$, яка отримується після послідовної обробки паладохлористоводневої кислоти та сплук, які утворюються, має малу розчинність і тому використовується для виділення паладію з розчинів. При нагріванні хлорпаладозамін розкладається. При цьому, хлористий амоній і хлористий водень виділяються у вигляді газів, а паладій залишається у вигляді металічної губки.

При темно-червоному прожарюванні фтор утворює з паладієм дифторид PdF_2, а хлор – дихлорид $PdCl_2$.

Сірка і селен при декілька більшій температурі енергійно діють на паладій, причому реакції супроводжуються значним виділенням тепла.

Менш енергійно реагують з паладієм фосфор і миш'як, а силіцій вступає в реакцію тільки при температурі білого прожарювання.

Вуглець, хоча і розчиняється у розплавленому паладії, але при застиганні знову виділяється з нього у вигляді графита.

Як і усі інші платиноїди, паладій утворює безліч комплексних сполучень. Деякі з них приносять практичну користь, хоча б у виробництві самого паладію.

Комплекси двовалентного паладію з амінами, тіомочевиною і багатьма іншими органічними сполуками мають пласку квадратну будову і цим відрізняються від комплексних сполучень інших платинових металів, які завжди утворюють об'ємні октаедричні комплекси.

При кип'яченні паладію в концентрованій сірчаній кислоті він розчиняється з утворенням $PdS0_4$ та SO_2. Така ж реакція здійснюється і при сплавленні паладію з бісульфатом калію.

При сплавленні із селітрою та содою паладій не окиснюється, а при нагріванні з перекисом натрию він переходить у моноксид *PdO*.

Ще одним важливим представником підгрупи легких платиноїдів є ***родій*** – твердий перехідний метал сріблясто-білого кольору. Він має високий коефіцієнт віддзеркалення електромагнітних променів видимої частини спектра.

Родій погано піддається механической обробці. Тому його прокатка або волочіння можливі лише при 800...900 °С.

Він легко утворює сплави з платиною, паладієм, міддю та іншими металами.

За хімічною стійкістю у більшості корозійних середовищ родій перевершує платину. На компактний родій не діють ані кислоти, ані луги. Лише дуже подрібнений родій повільно розчиняється у гарячій царській горілці або концентрованій сірчаній кислоті.

Родій вельми стійкий і до дії галогенів: з хлором, бромом і навіть із фтором він реагує лише після тривалого нагрівання. При цьому, у залежності від температури проведення реакцій виходять галогеніди різного складу. Зокрема, з хлором утворюються хлориди одно-, дво– і тривалентного родію: $RhCl$, $RhCl_2$, $RhCl_3$.

При високих температурах родій повільно реагує із сіркою, перетворюючись у сульфіди: RhS, RhS_2, Rh_2S_5.

Одна з важливих особливостей родію – характер його взаємодії з киснем при високій температурі. При нагріванні родію у середовищі кисню утворюється оксид Rh_2O_3. Але процес йде дуже повільно. Щоб окиснити на повітрі десяті частки грама дрібнодисперсного родію, його треба багато годин безперервно тримати у печі при температурі близько 1000 °С.

Гідроксид і оксид родію проявляють *основні* властивості і взаємодіють з кислотами при утворенні комплекса H_3RhCl_6.

Вищий ступінь окиснення +6 родій проявляє в гексафториді RhF_6, який утворюється при прямому спалюванні родію у середовищі фтора. Ця сполука нестійка. При відсутності парів води гексафторид родію окиснюється вільним хлором або оксидом азота NO з триманням RhF_3. При нижчих ступенях окиснення +1 и +2 родій утворює комплексні сполуки.

Вихідними сполуками для синтезу багатьох відомих комплексних сполук родію зазвичай слугують його хлорокомплекси. Для їх отримання металічний родій попередньо спікають з перекисом барію або перекисом натрію при 700...1000 °С, а потім отримані продукти обробляють соляною кислотою. При цьому утворюються комплексні іони $[RhCl_6]^{3-}$, які гідролізуються.

Комплексні хлориди родію також отримуються при хлоруванні суміші металічного родію з кухонною сіллю при високій температурі з наступним розчиненням речовини, що отримана, у соляній кислоті. Те ж саме має місце і при електролітичному розчиненні метала в HCl.

Сполуки родію досить рідко використовуються у повсякденному житті; їх вплив на організм людини до кінця не досліджений. Відомі лише їх поодинокі впливи, а також те, що вони являються високотоксичними та канцерогенними речовинами.

Застосування металів платинової групи індивідуально або у вигляді сплавів, частіше за все – на основі платини з родієм (до 40%) або паладієм (до 50%), або іридієм, а також нікелем, кобальтом, хромом, вольфрамом та/або молібденом зумовлено комплексом їх унікальних властивостей. У результаті, платиноїди використовують (*за порядком спадання споживання у відповідних сферах*): як каталізатори; в ювелірній промисловості; при нафтопереробці; як носій інвестицій; у хімічній промисловості; в електротехніці; при виробництві оптичного скла, скловолокна та ін.

Представлені вище властивості платиноїдів зумовили їх використання в хімічному машинобудуванні та технічному оснащенні хімічних і физико-технічних процесів. Так, хімічні реактори, їх складові, що працюють в агресивних середовищах, а також хімічно та термічно стійку лабораторну посуду роблять цілком або покривають фольгою з металів платинової групи.

Використання платиноїдів в електрохімії пов'язано із застосуванням мало– або нерозчинних електродів (зокрема, для отримання перхлоратів, перборатів, перкарбонатів, пероксодвосірчаної кислоти; у гальванотехніці; для анодних штанг захисту від корозії корпусов підводних човнів та ін.).

У технічній фізиці (оптиці, електротехніці, електроніці, процесах вимірювань тощо) метали платинової групи застосовують для виготовлення термопар, надійних електричних контактів (стійких до короткочасної дії електричної дуги), електричних нагрівачів високотемпературних печей, еталонів, прецизійних (точних) механічних інструментів і приладів тощо.

Певну роль відіграють біологічні, фізіологічні та фармакологічні властивості платиноїдів. Їх іноді використовують у медицині, у тому числі, в якості невеликих добавок до лікарських засобів, які є активаторами імунітету організма. Наприклад, деякі сполуки платини і паладію (зокрема, дихлородіаміноплатину [Pt(NH3)2Cl2]) використовують проти різних пухлин, включаючи і онкологчні).

Практично всі метали платинової групи тим чи іншим чином використовують при виготовленні ювелірних виробів. Щорічно світова ювелірна промисловість споживає біля 50 тонн платины (в основному, це Японія, Китай та Росія). Платина та інші метали платинової групи використовуються компаніями і приватними особами в якості накопичень.

Із середини 70-х років XX ст. головною сферою застосування платини (біля 35% світового споживання), паладію (біля 70% світового споживання) і родію стала автомобільна промисловість, де використовують їх каталітичні властивості для доспалювання та знешкодження вихлопних газів у спеціальних пристроях (*каталітичних фільтрах-нейтралізаторах*) автомобілей. Такі пристрої представляють із себе керамічний блок з багатьма внутрішніми каналами, поверхня яких покрита шаром алюмінію, а на ньому, у свою чергу, нанесені хімічно активні метали (родій, паладій, платина). У такому трикомпонентному нейтралізаторі платина і паладій сприяють окисненню *CO* та *CH*, а родій «бореться» з NO_x. У каталізаторі використовують й інші хімічні елементи (нікель, залізо та церій), які підвищують ефективність трьох основних.

Високі каталітичні властивості платиноїдів дозволяють використовувати їх також в якості каталізаторів у різних хімічних процесах.

Платина – найкращий каталізатор реакції окиснення аміаку повітрям до оксиду азота *NO* в одному з головних процесів виробництва азотної кислоти. Каталізатор як пристрій тут предстає у вигляді сітки з платинового дроту діаметром 0,05...0,09 мм.

Платинові каталізатори прискорюють багато інших практично важливих реакцій: гидрування жирів, циклічних та ароматичних вуглеводнів, олефінів, альдегідів, ацетілену, кетонів, окисненння SO_2 до SO_3 у сірчанокислотному виробництві. Їх застосовують також при синтезі вітамінів та деяких фармацевтичних препаратів.

Не менш важливі платинові каталізатри у нафтопереробній промисловості. З їх допомогою отримують високооктановий бензин, ароматичні вуглеводні та технічний водень з бензинових і лігроїнових фракцій нафти. Тут платину зазвичай застосовують у вигляді дрібнодисперсного порошка, нанесеного на оксид алюмінію, кераміку, глину, вугіль.

Покриті платиною апарати використовують при виготовленні чистих хімічних препаратів та у харчовій промисловості.

У платинових тиглях розкладають гірничі породи, сплавляючи їх із содою або обробляючи плавиковою кислотою. Платиновим посудом користуються при особливо точних і відповідальних аналітичних операціях.

Платина використовується в термоопорах, які позначаються маркуванням «*ТСП*».

Наряду із золотом і сріблом, платина також є основним металом, який виконує монетарну функцію. Але платину почали використовувати для виготовлення монет на декілька тисячоліть пізніше золота і срібла, а після 1846 року жодна країна не дозволяла

собі «розкоші» уводити до обігу платинові монети, а ті, що випускаються, різними країнами у наявний час стають *інвестиційними монетами*.

Платина добре сплавляється із золотом, що навіть при незначних добавках золота дозволяє виготовляти вироби, які візуально неможливо відрізнити від золотих.

З платини, паладію та їх сплавів з іншими металами виготовляють медичні інструменти, деталі кардіостимуляторів, зубні протези.

Паладій також часто використовують як каталізатор у процесах гідрогенізації жирів і крекінгу нафти, при виробництві ацетілену, багатьох фармацевтичних препаратів та інших продуктів органічного синтезу.

В апаратах хімічної промисловсті паладій застосовують зазвичай у вигляді «паладієвої черні» (*див. вище*) або у вигляді оксиду *PdO*.

Одним із способів виготовлення такого каталізатора є просочення пористого матеріалу (деревного вугілля, пемзи або крейди) лужним розчином хлористого паладію. Потім при нагріванні у потоці водню хлорид відновлюється до металу, і чистий паладій осаджується на носії у вигляді тонкодисперсної черні.

Хлорид паладію використовують для виявлення мікрокількості чадного газа у повітрі або газових сумішей, в якості каталізатора та активуючої речовини при гальванічній металізації діелектриків, зокрема, при осаджуванні міді на поверхню шаруватих пластиків при виготовленні печатних плат в електроніці.

Паладій (або його сплав із сріблом) незамінний для очищення водню. При цьому використовується унікальна здібність водню під невеликим тиском та при температурі до 600 °С з великою швидкістю дифундувати крізь тонкі (до 0,1 мм) стінки паладієвих трубок, а домішки (пари води, вуглеводні, O_2, N_2) затримуються в трубках.

У металургії відомо застосування паладію в якості легуючої добавки при виробництві високоміцних сталей. Продукцію з них зазвичай виробляють штамповкою та холодною деформацією; це, зокрема – цільнотягнуті труби.

Покриття з паладію нанесять на електричні контакти для запобігання іскрінню.

Завдяки високій зносостійкості паладій застосовують при виготовленні реохордів – прецизійних електричних опорів високої точності в телефонії, контрольно-реєструвальних пристроях, воєнній та аэрокосмічній техніці, у тому числі – у вигляді його сплава з вольфрамом (наприклад, ПдВ-20М). Паладій входить до складу керамічних конденсаторів (тип КМ) з високими показниками температурної стабільності ємності у високочастотній апаратурі радіозв’язку.

Паладій у кількості біля 1% здібний різко змінити колір золота у сріблясто-білий. Такий сплав – «*біле золото*» – використовують ювеліри.

Паладій як коштовний метал останнім часом активно пропонується і купується на біржових і позабіржових ринках. З паладію іноді в обмеженій кількості карбують пам’ятні монети.

Компактний *родій* винятково стійкий щодо будь-яких хімічних впливів. Але якщо сплав родію із цинком або кадмієм розчинити у соляній кислоті, а потім відфільтрувати, то отримується осад дрібнодисперсного родію, який здібний вибухати на повітрі.

Поверхня родію володіє високою віддзеркалюючою здібністю (80%) для видимої частини спектра, що меньше за срібло (95%), але його стійкість до впливу активних газів і високих температур набагато більше. В результаті, поверхні, що покриті родієм, не тьмяніють навіть в атмосфері вольтової дуги. Тому родієм покривають спеціальні дзеркала для лазерної техніки (зокрема, фтороводневих лазерів), рефлектори прожекторів, елементи волноводів, антенних підсилювачів, резонаторів та ін.), а також технічні дзеркала прецизійних вимірювальних інструментів різного призначення. Його також використовують для виготовлення дифракційних решіток спектрометрів.

Завдяки високій стійкості до електроерозії родій та його сплави використовують в якості материалу для роз’ємів та ковзних контактів.

Особливий блиск і красоту ювелірним виробам надають родієві покриття. Холодний білий блиск родію добре сполучається з діамантами, фіанітами та іншим коштовним камінням прикрас. Також родій додають в якості легуючої та зміцнюючої добавки до платини та паладію. Гальванічне нанесення на ювелірний виріб родієвого покриття зменшує знос і збільшує твердість останнього, захищає від подряпин та надає яскравий блиск.

З *іридію* виготовляють лабораторні тиглі для проведення дослідів із фтором та його агресивними сполуками, а також виготовляють мундштуки для видування тугоплавкого скла.

Якщо хімічної стійкості, тугоплавкості, міцності або інших показників якості чистих платиноїдів недостатньо, їх замінюють на *сплави, які підвищують рівень необхідних властивостей*.

Наприклад до матеріалу платинових каталітичних сіток уводять добавку родію (5...10%). Використовують також і потрійний сплав: 93% *Pt*, 3% *Rh* та *4% Pd*. Добавка родію до платини підвищує механічну міцність і збільшує термін служби сітки, а паладій декілька здешевлює каталізатор і підвищує його активність.

Для економії вартісного паладію при виробництві мембран з очищення водню та разділення ізотопів водню, використовують його сплави з іншими металами (найбільш ефективним і економічним є сплав паладію з *іпрієм*).

Платину і родій (1...40% *Rh*) використовують у термоелектричних перетворювачах (термопарах) типу «платина-платинородій» для вимірювання температури до 1800 °С. Для вимірювання ще більш високих температур (2000…2300 °С) застосовують термопару, електроди якої виготовлені з іридію та його сплава з рутенієм або родієм (наприклад, типу *ИР 40/60*).

Сплав «платина-родій» застосовують при виготовленні рідкокристалічних екранів.

Магнітні сплави металів платинової групи (наприклад, сплав *ПлК-78* «платина-кобальт») володіють високою коерцитивною силою, і з них виготовляють високоефективні малогабаритні магніти.

Сплави іридию з *осмієм*, а також золота з платиною і паладієм застосовують для виготовлення компасних голок та напаювань на самописки.

Надзвичайно довговічними і стабільними є платино-іридієві електроконтакти та сплави марок ПлИ-10, ПлИ-20, ПлИ-30 для радіотехніки.

У техніці слабких електричних струмів при малих напругах використовують контакти зі сплавів золота з платиною або золота зі сріблом та платиною.

Паладій та його сплави також використовують в електроніці для покриттів, стійких до дії сульфідів, що є перевагою у порівнянні зі срібними покриттями.

Сплави паладію зі сріблом (від 60 до 5 % паладію) широко використовують для контактів слабо– та середньонавантаженої електричної апаратури з’вязку.

В ювелірній справі основні сплави паладію зі сріблом мають пробу 500 та 850 і є найбільш технологічними та привабливими.

Відомий сплав платини з іридієм (5…25%), родієм (3…10%) та/або *рутенієм* (2…10%). Прикладами використання металів платинової групи у таких випадках стають виготовлення: котлів для плавлення лугів або роботи із соляною, оцтовою та бензойною кислотами; перегонних реторт для виробництва плавикової кислоти; автоклавів, дистиляторів, колб, мішалок та ін.

Тиглі з платино-родієвих сплавів використовують у лабораторних дослідженнях і для вирощування деяких коштовних каменів та електрооптичних кристалів.

Зі сплава платини з 5...10% родію виготовляють ємності та фільєри для виробництва найтонкіших скляних та кварцових ниток. У цьому випадку родій різко збільшує хімічну та механічну стійкість платини та суттєво підвищує температуру плавлення.

Зі сплавів платини із золотом роблять деталі обладнання для отримання

синтетичного волокна, які за умовами виробництва повинні володіти винятковою стійкістю щодо впливу хімічних речовин.

Вміст платини у земній корі оцінюється за різним джерелами від $1 \cdot 10^{-8}$ до $5 \cdot 10^{-6}$ %, паладію – біля 10^{-9} %, для решти платинових металів приблизно 10^{-11} %. Як правило, платиноїди зустрічаються в одних і тих же родовищах. У зв'язку з цим, вони мають подібну історію відкриття та дослідження, видобування та виробництва.

У наявний час майже 90 % усього виробництва металів платинової групи поділено між платиною та паладієм. Решту платиноїдів видобувають і продають у невеликих кількостях.

Платина та метали її групи *знаходяться у природі* в поліметалічних (мідно-нікелевих) рудах, а також у родовищах золота і платини у вельми розсіяному стані: промислово значущим вважається вміст платиноїдів у руді завбільшки 5…20 г/т.

Геохімічно всі ці елементи пов'язані з ультраосновними та основними породами.

Відомо біля півсотні мінералів платинової групи.

Платина, іридій, паладій у гірничих породах і родовищах зустрічаються як у самородному вигляді, так і у вигляді твердих розчинів та інтерметалевих сполук з *Fe, Ni, Cu, Sn,* рідше – з *Au, Os, Pb, Zn, Ag.*

Мінерали класу саморідних елементів включають домішки заліза, іридію, паладію, родію, міді. Їх колір від білого до сіро-сталевого. Твердість за мінералогічною шкалою 4…4,5; щільність до 21000 кг/м^3.

Для земної кори, здебільшого, характерний саморідний стан *платини*, який є головним джерелом її отримання. Найбільш крупним відомим платиновим самородком є «Уральський гігант» масою 7,860 кг, виявлений у 1904 р. на Ісовській копальні (РФ).

Найбільш розповсюдженими мінералами платини являються *коліксен* (80…88 % *Pt*, 9…11 % *Fe*), *фероплатина* (16…19 % *Fe*), *паладиста платина* (7…40 % *Pd*), станнопаладиніт Pd_3Sn_2Cu (40…45% *Pd*, 15…20% *Pt*, 28…33% *Sn*), *гиверсіт* $PtSb_2$ (45% *Pt*, 51,5% *Sb*), *звягінцевіт* $(Pd, Pt)_3(Pb, Sn)$.

Крім того, у природі відомі арсеніди, сульфоарсеніди и сульфіди платини, рутенію і паладію, а саме *сперилі*т $PtAs_2$ (56,2 % *Pt*), *куперит PtS* (79,2…85,9 % *Pt*), *висоцкіт* $(Pd, Ni)_5S$ (59,5 % *Pd*, 14,2 % *Ni*, 4,8 % *Pt*), *холінгвортит (Rh, Pt)AsS* (25 % *Rh*) та ін.

Форми знаходження платини визначають її поведінку у наступних процесах збагачення. У зв'зку з цим, за природою утворення розрізняють «первинні» та «вторинні» родовища.

До перших відносяться, наприклад, канадські міднонікелеві магнітні колчедани в окрузі Садбері, південноафриканські міднонікелеві колчедани у Трансваалі, родовища Норильська (РФ). Вміст платини в рудах сягає 1,5…2,0 г/т.

У канадських родовищах платина зустрічається у вигляді *сперилі*та $PtAs_2$, *куперита PtS* та деяких більш рідкісних мінералів. Однак, більша частина платинових металів знаходиться у сульфідах у стані твердого розчину. Приблизно такий же мінералогічний склад мають південноафриканські руди; крім того тут знайдена саморідна платина та фероплатина. У великих уральських родовищах мінерали платинових металів генетично пов'язані з глибинними ультраосновними породами, головним чином, з дунітами.

Вторинні родовища (*розсипи*), наприклад, у Колумбії з'явилися завдяки вивітрюванню первинних родовищ з наступним їх вимиванням. При цьому, платинові метали, що мають більшу щільність, осаджувалися в певних місцях.

З інших платинових металів тільки *паладій* зустрічається (вкрай рідко) у саморідному стані у вигляді окремих зерен у платинових рудах, а також у деяких золотих пісках Бразилії, Колумбії та Кавказа. За зовнішнім виглядом його досить важко відрізнити від саморідної платини, але він значно легше і м'кіше за неї.

Хімічний аналіз показує, що саморідний паладій зазвичай містить домішки: перш за все – саму платину, а іноді – іридій, срібло і золото.

Приблизно третина відомих мінералів, що містять паладій, ще недостатньо досліджена і навіть не має назв. Можливим є існування й інших сполук, наприклад, паладію з ртуттю Pd_2Hg_3. У Бразилії знайдений дуже рідкісний і до наявного часу недостатньо досліджений різновид саморідного золота – *паладисте золото* (*порпецит*), що містить 8...11% паладію. За зовнішнім виглядом цей мінерал важко відрізнити від чистого золота.

Родій власних мінералів не має. Його знаходять разом із саморідною платиною (в долях процента) та осмістим іридієм.

До мінералім, що містять *осмій, рутеній та родій* відносяться: *нев'янскіт* (46,8…77,2 % *Ir*, 21…49,3 % *Os*), *сисертскіт* (67,9 % *Os*, 17 % *Ir*, 8,9 % *Ru*, 4,5 % *Rh*), *родієвий нев'янскіт* (69,9…70,4 % *Ir*, 17,2 % *Os*, 11,3 % *Rh*) – самий багатий на родій мінерал. Родій також міститься у платинових рудах та деяких золотих пісках Південної Америки. До 43 % родію міститься у мексиканському золоті.

Промислові родовища родію знаходяться у Південно-Африканській Республіці (ПАР), Канаді, Колумбії, на Уралі та у Заполяр'ї (РФ).

Світові прогнозні ресурси платинових металів, що оцінюються близько 120000 тонн, розподілені у 14 видобувних країнах світу нерівномірно, зокрема: у Бушвельдському комплексі (ПАР) у кількості приблизно 80000 тонн, США – 9300 тонн, Норильскому рудному районі (РФ) у кількості приблизно 65000 тонн, у Зімбабве – 3100 тонн, у Канаді – 500 тонн, у Колумбії – 150 тонн тощо [35]. В рудах Бушвельда вміст платини втричі вище за паладій, а в Норильську – відношення зворотнє.

В Україні розвіданих запасів металів платинової групи на сьогоднішній день немає. Проте є досить високі загальні перспективи виявлення цих металів у різних геологічних формаціях. Це підтверджено більш ніж піввіковою історією їх вивчення, починаючи з 1951 року, коли у гіпербазитах Приазов'я у районі р. Обитічна були виявлені концентрації у 0,1…0,2 г/т платини [36]. Перспективними вважають такі геологічні об'єкти: докембрійські мафіт-ультрамафітові комплекси Українського щита, альпінотипні гіпербазити Карпат, рифейську трапову формацію, що містить самородну мідь на Волині, ультрамафітові і залізорудні формації Кривбасу, калішпатові рідкіснометалічні і рідкісноземельні метасоматити центральної і північно-західної частини Українського щита, березит-лиственітові золотоносні метасоматити в зеленокам'яних структурах Середнього Придніпров'я, рудоносні пласти Середнього Бугу, вугленосні, червонобарвні поклади і метасоматити Донбасу, гори вивітрювання на базит-ультрабазитових масивах Українського щита. Була виділена найбільш перспективна ділянка Жиричі, в межах якої оцінені прогнозні ресурси руди із середнім вмістом металів платинової групи 1,5 г/т. З цих руд може бути одержаний концентрат із вмістом платиноїдів – 13,4 г/т з можливістю вилучення цих металів біля 30% .

Кожному типу руд й мінеральним різновидам притаманні свої особливості мінералізації, що зумовлені різним ступенем збагачення платиновими металами, різним співвідношенням платини, паладію, іридію, родію, рутенію та осмію, а також відмінністю форм знаходження цих металів.

Різноманіття типів руд і різниця форм знаходження платинових металів, зокрема, у мідно-нікелевих рудах викликає великі складнощі щодо повноти вилучення платинових металів у концентрати.

Отже, ***технології вилучення платини і металів платинової групи*** залежать від виду сировини.

Сировиною для отримання платинових металів слугують:

– шліхова платина, вилучена при розробці та збагаченні розсипів;

– концентрати, виділені в результаті збагачення та гідрометалургійної обробки анодних шламів електролізу нікелю та міді (*див. вище*), які містять після збагачення, у мас.%: 15…20 *Pt*; 1,5…2,5 *Te*; 35…45 *Pd*; 0,6…2,5 *Ni*; 1,5…2,0 *Au*; 0,4…0,6 *Rh*; 0,7…2,5 *Cu*; 8…10 *Ag*; 0,04…0,08 *Ir*; 1,5…4,0 *Fe*; 1,0…1,7 *Se*; 0,08…0,15 *Ru*; 2…5 *S*;

– лом вторинних платинових металів та інші відходи.

Шліхову платину отримують наступним чином.

Спочатку на рудних копалинах із розсипів добувають *саморідну платину*. Технологічні схеми вилучення платинових металів при збагаченні вкраплених руд визначаються формами наявності цих металів у даному конкретному родовищі.

Цей процес включає дві групи операцій: видобуток піску та його збагачення.

Піски видобувають підземним або відкритим способами. Як правило, прагнуть до застосування відкритих гірських робіт, які виконуються за два етапи: вскриття порожньої породи та видобуток платиновмісних пісків.

Видобуток пісків часто поєднують з їх гравітаційним збагаченням в одному агрегаті, наприклад, дразі (*див. рис. 1.38*). Тут видобута гірська маса з черпаків драги поступає до промивочної бочки, де здійснюється її *дезінтеграція* та *грохочіння*.

Процес дезінтеграції гірської маси у *бочці* здійснюється шляхом її механічного розділення та розмиву водою при перекатуванні породи усередині бочки та зрошення напірним струменем води. Порода при цьому поділяється на два продукти: верхній (галька, крупні каміння, нерозмиті куски глини), які не містять платини, спрямовується до відвалу; нижній поступає посліловно до шлюзів, осадової машини та концентраційних столів.

Технологічний процес гравітаційно-флотаційного збагачення саморідної платини немагнітних південноафриканських руд включає подрібнення вихідної руди з наступним її тонким подрібненням за дві стадії у кульових мельніцях, які працюють з гідроциклонами за замкненим циклом. Вільні зерна саморідної платини відокремлюють у циклі подрібнення на шлюзах. Отримані концентрати піддають додатковому очищенню на концентраційних столах з отриманням гравітаційного концентрата, що містить 30…35% *Pt*; 4…6 % *Pd* та до 0,5 % інших металів платинової групи.

Якщо в рудах платинові метали, зокрема, платина, знаходяться у вигляді магнітної *фероплатини*, то застосовують *магнітну сепарацію* з наступною переробкою збагаченого продукта або в окремому циклі, або сумісно з никелевим концентратом у пірометалургійному процесі (*див. вище*). Такий нікелевий концентрат містить платинові метали, мідний концентрат, до складу якого входять золото та срібло, а також піротиновий концентрат, який практично вільний від коштовних металів.

Пульпу після відокремлення гравітаційного концентрату загущують та спрямовують на флотацію.

У результаті збагачення отримується *шліхова платина*, що містить суміш зерен саморідної платини, яка сплавлена з платиновими металами, залізом, міддю, нікелем та іншими елементами. Для неї характерним є наступний склад, у мас. *%*: до 70…90 *Pt*; 1…3 *Ir*; менше 1 *Rh* та *Ru*; до 15 *Fe*.

Переробку шліхової платини внаслідок малої кількості забруднюючих елементів (сірки та кольорових металів) здійснюють за доволі простою схемою. Основними операціями є: розчинення, доведення розчинів та вибіркове осадження окремих платинових металів.

Перший етап переробки шліхової платини – її розчинення у царській горілці (суміші соляної та азотної кислот при об'ємному відношенні 3:1) у чані з набором тарілок або при інтенсивному перемішуванні за допомогою механічних мішалок. Спочатку шліхи розчиняють без підігріву, оскільки реакція розчинення протікає вельми енергійно, а потім (через 4…5 годин) підігрівають до 110…120 °С, що прискорює процес розчинення, який завершується приблизно через добу.

При такій обробці до розчину переходить більше 99% платини.

Для наступного *вибіркового осадження* платини у вигляді нерозчинного хлороплатинату амонію $(NH_4)_2[PtCl_6]$ необхідно попередньо перевести іридій (IV) та паладій (IV) відповідно до форм іридій (III) та паладій (III), інакше вказані чотиривалентні

метали при осадженні платини хлористим амонієм також опиняться в осаді у вигляді важкорозчинних сполук $(NH_4)_2[PdCl_6]$ та $(NH_4)_2[IrCl_6]$.

Розчин обробляють послідовно 5-, 12,5– та 25%-ним розчином хлористого амонію у присутності соляної кислоти. При цьому платина випадає в осад у вигляді хлороплатината $(NH_4)_2[PtCl_6]$.

Отриманий продукт відфільтровують і промивають на фільтрі 5%-ним розчином хлористого амонію. Осад хлороплатинату прожарюють у муфельних електропечах протягом 10…12 годин при поступовому підвищенні температури до 1000 °С. При цьому утворюється губчаста платина, яка містить домішки інших металів. Тому її подрібнюють, повторно розчиняють у царській горілці та повторно осаджують у вигляді хлороплатината амонію.

Очищена платинова губка має світлосірий колір з металічним блиском. При ударі вона не повинна розсипатися в порошок. Такий матеріал далі спрямовують до афінажу.

Вище було викладено, що при збагаченні сульфідних мідно-нікелевих руд отримуються мідний і нікелевій концентрати, які переробляють за складною технологічною схемою. Платинові метали, які містяться в сульфідних мідно-нікелевих рудах, проходять пірометалургійні операції, концентруються у чорновому металі та поступають до електролітичного рафінування нікелевих і мідных анодов. У залежності від умов проведення цих операцій суттєва кількість платинових металів може переходити до збірних або обертових продуктів і, у кінцевому сенсі, безповоротньо губитись разом з відвальними шлаками, пилом та газами.

При одночасній наявності сульфідної, оксидної та металічної фаз платинові метали *концентруються у металічній фазі*, утворюючи кристалічну решітку заміщення без організації самостійних структур. Ця обставина утруднює вилучення платиноїдів.

Схематично, *процес металургійної переробки* сульфідних платиновмісних руд і концентратів, призначений для вилучення платиноїдів, здійснюється за наступними стадіями.

Нікелевий концентрат після агломерації або окатування плавлять в електротермічних (рідше – відбивних) печах з отриманням штейна та шлака (*див. вище*). Шлак на деяких підприємствах після грануляції та подрібнення піддають флотації для відокремлення часток штейна, які містять платинові метали. Далі штейн, у якому концентрується основна маса платинових металів, проходить операцію конвертування на *збіднюючу* електроплавку.

Файнштейн повільно охолоджується, подрібнюється і флотується з отриманням мідного концентрату, який переробляється у мідному виробництві, і нікелевого концентрату, який йде на прожарювання у печах киплячого шару.

Металічний сплав, вихід якого на різних заводах складає 8…15%, вбирає в себе із файнштейна до 95 % платинових металів.

Речовину, що отримується після прожарювання нікелевого концентрату, піддають відновлювальній плавці на аноди в дугових електропечах. Ці аноди піддають електрорафінуванню; шлам, що випадає на аноді, концентрує в собі основну масу платинових металів.

Аналогічно, платинові метали, які є у мідному концентраті, після випалювання, відбивної плавки, конвертування та вогневого рафінування концентруються у мідних анодах, а після електрорафінування переходять до мідного шламу. Основними складовими шламу є сульфіди міді та нікелю (α-Cu_2S, β-Cu_2S, Ni_3S_2, NiS), оксиди (NiO, CuO, Fe_2O_3, Fe_3O_4), ферити ($NiFe_2O_4$, $CuFeO_2$).

У зв’язку з малою кількістю платиноїдів у таких шламах їх попередньо *збагачують* піро– та гідрометалургійними методами з отриманням *концентратів платинових металів*. На різних підприємствах це здійснюють за різними технологічними схемами.

За однією з відомих схем з *використанням пірометалургійних операцій* шлам нікелевого електроліза змішують зі шламом мідного електроліза, з якого попередньо

видаляють селен. Цю суміш піддають окиснювально-сульфатизуючому випалюванню в печі з механічним перемішуванням протягом 10…14 годин при 550…600 °С. У результаті, сульфіди міді, нікелю та заліза перетворюються на сульфати, а платиноїди переходять до огарку у вигляді вільних металів.

Недогарок після випалювання вилуговують 0,5…1,0-молярним розчином H_2SO_4 при 80…90 °С та механічному перемішуванні. Сульфати нікелю, міді та заліза при цьому переходять до розчину, а залишок збагачується у 2,5…3,5 рази. Платина у розчинах після вилуговування практично відсутня.

Недогарок, після вилуговування та сушіння спрямовують до відновлюваного плавлення в електропечі при 1700 °С та відливання анодів. Отримані шлаки переробляють в електропечах, а збіднені шлаки повертають до мідного або нікелевого виробництва.

Аноди, збагачені платиновими металами, піддають електролітичному розчиненню у сірчанокислотному електроліті. Продуктами електролізу являються: анодний шлам, катодна мідна губка та нікелевий розчин.

Анодний шлам представляє із себе багатий платиновий концентрат. Для відокремлення вторинних шламів від мідної губки аноди розміщують у діафрагмах з фільтровальної тканини.

Катодну мідну губку розчиняють у сірчаній кислоті, в результаті чого мідь переходить до розчину, а залишок стає ще одним концентратом платинових металів.

Представлена технологічна схема збагачення шламів з використанням окиснювально-сульфатизуючого випалу та електролітичного розчинення вторинних анодів дозволяє отримати селективні (відокремлені) концентрати, що значно полегшує процес наступного афінажу.

Застосовують також *гідрометалургійну переробку* платиновмісних сульфідних концентратів з використанням окиснювального автоклавного вилуговування, соляно– та сірчанокислотного вилуговування, хлорування при контрольованому потенціалі, а також інші процеси.

Відповідні технологічні схеми побудовані на селективному вилученні кольорових металів, що містяться у шламах. Коштовні метали при цьому залишаються у нерозчиненому осаді, який у подальшому спрямовують до афінажного виробництва, а розчин, який містить сульфати кольорових металів, повертають до їх основного виробництва.

У багатьох випадках для покращення розчиненості кольорових металів шлами піддають попередній пірометалургійній обробці (випалювання, спікання, відновлювальна плавка тощо).

При переробці шламів методом сульфатизації сульфіди, оксиди та інші сполуки кольорових металів при взаємодії з концентрованою сірчаною кислотою при температурі вище за 150 °С утворюють сульфати, які при наступному вилуговуванні переходять до розчину, а коштовні метали у кількості до 30% паладію та платини накопичуються у нерозчинному залишку. У подальшому їх спрямовують до афінажу, а лужний розчин після нейтралізації скидують.

Ця технологія має суттєвий недолік: при температурі сульфатизації вище за 200 °С іридій, родій та рутеній більше, ніж на 95%, переходять до розчину. Тому застосовують спосіб подвійної сульфатизації. Спочатку для певних пропорцій мідних і нікелевих шламів при 180…190 °С проводять першу стадію сульфатизації. При цьому, нікель, мідь і залізо більше, ніж на 99%, переходять до розчину, а платинові метали практично повністю залишаються у нерозчиненому залишку.

Хоча цей залишок більше, ніж у 8 разів, збагачується платиновими металами, їх вміст у ньому (меше 0,01 мг/л) недостатній для проведення афінажних операцій. Тому його піддають другій сульфатизації при 270…300 °С та механічному перемішуванні протягом 10…12 годин. Просульфатизований матеріал вилуговують водою при 80…90 °С.

При цьому досягають додаткового збагачення платиновими металами нерозчиненого залишку приблизно у 2…3 рази.

Залишок після другої сульфатизації та вилуговування піддають вилученню сицілію розваркою у 5-молярному розчині луги при 100 °С. Втрати коштовних металів з лужним розчином не перевищують 0,2 %. Цей розчин після нейтралізації скидають.

Отриманий концентрат містить 40…45% платиноїдів і йде до афінажу. Недоліком технології з подвійною сульфатизацією є невелика продуктивність.

Виробництво кожного металу платинової групи має свої особливості, які зумовлені їх властивостями.

Зокрема, методи отримання чистого *паладію* з природничої сировини, які базуються на розділенні хімічних сполук платинових металів, дуже складні та довготривалі.

В активній формі паладій також отримується при просоченні цеолитів розчинами його солей з наступними сушінням та відновленням воднем, а також відновленням у водному розчині формаліном з отриманням тонкодисперсної паладієвої черні.

Подібним шляхом отримують паладій з анодних шламів виробництва нікелю та міді, які переводять його до $[Pd(NH_3)_2Cl_2]$ з наступним відновленням воднем.

Ще один метал платинової групи – *родій,* який «власних» мінералів не має, разом з іншими платиновими металами добувають із сульфідних мідно-нікелевих руд. Вміст родію у цих рудах складає міліграми на тонну руди. Його вилучення та очистка від некоштовних та коштовних домішок пов’язана з виключно складними, довготривалими та трудомвісними операціями. Технологія виділення родію залежить, перш за все, від виду і складу сировини, яка переробляється.

В якості прикладу, можно коротко розглянути технологію вилучення родію із саморідної платини.

Сира платина з копалини надходить до афінажного заводу, де відокремлюють коштовні метали від некоштовних домішок та розділяють самі благородні метали. Робиться це наступним чином.

Сиру платину завантажують у фарфорові котли та нагрівають у царській горілці протягом доби. Родій, а разом з ним – майже вся платина, паладій, некоштовні метали (залізо, мідь та інші), частково – рутеній та іридій переходять до розчину, а в осаді залишаються осмістий іридій, кварц, хромистий залізняк та інші мінеральні домішки.

Спочатку на розчин діють хлористим амонієм, щоб осадити та відокремити платину. Розчин, що залишився, упаровують. Осад, що утворюється, складається із декількох солей. У ньому до 6% родію; присутні також паладій, рутеній, іридій, залишки платини (повністю її за допомогою NH_4Cl відокремити не вдається) та некоштовні метали.

Цей осад розчиняють у воді і ще раз тим же способом відокремлюють платину. Залишок, в якому знаходяться родій, рутеній та паладій, у міру накопичення, направляють на очистку та розділення.

Родій вилучають різними способами. Наприклад, за способом, який був запропонований В.В. Лебединським у 1932 р., спочатку нітритом натрію $NaNO_2$ осаджують та відокремлюють від розчину осад гідроокисів некоштовних металів; родій при цьому залишається у розчині у формі $Na_3[Rh(NO_2)_6]$. Після цього, за допомогою NH_4Cl з розчину «на холоду» виділяють родій у вигляді малорозчинного комплекса $(NH_4)_2Na[Rh(NO_2)_6]$. Але при цьому разом з родієм до осаду потрапляє й іридій; інші платинові метали (рутеній, паладій та залишки платини) залишаються у розчині.

Осад з родієм розчиняють у розбавленому їдкому натрі, і з цього розчину завдяки дії аміаку та NH_4Cl знов осаджують родій – тепер вже у формі іншої комплексної сполуки $[Rh(NH_3)_3(NO_2)_3]$. Осад відокремлюють та ретельно промивають розчином хлористого амонію.

Осад знов завантажують у котел із соляною кислотою та нагрівають декілька годин. Відбувається реакція з отриманням нової комплексної сполуки $[Rh(NH_3)_3Cl_3]$

яскравожовтого кольору. Це – триамінтрихлорид родію. Його ретельно промивають водою і тільки після цього приступають до виділення металічного родію.

Соль завантахують у піч та прожарюють декілька годин при 800...900 °С. Комплексна сполука розкладається та утворюється порошкоподібний продукт суміші родію з його оксидами. Після охолодження порошок ще раз ретельно промивають разбавленою царською горілкою для видалення незначної кількості некоштовних доміщок, що залишилися, потім знов завантажують у піч і відновлюють до метала шляхом прожарювання в атмосфері водню.

Переробка лому вторинних платинових металів залежить від виду лому та зазвичай включає різні пірометалургійні операції (переплав, рафінування тощо).

Найбільш доступною сировиною для вилучення платини і паладію є непотрібні радиідеталі – мікросхеми та керамічні конденсатори.

В якості прикладу використання у виробництві платиноїдів *інших відходів* розглянемо *переробку відпрацьованих каталізаторів* на основі оксиду алюмінію.

При цьому реалізують один з наступних шляхів:

– з виділенням основи (Al_2O_3) та отриманням концентрату коштовних металів;

– вилучення коштовних металів, не чіпаючи при цьому основи.

До методів першої групи відносяться різні варіанти сульфатизації.

Так звана *«суха» сульфатизація* здійснюється шляхом змочування матеріала надлишком концентрованої сірчаної кислоти з наступним прожарюванням при 300 °С. Процес здійснюють у подових печах з механічним перемішуванням або у трубчастих печах, що обертаються. Охолоджений спек вилуговують водою. Нерозчинений залишок складає 12…13% маси вихідного материалу.

Якщо розчинення спека вести у 10%-му розчині H_2SO_4, то вміст платини в отриманому концентраті сягає 7,5…8,5%.

Для підвищення якості концентратів застосовується комбінована технологічна схема, що включає попереднє сірчанокислотне вилуговування оксида алюмінію у 10…20%-му розчині H_2SO_4, випалювання при 550…600 °С та повторне вилуговування огарка у сірчанокислотному розчині. Така технологія забезпечує отримання концентрату, що містить до 20..22% платини.

Згідно з іншим варіантом цієї технології нерозчинний залишок першого вилуговування змішують з вугіллям і нагрівають до 750…800 °С в атмосфері, що не містить окиснювача. Отриманий огарок піддають другому сірчанокислотному вилуговуванню з отриманням 25…30%-го платинового концентрату.

При реалізації метода «сухої» сульфатизації спостерігається частковий перехід платини до розчину. Це зумовлено присутністю у катализаторі адсорбованого молекулярного хлора, внаслідок чого при сульфатизації виникають умови для утворення хлоридних комплексів платинових металів. Через наявність на поверхні носія адсорбованих мінеральних солей, наприклад, галогенідів, можливим також є розчинення платини за участю кисню повітря в якості окиснювача.

З усіх розглянутих варіантів технології сірчанокислотного збагачення тільки останній забезпечує невеликий перехід платини до розчину, що зумовлено проведенням випалювання у відновлювальній атмосфері.

До першого шляху також відносяться *лужні методи*, які базуються на здібності оксида алюмінію взаємодіяти з лугами з утворенням водорозчинних алюмінатів натрію. Так, сплавленням відпрацьованих каталізаторів з *NaOH* та наступним вилуговуванням сплава у воді можна отримати концентрат, що містить 18…22% *Pt*.

Спікання відпрацьованих каталізаторів з кальцинованою содою при 1200…1250 °С, охолодження та наступне вилуговування у розчині їдкого натра при 90…95 °С дозволяє отримувати концентрати, які містять від 14 до 34% *Pt*.

Відомий також спосіб вилуговування оксида алюмінію в автоклаві розчином *NaOH* при 160…175 °С і тиску 0,6…0,7 МПа, що дає можливість отримання концентрата з 8…9% *Pt*.

Згідно з іншими методами другої групи застосовують, здебільшого, прийоми хлорної металургії, зокрема, переведення платини у розчин у хлоридного комплекса. Оксид алюмінію при цьому не взаємодіє з хлор-агентами.

З розчину платиноїди осаджують цементацією алюминієм, цинком або магнієм.

З відпрацьованих каталізаторів платину також можна вилучити плавкою на мідний сплав. Для відшлакування тугоплавкого оксида алюмінію до шихти вводять вапно і плавиковий шпат CaF_2, а для утворення колективуючої фази – порошкову мідь. Плавку ведуть при 1500…1550 °С. Мідний сплав, у якому концентруються платинові метали, направляють до афінажу. Шлаки с невисоким вмістом коштовних металів повертають до рудного перероблення.

Родій вилучають з матеріалів, які є супутніми у процесах гідроформілірування (*оксосинтеза*). У цих процесах взаємодіють олефіни з оксидом вуглецю і воднем при підвищених температурі та тиску у присутності деяких карбонілів металів, а продуктом реакції є альдегіди. Використання у цьому процесі родійвмісного каталізатора (замість кобальтвмісних каталізаторів) дозволяє проводити процес при м’якіших умовах зі збільшенням виходу корисного продукту.

У процесі реакції отримання альдегідів легколетючі компоненти відокремлюють шляхом дистиляції; при цьому, родійвмісний каталізатор накопичується у високиплячому залишку від дистиляції. Цей залишок, у принципі, може бути поверненим до процесу гідроформілірування. Але повернути весь залишок не вдається, тому що його кількість у ході процесу поступово зростає, а активність каталізатора поступово знижується. Тому доцільним стають вилучення родію та регенерація вартісних родієвих каталізаторів.

Метод вилучення включає обробку залишків дистиляції процесу гідроформілірування кисеньвмісними мінеральними кислотами та перекисами, в результаті чого отримується водний розчин родієвої солі. Цей водний розчин обробляють катіонітом; останній відокремлюють від розчину, а абсорбовані іони родію десорбують соляною кислотою. Розчини гексахлор-родината, які містять соляну кислоту, обробляють (у присутності водорозчинного органічного розчинника та третичного фосфіна PR_3) оксидом вуглецю або сполуками, які виділяють оксид вуглецю, при температурі до 150 °С і тиску 0,1…0,5 МПа.

Родій, осаджений на носії, після видалення розчину переводять до розчинного родієвого карбонільного комплексу дією оксиду вуглецю в присутності розчинника та сполуки, яка може замінити собою оксид вуглецю в якості ліганда (атома, іона або молекули, які дають електронну пару іншому атому-акцептору, зазвичай – металу шляхом донорно-акцепторної взаємодії). Реакцію проводять при температурі 20…30 °С і тиску 0,1…70,0 МПа.

Родій також виділяють з кубових залишків процесу гідроформілірування ненасичених вуглеводнів, де він та риарілфосфіт застосовується в якості ліганда. Процес виділення включає наступні стадії:

– попередня сумісна обробка кубових залишків органічним розчинником (або сумішшю розчинників), водою (у кількості не менше 5 мл на 100 г кубового залишку), газоподібним киснем (або сполукою, що виділяє кисень) та основи у кількості, що достатня для забезпечення необхідної величини *pH*;

– забезпечення температури 0…80 °С з метою окиснення триарілфосфітного ліганда до відповідної фосфатної сполуки;

– нагрів суміші, яка отримана на попередній стадії, протягом 15…120 хв. при 115…175 °С для осаджения металічного родію;

– відокремлення осаду родію;

– промивка осаду родію кислотним розчинником при $pH = 3…4$;

– обробка осаду родію лужним розчином для відновлення домішок тривалентного родію до металу;

– обробка родію крижаною оцтовою кислотою;

– відокремлення родію;

– промивка родію кислим розчином при *pH*=3…10 та сушка родію в інертній атмосфері при 250…400 °С;

– окиснення родію при температурі 300…900 °С (якщо отримання відповідного продукта є необхідним).

Можливі й інші схеми вилучення родію з висококиплячих смолистих залишків дистиляції переробки реакційних сумішей, які утворюються при перестворенні органічних сполук у присутності гомогенних комплексних родієвих каталізаторів [34].

Останньою операцією отримання металів платинової групи є *афінаж*, який застосовують до їх концентратів на афінажних заводах.

Технологічні схеми афінажа платинових металів налічують десятки взаємопов'язаних операцій з чисельними обертаннями розчинів і напівфабрикатів та поступовим виділенням тих сполук, з яких безпосередньо можна отримати очищені платинові метали.

Властивості платиноїдів регламентуються стандартами і технічними умовами (*див. Додаток А*). Зокрема, згідно з нормативними документами рафінована *платина у злитках* випускається марок: ПлА-0, ПлА-1, ПлА-2, які відрізняються регламентованою кількістю домішок інших платиноїдів, а также золота, свинцю, заліза, силіцію, олова, алюмінію, сурми, срібла, магнію, цинку, міді та нікелю (у сумі не больше 0,02; 0,05 та 0,1 масс.% відповідно).

На додаток до викладених матеріалів, нижче надано коротку інформацію про стан виробництва деяких металів (матеріалів) у інших підгалузях сфери виготовлення кольорових металів.

До підприємств ***ртутно-сурм'яної підгалузі*** України належить ВАТ «Микитівський ртутний комбінат» (м. Горлівка). Це підприємство мало повний цикл виробництва: від видобутку сировини (руди) до готової продукції (ртуті). Відсутність попиту на ртуть і великі витрати на її виробництво призвели до припинення видобутку ртуті з власної сировини.

Виробництво рідкісних металів зосереджене на Філії «Вільногірський гірничо-металургійний комбінат АТ «Об'єднана гірничо-хімічна компанія» у м. Вільногірськ Дніпропетровської області (гафній, цирконій, відповідні сполуки тощо), ДП «Придніпровський хімічний завод у м. Кам'янське Дніпропетровської області (цирконій, гафній та велика кількість сполук інших рідкісних металів), який реконструйовано на ряд самостійних виробництв, що випускають, здебільшого, непрофільну продукцію, а також на Мужіївському золотополіметалічному комбінаті (будівництво) біля с. Мужіїво Берегівського району в Закарпатській області (потужність до 60 тис. тонн руди золота на рік).

Виробництво ***напівпровідникових матеріалів*** в Україні становило близько 10 відсотків світових обсягів і здійснювалось на трьох підприємствах: Казенне підприємство «Запорізький титаномагнієвий комбінат», ВАТ «Чисті метали» (м. Світловодськ Дніпропетровської області) та хіміко-металургійній фабриці ПрАТ «Металургійний комбінат імені Ілліча» (м. Маріуполь). Це моно– та полікристалічний силіцій, германій, арсеніди та фосфіди галію та індію, пластини та структури на їх основі, а також різноманітні сполуки (оксиди, хлориди, моно– і дихлорсилани тощо). Домінуючим серед цих продуктів є силіцій полікристалічний. Випуск його та продукції на його основі становив 75 відсотків загального обсягу напівпровідникової продукції, що вироблялась. Створені в Україні потужності виробництва полікристалічного силіцію повністю забезпечувалися власною сировиною (трихлорсиланом), і приблизно 40 відсотків обсягу його виробництва відправлялось за межі України. Через великі витрати на виробництво та відсутність потреби в Україні випуск напівпровідникових матеріалів практично припинено.

Виробництво ***порошкових металів*** в Україні зосереджене на таких підприємствах: ВАТ «Закарпатський металургійний завод» (смт Вишково, Закарпатська обл.), Запорізький металургійний дослідно-промисловий завод, ПАО «Інститут титану», ДП «Завод порошкової металургії» (м. Бровари), ВАТ «Торезтвердосплав» (м. Торез), ДП «Світловодський казенний комбінат твердих сплавів і тугоплавких матеріалів», Кіровський завод виробів з металевих порошків (м. Голубівка, Луганська область), ТОВ НВФ «Металург» (м. Харків), – і деякі інші підприємства чорної металургії. Тут титанові порошки використовують для виробництва фрикційних виробів, порошків тугоплавких сполук титану, в чорній металургії, атомній енергетиці та інших галузях. Сировиною для виробництва титанових порошків є низькосортний губчастий титан.

Виготовлення ***вугільних та графітових електродів***, блоків, анодної маси, вуглецевих тканин й ін. на основі виробництва вуглецю з нафтового і пекового коксу і термоантрациту здійснюється на ПрАТ «Укрграфіт» (м. Запоріжжя). Для забезпечення спецтехніки на базі цього підприємства створено Державний завод «Вуглекомпозит». На підприємстві відбулося значне зниження обсягів випуску продукції. Основною причиною цього є труднощі у постачанні сировинних компонентів з-за кордону та висока вартість енергоносіїв.

Запитання для самоконтролю до підрозділів 1.1 та 1.2.1

1. Назвіть види металургії. Наведіть приклади відповідної продукції.
2. Яка різниця між «металами» та «сплавами»? Проясніть різницю між «легуванням» та «модифікуванням» при їх виготовленні.
3. Якими документами регламентуються властивості металургійної продукції? Як маркують відповідні документи в різних країнах? Наведіть приклади.
4. Як зіставляються назви хімічних *елементів* та відповідних технічних *матеріалів*?
5. Навіщо знати фізико-хімічні властивості металів і сплавів при проєктуванні процесів їх виробництва?
6. У чому полягає суттєва різниця між «сталями» та «чавунами»?
7. Що таке «феррометали», та для чого їх застосовують? Наведіть приклади.
8. Назвіть категорії (марки) та групи чавунів і сталей.
9. За яким принципом й як класифікують та позначають сталі, включаючи леговані?
10. Назвіть види та підвиди процесів з обробки тиском та надайте приклади відповідної продукції.
11. Опишіть конструкцію доменної печі, призначення складових та особливості її роботи, користуючись відповідною схемою обладнання.
12. Надайте загальну характеристику матеріалам доменної плавки.
13. Назвіть основні залізні руди, надайте їм загальну характеристику та означте розташування головних копалин залізних та марганцевих руд в Україні.
14. Для чого застосовують флюси при доменній плавці?
15. Надайте загальну характеристику процесам підготовки шихтових матеріалів до доменної плавки. Які властивості матеріалів і процесів підлягають технічному контролю?
16. Чому сірка та фосфор (а також деякі інші домішки) у чавуні та сталі вважають шкідливими?
17. Чи можна вважати шлак відходом металургійних виробництв?
18. Що таке «основність шлаку», як визначається ця характеристика та що відображує?
19. Наведіть перелік основних можливих напрямів інтенсифікації доменного процесу.

20. Надайте загальну характеристику позадоменним процесам відновлення заліза із сировини.

21. На яких хімічних реакціях базується сталеплавильний процес?

22. Як розрізняють сталі за ступенем окиснення? Надайте цим різновидам загальну характеристику.

23. Опишіть типові конструкції сталеплавильних агрегатів та відповідні технології плавлення, користуючись відповідними схемами. Які властивості відповідних матеріалів і процесів підлягають технічному контролю?

24. Назвіть переваги вакуумування сталі. Як технічно це реалізується?

25. Опишіть обладнання та відповідні технології електроплавлення металів, користуючись відповідними схемами.

26. Опишіть обладнання, відповідні технології позапічної обробки металу, користуючись відповідними схемами, їх переваги та недоліки.

27. Надайте характеристику способам розливки сталі.

28. Опишіть будову сталевого злитка.

29. Як реалізується та які переваги має безперервна розливка сталі?

30. Які підгалузі виділяють у галузі кольорової металургії? Наведіть приклади відповідної продукції та сировини.

31. Надайте загальну характеристику сировинній базі кольорової металургії у світі та в Україні.

32. Назвіть узагальнені особливості (технологічні перероблення) виробництва кольорових металів.

33. Чим принципово відрізняються процеси пірометалургійних та гідрометалургійних технологій виробництва кольорових металів?

34. Яка різниця між поняттями «штейн» та «файнштейн»?

35. Які метали (сплави) відносяться до коштовних? Які технології застосовують для їх виробництва?

36. Надайте загальну характеристику родовищам коштовних металів, що експлуатуються у світі та в Україні.

37. Які метали відносяться до групи платиноїдів? Що їх об’єднує?

38. Що із себе, у загальному сенсі, представляють процеси відновлення, рафінування, афінажу при виробництві кольорових та коштовних металів?

39. Де і як використовують метали платинової групи? Наведіть приклади.

1.2.2 Обробка матеріалу (металу, сплаву) у твердому стані

На початку наявного розділу був наданий перелік основних видів металургійної продукції, яка виготовляється методами обробки тиском: прокаткою, ковкою, штамповкою, пресуванням, волочінням. У деяких випадках використовуються об'єднані процеси, які мають риси двох з перелічених видів: «прокатка-волочіння», «прокатка-ковка» та ін. Також слід мати на увазі, що деякі види продукції, навіть одного сторозмірного ряду можуть виготовлятися різними видами обробки тиском або їх комбінацією. Наприклад, труби – прокаткою, волочінням або пресуванням, дріт – прокаткою або волочінням, металовироби – ковкою, штамповкою, згинанням тощо.

Для кращого сприйняття матеріалів, що представляються тут за тематикою підручника, які стосуються, здебільшого, металургійних технологій, коротко розглянемо основні фактори базових процесів обробки тиском. При цьому треба мати на увазі, що представлені дані ні в якому разі не претендують на вичерпність, оскільки більш докладно ці процеси та основи їх застосування описані у спеціальній літературі [6, 7, 37…49 та ін.].

1.2.2.1 Елементарні основи процесів обробки металів тиском

Всі вказані процеси ОМТ базуються на спроможності матеріалів у конкретних умовах змінювати розміри та форму без руйнування, тобто на їх *пластичності*.

У загальному випадку, процеси зміни форми та розмірів тіл характеризуються величинами лінійних e та зсувних γ *деформацій*, що виникають у матеріалі (металі, сплаві) під впливом будь-якої зовнішньої сили, яка може бути умовно розкладеною відносно поверхні впливу на нормальні P та тангенціальні T складові [51…53].

Якщо деформація зникає після зняття сили, вона вважається *пружною*. Це має місце у випадках, коли зовнішня сила менша за деяку визначену межу. При перевершенні цієї межі тіло отримує залишкову (*пластичну*) деформацію. Зазвичай, пластична деформація у реальних процесах обробки тиском на порядок більше, ніж пружна, отже останньою нехтують. Але є ряд випадків, коли це стає некоректним, наприклад, в процесах *тонколистової прокатки* [42, 54], зокрема, при урахуванні пружної деформації інструмента (валків) [54].

Лінійні деформації e_x, e_y, e_z навколо матеріальної точки у декартовій системі координат характеризують зміну лінійних розмірів тіла за відповідними осями x, y, z. Зсувні деформації γ_{xy}, γ_{xz}, γ_{zy} проявляються між вказаними відповідними осями системи координат та характеризують зсуви в об'ємі тіла. Разом вони визначають повну деформацію, або так звану *інтенсивність деформації* e_i [51]:

$$e_i = \frac{\sqrt{2}}{3}\sqrt{(e_x - e_y)^2 + (e_y - e_z)^2 + (e_z - e_x)^2 + \frac{3}{2}(\gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 + \gamma_{zx}^2)}, \qquad (1.4)$$

та *інтенсивність деформації зсуву*:

$$\gamma_i = \frac{2}{3}\sqrt{(e_x - e_y)^2 + (e_y - e_z)^2 + (e_z - e_x)^2 + \frac{3}{2}(\gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 + \gamma_{zx}^2)}. \qquad (1.5)$$

Аналогічні вирази одержані для циліндричних та сферичних координат [53].

В теорії пластичності доводиться, що завжди можна знайти таке положення системи координат в тілі (відносно зовнішніх сил), коли вся деформація зосереджена тільки в складових e_x, e_y, e_z, а $\gamma_{xy} = \gamma_{xz} = \gamma_{zy} = 0$). Такі деформації називають «*головними*» і маркують e_1, e_2, e_3. При цьому приймають *напрям* деформації *розтягом за позитивний*[1], а e_1 – за

[1] У деяких джерелах за позитивний напрям деформації беруть не розтягнення, а стиснення. Це ніяк не впливає на кінцеві результати аналізу, але вимагає дотримання цієї умови у вибраній моделі з початку до кінця розгляду.

найбільшу деформацію по осі «1» з урахуванням її знаку. Відповідно, деформації стиснення приймають за від'ємні.

Оскільки при формозміні тіла, зазвичай, приймається постійність його об'єму[2], має місце «*рівняння нерозривності деформацій*»:

$$e_1 + e_2 + e_3 = 0\,. \tag{1.6}$$

У зв'язку з цим, у загальному випадку можна представити існування схем *головних деформацій* елементарного об'єму матеріалу, які відображені на рисунку 1.39.

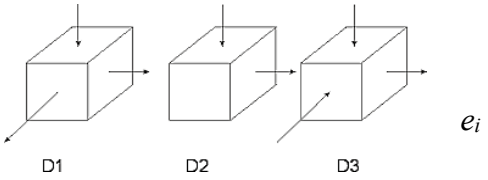


Рисунок 1.39 – Схеми деформованого стану матеріалу: D2 – плоска, D1 та D3 – об'ємні

На схемах стрілками позначено напрям головних деформацій. Як видно, у будь-якій схемі обов'язково має бути, принаймні, одна позитивна та одна від'ємна деформація.

З урахуванням тільки головних деформацій інтенсивність деформації згідно з формулою (1.4) має вигляд:

$$e_i = \frac{\sqrt{2}}{3}\sqrt{(e_1 - e_2)^2 + (e_2 - e_3)^2 + (e_3 - e_1)^2}\,, \tag{1.7}$$

а інтенсивність деформації зсуву згідно з рівнянням (1.5):

$$\gamma_i = \frac{2}{3}\sqrt{(e_1 - e_2)^2 + (e_2 - e_3)^2 + (e_3 - e_1)^2}\,. \tag{1.8}$$

При обробці тиском мають місце *великі деформації*. Кількісно, відповідна величина e при зміні характерного розміру тіла (довжина, висота або ширина) від початкового значення l_0 до кінцевої величини l_1 або відповідної площі F_0 та F_1 може бути представлена так званою «*логарифмічною деформацією*»:

$$e = \ln\frac{l_1}{l_0}\,, \tag{1.9}$$

або

$$e = \ln\frac{F_0}{F_1}\,. \tag{1.10}$$

Використовуються також й інші показники деформації:

- *умовна відносна деформація*:

$$\varepsilon = \frac{l_1 - l_0}{l_0}\,, \tag{1.11}$$

або

$$\varepsilon = \frac{F_0 - F_1}{F_0}\,, \tag{1.12}$$

- *відносне видовження* δ *:*

[2] У реальності, здебільшого, при гарячому деформуванні литого металу об'єм може зменшуватись до кількох відсотків, а при холодній ОМТ – збільшуватись на декілька десятих відсотка.

$$\delta = \frac{l_1 - l}{l} \ (100\%); \tag{1.13}$$

– відносне звуження ψ *:*

$$\psi = \frac{F_0 - F_1}{F_0} \ (100\%) , \tag{1.14}$$

а також *коефіцієнти деформації*:

$$\mu = \frac{l_1}{l_0} , \tag{1.15}$$

або

$$\mu = \frac{F_0}{F_1} . \tag{1.16}$$

Для більшості процесів формозміни важливим є не тільки значення деформацій, але й швидкість їх зміни у часі θ . Отже перетворенням:

$$\bar{e} = \frac{de}{d\theta}; \bar{\gamma} = \frac{d\gamma}{d\theta} , \tag{1.17}$$

яке застосовується до рівнянь (1.9)…(1.12), можна визначити відповідні *швидкості деформації*. Доречно тут зазначити, що розмірність швидкості деформації c^{-1} .

Деформація під дією зовнішньої сили викликає в тілі протидію внаслідок зміни енергетичного стану його внутрішньої структури [51]. Не заглиблюючись докорінно в природу такої протидії, можна констатувати, що це супроводжується появою внутрішніх сил у тілі, рівнодіюча яких за умов рівноваги тіла чисельно дорівнює та протилежно спрямована рівнодіючій зовнішніх сил.

Внутрішні сили викликають в матеріальній точці тіла лінійні σ та тангенціальні (зсувні) τ напруження, величина яких розраховується як

$$\sigma = \frac{P_n}{F}; \tag{1.18}$$

$$\tau = \frac{P}{F}, \tag{1.19}$$

де F – площина, на якій діє нормальна сила P_n або тангенціальна сила P_τ відповідно.

Аналогічно деформаціям e_x, e_y, e_z та γ_{xy}, γ_{xz}, γ_{zy}, повне напруження в околі матеріальної точки може бути розкладене за осями використаної системи координат на складові, зокрема, у декартовій системі: нормальні $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ та тангенціальні (зсувні) τ_{xy}, τ_{xz}, τ_{zy} .

Так само, як і при розгляді деформацій, можна знайти у тілі таке положення системи координат, при якому вся енергія напружень зосереджується у так званих *головних напруженнях*: σ_1 , σ_2 , σ_3 . Тут за позитивний напрям приймають той, який був визначений для деформацій: причому σ_1 – (за координатою «1») – найбільше позитивне напруження, а σ_3 – найбільше негативне напруження (за координатою «3»).

У зв'язку з цим, у загальному випадку можна представити існування схем головних напружень, які відображені на рисунку 1.40.

Як видно, існування схеми з трьома напруженнями розтягнення не передбачається (що формально відповідає руйнуванню тіла).

При такому розгляді в площинах, які є *діагональними* відносно координатних осей «1», «2» та «3», тобто в таких, які однаково нахилені до пар осей, діють екстремальні, так звані – *головні дотичні напруження* τ_{12} , τ_{23} , τ_{31} .

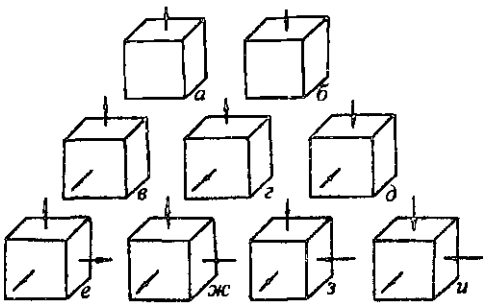


Рисунок 1.40 – Схеми напружень: *а, б* – лінійні; *в, г, д* – плоскі; *е, ж, з, и* – об'ємні

У теорії ОМТ доводиться, що:

$$\tau_{12} = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{2};\ \ \tau_{23} = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{2};\ \tau_{31} = \frac{\sigma_3 - \sigma_1}{2}, \tag{1.20}$$

а у відповідності з їх маркуванням найбільшим за абсолютною величиною виступає [51]:

$$\tau_{\max} = \tau_{31} = \pm\frac{\sigma_3 - \sigma_1}{2}\ . \tag{1.21}$$

Саме ця величина згідно з деякими теоретичними поглядами зумовлює початок деформації матеріалу.

Якщо в околі матеріальної точки у тілі визначити площину, яка є однаково нахиленою до всіх головних осей (так звану, «октаедричну площадку»), то узагальнюючою характеристикою дотичних напружень на ній буде:

- в головних нормальних напруженнях:

$$\tau_{окт} = \pm\frac{1}{3}\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}\ , \tag{1.22}$$

або з урахуванням рівнянь (1.20)

$$\tau_{окт} = \pm\frac{2}{3}\sqrt{\tau_{12}{}^2 + \tau_{23}{}^2 + \tau_{31}^2)}\ ; \tag{1.23}$$

– у довільній системі декартових координат:

$$\tau_{окт} = \pm\frac{1}{3}\sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)}\ . \tag{1.24}$$

Позитивну скалярну величину, яка чисельно дорівнює $\tau_{окт}$, називають *інтенсивністю дотичних напружень*.

Розрахунки доводять, що значення октаедричного за формулою (1.22) та максимального за формулою (1.20) дотичних напружень близькі між собою: $0{,}816 \le {\tau_{окт}}/{\tau_{\max}} \le 0{,}941$.

Нормальні та дотичні напруження разом формують ще одну інтегральну скалярну характеристику напруженого стану тіла – так звану *інтенсивність напружень* σ_i, яка відрізняється від $\tau_{окт}$ множником [51]:

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{(\sigma_1 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2}\ , \tag{1.25}$$

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)}\ . \tag{1.26}$$

Напруження σ та деформації ϵ пов'язані між собою. Для *лінійного напруженого стану* при напруженні $\sigma_{пр}$ пружності зразка матеріалу цей зв'язок фіксується законом Гука [51]:

$$e = \frac{\sigma_{пр}}{E}; \tag{1.27}$$

$$\gamma = \frac{\tau}{G}, \tag{1.28}$$

де $G = E/2(1+\mu)$; E – модуль пружності першого роду (модуль Юнга); μ – коефіцієнт Пуасона (показує, яку частку від деформації видовження за віссю «1» складає деформація одночасного скорочення за віссю «3») – довідкові величини для різних матеріалів.

У теорії ОМТ досить строго доводиться, що рівняння (1.27) та (1.28) можна узагальнити для використання у ситуаціях малих пластичних деформацій:

$$\sigma_i = E \cdot e_i; \tag{1.29}$$

$$\tau_{окт} = \mathrm{G} \cdot \gamma_{\mathrm{окт}}. \tag{1.30}$$

Але при цьому замість E слід використовувати значення *модуля пластичності* E', яке можна одержати з графіку «деформація – напруження» *поза ділянкою пропорційності* при лінійному навантаженні зразків матеріалу в ході стандартних випробувань, а замість G вживати $G' = E'/3$ [1, рис. 7.15; 51].

Означені вище види обробки тиском характеризуються *різною сукупністю* схем деформованого та напруженого стану, що визначаються технологією обробки металу, яка застосовується, заданою кінематикою та динамікою взаємодії металу й інструменту, що суттєво впливає на якість продукції, зокрема, на ймовірність появи дефектів. При цьому, особливо важливими стають аспекти досягнення металом пластичного стану.

Ключовим фактором тут стає деяке *характерне* значення напруження у металі, при якому останній переходить у стан пластичності.

Складність проблеми та деяка наявна плутанина у відповідній термінології зумовлені тим, що вказане значення напруження визначається як властивостями матеріалу, так і конкретними умовами його навантаження. До наведеного нижче прояснення цього питання будемо називати цю величину ***напруженням*** σ_T ***текучості*** металу.

Вважається, що при лінійному напруженому стані діє тільки напруження σ_1, і перехід від пружної до пластичної деформації здійснюється при:

$$\sigma_1 = \sigma_T. \tag{1.31}$$

У джерелі [1] було показано, що значення характеристик міцності: межу (границю) текучості σ_T та межу (границю) міцності σ_B матеріалу розраховують за формулами:

$$\sigma_T = \frac{P_T}{F_0}; \tag{1.32}$$

$$\sigma_B = \frac{P_B}{F_0}; \tag{1.33}$$

де P_T, P_B – сили, при яких на діаграмі «деформація – напруження» фіксується перехід металу у стан пластичності та стан руйнування відповідно [1, рис. 7.15].

Величину P_T на вказаній діаграмі визначають за розташуванням «*площадки текучості*» [1]. У разі неявного представлення на цій діаграмі «площадки текучості» при визначенні σ_T за відповідний характерний ступінь деформації приймають $\varepsilon = 0{,}2\%$. Тому часто в теорії обробки металів тиском межу текучості у визначеному сенсі позначають як $\sigma_{0,2}$. Отже, за умов визначення межі текучості в *стандартизованих* умовах $\sigma_T \approx \sigma_{0,2}$ – це постійна для даного матеріалу величина.

Якщо припустити, що за початок пластичної деформації «відповідає» максимальне дотичне напруження (1.21), то для будь-якого напруженого стану згідно з рівнянням пластичності Кулона-Сен-Венана-Треска [51]:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \sigma_T \,. \qquad (1.34)$$

За аналогією з формулою (1.31) та з урахуванням рівнянь (1.25) або (1.26), припускаючи, що перехід до пластичного стану зумовлений дією октаедричного дотичного напруження, також одержано «рівняння пластичності» за Губером-Мізесом-Генки [51]:

$$\sigma_i = \sigma_T \,, \qquad (1.35)$$

або у довільних декартових координатах:

$$(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2) = 2\sigma_T^2 \,, \qquad (1.37)$$

або в головних координатах:

$$(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = 2\sigma_T^2 \,. \qquad (1.38)$$

Цей вираз добре відповідає *енергетичним* уявленням про процес деформування ізотропних середовищ при будь-яких температурно-швидкісних та деформаційних умовах [51].

При урахуванні у рівнянні (1.37) безрозмірної величини – параметру Надаї-Лоде («коефіцієнту Лоде») $\beta = \dfrac{2\sigma_T}{\sqrt{3 + \xi_\sigma^2}}$, де $\xi_\sigma = \dfrac{2\sigma_2 - \sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}$ після перетворень одержують [51]:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \beta\sigma_T \,. \qquad (1.38)$$

В останньому виразі коефіцієнт Лоде β враховує вплив σ_2 на перехід металу до пластичного стану.

Розрахунки доводять, що при рівності двох з трьох головних напружень: $\beta = 1$, а для плоского деформованого стану, коли $\sigma_2 = {(\sigma_1 + \sigma_2)}/{2}$, $\beta = 1{,}155$.

Величину $\beta\sigma_T$ називають «*вимушеною межею текучості*» та позначають σ_T^*.

Перетворення формули (1.32) *для плоского напруженого стану* металу дає відповідний вид рівняння пластичності у головних координатах:

$$\sigma_1^2 + \sigma_3^2 - \sigma_1\sigma_3 = \sigma_T \,. \qquad (1.39)$$

Для *плоского деформованого стану* в головних координатах:

$$(\sigma_1 - \sigma_3)^2 = 4k \,, \qquad (1.40)$$

де *опір пластичному зсуву* (або «*опір зсуву*»):

$$\mathrm{k} = {\sigma_\mathrm{T}}/{\sqrt{3}} \,. \qquad (1.41)$$

Враховуючи вирази (1.19) та (1.37), отримуємо ще один окремий вид рівняння пластичності [51]:

$$\tau_{\max} = k \,. \qquad (1.42)$$

Аналогічні вирази можна одержати у циліндричних та сферичних координатах [53].

Рівняння пластичності у формі, що відповідає особливостям процесу, який моделюється, обов'язково включається до розгляду при розв'язуванні енергосилових задач ОМТ.

З представлених даних видно, що при використанні будь-якого виду формули щодо переходу металу до пластичного стану здійснюється співставлення внутрішніх напружень, які викликані *зовнішніми* для металу факторами, передусім – силовими умовами деформування, з його міцністними властивостями, на які впливають природа матеріалу та зовнішні фактори. Частково такий вплив відображено у відмінності σ_T^* від σ_T (*див. вище*).

Ключовою характеристикою металу тут виступає його межа текучості σ_T. При цьому, межа текучості σ_T металу *як характеристика його властивостей*, здебільшого,

визначає силові та енергетичні умови формозміни в процесах ОМТ, а відносне видовження δ за формулою (1.13) та відносне звуження ψ за формулою (1.14), значною мірою, але з урахуванням схеми напружень за рис. 1.40 – здібність металу до пластичного деформування.

Отже, слід розрізняти:

– межу текучості σ_T (або $\sigma_{0,2}$) металу, яка характеризує властивості самого металу і отримана в ході стандартних розривних випробувань;

– напруження текучості (опір деформації) σ_T металу в реальних умовах його деформування; ця характеристика залежить, крім природи металу, від історії його навантаження (*попередніх* ступеня та температури деформації, структури, фазового складу та розміру зерен), а також – від *поточних* (у процесі формозмінення металу) значень температури ступеня та швидкості деформації;

– вимушену межу текучості σ_T^* металу, яка враховує вплив на σ_T (або $\sigma_{0,2}$) схеми напруженого стану металу у відповідності до рівняння пластичності;

– напруження нормальні $p_н$ та зсувні $\tau_к$ на контакті металу з інструментом, які зумовлюють його формозміну в осередку деформації (*див. нижче*).

Слід зауважити, що для *великих деформацій* теорія пластичності у наявний час є остаточно не розробленою і, значною мірою, суперечливою.

Вважається, що процеси деформації можуть проходити у холодному, теплому та гарячому станах металу.

Холодна деформація металу, зазвичай супроводжується витягуванням зерен його структури за напрямом деформації розтягнення та зменшенням їх розмірів – за напрямом деформації стиснення.

Так, зерна металу, що мали до деформації сфероподібну форму, при осадці розплющуються у диски, при волочінні витягуються у волокна, а при прокатці приймають сплющену витягнуту форму.

Це призводить до того, що механічні властивості продеформованого металу будут неоднаковими в разних напрямках – паралельно та перпендикулярно видовженій вісі зерен, тобто метал стає *анізотропним*.

Одночасно зі зміною форми зерен змінюється орієнтування їх кристалографічної решітки за певними площинами та напрямами ковзання, тобто утворюється *текстура* деформації, що особливо проявляється при ступенях деформації $\varepsilon \geq 50\%$. Тип текстури визначається, у першу чергу, вихідним типом решітки металу та схемою деформації і мало залежить від *схеми* напруженого стану. Тому, наприклад, текстура прутків, що отримані пресуванням та волочінням, однакова.

Прості типи текстури утворюються при осесиметричних деформаціях видовження (волочіння та пресування циліндричних виробів із заготовок такої ж вихідної форми) та стиснення (наприклад, при осаджуванні циліндричних заготовок). У цих процесах решітка більшості зерен розташовується так, що певний кристалографічний напрям стає паралельним осі максимальної деформації або близьким до неї.

При прокатці тонких листів і стрічок деформація є практично плоскою, оскільки розширення незначне, і ним можна знехтувати. Текстура прокатки отримується складною: кристалічна решітка большості зерен встановлюється таким чином, щоб певна кристалографічна площина ставала паралельною площині листа, а певний кристалографічний напрям – паралельним напряму прокатки.

У цілому, холодна деформація металів і сплавів, як правило, супроводжується збільшенням їх характеристик σ_B і σ_T міцності та зменшенням характеристик δ та ψ пластичності. Саме ж явище називається *зміцненням (наклепом)* металу і демонструється графіками на рисунку 1.41, *а*. Певний вплив також зумовлює схема навантаження металу:

зниження пластичності більш інтенсивне при схемах напруженого стану з наявністю напружень, які розтягують, ніж при усесторонньому стисненні.

Монотонність зміни кривих, як на рис. 1.41,*а* , може порушуватись при теплій і гарячій деформації. А за даними проф. Шломчака Г.Г. при холодному деформуванні окремих металів та складнолегованих сплавів зростання ступеня деформації після деякого характерного $\varepsilon_{хар}$ може супроводжуватись *зменшенням* міцнісних властивостей матеріалу (*див. рис. 1.41, б*).

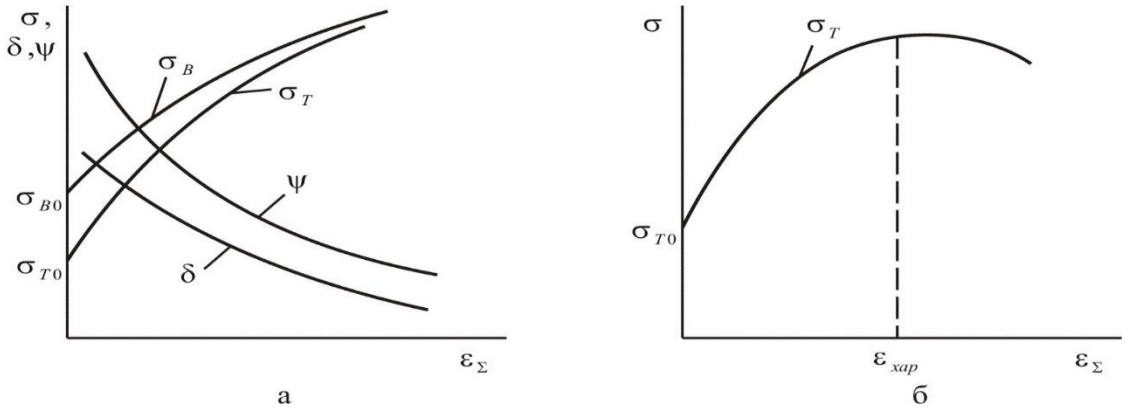


Рисунок 1.41 – Типовий вид простих залежностей характеристик міцності та пластичності металу від сумарного ступеня холодної деформації ε_Σ (*а*) та характер зміни межі текучості для металу (сплаву) зі складною реологією (*б*)

Причиною такого явища можуть бути: фазові перетворення структури металу, інтенсивна нерівномірна деформація складових його структури, які мають різні властивості, поява внаслідок цього місцевих різноспрямованих напружень і значних тепловиділень та ін. Ряд матерілів, зокрема, складнолегованих сплавів характеризується немонотонною зміною σ_T при збільшенні ε_Σ. Тоді на графіках типу рис. 1.41, *б* може бути не один, а декілька перегинів.

Слід відрізняти сутність залежностей в координатах $\sigma_T \Leftrightarrow \varepsilon_\Sigma$ та $\sigma_B \Leftrightarrow \varepsilon_\Sigma$ на рис. 1.41 від діаграми розтягання при стандартних механічних випробуваннях, представлених у джерелі [1], в координатах $\sigma \Leftrightarrow \varepsilon$.

У першому випадку відображаються *вже наявні* (після деформування) значення параметрів σ_B та σ_T, починаючи з їх вихідних даних σ_{B0} та σ_{T0} (при $\varepsilon_\Sigma = 0$), а у другому – *поточні величини*, за якими в ході стандартних розривних випробувань зразків металу визначають його міцнісні властивості у зміцненому (σ_B та σ_T) або вихідному, незміцненому (σ_{T0}, або $\sigma_{0,2}$ та σ_{B0}) стані.

Для багатьох металів і сплавів залежність напруження текучості від сумарного ступеня деформації можна представити степеневою функцією виду [55, 56]:

$$\sigma_T = \sigma_{T0} + a\varepsilon_\Sigma^m, \qquad (1.43)$$

де a та m – емпіричні коефіцієнти, а сумарний ступінь деформації ε_Σ виражений у %.

Для конкретних розрахунків силових умов деформування металів часто є необхідним і достатнім визначення *середнього значення напруження текучості*. Цю величину можна одержати інтегруванням функції $\sigma_T = \varphi(\varepsilon_\Sigma)$ в діапазоні від кінцевого до початкового значень сумарного обтиснення, або приблизно:

– для попередньо незміцненого металу:

$$\sigma_{T\text{сер}} = 0{,}4\sigma_{T0} + 0{,}6\sigma_{T1}; \qquad (1.44)$$

– для металу, зміцненого попередньою обробкою:

$$\sigma_{Tсер} = 0{,}5(\sigma_{T0} + \sigma_{T1}), \qquad (1.45)$$

де σ_{T0}, σ_{T1} – напруження текучості металу на початку та наприкінці циклу формозмінення в осередку деформації відповідно, які визначаються формулою типу (1.45) при належних значеннях $\varepsilon_{\Sigma 0}$ та $\varepsilon_{\Sigma 1}$.

Зміцнення («наклеп») металів зумовлює зміну й інших властивостей, зокрема, електромагнітних [53]. Це відбувається внаслідок:

– появи внутрішньо– та міжкристалітних порушень і спотворень;

– руйнування міжзеренних прошарків, що призводить до безпосереднього стикання зерен;

– утворення текстури, появи залишкових напружень у зернах, які продеформовані з різним ступенем.

На зміну електропровідності, в основному, впливають перші два фактори, з яких перший, утруднюючи рух електронів, знижує електропровідність, а другий – підвищує.

У цілому, зазвичай електропровідність внаслідок зміцнення металу знижується, а електричний опір збільшується. Така зміна для більшості металів невелика (до 2%). Однак для нікелю таке збільшення електричного опору складає 8%, для молібдену 18%, а для вольфраму – до 50%.

У деяких сплавів (хромеля, алюмеля та ін.) із зростанням наклепа електричний опір зменшується; причини цього не виявлені.

При зміцненні феромагнетиків (залізо, нікель, кобальт та їх сплави) магнітна проникненість зменшується, а коерцитивна сила збільшується, що пов’язано зі збільшенням між– і внутришньозеренних спотворень і залишкових напружень.

Зростання залишкових напружень у продеформованому металі супроводжується зменшенням його корозійної стійкості та підвищенням розчинності у кислотах.

Експериментально визначено, що при пластичній деформації до 90% робота, що витрачена, переходить у тепло, нагріваючи метал тем більше, чим вище рівень його вихідних міцнісних властивостей. Інша частина роботи накопичується в енергії залишкових напружень.

Підвищення температури при обробці виробу (іноді – до декількох сотен градусів) залежить також від швидкості деформации: розсіювання тепла тим менше (а нагрів – більше), чим вище швидкість деформації.

Вихід тепла залежить також від вихідної температури тіла, що деформується: чим нижче температура, більше спротив деформації і робота, тим більше вихід тепла.

Підвищення температури метала при «холодній» обробці тиском зазвичай знижує його опір деформації (на 5…20%), підвищує пластичність і може сприяти інтенсифікації протікання фазових перетворень. Зростання швидкості деформації зазвичай супроводжується зворотним впливом (до 5…15%).

У таких умовах фазовий стан сталей і сплавів залежить від їх складу і може змінюватись у процесі деформування [57…59].

Так, наприклад, при холодній деформації нержавких сталей аустенітного класу, які представляють собою після закалювання однорідний твердий розчин з решіткою гранецентрованого куба, здійснюється виділення α-фази, що має решітку об’ємноцентрованого куба, знижену коррозійну стійкість, і супроводжується появою феромагнетизма сталі, яка спочатку була немагнітною.

При холодній деформації сталі, загартованій на мартенсит, встановлений його розпад з виділенням дисперсних карбідних часток у площинах ковзання, що стає додатковим фактором зміцнення. Аналогічне явище виявлено і при деформуванні загартованих сплавів типа дюралюмінію.

Неоднорідність напруженого стану та нерівномірність розподілу енергії, що утворені пластичною деформацією, можуть бути усунені утворенням нових, менш спотворених зерен і поєднанням багатьох зерен в одне зерно, яке володіє меншою поверхнею на одиницю об’єму. Для протікания цих процесів необхідна підвищена

температура. Зокрема, при *рекристалізації* відбувається зміна усіх властивостей металу, які були характерними для його попереднього ненагартованого стану.

При дослідженні процесів, які проходять у металі при підвищених температурах, використовують поняття *гомологіних*, або *збіжних температур* [54]: це температури, які складають долю от температури T_{Knn} плавлення за шкалою Кельвіна.

Основою цього є те, що *температура початку рекристалізації багатьох* металів і сплавів технічної чистоти складає при великих деформаціях приблизно $0{,}4\,T_{Knn}$. Наприклад, гомологічна температура $0{,}4\,T_{Knn}$ для алюмінію дорівнює 0,4·(660+273) = 373 К, або (373 – 273)=100 °С; для свинцю: 0,4·(327+373)=280 К, або -93 °С; для низьковуглецевої сталі: 0,4·(1530+273) =721 К, або 448 °С.

При нагріванні металів до порівняно низьких гомологічних температур (приблизно до $0{,}3\,T_{Knn}$) у металах відбувається процес *звороту,* або «*відпочинку»*, при якому нагартований метал частково знеміцнюється – знижуються рівні параметрів міцності та підвищується пластичність. Характерним для процесу повернення є практична незмінність структури та текстури, які попередньо були притаманними цьому металу. Такі процеси властиві для *теплої* (*«неповної холодної»* або *«неповної гарячої»*) *деформації,* яка займає за температурними умовами формозміни металу проміжне місце між холодною та гарячою. Наприклад, формозмінення алюмінію, при 60 °С відповідає умовам теплої деформації.

Гаряча деформація характеризується інтенсивним протіканням процесів рекристалізації металу при температурі вище за $0{,}4\,T_{Knn}$, які проходять одночасно з процесами зміни його структури. Наприклад, деформація свинцю при кімнатній температурі є гарячою.

Для забезпечення потрібного рівня властивостей і структури металу після ОМТ (або між її циклами) застосовують різні види термічної обробки.

Зокрема, для зниження міцнісних та підвищення пластичних властивостей металу, рівень яких зумовлений попередньою холодною (або теплою) деформацією, проводять *рекристалізаційний відпал*. Відповідне знеміцнення металу пояснюється усуненням недосконалостей кристалічної решітки, які зумовлені попередньою холодною деформацією.

Температура початку рекристалізації залежить від ступеня накопиченої деформації: чим остання більше, тим більше вихідне спотворення кристалічної решітки, і легше протікає при меншій температурі процес рекристалізації.

При рекристалізації змінюється структура метала: відбувається зародження нових зерен з рівноосною формою, волокниста будова і пов’язана з ним механічна анізотропія зникають. Нові рівноосні зерна мають більш досконалу та менш спотворену структуру, ніж попередні витягнуті.

Разом із зародженням нових зерен відбувається їх зростання. Величина зерен після деформації та рекристалізації залежить від їх величини у вихідному стані (до деформації). У цілому, чим крупніше зерна у вихідному стані, тим крупніше вони стають і після рекристалізації.

Розрізняють два види рекристалізації: *первинну* та *збираючу*.

У процесі *первинної рекристалізації* відбувається зародження і зростання нових зерен за рахунок попередньо деформованих зерен.

При *збираючій рекристалізації* відбувається зростання одних вже рекристалізованих зерен за рахунок інших також рекристалізованих зерен.

Розмір зерен та відповідні властивості метала до моменту завершення рекристалізації залежать від багатьох факторів. Основними з них при певному складі метала є температура та тривалість відпалу, ступінь попередньої деформації та величина зерен до холодної деформації .

Чим вище температура і довше тривалість відпалу, тим крупніше зерна за рахунок збираючої рекристалізації.

Зі збільшенням ступеню попередньої холодної деформації зростають спотворення решітки, що сприяє зростанню швидкості зародження центрів кристалізації та швидкості зростання самих зерен. Швидкість зародження центрів зі збільшенням ступеню деформації перевищує швидкість зростання розмірів, тому чім більше ступінь деформації, тим зерна дрібніше.

Але, якщо ступінь попередньої деформації невелика (до 5%), малими виявляються спотворення решітки та руйнування границь між зернами, то рекристалізація практично не відбувається, і зерна виходять дрібними.

Отже, при якомусь середньому, відносно невеликому ступені деформації, але такому, що є достатнім для здійснення процесів рекристалізації, зерна будуть особливо великими. Цей ступінь деформації (приблизно 5…15%) називають *критичним*.

Деяким металам (алюміній, мідь та певні марки сталі) при ступенях деформації більше за 70...95% і високих температурах притаманна і друга область крупних зерен внаслідок *вторинної рекристалізації*.

Таким чином, поєднаним вибором ступеню холодної деформації та режима рекристалізації можно отримати зерна різної величини, що має велике значення для надання металу потрібних службових властивостей у процесах обробки тиском.

Технологи розуміють, що для обробки тиском, коли рекристалізаційний відпал є проміжною операцією між етапами холодної деформації, наявність надвеликого зерна не є бажаною, оскільки такий метал має, як правило, знижену пластичність. У більшості випадків крупне зерно в сталі, зокрема, в конструкційній та інструментальній є небажаним і споживачам. Для електротехнічних (трансформаторних) сталей, навпаки, часто бажано мати крупнозернисту будову.

У процесах термічної обробки після холодної ОМТ, які супроводжуються фазовими перетвореннями у металі, при досягненні відповідної температури буде відбуватися процес *перекристалізації,* і величина зерен практично незалежно від ступеню попередньої холодної деформації стає залежною від температури нагріву та швидкості охолодження при термічній обробці. В результаті (наприклад, *нормалізацією*), можна отримати дрібні зерна й після критичного ступеню деформації.

Текстура деформації в процесі рекристалізації може зникнути, зберегтися або змінитися, тобто перетворитися на *текстуру рекристалізації*. Найбільше значення має останній варіант, коли з'являється текстура рекристалізації, яка відрізняється від текстури деформації.

Так, наприклад, текстура рекристалізації металів з вихідною гранецентрованою решіткою може стати кубичною. Текстура рекристалізації металів з об'ємноцентрованою решіткою зазвичай перетворюється на ромбічний додекаедр (це так звана «текстура Госса» у трансформаторній сталі). Метали, що мають гексагональну решітку, при рекристалізації зазвичай зберігають цю текстуру.

У деяких випадках анізотропія властивостей як наслідок текстури небажана. Наприклад, при штамповці (*див. нижче*) виробів типу «стаканчик» з мідних листів наявність текстури зумовлює утворення *фестонів* (хвилястої кромки), що збільшує обрізь і підвищує витрати металу.

При гарячому формозміненні метала процеси спотворення його кристалічної решітки та структурні перетворення, представлені вище, в осередку деформації та/або послідовно – в осередку деформації та у міждеформаційних паузах – відбуваються одночасно.

В інтервалі температур вище за $0{,}7\,T_{Kпл}$ при гарячій обробці тиском напруження текучості σ_T *конкретного сплава* визначається, в основному, трьома факторами: температура T_t, ступінь ε і швидкість $\bar{e}$ деформації. Бажано також при цьому враховувати фазовий склад і структуру метала, але, як правило, їх вплив незначний.

Для опису залежності напруження σ_T текучості від вказаних факторів проводять визначення цієї величини при зміні температури (з кроком 50…100°) і різній швидкості деформації у залежності від діапазона зміни останнього параметра. Рівень спотворення решітки метала при цьому залежить від часу здійснення процесу деформації та тривалості паузи між циклами деформації, оскільки на кожному етапі метал повністю або частково рекристалізується. При великих значеннях швидкості деформації та коротких паузах (менше декількох секунд) можливим стає збільшення міцності металу через нестачу часу для повної рекристалізації.

Відповідні дані були отримані, зокрема, Зайковим М.А., Зюзіним В.І. та Третьяковим А.В., Гуном Г.Я., Полухіним В.П. із співробітниками та ін. [51, 55, 56].

Одним із шляхів аналітичного представлення σ_T є наступний.

На основі базового значення $\sigma_{Tб}$, який попередньо визначений при температурі 1000 °С, швидкості деформації 10 $с^{-1}$ та умовному відносному ступені деформації $\varepsilon = 10\%$, середню для осередку деформації величину напруження текучости для будь-яких значень вказаних факторів розраховують за формулою:

$$\sigma_T = \sigma_{Tб} k_T k_\varepsilon k_u , \qquad (1.46)$$

де k_T, k_ε, k_u – термомеханічні коефіцієнти, які враховують вплив температури обробки (зазвичай береться температура на вході до зони деформації), ступінь деформації (зазвичай – на виході із зони деформації) та швидкість деформації (середня у зоні деформації) відповідно.

На рисунку 1.42 в якості прикладу представлені графіки зміни термомеханічних коефіцієнтів для однієї марки сталі, отримані В.І. Зюзіним і А.В. Третьяковим.

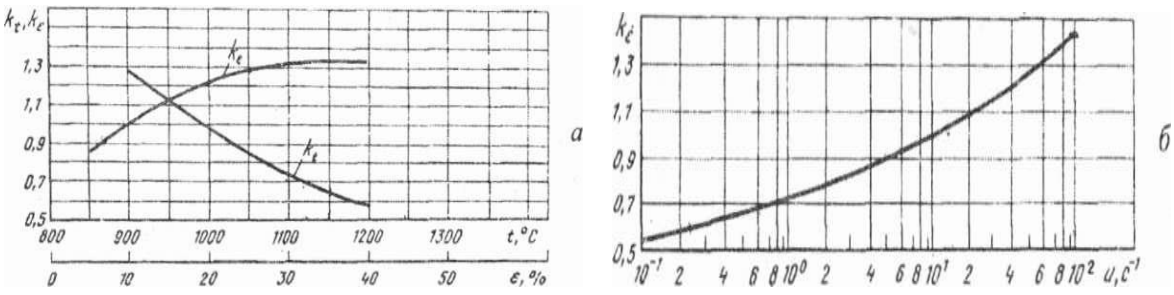


Рисунок 1.42 – Термомеханічні коефіцієнти k_T, k_ε (*а*) та k_u (*б*) [56]

Вплив швидкості деформації стає помітним при її зміні на порядок.

У відомих процесах ОМТ швидкість деформації змінюється від 0,01 до більш ніж 1000 $с^{-1}$. Тому для зручності представлення на абсцісі графіка на рис. 1.42, *б* надані не абсолютні значення швидкості деформації, а логарифм цієї величини.

У довідковій літературі [55, 56, 60 та ін.] наводяться аналогічні дані для розповсюджених сталей і кольорових сплавів.

Слід зауважити, що *точне* визначення базових значень напруження текучості як при гарячій, так і при холодній деформації неможливе через допустимий стандартами розбіг вмісту хімічних елементів (вуглецю, мангану, силіцію та легуючих) у кожній марці сталі та у кольорових металах (сплавах), різницю в технології виробництва на різних заводах й інших суттєвих факторах.

Тому застосовують й інші підходи до розрахунку напруження текучості. Наприклад, Экелундом запропонована емпірична формула у вигляді:

$$\sigma_T = 0{,}1 \cdot (14 - 0{,}01 \cdot T_t) \cdot (1{,}4 + C + Mn + 0{,}3Cr) \text{ [МПа]}, \qquad (1.47)$$

де T_t – температура, °С; C, Mn, Cr – вміст (%) у сталі вуглецю, мангану і хрома відповідно.

Цю формулу можні застосовувати для сталей, що містять до 1% Mn та не більше 2…3% Cr. Її особливістю та деяких аналогічних виразів є зіставлення впливу вуглецю з

дією інших елементів (у наведеному прикладі – мангану і хрома) на міцністні властивості сталі. Подібним чином ураховується так званий *«вуглецевий еквівалент»*.

Можна також використовувати залежність, яка запропонована Л.В. Андреюком:

$$\sigma_T = A\sigma_{Tб}(\bar{e})^B(10\varepsilon)(T_t/1000)^{\mathrm{D}}, \text{ МПа}, \qquad (1.48)$$

де коефіцієнти *A, B* і *D* приводяться у спеціальній літературі, а визначення величини $\sigma_{Tб}$ здійснюється за допомогою спеціальних установок – *пластометрів*, на яких проводиться пластичне осаджування зразків металу при контрольованих температурі (у муфелі), ступеню та швидкості деформації.

Деякі конструкції пластометрів дозволяють проводити також випробування на растягнення та моделювати багатопрохідні процеси осаджування (розтягнення) шляхом відповідного профілювання і кількості інструментів, що деформують метал. Але варіація умов деформації обмежена. Високі швидкості деформації можуть поєднуватися тільки з короткочасними паузами, а малі швидкості деформації – з довготривалими паузами. Недоліками пластометрів також є знижена жорсткість їх конструкції та необхідність деякого часу для досягнення бажаної швижкості деформування металу.

Більшість процесів ОМТ реалізується при безпосередньому контакті метала з інструментом (валком, волокою, прес-штемпелем, пуансоном, оправкою, направляючою арматурою тощо). При цьому має місце відносний зсув точок контактуючих тіл, що супроводжується появою поверхневої *сили тертя, яка протидіє напряму зсуву*.

Ця сила на будь-якому контакті виникає внаслідок взаємного занурення мікровиступів одного тіла в інше, адгезії, а іноді – їх зварювання на окремих ділянках з наступним розривом зв'язків при взаємному зсуві тел. Тертя – *дисипативний процес*, який супроводжується розсіюванням енергії на контакті і переході її, здебільшого, у теплову.

Дослідженню тертя як явищу та процесу присвячено велику кількість робіт вітчизняних (Айнбіндер С.Б., Крагельський І.В., Дерягін Б.В., Дьомкін Н.Б., Костецький Б.І., Ахматов О.С. та ін.) та закордонних (Боуден Ф.П., Тейбор Д., Ернст Г., Мерчент М., Надаї А. та ін.) учених-трибологів для умов роботи механізмів, де відсутнє (і не повинно бути!!) помітної пластичної формозміни жодного з тіл тертя. Таке тертя називають «*машинним*» [51, 61].

У теорії машинного тертя усі види тертя поділяють на:

– *тертя спокою*, коли *помітне* взаємне переміщення тіл не спостерігається, а є лише *тенденція* до зміщення, тобто незначний зсув, здебільшого – у пружній зоні деформації поверхневих шарів контактуючих тіл;

– *тертя руху,* при якому відбувається безперервне відносне зміщення контактуючих поверхонь. У свою чергу, цей вид тертя поділяють на *тертя ковзання* та *тертя кочення*. Причому, тертя кочення на практиці у чистому вигляді майже не зустрічається, оскільки завжди на такому контакті є деяке взаємне ковзання тіл.

Для кількісного визначення сил тертя T широко застосовують феноменологічний закон Амонтона, який відноситься *до усієї поверхні контакту*:

$$T = f \cdot N \ , \qquad (1.49)$$

где f – коэфіцієнт тертя; N – сила, що діє перпендикулярно площині контакту.

Величина f є довідковою і зазвичай знаходиться у межах 0,05…0,25 для машинного тертя різних матеріалів.

Кулоном декілька пізніше за Амонтона запропонований двочленний закон тертя, який враховує залежність сили тертя від тиску та адгезії.

При помітній шершавості тіл адгезійною складовою можна знехтувати. Тоді двочленний закон Кулона перетворюється на одночленний закон Амонтона (1.49).

При діленні обох частин рівняння (1.49) на площу контакта отримується середнє для усього контакту напруження тертя $t_{сер}$:

$$t_{сер} = f \cdot p_{сер} \ , \qquad (1.50)$$

где $p_{\text{сер}}$ – середній тиск на контакті.

Вираз (1.50) часто помилково називають «законом Кулона» або «законом Амонтона-Кулона», хоча математично воно представляє собою аналітичне перетворення формули (1.49), яке не має фізичного сенсу.

Тертя у машинах, як правило, є шкідливим фактором з точки зору енергоспоживання та зносу. Для його зменшення застосовують рідкі, тверді та консистентні мастила, які вводять у зазор між поверхнями, що труться.

В якості рідких мастил застосовують мінеральні, рослинні або синтетичні олії та емульсії (стабільні, метастабільні та суспензії).

Тверді мастила зазвичай мають шарувату дрібнодисперсну та відносно м'яку структуру (наприклад, графіт, дисульфід молібдену та ін.).

Консистентні мастила займають проміжне місце між рідкими та твердими мастилами та іноді представляють собою їх суміш [61].

Ефективність мастила з точки зору зниження рівня тертя залежить від його фізико-хімічних властивостей та товщини розділового шару на контакті.

Хімічні властивості мастильного (зазвичай – рідкого) матеріалу зумовлюють формування на поверхнях тертя *граничного* мастильного шару. При наявності у мастилі так званих поверхнево-активних речовин (ПАР) цей шар твщиною до декількох сотих долей міліметра має вигляд «щітки» з молекул, «основою» якої є тіло тертя. Оскільки на контакті зазвичай є надлишок мастила, а на поверхні контр-тіла тертя також формується граничний мастильний шар, тертя йде по границі «мастило – мастило». Відповідний коефіцієнт тертя f, як правило, не перевищує рівень 0,15.

Товщина ξ мастильного шару на контакті зумовлюється як властивостями самого мастила, так і умовами його застосування.

Для рідкотекучих мастил у загальному випадку $\xi = \varphi(\eta, v, \alpha, p)$, де η – динамічна в'язкість, v – швидкість течії, α – гідродинамічний кут залучення, p – тиск. При цьому слід мати на увазі, що збільшення α зменшує ξ, безпосереднє збільшення швидкості v збільшує ξ, але супроводжується зростанням температури та тиску, зі зростанням тиску p в'язкість η та товщина ξ мастила збільшуються, при підвищенні температури – зменшуються. Зростання шорсткості збільшує товщину мастильного шару, але одночасно випереджуючим темпом збільшується тертя. На вказані взаємозалежності накладається також вплив пружної деформації контактуючих поверхонь, що робить відповідні розрахунки вельми трудомісткими і часто – неточними.

При значній (у порівнянні з шершавістю на контакті) товщині рідкого мастильного шару для визначення напруження τ тертя використовують закон Ньютона у вигляді:

$$\tau = \eta \cdot \frac{\partial v}{\partial y} \approx \tau_{сер} = \frac{\eta \cdot v_{сер.ков}}{\xi_{сер}}, \qquad (1.51)$$

де $v; v_{сер.ков}$ – поточна та середня швидкість ковзання відповідно по висоті y мастильного шару, $\xi_{сер}$ – середня товщина мастильного шару.

При застосуванні консистентних мастил типу консталіна напруження тертя можна визначити за законом Бінгама-Шведова:

$$\tau = \tau_0 + \eta \cdot \frac{\partial v}{\partial y} \approx \tau_0 + \frac{\eta v_{сер.ков}}{\xi_{сер}}, \qquad (1.52)$$

де τ_0 – вихідне значення напруження, необхідне для початку зсувних явищ у мастильному шарі.

Формування та антифрикційна ефективність *твердих* мастил у більшій мірі залежить від їх походження, розмірів і властивостей часток, ніж від умов їх застосування.

Більша частина закономірностей тертя та особливостей застосування мастил при машинному терті справедливі і для умов обробки металів тиском. Але є й особливості, що характерні для пластичного осередка деформації [51, 61].

Головною відмінністю так званого «*пластичного тертя*» є *взаємний зв'язок* сили тертя, яка впливає на схему напруженого стану металу, що деформується (*див. рис. 1.40*), із силою нормального тиску на метал: сила тертя визначається силою нормального тиску, а та – за рівнянням пластичності, наприклад, (1.38) залежить від сили тертя.

Менш принциповими, але важливими відмінностями також стають наступні фактори:

– вплив напруження тертя на властивості материала, що деформується, наприклад, унаслідок появи залишкових напружень та/або зміни структури поверхневих шарів металу;

– надвисокі значення тиску та, у ряді випадків – наприклад, при гарячій деформації – температури;

– можливість одночасного існування в осередку деформації на контакті металу з інструментом як тертя ковзання (можливо – з коченням), так і тертя спокою (наприклад, у зоні «прилипання» при прокатці високих штаб);

– можливість одночасного існування в осередку деформації розділу течії металу та різноспрямованих сил тертя (наприклад, у зонах відставання та випередження при прокатці та роликовому волочінні);

– активна роль сил тертя у реалізації процесів ОМТ (наприклад, у зоні відставання при прокатці);

– суттєва зміна величини та напряму вектора сил тертя (відносно прийнятої для аналізу системи координат), наприклад, при періодичній прокатці.

Мастила, що застосовують для зниження тертя в осередку деформації при обробці металів тиском, називаються «*технологічними мастилами*». За таким призначенням використовують усі типи мастил з урахуванням їх властивостей та особливостей відповідних процесів (вид ОМТ, метал, що деформується, форма осередка деформації, температура і швидкість обробки металу, ступінь деформації тощо).

Для оцінки напруження тертя в процесах ОМТ часто використовують формулу (1.50), рідкіше – (1.51) або (1.52). Безумовно, їх використання потребує знання попередньо експериментально визначених значень f, η, τ_0, а у деяких випадках – і $\xi_{сер}$. При цьому, формула (1.50) за аналогією з машинним тертям краще застосовна в умовах ковзання метала на контакті з інструментом.

Крім представлених виразів, згідно з пропозицією Е. Зибеля використовують також наступну залежність:

$$t_{сер} = f_\sigma \beta \sigma_{T.сер}, \tag{1.53}$$

де f_σ – *показник* тертя за рівнем напруження текучости; $\beta = 1{,}0...1{,}15$ – коефіцієнт Лоде (*див. вище*).

Згідно з фізичними уявленнями, вираз (1.53) є більш застосовний в умовах обмеженого ковзання металу по поверхні інструмента (наприклад, для зони прилипання в осередку деформації при прокатці).

Значення f та f_σ відрізняються за величиною.

Оскільки середнє значення напруження тертя не залежить способа його визначення, з рівнянь (1.50) та (1.53) отримуємо:

$$f_\sigma = \frac{f p_{сер}}{\beta \sigma_{T.сер}} = f \cdot n_\sigma, \tag{1.54}$$

де *коефіцієнт напруженого стану* металу в осередку деформації:

$$n_\sigma = \frac{p_{сер}}{\beta \sigma_{T.сер}}. \tag{1.55}$$

У процесах ОМТ із всебічним стисканням, наприклад, при прокатці та осаджуванні $p_{сер} > \beta\sigma_{T.сер}$, $n_\sigma > 1$, і $f_\sigma > f$. При волочінні схема напруженого стану характеризується двома напруженнями стискання і одним напруженням розтягнення (*див. рис. 1.40*). В результаті, тут $p_{сер} < \beta\sigma_{T.сер}$, $n_\sigma < 1$, і $f_\sigma < f$.

Рівняння (1.50) та (1.53) з розрахунку $t_{сер}$ використовуються при виведенні теоретичних формул для визначення тиску p в осередку деформації. При цьому, перевагою залежності (1.53) у порівнянні з (1.50) є те, що напруження тертя «зверху» обмежено величиною 0,5…0,57, і його приймають незалежним від тиску p.

У теорії ОМТ використовують й інші залежності для розрахунку рівня напруження тертя [51].

При обробці тиском матеріали можуть піддаватися великим пластичним деформаціям. Тому важливим аспектом при проєктуванні відповідних процесів ОМТ є визначення здібності метала сприймати пластичну деформацію без руйнування. Таке завдання вирішується на «стику» фізики твердого тіла, механіки суцільного середовища та металознавства.

Згідно із сучасними уявленнями [51, 52], під «руйнуванням» розуміють розділення виробу на частини або появу макротріщин, які роблять використання матеріалу неможливим. Такі макротріщини можуть проявлятися на поверхні виробу або (що особливо небезпечно!) всередині нього.

Руйнування металу в результаті багаторазових повторних або знакозмінних навантажень називається *втомою*. Вона може проявитися при значеннях навантаження, яке є безпечним в умовах постійного або монотонного його повільного збільшення.

Здібність металу витримувати велику кількість циклів навантажень називається *витривалістю*, або *циклічною міцністю*. У цьому зв'язку, максимальне напруження симетричного циклу, при якому метал не руйнується протягом $10^7 \ldots 10^8$ заздалегідь заданої кількості циклів називається *межею (границею) втоми* (на відміну від *межі міцності – див. вище*).

Можна прийняти наступний фізичний механізм руйнуванн металу при його пластичній деформації з урахуванням того, що руйнування, в основному, відбувається під дією напружень.

На перших стадіях пластична деформація здійснюється за рахунок переміщення окремих дислокацій (мікропорушень структури) або їх невеликих груп. При цьому, локальні напруження не сягають великих значень, отже зародження мікротріщин неможливе.

При подальшому збільшенні ступеню деформації відбувається перехід до колективних дислокаційних ефектів, які призводять до неоднорідності пластичної деформації в об'ємі тіла та пов'язаному з цим зростанням локальних напружень. Це зумовлює утворення зародкових мікротріщин, що починається для пластичних тіл при деформації 1…5%, а для крихких – приблизно на порядок менше. Час такого «вибухового» зародження та зростання тріщини складає $10^{-6} \ldots 10^{-7}$ с [52].

Третя остання стадія характеризується повільним збільшенням тріщин з їх об'єднанням, що призводить до появи магістральної тріщини, внаслідок зростання якої тіло руйнується.

Макроруйнування може виникати *розривом* під дією напружень, що розтягують, або *сколом* – за напрямом дії максимальних зсувних напружень.

Стискаючі лінійні напруження сприяють «заліковуванню» дефектів і перешкоджають розвитку тріщин. Але наявність нерівномірності деформації, незалежно від схеми зовнішніх напружень, викликає *додаткові* напруження розтягнення та стискання, перші з яких можуть стати причиною руйнування металу.

У цьому зв'язку *деформівністю* називають здатність метала до пластичної формозміни без руйнування.

Деякою мірою, про здібність металу протистояти руйнуванню можуть свідчити характеристики його пластичності: відносне видовження (1.13) та відносне звуження (1.14), які отримують в ході досить тривалих (до десятків секунд) розривних випробувань (*див. вище*). Однак вони проводяться в умовах максимально наближених до лініного напруженого стану металу і не відображують складні процеси зародження, розвитку, а також «заліковування» дефектів при обробці металів тиском. До того ж, час деформування певного об'єму метала в різних процесах ОМТ різний і може складати від сотих (навіть – тисячних!) долей секунди до декількох десятків секунд.

У зв'язку зі складністю представлених процесів для оцінки деформівності та прогнозування руйнування заготовок у процесах обробки тиском отримали розвиток *феноменологічні методи*, засновані на експериментальних даних.

У наявний час паралельно існують два основні фізично рівноцінних підходи до розв'язання представленої задачи.

Один з них передбачає використання в якості міри пластичності деформацію, що накопичена тілом, при якій утворюється магістральна тріщина [52]. Такі дані отримують за діаграмами пластичності в ході пластометричних випробувань.

За цим підходом оцінку деформівності заготовок, а також розрахунок граничних технологічних параметрів проводять за допомогою деформаційних критеріїв, в основу яких покладені обмеження рівня сумарної деформації. Гранична міра пластичності залежить від властивостей матеріала, напруженого стану та його зміни, історії температурно-швидкісних умов деформування.

На жаль, визначення цієї міри на «дислокаційному» рівні у наявний час неможливе. При прийнятті гіпотези про єдину криву течії в координатах «$\sigma_i - e_i$» (*див. вище*) вважають, що гранична деформація $e_{гр}$ – це деяка, визначена для кожного матеріалу, але єдина для різних видів його напруженого стану та історії деформування функція напруження. Відповідний критерій в'язкого руйнування матеріала, запропонований Г.О. Смирновим-Аляєвим, має вигляд:

$$e_i = \int_0^{\theta_p} \bar{e} \cdot d\theta \le e_{гр} \cdot \varphi(n_{1\sigma}), \qquad (1.56)$$

де $\bar{e}$ – інтенсивність швидкостей деформації; θ; θ_p – час поточний та всієї деформації до руйнування металу відповідно; $e_{гр} \cdot \varphi(n_{1\sigma})$ – інтенсивність граничного ступеню деформації, залежного від напруженого стану металу.

Фізичний зміст виразу (1.56) відображує початок руйнування при досягненні у металі при певному напруженому стані деякого граничного значення $e_{гр} \cdot \varphi(n_{1\sigma})$ сумарної (накопиченої *за період* навантаження) інтенсивності деформації.

При нормуванні до 1 з використанням гіпотези про пропорційність накопичених порушень суцільності та ступеню приросту деформації за рівнянням (1.56) отриманий критерій ψ руйнування В.Л. Коломогорова [52]:

$$\psi = \int_0^{\theta_p} E(\theta - \theta_{лік}) \mathrm{B}(\theta) \frac{\overline{\mathrm{e}(\theta)}}{\mathrm{e}_{\mathrm{пр}}(n_{1\sigma}(\theta))} \le 1, \qquad (1.57)$$

де $E(\theta - \theta_{лік})$ – коефіцієнт, який враховує самозаліковування дефектів (якщо воно має місце, наприклад, при гарячій деформації) протягом деформування, і який монотонно зменшується від 1 до 0 зі збільшенням аргумента; $B(\theta)$ – коефіцієнт, який враховує швидкість розвитку тріщин та їх заліковування при холодному деформуванні.

Практичне використання формул (1.56), (1.57) та їм подібних є ускладненим, оскільки у технічній літературі даних щодо значень $e_{гр} \cdot \varphi(n_{1\sigma})$, $E(\theta - \theta_{лік})$ та $B(\theta)$ для широкого сортамента матеріалів вкрай мало.

Інший підхід базується на зіставленні рівнів наявних напружень *розтягнення* у металі з деяким його граничним значенням, яке призводить до руйнування і є характерним для конкретного виду ОМТ з певними умовами деформування [51].

При цьому розглядають умовно в'язке («повільне») та умовно крихке («швидке») руйнування, маючи на увазі, що «крихкість» та «в'язкість» у даному разі – не властивості металу, а якісні характеристики його схильності у визначених умовах до того чи іншого виду руйнування.

Практика свідчить, що при всебічному стисканні руйнування початково пластичних матеріалів не відбувається.

Важливим тут є не середнє значення діючих напружень, а максимальні напруження *розтягнення* у критичних точках. На це, значною мірою, впливають залишкові напруження, які зумовлені нерівномірністю деформації. До речі, такі напруження погано піддаються розрахунку відомими методами.

Орієнтовно вважають, що руйнування металу при стандартних розривних випробуваннях з відносним видовженням $\delta \le 5\%$ відносить його до малопластичних («крихких»), а при $\delta > 10\%$ – до пластичних. Також треба враховувати «інформативність» значень δ та відносного звуження ψ. Зокрема, при волочінні деформівність металу більш адекватно відбивається величинами ψ та числом перегинів n [1].

Якісно про деформівність металу також свідчить відношення σ_B/σ_T, яке отримується за результатами стандартних розривнх випробувань при лінійному напруженому стані зразків матеріалу. Наприклад, для попередньо відпаленої сталі, яка, як правило, характеризується підвищеною деформівністю, це відношення не менше за 1,4, а для цього ж металу, зміцненого деформацією, відношення σ_B/σ_T зменшується до значень не більше за 1,2.

Фізично обгрунтованим критерієм руйнування для початково пластичних металів можна прийняти рівність максимального значення *нормального* напруження розтягнення $\sigma_{\max}$ величині опору $b\cdot\sigma_B$ відриву, де b – емпіричний коефіцієнт, який враховує особливості деформування металу. Для умовно крихких матеріалів справедливим уявляється той же підхід відносно *дотичних* («зсувних») напружень (*див. вище*).

На величину b також може вплинути якість заготовки, що деформується.

Так, умова безобривного волочіння, виходячи з представленого критерию, має вигляд:

$$\sigma(e;\alpha;l_к;f;q)=\frac{Q}{F_1}=b_{вол}\cdot\sigma_{T1}, \tag{1.58}$$

або

$$K_{зап}=\frac{\sigma_{T1}}{\sigma(e;\alpha;l_k;f;q)}\ge[K_{зап}]=1/b_{вол}, \tag{1.59}$$

де $\sigma(e;\alpha;f;l_к;q)=Q/F_1$ – напруження волочіння, яке залежить від ступеню деформації e у волоці, величини напівкута α конусності її робочої зони та довжини $l_к$ калібруючого паска, коефіцієнта тертя f та заднього натягу q; Q – сила волочіння; F_1 – площа поперечного перерізу дроту на виході з волоки; σ_{T1} – границя текучості метала на виході з волоки; $K_{зап}$, $[K_{зап}]=1{,}3...2{,}5$ – наявний та гранично допустимий запас міцності при волочінні, який зумовлений діаметром дроту та видом матеріалу (більшим значенням діаметра дроту та його кращій якості відповідають менші значення $[K_{зап}]$, або $b_{вол}$).

Далі коротко розглянемо типові технологічні процеси та перероблення при гарячій та холодній ОМТ.

1.2.2.2 Технологічні процеси, пов'язані з обробкою металів тиском

До 90% маси металів, що виплавлюється, піддається обробці тиском, залишок використовують для отримання виробів за допомогою лиття (див. підрозділ 1.2.1).

Широке роповсюдження обробки тиском зумовлено її високою продуктивністю, можливістю механізації та автоматизації, різноманітністю форм виробів, які, здебільшого, не потребують подальшої обробки, а також відносно низькими втратами метала. Особливо важливим є те, що пластична деформація дозволяє значно покращити структуру метала, зробити її однорідною, зменшити кількість внутрішніх несуцільностей вихідного литого метала та підвищити механічні властивості готових виробів.

Процеси ОМТ вирізняються технологічними особливостями та за конструкціями обладнання, що застосовується. Деякі з них незамінні для отримання певного виду продукції, інші – взаємозамінні. Вибір конкретного процеса зумовлений прагненням до забезпечення раціональних (оптимальних) умов отримання певної продукції з необхідною якістю, кількістю та з мксимальною економічною ефективністю.

Вище було відмічено, що усі процеси ОМТ за температурою обробки металу поділяються на різновиди: гаряча, холодна, тепла (неповна гаряча або неповна холодна).

Гаряча ОМТ реалізується, в основному, з попереднім нагрівом металу у процесах:

– ковки і гарячої об'ємної штамповки;

– гарячої прокатки;

– пресування.

Холодна ОМТ реалізується, в основному, у процесах:

– холодної прокатки;

– листової штамповки;

– волочіння;

– холодного висаджування (видавлювання);

– виробництва гнутих профилів.

Практично, всі процеси ОМТ супроводжуються поточним або позапоточним *обробляням* заготовки, напівфабрикату або продукції, які забезпечують наявність у металі властивостей, необхідних для наступних стадій обробки або для безпоседнього використання споживачем. До таких операцій (перероблень) відносяться підготовка заготовки до деформації (різання, нагрів, зачищення та вилучення окалини, розмотування рулонів або бунтів, правка, нанесення технологічного мастила та/або покриття, пакетування, складування, зберігання тощо).

Серед цих процесів особливе місце за складністю та специфікою обладнання, що використовується, займають: термічна обробка металу, його оздоблення на різних стадіях обробки, а також нанесення покриттів.

Для зручності викладення матеріалів, пов'язаних з процесами ОМТ, коротко розглянемо їх осібно.

Термічна обробка металів

Вище при розгляді особливостей гарячої деформації деякі дані про відповідні структурні перетворення у металі були наведені.

Під *термічною обробкою* розуміють *цілеспрямовану* зміну структури, а отже, і властивостей металу (сплаву), що досягається його *керованими та контрольованими* нагрівом (нагрівами) до певної температури, витримкою за цієї температури і подальшим охолоджуванням із заданою швидкістю [58, 62, 63].

Термічну обробку застосовують як проміжну операцію для поліпшення технологічних властивостей (оброблюваності тиском, різанням й ін.) та як завершальну операцію для досягнення металом або сплавом такого комплексу властивостей, який забезпечує необхідні експлуатаційні характеристики виробу.

Поліпшення характеристик металу в результаті термообробки дозволяє застосовувати сплави з більш простим складом замість складнолегованих.

Всі режими термічної обробки призначаються у відповідності з так званими «*фазовими діаграмами*», які є графічним відображенням залежності врівноваженого фазового складу сплава від його хімічного складу, температури та іноді – тиску. Фазові діаграми експериментально визначені для багатьох відомих матеріалів, і така задача є актуальною для нових сплавів.

Зокрема, для системи «залізо – вуглець» відомі і широко застосовуються на практиці діаграми виду, що наведений на рисунку 1.43. Тут по осі ординат відображено температуру в градусах Цельсія, по осі абсцис – вміст вуглецю в сплаві.

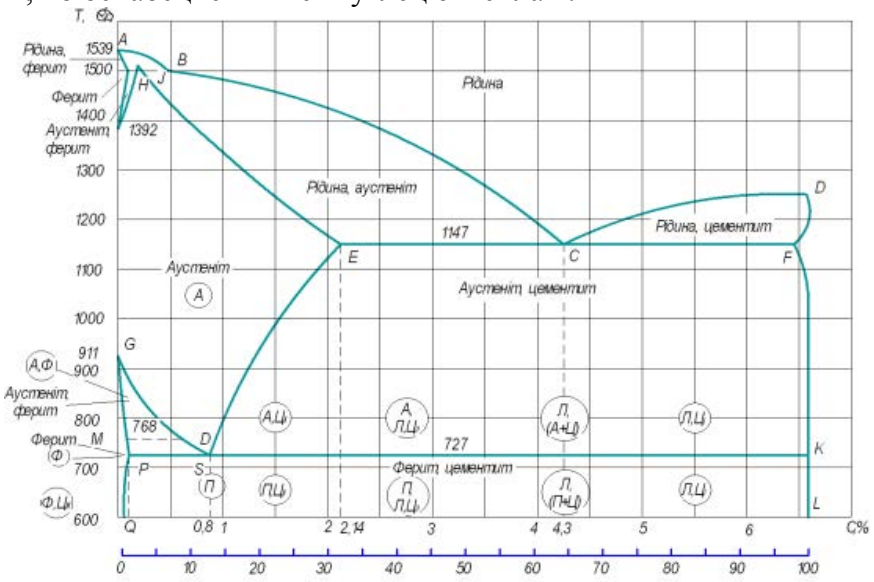


Рисунок 1.43 – Діаграма стану «залізо – вуглець» для сталей та білих чавунів

Для зручності пояснень у полі діаграми позначені характерні точки та лінії, а також зони існування характерних фаз сплаву. У вказаній системі відображені такі фази:

– рідинна фаза, яка є однорідним розчином вуглецю у залізі в будь-яких пропорціях;

– ферит (*Ф*) – твердий розчин вуглецю в α-залізі. Ферит має змінну граничну розчинність вуглецю: мінімальну – 0,006% за кімнатної температури (точка *Q*), максимальну – 0,02% за температури 727 °С (точка *P*). Властивості фериту близькі до властивостей чистого заліза. Він м'який (твердість 130 НВ) і пластичний; магнітний (за відсутності вуглецю) до 770 °С. За температури вище 1392 °С існує високотемпературний ферит (так званий δ-ферит) з максимальною розчинністю вуглецю близько 0,1% при температурі близько 1500 °С (точка *I*). У разі розчинення інших елементів у фериті змінюються його властивості та температурні границі їх існування;

– аустеніт (*А*) – твердий розчин проникнення вуглецю в γ-залізо. Аустеніт має змінну граничну розчинність вуглецю: мінімальну – 0,8% за температури 727 °С (точка *S*), максимальну – 2,14% за температури 1147 °С (точка *E*). Твердість аустеніту 200…250 НВ, він пластичний, парамагнітний. У разі розчинення інших елементів в аустеніті змінюються його властивості та температурні границі їх існування;

– графіт (*Г*) – фаза, що майже повністю складається з вуглецю і має кулеподібну гексагональну решітку. Графіт обов'язково присутній у сірих чавунах. Тут він проявляється у вигляді крупних крабоподібних (зігнутих пластинчастих) включень, а у високоміцних чавунах – у вигляді сфероїдів. Він присутній також і в графітизованих сталях. Щільність графіту (2,3 г/см^3) набагато менше за щільність усіх інших фаз: близько 7,5…7,8 г/см^3. Це ускладнює і уповільнює його утворення, що й призводить до виділення цементиту (*див. нижче*) при більш швидкому охолоджуванні. Утворення графіту зменшує усадку при

кристалізації злитків, він виконує роль мастила при терті, зменшуючи знос, сприяє розсіянню енергії вібрацій;

– цементит (*Ц – Fe_3C*, карбід заліза) – хімічна сполука заліза з вуглецем із складною ромбічною решіткою, містить 6,67% вуглецю. Цементит твердий (понад 1000 НВ) і дуже крихкий. Ця метастабільна фаза при тривалому нагріві розкладається на вуглець у вигляді графіту та залізо. У залізовуглецевих сплавах цементит як фаза може за різних умов бути у таких різновидах:

-цементит первинний, що виділяється з рідкої фази заевтектичних чавунів у вигляді крупних пластинчастих кристалів;

– цементит вторинний, що виділяється з аустеніту і розташовується по межах його зерен у вигляді сітки;

– цементит третинний, що виділяється з фериту і у вигляді дрібних включень розташовується по межах феритних зерен;

– цементит евтектичний, який спостерігається лише в білих чавунах;

– цементит евтектоїдний, що має пластинчасту форму і є складовою частиною перліту *П* (перліт – це результат розпаду аустеніту на ферит та цементит при температурі 727 °С).

Цементит може під час спеціального сфероїдизаційного відпалу або гартування з високим відпусканням (*див. нижче*) виділятися у вигляді дрібних сфероїдів.

На механічні властивості сплавів впливає форма, розмір, кількість і розташування включень цементиту, що дозволяє на практиці для кожного конкретного застосування сплаву досягати оптимального поєднання твердості, міцності, стійкості до крихкого руйнування тощо.

Всі лінії на діаграмі відповідають рівновагам фаз, які вони розділяють.

Зокрема, лінія *ABCD* – лінія *«ліквідус»*, вище якої сплав знаходиться у рідинному стані, а нижче якої починається кристалізація сплаву; лінія *AHJECF – «солідус»* відповідає кінцю кристалізації сплаву. Область *HJCE* на діаграмі відповідає рівновазі двох фаз: рідинного розчину і аустеніту, а область *CFD* – рівновазі рідинного розчину і цементиту тощо. Точка *C* при вмісті у сплаві 4,3% вуглецю і при температурі 1130 °С відповідає трифазній рівновазі рідини, аустеніту і цементиту. Охолодження сплаву нижче вказаної температури призводить до утворення аустенітно-цементитної *евтектики* (взаємного проникнення вказаних фаз при їх утворенні та зростанні). Ця структурна складова називається *ледебуритом*. Він присутній у всіх сплавах системи «залізо – вуглець», що містять від 2,0 до 6,67% С.

Точка *E* відповідає граничній розчинності вуглецю (2,03% *C*) у γ -залізі (аустеніті). Під час охолодження сплавів аустеніт розпадається з виділенням нижче лінії *GS* фериту, а нижче лінії *SE* – вторинного цементиту.

Лінії *GS, PSK* і *SE* мають велике практичне значення для встановлення режимів термічної обробки сталей. Так, лінію *GS*, якій відповідає температурний інтервал (727…911) °С називають *лінією верхніх* критичних точок (так звана лінія A_{C3}), а *PSK* – *лінією нижніх критичних точок* (так звана лінія A_{C1} при температурі 727 °С). Лінії *SE* (так звана лінія A_{cm}) відповідає температурний інтервал (727…1147) °С.

Область нижче лінії *PSK* (при температурі низче 727 °С) відповідає розпаду аустеніту та утворенню перліту.

Відносно точки *S*, якій відповідає ~0,8% *C*, залізовуглецеві сплави отримали наступні назви:

– сталі: при кількості вуглецю менше 0,8% – *доевтектоїдні*, приблизно 0,8% *C* – *евтектоїдні*, більше (0,8…2,03)% вуглецю – *заевтектоїдні*;

– чавуни: (2,03…4,3)% *C* – *доевтектичні*; приблизно 4,4% – *евтектичні*, більше (4,3…6,67)% *C – заевтектичні.*

Ґрунтуючись на типі фазових і структурних змін у металі, А.А. Бочвар систематизував багаточисельні різновиди термічної обробки чорних і кольорових металів і

сплавів. На цій основі була розроблена класифікація видів і різновидів термічної обробки сталей і кольорових металів і сплавів, а також відповідна термінологія. Згідно з цими підходами, розділяють:

– власне термічну обробку, яка включає лише термічний вплив на метал або сплав;

– хіміко-термічну обробку, що поєднує термічний і хімічний вплив;

– термомеханічну (або деформаційно-термічну) обробку, яка поєднує термічний вплив і пластичну деформацію.

Власне термічна обробка включає наступні основні види:

– *відпал 1-го роду* (базується на *структурних* перетвореннях, які можуть супроводжуватись і фазовими перетвореннями, наприклад, рекристалізаційний чи гомогенізаційний відпал);

– *відпал 2-го роду* (базується на *фазових* перетвореннях, які можуть супроводжуватись і структурними перетвореннями, наприклад, перерекристалізаційний чи гетерогенізаційний відпал);

– *гартування з поліморфним перетворенням*, наприклад, для сплавів на основі заліза, що має при атмосферному тиску природні поліморфні модифікації $\alpha - Fe$ з об'ємноцентрованою кубічною (ОЦК) решіткою, $\gamma - Fe$ з гранецентрованою кубічною (ГЦК) решіткою та $\delta - Fe$ з ОЦК решіткою в системі «залізо – вуглець» з перетворенням аустеніту на мартенсит;

– *гартування без поліморфного перетворення* (головним чином, для кольорових металів, які не є поліморфними, і сплавів на їх основі, наприклад, у сплавах системи «алюміній – мідь» з одержанням пересиченого твердого розчину міді в алюмінії);

– *відпускання* (одержання більш врівноваженої та стабільної структури поліморфних металів та сплавів на їх основі після гартування на мартенсит);

– *старіння* (одержання більш врівноваженої та стабільної структури після гартування сплавів на пересичений твердий розчин).

Кожен з видів власне термообробки поділяється на різновиди, специфічні для сплавів різних систем легування.

Вище було відмічено, що окремі явища, пов’язані з термічним впливом, з’являються як *побічні* під час основних процесів: лиття, гарячого оброблення тиском, зварюванні та ін. Вони бувають корисними, а можуть викликати і небажані зміни структури і властивостей виробів.

Слід мати на увазі, що *виробничі назви* окремих видів термообробки складалися історично і ґрунтувалися не стільки на характері внутрішніх перетворень у металі або сплаві, скільки на чисто зовнішніх ознаках. Тому той самий термін інколи використовують для позначення видів термообробки, абсолютно різних за своєю фізичною суттю.

Наприклад, нагрівання з переходом за критичну точку, витримку і охолоджування на повітрі зазвичай називають *«нормалізацією»*. Під час такої обробки у вуглецевій сталі відбуваються процеси фазової перекристалізації, які відносяться до відпалу 2-го роду; у високолегованих сталях може утворитися мартенсит, тобто відбувається гартування з поліморфним перетворенням, а деякі кольорові сплави піддаються гартуванню без поліморфного перетворення. Подібних прикладів можна привести безліч.

На практиці за умов урахування фазових і структурних змін у сплаві згідно з діаграмою його стану (*див. рис. 1.43*), конкретний вид термообробки визначається характером зміни температури за часом. Для цього зазвичай в технологічних інструкціях наводиться графік відповідної термічної обробки, загальний вигляд якого демонструється рисунком 1.44.

За таким графіком можна визначити температуру нагрівання, час нагрівання і охолоджування, середні і дійсні швидкості нагрівання і охолоджування, час витримки за температури нагрівання і загальну тривалість виробничого циклу. Але тільки за формою цього графіка нічого не можна сказати про те, з яким виглядом термообробки ми маємо справу.

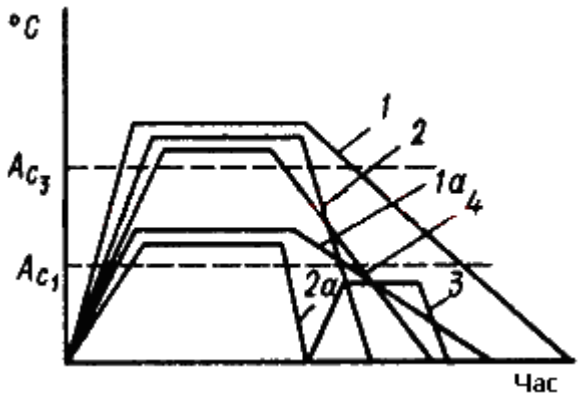


Рисунок 1.44 – Графік різних видів термічної обробки: 1, 1а – відпал; 2, 2а – гартування; 3 – відпускання; 4 – нормалізація

Розрізняють термічну обробку з фазовою перекристалізацією та без фазової рекристалізації.

Основною операцією термічної обробки *з фазовою перекристалізацією* є *відпал*, який у більшості випадків є проміжною (*підготовчою*) термічною обробкою для зниження твердості і підвищення в'язкості сталі, покращення її оброблюваності і стабілізації фізичних властивостей. Відпалу піддають виливки, поковки, прокат перед їх подальшою деформацією. Але в деяких випадках, наприклад, при виготовленні крупних злитків або поковок відпал є завершальною термічною обробкою.

Розрізняють наступні види відпалу: повний, неповний, ізотермічний, дифузійний.

Повний відпал полягає в нагріві доевтектоїдної або евтектоїдної сталі на 30…50 градусів вище за точку A_{C3} (для евтектоїдної сталі – вище за точку A_{C1}), витримці за цієї температури для повного прогрівання металу і подальшому повільному охолоджуванні в печі. Фазова перекристалізація, що відбувається під час відпалу, подрібнює зерно і усуває *відманштетову* (з наявністю голчастого фериту) структуру сталі. В результаті, сталь наближається до фазової і структурної рівноваги, і в ній утворюється структура, наведена на діаграмі стану системи «залізо – вуглець»: ферит + перліт для доевтектоїдної сталі та перліт – для евтектоїдної (*див. рис. 1.43*). При вказаній температурі на межі фаз фериту та цементиту утворюється велика кількість зародків аустеніту, чим зумовлюється формування дрібних зерен останнього. Надмірне перевищення температури нагрівання над точкою A_{C3} (A_{C1} – для евтектоїдної сталі) викликає зростання зерен аустеніту, що погіршує властивості сталі.

Формально, повний відпал можна реалізувати і для заевтектоїдної сталі шляхом нагріву сплаву на 30…50 градусів вище за температуру A_{cm}. Але при наступному повільному охолодженні в інтервалі $A_{cm} \dots A_{C1}$ по межах зерен аустеніту виділяється вторинний цементит, що зумовлює крихкість сплаву. Тому таку операцію, як правило, не реалізують.

Час нагріву і витримка за робочої температури залежать від типу нагрівальної печі, способу укладання виробів в піч, висоти садки, типу напівфабрикату (лист, сортовий прокат і т. п.). У практиці металургійних заводів швидкість *нагріву* зазвичай приймають рівною 100 град/год, а тривалість витримки може коливатися від 0,5 до 1 год. на 1 т металу, що нагрівається.

Повільне *охолоджування* повинне забезпечити такий розпад аустеніту, щоб уникати утворення надмірного подрібнення ферито-карбідної складової з властивою їй більш високою твердістю. Охолодження має бути повільнішим для сталі зі стійким переохолодженим аустенітом. Леговані сталі, що мають високу стійкість переохолодженого аустеніту, охолоджують значно повільніше (швидкість 10…100 град/год.), ніж вуглецеві (150…200 град/год.).

Швидкість охолоджування під час відпалу можна регулювати, проводячи його у печі із закритими або відкритими дверцятами, з повністю або частково вимкненим обігрівом.

Повільне охолоджування, особливо – легованих сталей, схильних до відпускної крихкості, слід проводити до 500…600 °С. Після розпаду аустеніту в перлітній області подальше охолодження можна прискорювати та здійснювати навіть на повітрі. Це не лише скорочує тривалість технологічного процесу, але й зменшує можливість розвитку відпускної крихкості.

Якщо відпал призначено для зняття напружень, наприклад, у виливках складної конфігурації, повільне охолоджування з піччю проводять майже до кімнатної температури.

Повному відпалу частіше піддають прокат, поковки, фасонні виливки, а також зливки легованих сталей (для пониження твердості й полегшення їх обдирання перед прокаткою).

Неповний відпал сталі характеризується тим, що її нагрівають до температури, декілька нижчої, ніж при повному відпалі.

Для доевтектоїдної сталі – це температури вище за A_{C1}, але нижче, ніж A_{C3}. При цьому через низьку температуру відпалу відбувається лише часткова перекристалізація сталі за рахунок перетворення: перліт→аустеніт. Надлишковий ферит лише частково перетворюється на аустеніт, а отже, не повністю піддається перекристалізації. Неповний відпал доевтектоїдних сталей застосовують у випадку, якщо гаряча механічна обробка була виконана правильно і не призвела до утворення крупного зерна і відманштетової структури.

Для заевтектоїдних сталей неповний відпал, як правило, застосовують замість повного відпалу. У цих сталях нагрів вище A_{C1} викликає практично повну перекристалізацію. В той же час, що особливо важливе для заевтектоїдних сталей, неповний відпал дозволяє отримати зернисту форму перліту замість пластинчастої. Такий відпал у виробничих умовах називають також *сфероїдизаційним*.

Це відбувається завдяки тому, шо частки надлишкового цементиту, які не розчинилися при нагріві, служать центрами утворення цементиту, що виділяється при охолодженні нижче A_{C1}, з отриманням зернистої форми. На відміну від цього, при нагріві заевтектоїдних сталей значно вище A_{C1} і розчиненні більшої частини надлишкового цементиту подальше виділення цементиту нижче A_{C1} відбувається в пластинчастій формі.

Сталі, які мають склад, близький до евтектоїдного, мають вузький інтервал температур нагріву для відпалу на зернистий цементит. Він дорівнює 750…760 °С, тоді як для заевтектоїдних вуглецевих сталей цей інтервал розширюється до 770…790 °С, а для легованих сталей – до 770…800 °С. Витримка за вказаних температур – 1…2 години.

Охолоджування під час сфероїдизації має бути повільним, що забезпечує розпад аустеніту на ферито-карбідну складову і коагуляцію (зростання) карбідів, що утворилися, при охолодженні до 620…680 °С.

Сталь із зернистим перлітом має знижені твердість і межу міцності та більш високі значення відносного видовження і звуження. Така сталь менш схильна до перегріву та утворенню тріщин при подальшій деформації та гартуванні. Тому відпалу на зернистий перліт для підвищення пластичності піддають тонкі листи та прутки зі сталі перед холодною деформацією.

Часто для легованих сталей застосовують так званий *ізотермічний* відпал, що вимагає менше часу. В цьому випадку їх нагрівають, як і при звичайному відпалі, і порівняно швидко охолоджують (частіше перенесенням в іншу піч) до температури нижче за A_{C1} (зазвичай на 50…100 градусів залежно від характеру кривої ізотермічного розпаду аустеніту). За цієї температури призначають ізотермічну витримку (30…60 хв., а у виробничих умовах її приймають 1…3 год., що залежить від маси відпалюваного металу). Це необхідно для повного розпаду аустеніту і коагуляції карбідів, після чого швидко проводять охолоджування на повітрі.

Для прискорення такого відпалу температуру ізотермічної витримки бажано вибирати близькою до температури мінімальній стійкості переохолодженого аустеніту в перлитній області.

Інша перевага ізотермічного відпалу – здобуття більш однорідної структури, оскільки при ізотермічній витримці температура за перетином виробу вирівнюється, і перетворення за усім об'ємом сталі відбувається при однаковому ступені переохолодження.

Ізотермічний відпал особливо застосовний для прокату, поковок й інших заготовок, що мають невеликі розміри.

Різновидом ізотермічної обробки є *патентування*. Його застосовують як проміжну операцію при виробництві дроту з вуглецевої (0,6…0,8% *С*) сталі. Після аустенізації при температурі вище A_{C3} на 30…50 градусів охолоджування проводять в розплавленому свинці або розплавлених солях до температури 450…600 °С (залежно від складу сталі). Далі за цієї температури проводять ізотермічну витримку для повного розпаду переохолодженого аустеніту з утворенням тонкої ферито-карбідної складової – *сорбіту*, що має високу пластичність. Патентування в поєднанні з подальшим холодним волочінням дозволяє отримати дріт з високою міцністю.

Для зменшення внутрішньокристалічної ліквації при термічній обробці злитків легованої сталі і крупних фасонних виливок застосовують так званий *дифузійний (гомогенізаційний) відпал*.

Нагрів при дифузійному відпалі має бути до 0,95 від температури «солідус» (в градусах Кельвіна), тобто 1100…1200 °С, оскільки лише в цьому випадку більш повно протікають дифузійні процеси *гомогенізації* (вирівнювання складу в окремих об'ємах сталі). Такий нагрів проводять зі швидкістю 100…150 град/год., а тривалість витримки встановлюють мінімальною. Залежно від складу сталі та маси садки вона знаходиться в межах 8…16 год. Після гомогенізації здійснюють повільне охолоджування.

У результаті тривалого нагріву за високої температури після гомогенізації сталь має крупне зерно. Цей недолік усувається під час подальшої обробки заготовки тиском.

Загальна тривалість дифузійного відпалу (нагрів, витримка, охолоджування) сягає 50…100 годин і більше.

Згідно *термінології, прийнятій на металургійних заводах,* застосовують декілька видів відпалу прокатної продукції: повний (рекристалізаційний) відпал готового сортового і листового прокату для отримання заданої структури і властивостей відповідно до вимог нормативної документації; неповний (*пом'якшувальний*) відпал напівпродукту і сортового прокату перед видаленням дефектів поверхні; відпал металу, контрольованого за карбідною і цементитною сіткою; *реставраційний* відпал зневуглецьованого металу та ін.

Ще одним видом термічної обробки сталі з перекристалізацію є нормалізація.

Нормалізація полягає в нагріві до температури, що перевищує на 50…60 градусів точку A_{C3} для доевтектоїдної сталі і A_{cm} – для заевтектоїдної сталі, нетривалій витримці і охолоджуванні на повітрі. Ця обробка відрізняється від відпалу підвищеною швидкістю охолоджування, яке проводять не в печі, а на повітрі (спокійному або рухомому).

Прискорене охолодження на повітрі приводить до розпаду аустеніту за більш низьких температур, що підвищує дисперсність ферито-цементитної складової структури і, отже, подрібнює крупне зерно, отримане під час лиття або гарячої обробки тиском (при куванні, штампуванні, прокатці), підвищує міцність та в'язкість металу, полегшує подальше оброблення металу різанням та дозволяє отримати чистішу поверхню деталей. Крім того, частково пригнічується виділення фериту в доевтектоїдних сталях і надлишкового цементиту в заевтектоїдних сталях, що підвищує міцність і твердість нормалізованої сталі у порівнянні з відпаленою.

Ефект, що отримується від нормалізації, залежить від складу сталі.

У виробничій практиці нормалізацію як простішу операцію застосовують замість відпалу для низьковуглецевих сталей. Декілька підвищуючи твердість, нормалізація забезпечує набуття більш чистої поверхні при різанні.

Для середньовуглецевої сталі нормалізацію застосовують замість гартування і високого відпускання (*див. далі*).

Для високовуглецевої (заевтектоїдної) сталі нормалізацією усувають цементитну сітку, яка може утворюватись при повільному охолоджуванні з температури вище A_{cm}.

Нормалізацію з подальшим високим відпусканням (600…650 °С) часто застосовують для виправлення структури легованих сталей замість їх відпалу.

Розглянуті види термічної обробки за наслідками їх застосування можна віднести до таких, що підвищують пластичні властивості сплавів.

Гартування, яке також здійснюється з перекристалізацію початкової структури металу, має суттєві особливості. Зокрема, при термічній обробці залізовуглецевих сплавів воно здійснюється шляхом нагріву до температури на 30…50 градусів вище за A_{C3} для доевтектоїдних сталей або A_{C1} для заевтектоїдних сталей з витримкою для завершення фазових перетворень і подальшим охолоджуванням *зі швидкістю вище критичної*.

Якщо при відпалі (*див. вище*) формування кінцевої структури сплаву відбувалося при «русі» по діаграмі стану на рис. 1.43 «зверху униз», що визначалося його повільним охолоджуванням із завершенням усіх дифузійних (повільних!) фазових переходів, то при гартуванні внаслідок швидкості охолоджування вище за деяку критичну величину дифузійні фазові переходи пройти не встигають. У результаті, в сплавах, для яких характерним є поліморфізм, відбувається бездифузійне (швидке!) мартенситне перетворення (наприклад, в сталях аустеніт трансформується на мартенсит; одна з модифікацій титану переходить у мартенсит, і т.і.). Така структура обумовлює підвищення твердості та міцності при зниженні пластичних властивостей сплаву.

Для сплавів, компоненти яких не є поліморфними, висока швидкість охолоджування зумовлює фіксацію («заморозку») високотемпературної структури та фазового складу. Така обробка може бути як зміцнюючою, так і пом’якшуючою в залежності від складу та стану сплаву.

При нагріві доевтектоїдної сталі до вказаної вище температури вихідна структура «перліт+ферит» перетворюється на аустенітну структуру, яка при подальшому охолоджуванні зі швидкістю вище критичної перетворюється на мартенсит. Таке гартування називають *повним*.

При нагріві доевтектоїдної сталі вище A_{C1}, але нижче A_{C3} після охолодження поряд з мартенситом зберігаються ділянки фериту, що не зазнають попереднього перетворення на аустеніт при нагріві. Присутність фериту знижує твердість сталі після гартування та її механічні властивості після відпускання. Тому таке *неповне* гартування для доевтектоїдних сталей, як правило, не застосовують.

Нагрівання сталі значно вище за A_{C3} викликає зростання зерен аустеніту, що призводить до утворення при охолодженні крупноголчастого мартенситу і погіршення в'язкості. Крім того, перегрів збільшує деформацію *деталей*, які піддаються гартуванню, підсилює тріщиноутворення і зневуглецювання.

Заевтектоїдні сталі при гартуванні нагрівають до A_{C1}+(50…70 °С). При цьому утворюється аустеніт, але зберігається деяка кількість цементиту. Тому після гартування в основній мартенситній структурі присутні частки цементиту, що не розчинився при нагріві. Ця структура забезпечує вищу твердість, тріщиностійкість і зносостійкість у порівнянні з отримуваною при гартуванні з нагрівом вище за A_{cm}, тобто із зони однорідного аустеніту. В результаті такого більш високого нагрівання сталь отримує структуру крупноголчастого мартенситу без цементиту, але з підвищеною кількістю залишкового аустеніту. Цементит має вищу твердість, ніж мартенсит; присутність аустеніту одночасно знижує твердість. Нагрів вище A_{cm}, крім того, погіршує міцність через укрупнення зерна і збільшує деформацію виробу при гартуванні.

Для легованих сталей перлітного класу температури гартування обирають з урахуванням положення точок A_{C1} і A_{C3} на діаграмі стану (див. рис. 1.43). При цьому слід зазначити, що нікель і манган у сплаві знижують температурні рівні A_{C1} і A_{C3}, а хром, вольфрам, молібден, титан і силіцій їх підвищують. Тому при одному й тому ж вмісті вуглецю температура нагрівання під гартування легованих сталей може бути вище або нижче за температуру гартування вуглецевих сталей. Для деяких високолегованих сталей температура гартування визначається не положенням A_{C1} і A_{C3}, а температурою розчинення карбідів в аустеніті для отримання потрібного ступеня легування твердого розчину. Підвищення температури гартування при цьому не супроводжується перегрівом, оскільки карбіди гальмують зростання зерен аустеніту.

Нагрів під гартування проводять в печах періодичної і безперервної дії, частіше електричних або таких, що працюють на газоподібному або рідкому паливі (*див. нижче*). Широко використовують печі-ванни, в яких виріб нагрівається в розплавлених солях.

Застосовують наступні суміші солей: 95% $BaCl_2$ + 5% MgF_2 (марка суміші БМ5); 78% $BaCl_2$ + 22% $NaCl$; 68% $BaCl$ + 30% $NaCl$+2,0 MgF_2 (БНМ2).

Для запобігання зневуглецюванню сталі до соляних ванн додають буру або феросиліцій. Для цієї ж мети використовують фтористий магній MgF_2 (солі марок БМ5 і БНМ2).

Вибір швидкості нагріву залежить від типу нагрівального пристрою, складу і вихідної мікроструктури сталі, форми і розмірів виробу. Вона має бути менше для сталі з підвищеним вмістом вуглецю та легуючих елементів і для крупних виробів складної форми. Причиною цього є те, що при зниженій теплопровідності сталі та великій різниці температур внутрішніх і зовнішніх об'ємів виробу виникають значні напруження, які можуть викликати викривлення виробу, утворення тріщин і навіть його руйнування.

Ковані і катані вироби з конструкційних сталей (із вмістом вуглецю до 0,6…0,7%) зазвичай нагрівають у печах зі швидкістю 0,8…1,0 хвилин на 1 мм перетину. При нагріванні виробів у соляній ванні тривалість нагрівання зменшується приблизно у два рази, а при нагріві в розплавлених металах (наприклад, у свинці) – у 3…4 рази.

Різальний інструмент (фасонний) при нагріванні під гартування рекомендується попередньо підігрівати в печі при 400…500 °С.

Після досягнення заданої температури нагрівання проводять витримку для повного прогріву виробу, завершення усіх фазових перетворень і вирівнювання складу аустеніту. Чим вище температура нагріву, тим менше може бути тривалість витримки. Час витримки часто приймають рівним ~20% від часу нагріву.

Тривалість витримки в електричній печі за температури гартування (750…900 °С) для інструменту з вуглецевої сталі (0,7…1,3% *С*) приймають рівною 50…80 с на 1 мм діаметру (найбільшої товщини), а з легованої сталі – 70…90 с. При нагріві в соляній ванні вуглецевої сталі – 20…25 с; для легованої сталі 25…30 с.

При нагріві до високих температур в полум'яневих або електричних печах пічні гази (продукти згорання, повітря) взаємодіють з поверхнею виробу, що нагрівається. Це викликає окиснення і зневуглецювання поверхневих шарів сталі.

Окиснення призводить до безповоротних втрат металу, погіршенню стану поверхневих шарів і вимагає наступного очищення від окалини. Зневуглецювання знижує твердість, зносостійкість і опір металу втомі. Для захисту виробів від окиснення і зневуглецювання застосовують нагрів в розплавлених солях, у захисних газових середовищах або у вакуумі.

Захисні газові середовища називають *контрольованими атмосферами*, оскільки їх взаємодію зі сталлю при нагріванні можна регулювати в потрібному напрямі. Для цього застосовують: продукти дисоціації аміаку (NH_3) або часткового їх спалювання (H_2–H_2O–N_2); генераторний газ (CO–CO_2–N_2), що попередньо очищають від вуглекислого газу і

осушують для запобігання зневуглецюванню; суміш газів ($CO–CO_2–N_2–H_2–H_2O$), що отримується в результаті часткового спалювання природного або світильного, коксового та інших вуглеводневих газів.

Останнім часом часто використовують ендотермічну атмосферу, що отримується в результаті часткового спалювання при 1000…1200 °С природного або промислових вуглеводневих газів в ендотермічному генераторі (тобто, який має зовнішній обігрів) у присутності спеціального каталізатора. Типовий склад ендотермічної атмосфери такий: 20% CO, 40% H_2 та 40% N_2.

Сталь з різним вмістом вуглецю може знаходитися в рівновазі з цією атмосферою лише при певній невеликій кількості в ній CO_2 та H_2O. Змінюючи коефіцієнт надлишку повітря, що подається в генератор, тобто вміст в атмосфері CO_2 і H_2O, можна отримати нейтральний газ відносно заданого складу сталі. Оскільки даній кількості CO_2 в атмосфері завжди відповідає певна кількість H_2O, контроль атмосфери можна здійснювати тільки за одним з цих компонентів. Частіше контроль проводять за кількістю водяної пари, вимірюваної температурою точки роси. Температура точки роси коливається від -12 °С до + 21 °С. Чим більше в сталі вуглецю і вище температура нагріву, тим нижче точка роси атмосфери, що знаходиться в рівновазі зі сталлю.

За відсутності контрольованих атмосфер вироби нагрівають в ємностях із сумішшю речовин, використовуваних для цементації, або наносять на вироби спеціальні обмазки (наприклад, буру).

Гартувальні середовища повинні забезпечити високу швидкість охолоджування за температур найменшої стійкості аустеніту (650…550 °С), щоб попередити його розпад на ферито-цементитний конгломерат. При гартуванні легованих сталей потрібне швидке охолодження і в зоні температур проміжного перетворення, де є другий мінімум стійкості аустеніту.

Для запобігання бейнітного перетворення нерідко швидкість охолодження має бути більше, ніж в області температур перлітного перетворення. Проте доцільне повільне охолоджування в області температур мартенситного перетворення, щоб запобігти появі підвищених внутрішніх напружень, які викликають деформацію загартованих виробів і утворення тріщин.

В якості гартувальних середовищ для вуглецевих і низьколегованих сталей, для яких характерна висока критична швидкість охолодження, застосовують воду з температурою 20…30 °С, а також різні водні розчини, а для легованих сталей з високою стійкістю переохолодженого аустеніту – масло і повітря.

Для води, масла та інших рідин, що киплять при зануренні в них нагрітого металу, розрізняють три періоди, що відзначаються різною інтенсивністю охолоджування.

Спочатку довкола охолоджуваного виробу утворюється парова оболонка. У цей період, званий *плівковим кипінням*, швидкість охолоджування порівняно невелика.

У наступний момент парова оболонка руйнується, і рідина на поверхні виробу починає кипіти, тобто створюється безпосередній контакт рідини і виробу з утворенням бульбашок пари (це період *пухирчастого кипіння*). Охолоджування в цей період відбувається з великою швидкістю. При подальшому охолодженні нижче температури кипіння воно протікає з невеликою швидкістю і, в основному, за рахунок конвекції.

Вода як гартувальне середовище забезпечує велику швидкість охолоджування, але має ряд недоліків. По-перше, її плівкове кипіння відбувається у широкому інтервалі температур. По-друге, охолоджуюча здатність води різко знижується при підвищенні її температури; крім того, вода створює високу швидкість охолоджування в області температур утворення мартенситу (250…300 град/с). Це є причиною виникнення великих структурних напружень, а отже – деформації виробів і навіть – утворення тріщин.

Властивості води як гартувального середовища покращуються додаванням кухонної солі, соди, луг, сірчаної кислоти або водорозчинних полімерів. У таких розчинах майже повністю зникає період плівкового кипіння, що прискорює охолодження за високих

температур і робить його більш рівномірним. У той же час в інтервалі температур мартенситного перетворення ці розчини мають меншу здатність до охолодження, ніж вода. Гартувальна здатність водних розчинів солей і луг, як правило, менш чутлива до коливань температури.

Мінеральне масло охолоджує в області перлітного і проміжного перетворення повільніше, ніж вода та водні розчини. Проте масло як гартувальне середовище має ряд переваг: воно має невелику швидкість охолоджування в інтервалі температур мартенситного перетворення внаслідок підвищеної температури кипіння. Це зменшує можливість утворення дефектів під час гартування. Гартувальна здатність масла лише трохи змінюється з підвищенням його температури від 20 до 150 °С. Масло, в порівнянні з водою, охолоджує більш рівномірно у всьому інтервалі температур, що зменшує гартівні напруження. Проте масло легко спалахує, а з часом підвищує свою в'язкість, що спричиняє зниження його гартувальної здатності.

Деякі високолеговані сталі загартовуються *при охолодженні на спокійному або зволоженому повітрі*, що подається під тиском. В цьому випадку досягаються найменші залишкові напруження.

Гартування, як правило, не є остаточною термічною обробкою. Щоб зменшити крихкість і напруження, викликані гартуванням, набути необхідні механічні властивості, сплави після гартування піддають додатковій термічній обробці.

Термічну обробку *без фазової перекристалізації* зазвичай застосовують для тих видів металовиробів, для яких у стані постачання згідно з нормативними документами (ДСТУ, ISO, EN, ТУ У) регламентовані твердість і мікроструктура. Це, здебільшого, стосується профілів конструкційних, ресорних та інших вуглецевих і низьколегованих сталей, а також деяких виробів з кольорових металів та сплавів.

Відпускання є остаточною операцією термічної обробки. Відпусканням називається нагрів попередньо загартованої сталі до температури не вище за A_{C1}, витримці при заданій температурі і подальшому охолодженні із заданою швидкістю. Під час відпускання в металі відбуваються укрупнення дисперсних фаз, розпад мартенситу і залишкового аустеніту з утворенням феритно-цементитної композиції, підвищується пластичність і в'язкість, знижується твердість. Крім того, відпускання повністю або частково усуває внутрішні напруження, що виникають під час гартування. Ці напруження знімаються тим повніше, чим вище температура відпускання. Найінтенсивніше напруження знижуються при витримці протягом перших 15…30 хвилин.

Температура відпускання значно впливає на властивості сплаву, що ним набуваються. У цьому зв'язку, розрізняють три види відпускання: низькотемпературне («низьке»), середньотемпературне («середнє») та високотемпературне («високе»).

Низькотемпературне відпускання сталей проводять з нагрівом до температури 150…250 °С і витримкою протягом 3…4 год. Така обробка знижує внутрішні напруження, переводить мартенсит гартування у відпущений мартенсит. У результаті, підвищується міцність і декілька – в'язкість без помітного зниження твердості. Загартована середньо– і високовуглецева сталі після низького відпускання зберегають твердість у межах 58…64 *HRC*, а отже, високу зносостійкість. Проте такий виріб (якщо він не має в'язкої серцевини) не призначений для сприйняття динамічних навантажень. Тому низькотемпературному відпусканню піддають різальні та вимірювальні інструменти з вуглецевих і низьколегованих сталей, а також деталі, що зазнають поверхневе гартування, цементацію і т.п.

Низькотемпературне відпускання інструменту частіше проводять в розплаві, що містить 50% KNO_3+50% $NaNO_2$. Рідкі середовища забезпечують швидкий і рівномірний нагрів і точніше регулювання температури.

Середньотемпературне відпускання для сталей проводять при 350…500 °С і витримкою протягом 0,5…1 год. Його застосовують для пружин і ресор. Таке відпускання забезпечує найвищу межу пружності і декілька підвищує в'язкість. Структура сталі після

середнього відпускання – троостит відпускання, твердість 40…50 *HRC*. Температуру відпускання слід вибирати так, щоб не викликати незворотної відпускної крихкості.

Високотемпературне відпускання сталей проводять при 500…680 °С і витримці протягом 3…4 год. Структура сталі після високого відпускання – *сорбіт відпускання*.

Високе відпускання майже повністю знімає внутрішні напруження і значно підвищує ударну в'язкість.

Для високолегованих сталей, в яких відсутнє перлітне перетворення, високе відпускання є єдиною термічною обробкою, що дозволяє понизити їх твердість.

Гартування з високим відпусканням порівняно зі станом сталі після відпалу одночасно підвищує межу міцності і текучості, відносне подовження та звуження і – особливо – ударну в'язкість. Високе відпустання застосовують також для запобігання утворенню флокенів і тріщин прокату. Тому таку термічну обробку називають *поліпшенням*, або *поліпшувальною обробкою*. Поліпшенню піддають середньовуглецеві (0,3…0,5% *C*) конструкційні сталі. Проте зносостійкість поліпшуваної сталі через зниження твердості не є високою.

В практиці прокатних цехів для сталей після горячої обробки тиском часто високе відпускання використовують замість повного відпалу. При цьому, нагрів сталі здійснюють до температури декілька нижче за A_{C1} (зазвичай 650…680 °С), витримують за цієї температури 0,5…1,0 год. на тонну садки і охолоджують на повітрі.

Режими відпускання (температура і час витримування) залежать від марки сталі, типу печі, маси садки, розміру профілю та інших чинників. Ці режими регламентуються заводськими технологічними інструкціями.

Швидкість охолоджування після нагріву під відпускання суттєво впливає на величину залишкових напружень. Чим повільніше охолоджування, тим менше залишкові напруження. Наприклад, охолоджування вуглецевих сталей на повітрі зменшує залишкові напруження до 7 разів, а в маслі – в ~2,5 рази менше порівняно з охолоджуванням у воді. Це слід враховувати при відпусканні виробів складної форми, щоб уникнути їх викривлення. Проте вироби з легованих сталей, схильних до зворотної відпускної крихкості при повільному охолоджуванні з температур 500…650 °С для зниження напружень слід охолоджувати спочатку швидко у воді (маслі) з подальшим низькотемпературним відпусканням при 200…250 °С.

Термічна обробка кольорових сплавів відрізняється від обробки сталей режимами нагріву і охолодження. Так, алюмінієві поковки гартують з наступним старінням – природним (з витримкою до п'яти діб) і штучним.

Поковки з магнієвих сплавів піддають відпалу або загартуванню та штучному старінню, з титанових сплавів – відпалу або подвійному відпалу і т.п.

Одним з найбільш поширених сучасних видів обробки металічних матеріалів для надання їм необхідних експлуатаційних властивостей є ***хіміко-термічна обробка (ХТО) металів***. Вона полягає в поєднанні термічного та хімічного впливу з метою зміни складу, структури і властивостей *поверхневого шару* сплаву.

Найбільш широко використовуються методи насичення поверхневого шару сталі вуглецем і азотом як окремо, так і спільно.

Це процеси: *цементації* (навуглецювання), *азотування* (насичення поверхні сталі азотом), *нітроцементації* та *ціанування* – одночасного введення у поверхневі шари сталі вуглецю та азоту.

Вельми ефективним і універсальним процесом хіміко-термічної обробки є *борування*. Його застосовують для підвищення твердості, зносостійкості та окалиностійкості поверхневого шару сталевих виробів, які працюють, зокрема, при підвищених (до 800…950 °С) температурах.

Насичення поверхневих шарів сталі іншими елементами (хромом – дифузійне *хромування*, кремнієм – *силіціювання* і алюмінієм – *алітування*) застосовують рідше.

Як правило, після насичення поверхні виробів вказаними елементами вироби піддають поверхневому гартуванню з наступним відпусканням.

На металургійних підприємствах всі види термічної обробки виконують в термічних відділеннях цехів або у спеціалізованих термічних цехах.

Печі і нагрівальні установки, що відносяться до основного устаткування термічних цехів та відділень, можна класифікувати за:

– технологічним призначенням (гартівні, відпускні, цементаційні тощо);

– конструкцією (*періодичної дії* – камерні з висувним або стаціонарним подом, ковпакові, муфельні або безмуфельні, шахтні, баштові; *безперервної дії* – з крокуючими балками, прохідні роликові);

– джерелом теплової енергії (рідке або газоподібне паливо, електрика);

– способом і мірою механізації (штовхальні, конвеєрні, з обертовим подом, з автоматизованим або ручним вивантаженням виробів тощо);

– використанням різних середовищ в робочому просторі при нагріванні (вакуумні, з контрольованою атмосферою, наприклад, нейтральною, незневуглецювальною або навпаки – навуглецювальною, печі-ванни з розплавленими солями або металами тощо);

– специфічним призначенням для термічної обробки певних виробів (для сортового або листового прокату, каліброваної сталі, труб, кріпильних виробів тощо).

До основних характеристик печей відносяться: габаритні розміри, розміри робочого простору, витрата палива в кг/год або $м^3$/год (для електричних печей – номінальна потужність у кВт), кількість теплових зон та їх потужність, максимальна температура у °С, вага в тоннах, продуктивність в кг/год.

До термічних печей пред'являється ряд вимог.

Вогнетривкі цегла та складові футеровки мають бути непористими та щільними, шви між цеглою не повинні пропускати гази і продукти згорання. Деяке оснащення печей (радіаційні труби, деталі рекуператорів та ін.) мають бути стійкими до газової корозії. Вони мають бути компактними і мати гарну теплоізоляцію зовнішнього шару футеровки. Кладка печі має бути поміщена у металевий кожух, температура якого під час роботи печі не повинна перевищувати 50…60 °С.

Робочі камери термічних печей, що працюють на мазуті, треба відокремлювати від камер спалювання палива. Останні доцільно розташовувати під подом печі. В цьому випадку под печі буде завжди гарячий. Поєднувати камери спалювання з робочим простором печі можна лише при використанні газоподібного палива, оскільки тут здійснюється максимальне змішування газу з повітрям та повне згорання газу.

Кожна піч повинна мати прилади для вимірювання, реєстрації та регулювання температури, а за необхідності – для регулювання тиску газу і повітря. Печі газової цементації та нітроцементації повинні мати прилади для автоматичного регулювання вуглецевого потенціалу. Печі, призначені для швидкого нагрівання, як наприклад, печі-ванни, мають бути забезпечені спеціальними годинниками.

Схема *шахтної електричної печі* для термічної обробки металу представлена на рисунку 1.45.

Кожух печі 5 виготовляють з листового сталевого прокату і заповнюють теплоізоляційним матеріалом 4. На внутрішній поверхні кожуха монтують електричні нагрівачі 3. Усередині печі міститься реторта 2, що є барабаном з отворами для циркуляції складових атмосфери 6 від її джерела 7. Піч закривається термоізоляційною кришкою 1.

Схема *камерної електричної печі* показана на рисунку 1.46. Така піч має робочу камеру 7, викладену шамотною вогнетривкою цеглою 8 з електро– та теплоізоляційною засипкою 9. Зовнішня поверхня печі покрита листовим сталевим кожухом 4. Електронагрівачі 5 розташовані на бічних стінках печі і під подовою плитою 2. Зверху печі розміщують термопару 6. Підйом дверцят печі 3 здійснюється натисненням педалі 1, що полегшується вантажем 11 на тросі, перекинутим через блок 10; цей вантаж підбирають приблизно рівним вазі дверцят.

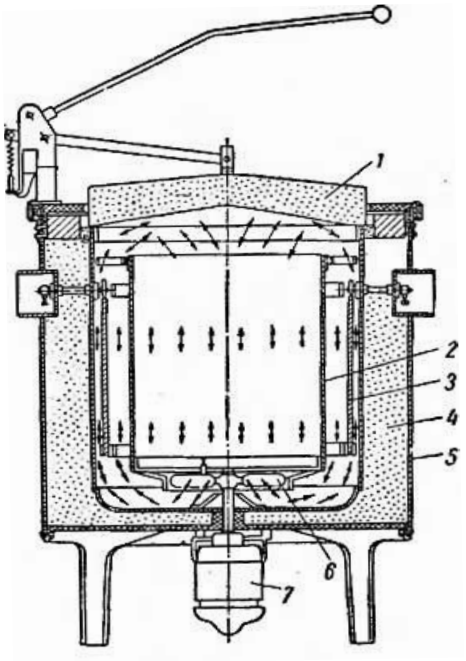


Рисунок 1.45 – Схема шахтної електричної печі (*позначення позицій – у тексті*) [62]

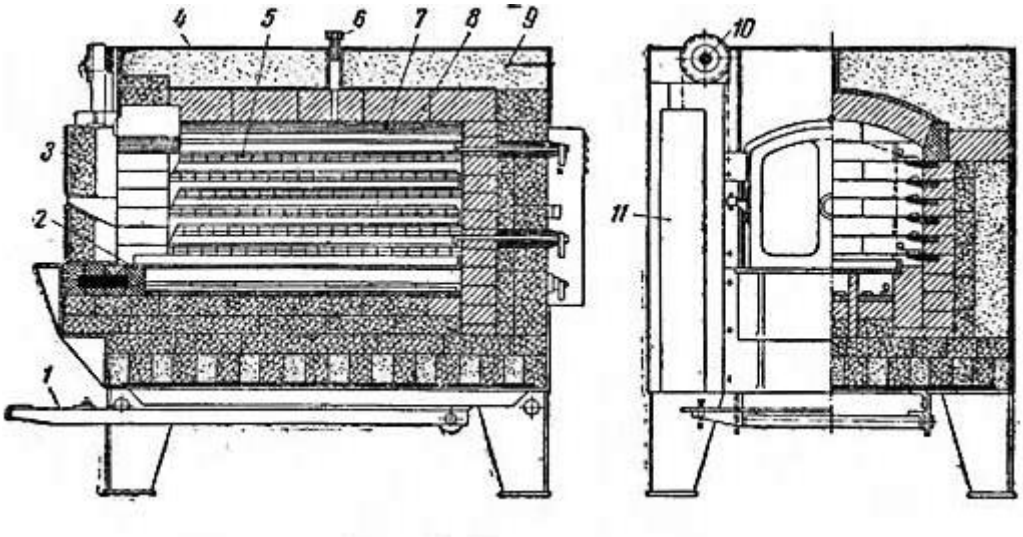


Рисунок 1.46 – Схема камерної електричної печі (*позначення позицій – у тексті*) [62]

Електронагрівачі для таких печей виготовляються у вигляді стрічок або дроту зі сплавів, що мають високий електричний опір (константан при нагріві до температур 500 °С; ніхром – при нагріві до 1100 °С; карборунд при нагріві більше 1100 °С; графітові нагрівачі застосовують у вакуумних печах, де потрібна температура 2000…3000 °С.).

Використовуються також *ковпакові печі* періодичної дії, які можуть бути газовими і електричними. Вони служать для відпалу сталевого дроту та стрічки, а також – для термічної обробки кольорових сплавів.

Конструкція такої печі складається з переносного футерованого ковпака, чотирьох стаціонарних стендів і чотирьох жаротривких муфелів. Ковпак має циліндричну форму і футерований нормальною шамотною, діатомітовою цеглою та мінеральною ватою. На стінці ковпака закріплюють нагрівачі, виготовлені зі сплаву марки Х20Н80. Муфель – подвійний газонепроникний – зварений з листової сталі марки Х23Н18. У муфель уводиться захисний газ.

Стенд служить для опертя садки і складається з каркасу, опорних кілець, направляючого апарату для захисного газу і вентилятора. На стенді є пристосування для

підведення і відведення газу, а також встановлюють термопари, за даними яких автоматично регулюється температура.

Рулони сталевої стрічки укладають на підставку стенду. Для кращого нагріву і циркуляції атмосфери між рулонами прокладають спеціальні кільця. Після завантаження на стенд всі укладені рулони з кільцями закриваються муфелем, який входить знизу в пісочний затвор. Робоча температура сягає 900 °С. Потужність печі 380 кВт. Вага завантажених деталей сягає 25 т. При циклі термічної обробки (нагрів, витримка, охолоджування) протягом 38 годин продуктивність установки складає 600 кг/год.

Для ковпакових електропечей із захисною атмосферою прийнято наступне позначення: після індексу СГЗ у чисельнику вказують діаметр і висоту робочого простору в дм, у знаменнику – температуру в сотнях градусів. Інколи до позначення печі додають букви Ц і К («Ц» – циркуляція атмосфери, «К» — додатковий охолоджувальний ковпак; цифра – маса садки в тоннах). Наприклад, позначення «СГЗ-14.35/7-ЦК-1» відповідає печі, шо має діаметр 1,4 м, висоту 3,5 м; забезпечує температуру нагріву 700 °С 1-тонної садки з циркуляцію атмосфери; оснащена додатковим ковпаком.

Для відпалу деталей з магнітних сплавів титану, для спікання металевих порошків (*див. нижче*) і для інших цілей у промисловості застосовуються *вакуумні електричні печі*. Конструктивно вони можуть бути камерного типу або з муфелем. У печах забезпечують вакуум 10^{-1}…10 мм рт. ст.

До групи *шахтних вакуумних печей* відносяться печі типу СШВ-8.8/9 і СШВ-15.15/9 з екранною теплоізоляцією, що працюють при температурі 900 °С (розшифровка позначення аналогічна тій, що наведена для ковпакових електропечей). Печі СШВ-1.10/20 і СШВ-5.15/22 призначені для спікання молібдену, деталей з оксидів алюмінію, цирконію, берилію, торію. Ці печі будують з графітовою ізоляцією та графітовими нагрівачами до 2000…3000 °С у вакуумній чи інертній (аргоновій) атмосфері.

Зараз для термообробки з інтенсивним охолоджуванням в аргоні різних деталей з аустенітних сталей, як наприклад, дисків і лопатей турбін використовують вакуумні печі: методичні з нагрівачами у вигляді графітових стрижнів для спікання і зварювання молібденових заготовок (типу ОКБ-870) та штовхальні (типу СТВ), які є високопродуктивними механізованими і автоматизованими агрегатами.

Знаходять використання також і вакуумні печі з індукційним нагрівом.

При виробництві сортового і листового прокату поширення отримала ***термомеханічна обробка металів***, при якій структура і властивості металу формуються при комплексному впливі процесів пластичної деформації (*див. нижче*) і термічної обробки з фазовими або безфазовими перетвореннями в сплаві. В залежності від умов реалізації розрізняють такі її види: високотемпературна; низькотемпературна; контрольована.

Остання є одним з перспективних способів зміцнення сортового сталевого прокату в технологічному потоці за чистовими клітями станів за допомогою різних пристроїв для регульованого охолодження стрічки з прокатного нагріву (від температури кінця прокатки).

Термічну обробку на металургійних підприємствах зазвичай розглядають як окремий технологічний процес, але іноді її відносять до операцій ***оздоблення (оброблення).*** Те ж саме можна сказати і про технологічні процеси нанесення покриттів [64…66].

Оздоблення металовиробів

Операції оздоблення («оброблення») дозволяють отримати продукцію (напівфабрикат) з потрібними властивостями і надати виробам товарний вигляд. Особливістю сучасних металургійних цехів є прагнення до проведення майже всіх операцій з оздоблення металу в технологічному потоці. Більшість цих операцій є завершальними в загальних процесах обробки металів тиском (ОМТ).

Для компактності ж викладення наступних матеріалів щодо технологічних процесів ОМТ доцільним уявляється попередньо *окремо* представити *основні операції оздоблення*.

До обробних операцій (крім *термічної обробки*, розглянутої вище) можна віднести:

– очищення поверхні від окалини;

– різання;

– правку;

– зачистку поверхневих дефектів (суцільну і вибіркову);

– консервацію (захист від корозії) та нанесення покриттів;

– маркування;

– пакування тощо.

Очищення поверхні металовиробів від окалини зумовлене тим, що окалина – неминучий негативний супутник процесу обробки металу. Особливо інтенсивно вона утворюється як у нагрівальних пристроях, так і в процесі гарячого формозмінення (наприклад, при прокатці) і наступного охолодження. Наявність окалини на заготовці підвищує рівень тертя, посилює знос інструменту, енергетичні витрати та нестабільність силових умов деформування, погіршує якість поверхні виробів.

Очищення поверхні прокату здійснюється хімічними та механічними засобами.

Хімічне очищення реалізується травленням в розчинах сірчаної або соляної кислот (рідше –інших кислот), а також обробкою металовиробів у розплавах лугів та солей.

Травлення – один з найбільш поширених способів очищення поверхні металу від окалини. Травлення є дорогим процесом, оскільки при цьому витрачаються травильні матеріали, стравлюється і втрачається основний метал, проявляється негативний вплив на довкілля, ускладнюється виконання санітарно-гігієнічних вимог.

Травлення *сталевих поковок* використовують рідко. Більш широко його застосовують при очищенні поковок з алюмінієвих, мідних, магнієвих і титанових сплавів.

Особливо широко застосовують травлення для видалення окалини з пруткового та бунтового прокату перед волочінням, перед холодною прокаткою листа і труб, а також – з метою виявлення поверхневих дефектів прокату перед зачисткою.

Травлення сталевих виробів у розчинах сірчаної кислоти базується на відповідній активній взаємодії заліза та його нижчого оксида (вюстита) з 15…20% водним розчином кислоти при температурі 60…90 °С. Вищі оксиди заліза (гематит та магнетит) при цих умовах розчиняються погано.

Залізний купорос $FeSO_4$, що утворюється при цьому, переходить до розчину і частково осідає на поверхні металу, а водень, концентруючись під плівками оксидів, створює там підвищений тиск, що сприяє відриву зовнішніх шарів окалини від поверхні металу.

Недоліком цього способу є мала швидкість обробки, поява водневої крихкості та міжкристалітної корозії металу, необхідність нагріву травильного розчину та уведення до нього інгібіторів травлення, які запобігають перетраву та недоцільним витратам металу, а також – утруднена регенерація відпрацьованого розчину, що збільшує ризик забруднення довкілля.

Особливостями *травлення сталі в розчині соляної кислоти* у порівнянні з сірчаною являються розчинність окалини в ній, суттєво менша схильність металу до перетраву, водневої крихкості та міжкристалітної корозії, суттєво більш високі швидкості травлення, низька температура використання і можливість майже повної регенерації травильних розчинів.

Застосування інгібірованої соляної кислоти дозволяє значно понизити втрати металу. Так, наприклад, при травленні катанки в розчині соляної кислоти втрати металу складають 1,5%, тоді як в розчині сірчаної кислоти не менше 2,1%. Крім того, навіть при тривалій витримці металу в травильній ванні, практично відсутній перетрав металу.

Істотним недоліком цього способу є висока вартість соляної кислоти і способів регенерації відпрацьованих травильних розчинів, а також значний негативний вплив на організм людини парів HCl .

У сучасних цехах холодної прокатки видалення окалини з поверхні гарячекатаних смуг здійснюється травленням у травильних *агрегатах безперервної дії* (рисунок 1.47).

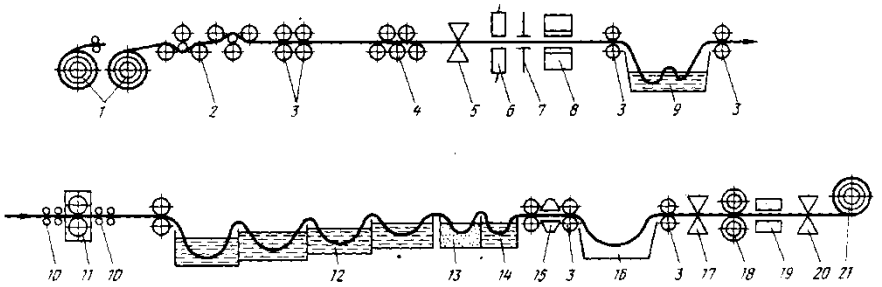


Рисунок 1.47 – Схема травильного агрегата безперервної дії горизонтального типу [65]:
1 – двопозиційний розмотувач рулонів; 2 – роликовий окалиноламач; 3 – тягнучі ролики; 4 –правильна машина; 5, 17, 20 – гильотинні ножиці; 6 – стикозварювальна машина; 7 – гратознімач; 8 – листозшивна машина; 9, 16 – петлеві ями; 10 – натяжні пристрої; 11 – дресирувальна кліть; 12 – травильні ванни; 13, 14 – ванни холодного та гарячого миття; 15 – сушильний пристрій; 18 – дискові ножиці; 19 – пристрій для промаслювання; 21 – згорточна машина (моталка)

Кожен такий агрегат складається з трьох частин: головної, середньої (технологічної) і хвостової.

До головної частини входять розмотувач рулонів 1, окалиноламач 2, правильна машина 4, гільйотинні ножиці 5, машни 6 та 8 для стикового зварювання або зшивання смуг.

Середня (технологічна) частина агрегату включає дресирувальний стан 11 або розтяжну машину 10 для додаткового механічного руйнування окалини, травильні і промивні ванни 12…14, сушильний пристрій 15.

У хвостовій частині агрегату знаходяться ножиці 17, 18 і 20, промаслювальний пристрій 19 та моталки 21.

Окалиноламач, куди надходить стрічка після розмотувача рулонів, діє за принципом знакозмінного вигину смуги навколо роликів малого діаметра.

З'єднання послідовних смуг з утворенням суцільної стрічки здійснюється на стикозварювальній машині 6. Перед цим смуги проходять через правильну машину 4, їх торці обрізаються на ножицях 5. Після зварювання грат (зварний валик) видаляється на гратознімальній установці 7. Для з'єднання смуг зі сталей, які погано піддаються зварюванню, використовується зшивна машина 8.

Перед травильними ваннами проводиться додаткове механічне руйнування окалини за допомогою дресирувальної кліті 11 (при обтисненні металу на 2…5%) або машини пластичного розтягування (з подовженням до 3%).

Основну операцію – травлення – зазвичай здійснюють у послідовно розташованих 4..5 травильних ваннах 12. Найбільш концентрований, свіжий розчин кислоти (наприклад, 20…23% H_2SO_4 у воді) знаходиться в останній за рухом смуги ванні. У міру збіднення розчин переливають до попередньої ванни і т.д. У першій ванні концентрація розчину складає приблизно 10%, після чого його направляють на регенерацію.

З останньої травильної ванни стрічка надходить на промивання спочатку холодною, а потім – гарячою водою. Після цього смуга обдувається гарячим повітрям.

У хвостовій частині агрегату зі смуги вирізують місця зварювання на ножицях поперечного різання 17, обрізають її бічні кромки на дискових ножицях поздовжнього різання 18, промаслюють поверхню металу, змотують смугу в рулони на моталці 21.

Зрозуміло, що головна і хвостова частини агрегату працюють з періодичними зупинками, які зумовлені часом на зварюванням смуг (в головній частині) і вирізання місць зварювання або розрізання нескінченної стрічки на рулони мірної маси (у хвостовій частині). Разом з тим, швидкість руху смуги через травильні ванни (середню частину агрегату) має бути постійною та узгоджуватись з часом травлення. Це забезпечується

включенням до складу агрегату *накопичувачів* смуги (петльових ям) 9 та 16, де на роликах утворюється запас стрічки у вигляді петлі. Під час зварювання та зняття грата смуга надходить у травильні ванни з петльової ями 9; після завершення зазначених операцій головна частина агрегату починає працювати з підвищеною швидкістю, завдяки чому в петльовій ямі знову створюється запас смуги. Аналогічну функцію виконує петльова яма 16 в хвостовій частині травильного агрегату: поки вирізують місця зварювання, смуга накопичується в цій ямі, а потім хвостова частина агрегату включається в роботу на підвищеній швидкості.

У травильних відділеннях волочильних цехів травлення може здійснюватись за схемою безперервного травлення (*див. рис. 1.47*) або у бунтах (мотках заготовки/дроту). Після промивання такого травленого металу проводять нейтралізацію поверхневих залишків кислоти, яку часто об'єднують з нанесенням підмастильного шару, наприклад, у киплячому 15…18% водному розчині вапна. Корисною після цього є операція обробки металу гарячим (до 300 ^{0}C) повітрям упродовж 20…60 хв. для запобігання водневого охрупчування.

Травлення труб-заготовок також здійснюють пакетами або поштучно згідно з представленою схемою.

Крім розглянутих травильних агрегатів горизонтального типу існують агрегати такого ж призначення баштового типу. За складом обладнання в головній і хвостовій частинах вони майже не відрізняються, але сам процес травлення забезпечується по іншому. Середню частину травильних агрегатів баштового типу розміщують у будівлі (вежі) висотою близько 70 м, де смуга, що проходить, розташовується у вигляді довгих вертикальних петель. Травлення ведеться *струменевим способом*: на поверхню металу через сопла подається кислотний розчин, який, стікаючи вниз, омиває смугу з усіх боків і розчиняє окалину. У нижній частині башти встановлений бак для збору кислотного розчину. Травильних ванн агрегати баштового типу не мають, що є їх основною перевагою. Крім того, вони більш компактні, займають меншу територію, але вимагають наявності високих будівель, і складні в обслуговуванні.

Максимальна швидкість проходження смуги через травильні агрегати безперервної дії знаходиться в межах 3…6 м/с, а їх продуктивність становить при сірчанокислотному травленні 0,9…1,5 млн. т/рік, при солянокислотному – 1,5…2,3 млн. т/рік. Продуктивність травильних агрегатів періодичної дії у 3…5 разів менше.

Останнім часом для аналогічних цілей стали застосовувати спосіб очищення металу, ґрунтований не на розчиненні окалини, а на відновленні оксидів заліза і легуючих елементів *в розплавах лугів*.

Найчастіше для цієї мети використовують гідрид натрію, який відновлює окалину до металевого стану або до оксидів, легко розчинних у кислотних розчинах. При використанні такого методу запобігаються втрати металу при одночасному збільшенні продуктивності процесу і поліпшенні якості очищення.

Проте висока вартість гідриду натрію і трудомісткість процесу дозволяють застосувати його тільки в тих випадках, коли використання інших, дешевших способів очищення не може забезпечити необхідну якість поверхні.

Способи механічного очищення ґрунтовані на застосуванні різних механічних засобів, які призводять до руйнування зв'язку окалини з основним металом і подальшим її видаленням. Частково ці способи використовуються в травильних агрегатах безперервної дії (*див. рис. 1.47*).

У промисловості механічне очищення металовиробів від окалини здійснюється шляхом [48]:

– обстукування виробу та вибивання окалини;

– очищення за допомогою щіток і голкофрез;

– знакозмінного вигину металу;

– дробоструминного очищення за допомогою суміші дробу у потоці стислого повітря;

– дробометного очищення;

– абразивного шліфування;

– термічної обробки;

– обробки струменем води високого тиску.

Обстукування виробу та вибивання окалини – найдавніший, найпростіший та найменш ефективний спосіб такої обробки. Він іноді застосовується для видалення окалини з бунтів катанки перед волочінням та здійснюється шляхом ударного впливу на метал дерев'яними колотушками.

Очищення металевими щітками, виготовленими із сталевого дроту, можна здійснювати як вручну, так і за допомогою спеціальних пневматичних машинок.

Одним з прогресивних способів видалення окалини або іржі з поверхні металу є *голкофрезерування*. Суть його полягає в тому, що спеціальним різальним інструментом – голкофрезою – зрізують тонкий шар металу завтовшки декілька сотих міліметра. При цьому, поверхня металу повністю очищається від окалини. Широкому впровадженню цього способу заважає знос та вартість інструменту.

Очищення знакозмінним вигином заготовки ґрунтується на відмінності в механічних властивостях окалини і основного металу. При такій обробці поверхневі шари смуги послідовно отримують невеликі (2…5%, за деякими даними – до 9% [48]) пластичні деформації розтягнення (на поверхні зовнішнього радіуса) та стискання (на поверхні внутрішнього радіуса). Оскільки окалина є крихким матеріалом, в ній виникають тріщини, відшарування, і вона обсипається. Лусочки, що залишилися, легко видаляються щітками.

Знакозмінний вигин стрічки в одній площині здійснюють її протягуванням через 2…5 роликів (рисунок 1.48, *а*). Якісніше видалення окалини досягається забезпеченням вигину в двох взаємно перпендикулярних площинах (рис. 1.48, *б*). Для цього ролики однієї групи розташовують вертикально, а другої – горизонтально. Зазвичай за роликами встановлюють щітковий очисний пристрій.

Суть способу *дробоструминного очищення за допомогою стислого повітря* полягає в тому, що на поверхню металу струменем стислого повітря спрямовують потік дробу, при зіткненні якого з металом відбувається руйнування окалини та її видалення.

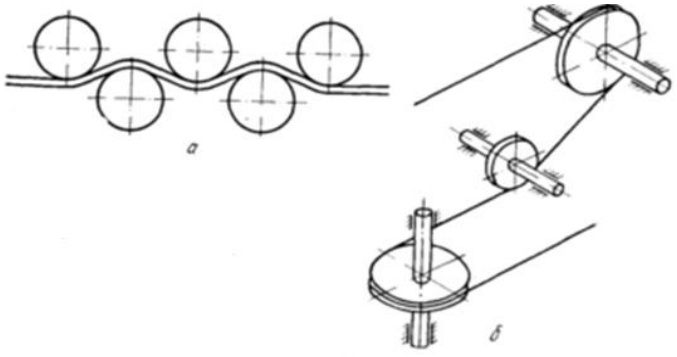


Рисунок 1.48 – Схеми видалення окалини вигином: *а* – в одній площині; *б* – у двох площинах [48]

Дробометне очищення, здебільшого, невеликих виробів (поковок) здійснюють струменем металевого дробу, який викидається на виріб лопатками колеса турбіни, що швидко обертається. Швидкість часток дробу діаметром 0,5…2 мм сягає 60 м/с. Очищення проводять у спеціальних дробометних барабанах, в яких металеві вироби знаходяться на поворотній нескінченній стрічці. При обертанні стрічки поковки перевертаються, що створює добрі умови для їх очищення (рисунок 1.49, *а*).

У порівнянні з дробоструминним очищенням дробометний спосіб відрізняється набагато більшою продуктивністю, меншими витратами енергії для надання потоку дробу заданої швидкості і широкими можливостями регулювання основних параметрів процесу.

Рисунок 1.49 – Схема очищення поковок в дробометним способом (*а*) і у галтовочному барабані (*б*) [48]

Недоліком такого способу є значні витрати дробу, що кришиться (2,5…3,5 кг на 1т поковок) та знос колес турбіни.

Економії дробу досягають при *галтовці.* При цьому, порівняно дрібні вироби простої конфігурації (масою до 50 кг) завантажують в обертовий барабан разом з металевими «зірочками», абразивним боєм і т. п. При обертанні барабану (рис. 1.49, *б*) поковки перекочуються, вдаряються об зірочки та одна об одну, тим самим очищаючись від окалини ударно-абразивним шляхом. Продуктивність стандартного барабану – до 2 тонн виробів на годину. Недоліком способу є високий рівень одноманітного шуму при роботі барабанів, що дуже втомлює персонал, а також неможливість очищення внутрішніх порожнин виробів.

Абразивне шліфування для зняття окалини («світління металу») полягає в знятті абразивним кругом шару окалини в певних місцях поверхні виробів з метою виявлення поверхневих дефектів. Світління здійснюють «змійкою», кільцями і суцільне.

Світлінню «змійкою» і кільцями, як правило, піддають круглий прокат з діаметром перерізу більше 25 мм. Ширина «доріжок шліфування» – 20…30 мм, крок 200…400 мм. При світлінні металу квадратного перерізу «змійка» обов'язково повинна охоплювати ребра, оскільки в цих місцях найчастіше можливі дефекти.

Термічний метод очищення поверхні металу від окалини ґрунтований на різних коефіцієнтах лінійного розширення окалини і основного металу.

При нагріванні поверхні металу до достатніх температури та швидкості її зміни окалина тріскається та відділяється від металу. Частки окалини мають розмір від 1,5 до 2,5 мм.

Для нагріву поверхні металу газокисневим полум'ям користуються спеціальними пальниками, так званими «вогневими щітками» (рисунок 1.50) або індуктором.

Представлені способи очищення металу реалізуються, здебільшого, як технологічні *непотокові* впливи на дискретні вироби.

Потокова *обробка заготовки струменем води високого* (100…150 атм) *тиску* здійснюється на більшості станів гарячої деформації металів безпосередньо перед потраплянням металу в осередок формозмінення. Для цього використовуються спеціальні насоси та відповідне оснащення (форсунки, трубопроводи тощо), які розміщують перед робочими валками прокатних станів. Використання таких способу та обладнання повязане з наступним очищенням води від окалини та можливістю використання останньої в якості складової сталеплавильної шихти.

Різання металу в металургійних цехах застосовують на всіх стадіях виготовлення металовиробів, починаючи з відокремлення головної частини злитків перед їх прокаткою на обтискних станах (блюмінгах або слябінгах – *див. нижче*), розкрою прокату на необхідні

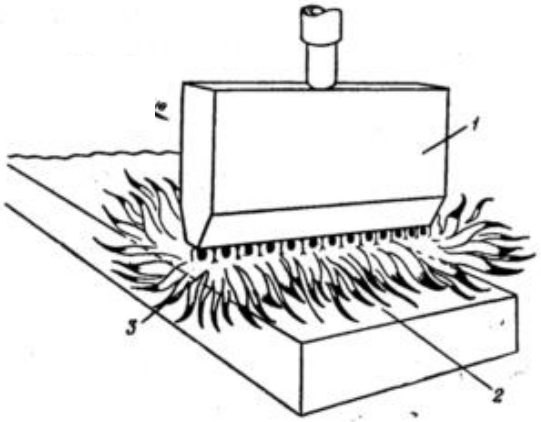


Рисунок 1.50 – Схема роботи «вогневої щітки»: 1 – мундштук пальника; 2 – поверхня, що очищається; 3 –полум'я, що спрямоване на метал [48]

довжини перед подальшим деформуванням або охолодженням і закінчуючи вирізкою дефектних місць та проб для контролю якості металу. Це одна з важливих операцій сортопрокатного та листопрокатного виробництва, що полягає у відрізанні переднього і заднього кінців розкату, подовжньому обрізанні кромок чи розділенні широкої стрічки на вузьки, а також в різанні смуги, що вийшла зі стану, на замовлені довжини. Окрім цих основних функцій, операцію різання також використовують для відсікання смуги в момент аварії (на безперервних станах).

Операцію здійснюють в холодному або гарячому стані металу.

Різання металу здійснюють ножицями, пилами, абразивними кругами, а також із застосуванням високоенергетичних впливів: анодно-механічного, плазменого, вибухом.

Різання ножицями блюмів, слябів і заготовок здійснюють при 800…1100 °С, а середньосортного і дрібносортного прокату, штрипсів, стрічки і смугових профілів, а останнім часом – і деяких великих сорторозмірів фасонних профілів (сталі кутової, швелерів і двотаврових балок), здебільшого – у холодному стані метала.

Різання блюмів, слябів і заготовок здійснюють непрофільованими ножами, а сортовий прокат у цілях отримання якісного різу – фігурними ножами. Профіль ножів виконують за формою перерізу прокату, який піддають різанню.

Для поперечного різання прокату використовують *гільйотинні ножиці* з паралельними або похилим ножами.

Різання на ножицях з паралельними ножами здійснюється одночасно по всій ширині різу. Кривошипні ножиці з похилим ножем застосовують зазвичай для холодного розрізання листа товщиною від 0,5 до 30 мм і більше при довжині різа до кількох метрів (рисунок 1.51).

Двокривошипний вал 3 листових ножиць з маховиком 4 обертається електродвигуном за допомогою клиноремінної і зубчастої передач. Лист кладуть на стіл 7, на якому він фіксується притиском (на схемі не показаний), і розрізають ножами – верхнім рухомим 2 і нижнім нерухомим 1. При русі верхнього ножа 2 униз лист розрізається не по всій його ширині одночасно, а поступово (окремими ділянками). Це в кілька разів зменшує силу різання в порівнянні із зусиллям, необхідним для розрізання того ж матеріалу на ножицях з паралельними ножами.

Притиск приводиться в дію важільно-кулачковим пристроєм. Кривошипний механізм ножиць включається муфтою 5. Керують ножицями з пульта 6 або педаллю 8.

Для отримання необхідної форми і розмірів смуг і заготовок застосовують передні, задні, бічні упори. Для усунення прогину довгих заготовок при розрізанні застосовують підтримуючі пристрої.

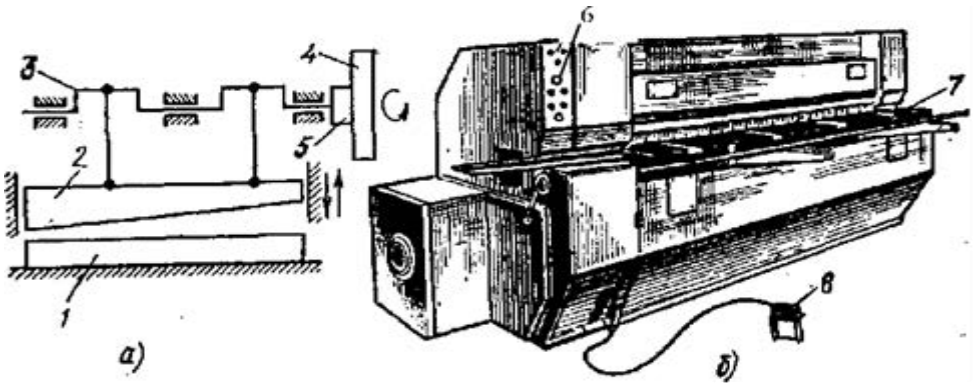


Рисунок 1.51 – Гільйотинні кривошипні ножиці з похилим ножем:
а – кінематична схема; *б* – загальний вигляд (*позначення позицій – у тексті*) [65]

Ножі для ножиць виготовляють цілісними зі сталі У8А, У10А, Х12, Х12Ф та ін. або збірними зі сталі 45 або 50 з ріжучою вставкою зі сталей 6ХС або Х12Ф1. У залежності від виду матеріалу і, особливо, його твердості застосовують певну заточку ножів і встановлюють кут нахилу кромки верхнього ножа 2…6°.

Для розрізання широкої рулонної стрічки на вузькі частини у відділеннях оброблення прокату застосовують *дискові ножиці* (рисунок 1.52) з однією або декількома парами циліндричних дискових ножів.

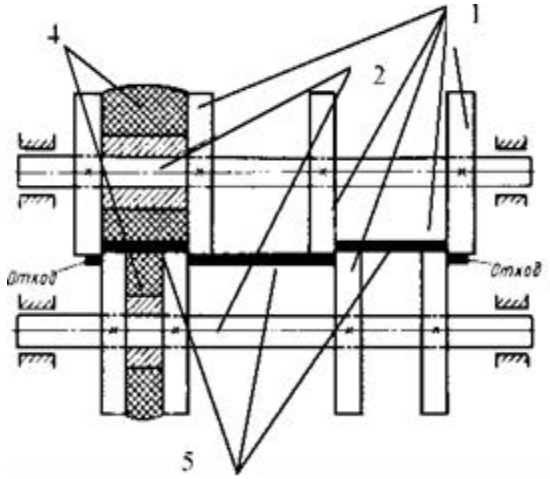


Рисунок 1.52 – Схема відрізки і загальний вид багатодискових ножиць з циліндричними ножами: 1 – циліндричні дискові ножі; 2 – паралельні вали; 3 – електродвигун; 4 – еластичні валки; 5 – розрізана смуга [65]

Циліндричні дискові ножі 1 встановлюють на паралельних валах 2. Ці вали обертаються електродвигуном 3 за допомогою клиноремінної і зубчастої передач.

Ножі самі втягують стрічку. Остання розмотується з однієї котушки і після розрізання намотується на кілька інших, число яких відповідає числу одержуваних стрічок.

На дводискових ножицях за допомогою спеціальних пристосувань та інструменту можна одночасно виконувати *операції гнуття* листового прокату: *згинання* та *відбортовку* (*див. нижче*).

На крупносортних станах прокат, як правило, ріжуть *дисковими пилами* як у гарячому, так і в холодному стані металу.

Перевагою такого різання у порівнянні з ножицями є отримання недеформованого кінця смуги після розрізання. Проте при різанні на пилах частіше утворюються такі дефекти, як задирки і перекос різу.

Стійкість дисків пил, значною мірою, визначається термічною обробкою їх зубів. При цьому, найкращі результати досягаються при застосуванні електроконтактного розігрівання і гартування зубів в олії на спеціальних автоматизованих верстатах, що забезпечують рівномірність механічних властивостей усіх зубів.

За конструкцією дискові пили поділяють на три типи: маятникові, салазкові і важільні.

Маятникова пила може переміщатися уздовж фронту різання. Основним вузлом пили є рама («маятник»), що гойдається та з одного боку шарнірно закріплена на станині, а на іншій її стороні розташований різальний диск.

На ділянці різання встановлюють декілька таких пил з регламентованою відстанню одна від одної. В результаті, смуга розрізається на потрібну кількість заготовок за одну установку.

Салазкові пили поширені ширше, ніж маятникові. Такі пили мають жорсткі направляючі, по яких рухаються салазки, що несуть диск. Головною перевагою салазкових пил являється значне зменшення вібрацій диска і забезпечення більш високої якості різу. Основний недолік цих пил полягає в тому, що направляючі салазок не захищені від попадання окалини, швидко зношуються, і це призводить до погіршення якості різу.

Пили важільного (радіально-важільного) типу, що отримали поширення останніми роками, позбавлені цих недоліків. У них ріжучій диск закріплюють у важільному механізмі, який розташований над рівнем різання та забезпечує можливість наближення пили до прокату, що ріжеться, під різними кутами.

Різновидом різання дисковими пилами можна вважати *абразивне різання*, яке здійснюється диском без зубців, виконаного з абразивного матеріалу (наприклад, спеченого, із швидкорізальної сталі та ін.).

На режими абразивного різання істотно впливають діаметр диска, швидкість різання, величина подачі і осциляції, охолодження диска і властивості оброблюваного металу.

Перевагами абразивного різання металу в порівнянні з іншими способами є: висока чистота і перпендикулярність різу, особливо, при різанні важкооброблюваних різанням сталей і сплавів.

Серед високоенергетичних способів різання на металургійних заводах спеціальних сталей і сплавів поширено *анодно-механічне різання.*

Цей спосіб реалізується завдяки підключення металу, який розрізається, до позитивного електроду джерела постійного струму, що робить метал анодом. Катодом при цьому стає інструмент – диск зі Сталі 10 або Сталі 15, чи міді товщиною 0,5…0,8 мм або стрічка шириною декілька мм. Відносна швидкість пересування поверхні інструменту до 20 м/с. У контакт між металом та катодом уводять рідину з малою струмопровідністю, наприклад водний розчин рідкого скла. При русі поверхні катода відносно анода при електричній напрузі 20…30 В і силі струму від декілька десятків до декількох сотен ампер (у залежності від товщини металу) при тиску до 120 Н/м^2 виникають знос рідкої плівки та часті короткі замикання. Завдяки цьому підвищується місцева температура, і катод ріже (розділяє) метал.

Цей спосіб має ряд переваг перед іншими способами, найголовнішими з яких є:

– можливість обробки будь-яких струмопровідних матеріалів незалежно від їх фізико-механічних властивостей;

– застосування в якості інструменту матеріалів меншої твердості і вартості, ніж оброблюваний метал;

– мала ширина різу і необмежені можливості розрізання металу великих перерізів у будь-якому напрямі;

– простота конструкції устаткування і невисока його металоємність.

Продуктивність анодно-механічного різання і чистота поверхні різу залежать від електричних і механічних параметрів процесу, теплопровідності і температури плавлення металу, який розрізають, а також від кількості рідкого скла, що потрапляє в зону різання.

Недоліком способу є пористість місць різу, яка на великих перерізах може доходити до декількох мм від торця.

При *плазмовому різанні* джерелом нагріву металу є плазмова дуга, яка у порівнянні з газокисневою має істотні технологічні переваги. Змінюючи витрату плазмоутворюючого газу та міру стискування дуги, можна у широких межах регулювати її температуру і концентрацію теплового потоку.

Формування плазмової дуги здійснюється в плазмотроні.

Плазмове різання сортового прокату пов'язане з рядом утруднень:

– необхідність частих включень і виключень дуги;

– нестабільність процесу через коротку зону різу;

– складність здійснення руху плазмової голівки по камері відповідно до конфігурації профілю, що розрізається.

Імпульсне різання – це відносно новий спосіб різання металу, що ґрунтується на використанні енергії вибуху.

Суть способу полягає в тому, що жорсткому тілу з пластиною-ножем енергією вибуху надається велика швидкість руху (10…300 м/с). Ножі миттєво вдавлюються в метал, розділяючи його на частини.

Принципова схема імпульсної машини для різання гарячого металу представлена на рисунку 1.53.

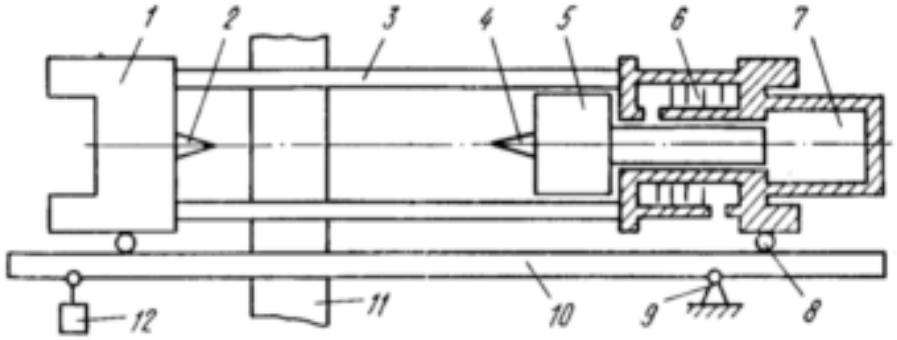


Рисунок 1.53 – Схема імпульсного різання металу вибухом (*позначення позицій – у тексті*) [65]

Процес різання протікає таким чином. У камеру згорання 7 у необхідній кількості подається горюча речовина (природний газ, пропан-бутан або бензин) і повітря під тиском 50 атм, після чого здійснюють займання суміші. Збільшений тиск штовхає шток 5 з ножем 4 до заготовки, а камера згорання під дією енергії віддачі відкочується на катках 8 по рамі 10 в протилежну сторону, захоплюючи за собою через колонни 3 утримувач 1 з ножем 2. Внаслідок різниці мас відкотних частин і штока їх швидкості руху, а отже – і прохідні ними шляхи будуть різними. Відстань від кромок ножів до поверхні заготовки 11 за

безпечує одночасне занурення ножів у метал. У кінці ходу шток відкриває вихлопні вікна, і відпрацьовані гази викидаються у глушник 6, а з нього – назовні. Після закінчення процесу різання гідросилова система повертає рухливі частини машини в початкове положення. Процес різання протікає практично миттєво – соті долі секунди, причому усі виникаючі зусилля замикаються усередині системи і не передаються на фундамент. Установка машини у вертикальній площині здійснюється за рахунок підйому рами 9 за допомогою гідроциліндра 12.

Правку металу використовують як з метою надання прокату товарного виду за геометрією, а у ряді випадків – за станом поверхні, так і для забезпечення можливості наступного здійснення необхідних обробних операцій (світління, абразивну зачистку, зняття задирок тощо). При цьому, відповідним критерієм оцінки якості прокатної продукції (згідно нормативних вимог) є виконання норм та виміряні показники викривлень штанг у

стані постачання: місцева подовжня кривизна (реброва і по площині), загальна кривизна, кінцева кривизна, скрученість смуги навколо подовжньої осі.

Процес правки прокату здійснюють за рахунок пластичної деформації металу. Суть правки полягає в утворенні в металі шляхом деформації залишкових напружень, які сприяють виправленню виробів.

Правку здійснюють одно– або багаторазовим вигином виробу роликами, на пресі або розтягуванням.

Правку на роликах здійснюють за допомогою роликоправильних машин (рисунки 1.54 та 1.55).

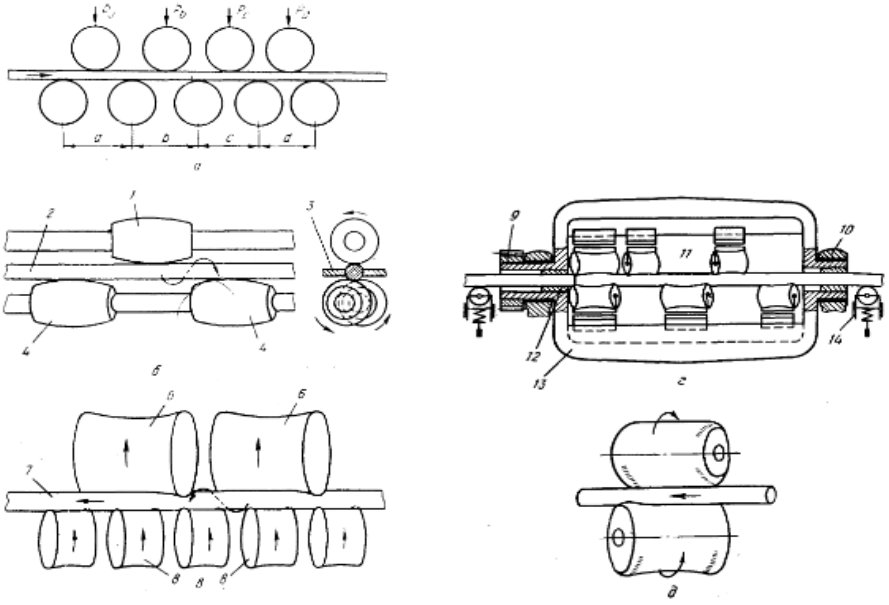


Рисунок 1.54 – Схеми правки роликами: *а* – багатороликова правильна машина; *б* – правильна машина з косими опуклими роликами; *в* – правильна машина з косими увігнутими роликами; *г* – лопатева правильна машина; д – двороликова правильна машина з увігнутим і циліндричним роликами (*пояснення позицій – у тексті*) [65]

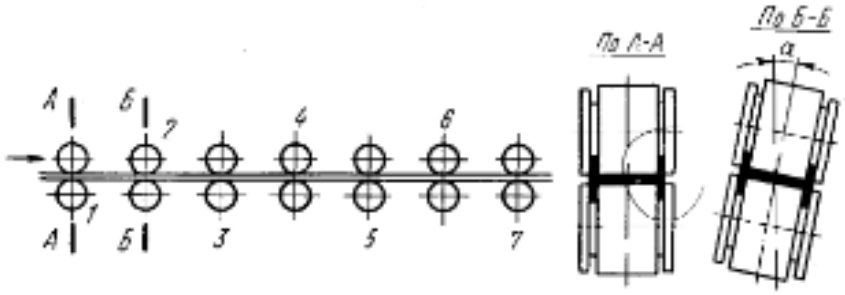


Рисунок 1.55 – Схема правки металу з обмеженим крученням [65]

Залежно від розмірів оброблюваних профілів прокату усі роликоправильні машини умовно поділяють на крупно-, середньо– і дрібносортні, а за призначенням і способом здійснення деформації вигину смуги – на наступні типи машин:

– одноплощинні з паралельно розташованими правильними роликами;
– двоплощинні з паралельно розташованими правильними роликами;
– ті, що працюють за системою коливальних роликів;
– ті, що працюють за принципом обмеженого кручення;
– з двома і більше косорозміщеними правильними роликами.

Машини першого та останнього з наведених типів широко застосовують для правки профілів прокату різних розмірів. Правильні машини II, III і IV типів використовують для правки обмеженого сортаменту профілів.

Одноплощинні правильні машини застосовують для виправлення подовжньої кривизни прокату багатократним вигином смуги в правильних роликах, розташованих паралельно один одному (*див. рис. 1.54, а*). Ролики зверху і знизу смуги розташовують, як правило, в шаховому порядку.

Правка на таких правильних машинах полягає в наступному. На перших роликах (за ходом руху смуги) усувається максимальна кривизна обох знаків; надалі виправляється найбільша залишкова кривизна, що виникає в результаті вигину прямолінійної ділянки попереднім роликом. З кожним черговим роликом величина прогинів зменшується.

Правильні ролики косовалкових правильних машин виконують з опуклими (*див. рис. 1.54, б, д*) та увігнутими у вигляді гіперболоїда (*див. рис. 1.52, в, г*). Останній характеризується тим, що пряма лінія, спрямована під будь-яким кутом до його осі, усіма своїми точками стикатиметься з його поверхнею. Завдяки такій властивості правильних роликів викривлений пруток круглого перерізу, потрапляючи в проміжок між ними, прагне зайняти прямолінійне положення, що і дає ефект правки.

Принцип правки обмеженим крученням (*див. рис. 1.55*) полягає в тому, що смуга проходить через декілька пар правильних роликів (на схемі – №№ 1…7), розташованих не в шаховому порядку, а один над іншим. Кожна пара роликів знаходиться у вертикальній площині, перпендикулярній напряму руху смуги. Перша, третя, п'ята і сьома пари робочих роликів розташовані в нерухомих блоках. Друга, четверта і шоста пари розміщені в блоках, які можуть обертатися відносно попередньої на деякий кут. Кручення, що надається прокату, сприяє його випрямленню.

Суть *правки на правильних пресах* полягає в противигині викривлених місць виробу, розміщеного на упорах, пуансоном пресу.

Спосіб застосовують для правки сортових профілів великих розмірів (двотаврових балок заввишки більше 600 мм; залізничних рейок усіх типів і т. д.) і прокату з матеріалів, що важко деформуються, круглого і квадратного профілів з характеринм розміром перерізу 180 мм і більше.

На практиці для цього використовують преси односторонньої та двосторонньої дії трьох типів: вертикальні, горизонтальні і похилі.

Основними недоліками такого способу правки є залежність якості правки від суб'єктивних навичок і умінь робітника та відносно низька продуктивність.

Правку розтягуванням здійснюють за допомогою спеціальних правильно-розтяжних машин. Вони можуть бути поділені на три групи, призначені для правки:

– простим розтягуванням;

– розтягуванням з підігріванням;

– розтягуванням з розкручуванням.

Суть цих різновидів правки полягає у забезпеченні в поверхневих шарах викривлених стержнів напруження, що відповідає межі текучості метала. У цьому разі залишкові напруження після деформації сприяють виправленню подовжної геометрії виробу.

Правильно-розтяжні машини застосовують для правки прокату з різних металів. Ефективність застосування цього способу правки зумовлена можливістю правки виробів будь-якої конфігурації з високою точністю. Додатково, при контрольованій деформації профілі круглої форми після правки розтягуванням мають однаковий діаметр по усій довжині. Тому такий процес можна застосовувати для калібрування (з малими обтисненнями) замість волочіння.

До основних недоліків правки на правильно-розтяжних машинах слід віднести порівняно низьку продуктивність процесу і витрати металу, пов'язані з необхідністю відрізки кінців виробів, які знаходилися в затискних пристроях машини.

Зачистку (***суцільну і вибіркову)*** виробів (прокату) використовують для видалення поверхневих дефектів.

Суцільну зачистку застосовують у разі значної ураженості прокату поверхневими дефектами; *вибіркову* – за наявності на поверхні виробів одиничних дефектів або невеликих дефектних ділянок. Вибірковій зачистці часто передує світління або травлення (*див. вище*) для виявлення і позначення дефектів.

Видалення дефектів з поверхні прокату є специфічною областю різання металів. Її особливостями є наступне:

– найбільша доля такої обробки припадає на важкооброблювані нержавіючі, інструментальні та високолеговані сталі і сплави;

– зачистка злитків, слябів і заготовок в умовах неточності подовжної та поперечної геометрії прокату й його дефектів, як правило, здійснюється до повного видалення усіх виявлених дефектів, і об'єм роботи заздалегідь визначити неможливо;

– глибина припуску, що може мати неоднорідні фізико-механічні властивості та видалятися, сягає 10 мм на сторону і більше, що зумовлює перевід значної кількості металу у відходи;

– існує тенденція зачистки металу в технологічному потоці основних металургійних агрегатів, що у ряді випадків визначає високий темп обробки металу.

На металургійних заводах застосовують наступні способи зачистки:

– вогневий;

– абразивний у холодному і нагрітому стані;

– лезвійний у холодному і нагрітому стані;

– дробоструминний;

– електричний та електрохімічний (хімічний).

Рішення щодо вибору способу зачистки і відповідного устаткування приймають з урахуванням якісних переваг того або іншого способу.

Вогнева зачистка – процес, при якому в розігріте до температури плавлення реакційне середовище на поверхні металу під певним кутом направляють струмінь чистого (різального) кисню. Виникає безперервна екзотермічна реакція окиснення заліза в потоці кисню, що зумовлює температуру 2500…3100 °С, плавлення та згорання за частки секунди *поверхневого* шару, де розташований дефект. Основна ж маса металу не встигає досягти тих температур, при яких в сталі відбуваються структурні зміни. Розплавлений метал енергією струменя різального кисню видаляється з поверхні прокату, що зачищається.

При вогневій зачистці нормативними документами на відповідний виріб регламентуються глибина (не більше 10% товщини металу), ширина (має бути не менше шестикратної глибини) та довжина (має бути не менше трикратної довжини) місць зачистки. Порушення вказаних вимог може спровокувати появу закатів (*див. далі*) при наступній прокатці.

Перевагами цього способу є те, що він може бути застосований потоково з високою продуктивністю при зачистці широкого сортаменту сталей при відносно низьких втратах металу. Цим способом вручну або з використанням машини вогневої зачистки обробляють більше 90% блюмів, слябів і заготовок.

Недоліком вогневої зачистки є те, що неможлива обробка ним деяких високолегованих сталей і сплавів, відходи зачистки малоцінні, а якість обробленої поверхні низька.

Ручну вогневу зачистку здійснюють різаком, що працює на ацетилені, коксівному або природному газі, для вибіркового видалення невеликих поверхневих і глибоких дефектів одним з методів: «подовжними канавками» і «ялинкою» (рисунок 1.56).

Машинна вогнева зачистка реалізує аналогічні функції в механізованому (автоматизованому) режимі. Машини вогневої зачистки (МВЗ) можуть бути встановлені в потоці прокатних агрегатів (станів) або як окремі установки на ад'юстажах обтискно-заготівельних станів. Важливим аспектом як з точки зору продуктивності МВЗ, так і

величини відходів металу при зачистці є зняття оптимального по товщині поверхневого шару металу. Після машинної вогневої зачистки нечисленні та глибоко залягаючі дефекти доцільно усувати вибірково ручним або механізованим способом на ад'юстажі.

а *б*

Рисунок 1.56 – Вогнева зачистка «подовжньою канавкою» (*а*) і «ялинкою» (*б*) [66]

Абразивна зачистка (шліфування) є обробкою прокату абразивним інструментом (абразивні круги, бруски, шкірки тощо). Цей процес можна розглядати як мікрорізання, що багаторазово повторюється з високою швидкістю.

Перевагами абразивної зачистки металу з точки зору потреб чорної металургії є можливості:

– суцільної та вибіркової зачистки, навіть на одному і тому ж устаткуванні;

– обробки будь-яких металів незалежно від їх виду, твердості, температури;

– обробки з великою продуктивністю великих площ, що характерно при зачистці листів, слябів, блюмів, злитків тощо з регулюванням товщини шару металу, що знімається, у межах від малих (0,03…0,05 мм – для листів) до значних (10…15 мм – для заготовок) та з плавним переходом від оброблених до необроблених поверхонь;

– забезпечення регульованої якості поверхні, що підвищує вихід придатного;

– відносна легкість механізації і автоматизації процесів зачистки і можливість застосування абразивної зачистки в умовах практично будь-якого виробництва.

Недоліком цього способу зачистки є відносно високі витрати на інструмент, що обмежує продуктивність зачистки.

У чорній металургії використовують, в основному, такі різновиди шліфування:

– пласке (для пласких поверхонь листів, слябів, блюмів і т. п.) периферією шліфувального круга (з подовжньою або поперечною подачею виробів; з комбінацією обох видів подач);

– кругле зовнішнє (для круглих виробів типу трубної заготовки, штанг, заготовки для волочіння тощо) – периферією шліфувального круга в центрах або на опорах з круговим обертанням виробу, з подовжнім переміщенням виробу, з урізуванням круга вглиб виробу, з комбінацією всіх цих подач;

– кругле зовнішнє безцентрове, що застосовується при суцільній зачистці поверхні або для отримання точних розмірів по діаметру круглих виробів.

Шліфувальні верстати і машини плоскої та круглої абразивної зачистки периферією шліфувального круга за характером роботи можна поділити на дві основні групи:

– шліфувальні верстати, які працюють з жорстким притиском інструмента (шліфувального круга) до виробу, що забезпечує приблизно постійну глибину шліфування;

– машини з постійним тиском на абразивний круг, працюють зі змінною глибиною шару металу, що вилучається, залежною від швидкості подання виробу, міри затуплення круга й інших чинників, що впливають на процес мікрорізання.

Безцентрове шліфування є однією з найважливіших операцій при виготовленні прутків. При цьому, прутки при обробці проходять між шліфувальним і провідним кругами по опорному ножу, отримуючи обертання й осьове пересування. Швидкість обертання

прутків встановлюють безступінчастою зміною частоти приводу обертання провідного круга.

Абразивну обробку прокату можна також здійснювати *стрічковим шліфуванням*, що все частіше застосовують у промисловості.

Шліфувальні стрічки порівняно з кругами мають ряд переваг, основними з яких є висока продуктивність і якість обробки поверхні, еластичність інструменту, що дозволяє обробляти складні поверхні, ефективна можливість застосування мастильно-охолоджувальних середовищ; відсутність необхідності у балансуванні і правці, плавність і безударність роботи інструмента, простота використання та заміни, постійність швидкості шліфування при зносі тощо.

Лезвійна зачистка є різновидом обробки металів різанням. В якості різального інструмента використовують пневматичні молотки, голкофрези та ін. Цим способом обробляють злитки, великі поковки і заготовки.

Перевагою лезвійної зачистки є можливість обробки металу в нагрітому стані, задовільна якість обробленої поверхні та забезпечення прийнятної якості відходів у вигляді металевої стружки, наприклад, зі сплавів з дефіцитними легуючими або коштовними металами.

Недоліками цього способу є складність створення систем стеження, які контролюють кривизну поверхні металу і наявність окремих дефектів, а також обмежена продуктивність при обробці металів, які важко деформуються.

Лезвійна зачистка пневматичним рубильним молотком застосовується для видалення (вирубування) окремих глибокорозміщених поверхневих вад злитків, блюмів, слябів і заготовок, а також – готового прокату великого перерізу.

Зачистка обточуванням (обдиркою) – це вид токарної обробки металу. Такому обдиранню піддаються злитки, поверхня яких суцільно уражена заворотами, пленами і газовими пухирями (*див. далі*), розташованими близько до поверхні виробу.

Для видалення дефектного шару з поверхні круглих і конічних злитків застосовуються злиткообдирні верстати різних типів. Обдирання квадратних (гранних) злитків здійснюється на спеціальних верстатах одночасно двома різцями.

Зачистку струганням здійснюють на спеціальних і універсальних подовжньо-стругальних верстатах.

Стругання дає найнижчу продуктивність і великі втрати металу в стружку (до 15% від вихідної маси) у порівнянні з іншими способами суцільної зачистки, тому його застосовують нечасто.

Ще одним способом механічної зачистки прокату лезвійним інструментом є *фрезерування*. Для цієї мети використовують фрезерні верстати і машини, на яких можна суцільно і вибірково зачищати злитки, сляби і готовий прокат в холодному і гарячому станах. В якості різального інструменту тут застосовують дискові та торцеві фрези.

Голкофрезерування – різновид процесу різання металу, при якому стружка зрізується пружно-рухливими різцями – *голкофрезами*

Область застосування голкофрез досить широка: їх застосовують для суцільної зачистки і світління прокату, вибіркової зачистки з керованою чистотою від 1-го до 9-го класів, видалення альфірованого шару на виробах з титанових сплавів, а також – зняття грату зі зварних труб. Голкофрезерування легко піддається механізації та автоматизації в потоці прокатних станів, потребує менші (у порівнянні з абразивною зачисткою) площі.

При голкофрезерній зачистці металів розміри зрізаної стружки наближаються до стружки, зрізаної драчевим напилком. Тому при голкофрезеруванні, як правило, відсутній пил, а стружка легко утилізується.

Слід при цьому мати на увазі, що голкофреза є специфічним різальним інструментом, який повинен проєктуватися для конкретних умов зачистки.

Дробоструминна та хімічна зачистка за суттю та технологією реалізації майже не відрізняється від відповідних способів видалення окалини з поверхні виробів (*див. вище*).

Електрохімічний спосіб зачистки полягає в інтенсивному і строго локалізованому на поверхні виробу анодному розчиненні металу в електроліті (зазвичай – це водний розчин *NaCl*) під дією різниці потенціалів від джерела постійного електричного струму.

Певний розвиток останніми роками отримали *електрофізичні способи видалення поверхневих дефектів металу*.

До них відносяться: електроконтактна, легкодугова, плазмова зачистка металу і плазмова переплавка поверхневого шару заготовок.

Перспективність *електричних способів зачистки*, які розвиваються швидкими темпами, пояснюється наступними їх перевагами:

– можливість концентрації значної енергії на порівняно малих площах, що дозволяє здійснювати інтенсивну зачистку металу в потоці металургійних агрегатів;

– відсутність обмежень, пов'язаних з фізико-механічними та температурними властивостями оброблюваних металів;

– менша металоємність устаткування, ніж при обробці різанням і шліфуванням;

– високий рівень керованості та автоматизації електричного устаткування для забезпечення заданого технологічного режиму.

Суть *електроконтактної обробки* полягає в тому, що між електродом-інструментом і оброблюваною поверхнею на малій ділянці виробу постійно збуджується електрична дуга, яка за короткий час інтенсивно нагріває міжелектродний простір і розплавляє метал в зоні контакта. Розплавлений метал видаляється із зони обробки диском, що швидко обертається.

Перевагою цього методу є його простота при значних швидкостях знімання металу і невисоких питомих витратах електроенергії, а недоліками – знос інструмента, високий рівень шуму і газовиділень, необхідність використання джерел енергії великої потужності.

Суть *легкодугової зачистки* поверхні прокату, яку застосовують для видалення місцевих дефектів поверхні, полягає в тому, що розплавлений теплом електричної дуги метал видувається із зони обробки струменем стислого повітря.

Недоліком способу при використанні вугільного або графітового електроду стає навуглецювання і підвищення твердості кромок оброблюваної поверхні металу.

Інтенсивний процес *зачистки злитків плазмою* супроводжується яскравим світловим випромінюванням, шумом, виділенням газу і пари. Для захисту оператора користуються металевим екраном, біля місця зачистки треба передбачати вентиляційне відсмоктування. Недоліками плазмової установки з водяною стабілізацією дуги також є незручність запалення дуги, недостатня надійність механізму подання і обертання електроду, низька стійкість графітизованного електроду.

Плазмова переплавка поверхневого шару заготовок – це відносно новий технологічний процес, який передбачає рафінуючу переплавку в контрольованій атмосфері поверхневого шару злитків і безперервнолитих заготовок без його видалення. При цьому утворюються сприятливі умови виведення з поверхневого шару усіх макроскопічних дефектів. Втрати металу при цьому практично відсутні.

Нанесення покриттів на металовироби

Вище вже було відмічено, що всі процеси перероблення металів, а також експлуатація металовиробів супроводжуються корозією. Тому захист металевих виробів від неї визначає найважливішу науково-технічну проблематику.

Розрізняють два види корозії: хімічну і електрохімічну [67].

Хімічна корозія відбувається у середовищах, які не проводять електричного струму. Вона зумовлюється дією на метали неелектролітів (спирту, бензину, мінеральних масел тощо), а при високій температурі – сухих газів (кисню, оксидів азоту, хлору, хлороводню, сірководню тощо).

У результаті таких взаємодій поверхня металу вкривається тонким шаром (плівкою) різних хімічних сполук («*продуктів корозії*»): оксидів, хлоридів, сульфідів і т. д. Інколи

щільність такого шару запобігає проникненню агресивного середовища до основного матеріалу.

Електрохімічна корозія більш поширена і завдає значно більшої шкоди, ніж хімічна. Вона виникає при контакті двох металів у середовищі водних розчинів електролітів. На відміну від хімічної, електрохімічна корозія супроводжується переміщенням валентних електронів з одної ділянки металу на іншу, тобто виникненням місцевих електричних струмів унаслідок утворення на поверхні так званих *гальванічних пар*.

Завдання щодо захисту від корозії *технологічно* поділяються на захист готового виробу та міжопераційний захист.

У цьому сенсі, з урахуванням призначення та стадії виготовлення виробів розрізняють заходи щодо забезпечення їх *довготривалого* або *тимчасового* захисту.

Довготривалий захист має виконувати захисні функції протягом усього терміну «життя» виробу.

Тимчасовий захист забезпечує якісне зберігання виробу (напівфабрикату) з моменту його виготовлення до початку його використання або експлуатації у виробника чи споживача, включаючи термін зберігання на складах.

Особливість тимчасового захисту металів полягає у застосованні захисних матеріалів, що легко видаляються (або взагалі не потребують видалення) перед початком використання виробу.

За тривалістю дії розрізняють тимчасовий захист металів: короткочасний (3…6 місяців), середньої тривалості (6…12 місяців), тривалий (1…2 роки) та особливо тривалий (більше 2 років).

Тимчасовий захист також призначається для збереження властивостей виробу у процесі виробництва (*міжопераційний захист*) або після його закінчення (*захист готового виробу*). Він може здійснюватись уведенням до мастильно-охолоджуючої рідини антикорозійних добавок при обробці металів, використанням антикорозійних миючих рідин при їх відмиванні після механічної обробки, використанні покриттів та пасиваторів для захисту поверхні, запобіганням попаданню на вироби поту з рук робітників, упаковкою виробів тощо.

Захист готового виробу – остання виробнича операція. Вона полягає в консервації і упаковці (*див. нижче*) готових виробів. Ці операції мають бути виконані безпосередньо після вихідного технічного контролю металевого виробу.

Захист металовиробів від корозії на визначений термін повинен здійснюватися найбільш простими способами з мінімальними витратами.

Найпростішим засобом такого захисту є *консервація за допомогою покриття* на термін, який відповідає вказаному вище виду захисту.

Повна технологія захисту з нанесенням покриттів складається з операцій очищення поверхні виробу (*див. вище*), нанесення на неї консервуючих засобів та пакування (*див. нижче*). Іноді пакування виробу і очищення його поверхні при тимчасовому захисті виявляються непотрібними.

Основною частиною консервації є *нанесення захисних покриттів* на поверхню виробів. Ця операція технологічно може розглядатися не тільки як частина процесу консервації виробів, але й як самостійна технологія при виготовленні деяких специфічних видів продукції (лист з металевими або полімерними покриттями, оцинкований дріт, емальований посуд тощо). Тому доцільним є компактне представлення відповідних технологій.

Захисні покриття мають бути суцільними, непроникними, мати достатню адгезію до основи, можуть надавати виробу спеціальні властивості (твердість, зносостійкість, тепло– або жаростійкість, антифрикційність або збільшення тертя, електропровідність, декоративність тощо) згідно з нормативними документами.

Тривалість захисної дії можна варіювати вибором відповідного матеріалу і товщиною покриття, що наноситься. Матеріал для покриття вибирають з урахуванням

вимог, що пред'являються до якості продукції, технології нанесення покриттів, виду виробу, його розмірів і подальшої обробки.

На практиці захисні покриття поділяють на неметалеві і металеві.

Загальні вимоги до металевих і неметалевих покриттів обумовлені стандартами Єдиної системи захисту від корозії та старіння (ДСТУ 2367, ДСТУ 2639, ДСТУ 2733, ДСТУ 3291). Додатково особливі вимоги викладені у відповідних стандартах на продукцію: лист, труби, дріт, металовироби, або «метизи» з різними покриттями та ін. (ДСТУ ISO 3651-1,2; ДСТУ 3830 тощо, а також згідно з даними Додатку А).

Неметалеві захисні покриття застосовують для тимчасової та довготривалої консервації металевих виробів, надання їм привабливого вигляду та інших споживчих властивостей.

Вибір методу нанесення такого покриття залежить від виду покриття та виробу (матеріалу, стану поверхні, габаритів) та вимог до них, механізму корозії, якому прагнуть запобігти, умов зберігання та транспортування, необхідного часу захисту та економічних факторів.

Матеріали неметалевих захисних покриттів прийнято поділяти на групи: масла і мастила; тонкоплівкові антикорозійні засоби; лаки та фарби; силікатні емалі; полімери; гуми.

Вони створюють *ізолюючий шар* або *захисну плівку* на поверхні металу. Засоби консервації, захисна дія яких полягає в утворенні ізолюючого покриття, менш вигідні, ніж ті, що створюють захисну плівку, оскільки вимагають (при необхідності) трудомісткої розконсервації.

Захисні покриття з масел та мастил використовують як при тимчасовому захисті, так і при тривалому зберіганні і перевезенні металовиробів.

Основним компонентом масляних покриттів можуть бути мінеральне масло: вазелінове, машинне тощо, – з домішками різних речовин (воску, парафіну, церезину, мил, синтетичних смол, бітумів та ін.). Якщо виріб сталевий, то в мастило додатково вводять декілька відсотків лугу, що забезпечує лужне середовище ($pH>7$).

Підвищення корозійної стійкості досягається також уведенням до складу мастильних сумішей різних інгібіторів корозії. Найчастіше застосовують суміші нітрованої олії та стеарину, нейтралізовані гідратом окису кальцію (АКОР-1) або гідратом окису кальцію й азотнокислим кальцієм (АКОР-П), а також інгібітори МНІ від №5 до №10, КП, СПЕК та ін., що вводяться в масло у кількості від 0,5 до 10%.

При додаванні трихлоретилену до олії, вазеліну або їх суміші можна, змінюючи концентрацію розчину, регулювати товщину покриття, що наноситься.

Вказані засоби захисту наносять на металовироби одним з наведених нижче шляхів:

– зануренням в холодне або нагріте масло або масляну емульсію;

– нанесенням з розчинів;

– розпиленням або контактним нанесенням (щіткою, тампоном тощо) холодного або гарячого масла;

– нанесенням густих мастил на холоді;

– заливанням масла.

При консервації металовиробу *зануренням в масло або в масляну емульсію* очищені предмети у кошиках або по одному занурюють у ванну, заповнену консервуючим засобом. При використанні масла обробка триває декілька секунд при температурі 10…30 ºС; при використанні емульсії 2…3 хвилини при температурі 10…60 ºС. Після цього з предметів видаляють залишки консервуючого засобу, наприклад, витримкою на повітрі або підсушуванням теплим повітрям.

Цей метод застосовують для міжопераційного і короткочасного захисту металургійних виробів, дрібних металевих деталей, частин машин, простих збірних вузлів. Для їх захисту на термін більше трьох місяців потрібна їх упаковка.

Як варіант цього методу *консервація зануренням у нагріте масло* здійснюється у ванні, заповненій ним при температурі 70…110 ºС. Для отримання товстих рівномірних, непроникних покриттів, що не містять бульбашок повітря, виріб занурюють у ванну двічі, причому при повторному змащуванні температура ванни має бути на 20 ºС нижче, ніж при першому. Далі виріб охолоджують до кімнатної температури і завертають в парафінований папір. Метод застосовується для тривалого захисту виробів невеликих розмірів.

Консервацію *нанесенням композицій з розчинів* застосовують для короткочасного і тривалого захисту виробів невеликих розмірів, форма яких дозволяє здійснити повне видалення розчинника.

При цьому, добре очищені та поміщені в металеві кошики предмети занурюють на 15…20 с у ванну з розчином захисної композиції у летючому розчиннику. Після вилучення з ванни і витримки на повітрі для стікання залишків композиції предмети поміщають на декілька хвилин у витяжну шафу для випарювання розчинника протягом 20…60 хв. Далі виріб загортають в парафінований папір або в непроникний поліетиленовий чохол. Перед використанням вироби розконсервовують зануренням в органічний розчинник або в гарячу воду.

При консервації *розпиленням або контактним нанесенням масла* матеріал консервації розпилюють за допомогою стислого повітря під тиском 300…500 кПа або щіткою чи тампоном. Цей спосіб є найбільш простим і дешевим при захисті прокату від корозії. В якості захисного матеріалу застосовують консистентні масла: гарматне, технічний вазелін, солідол та ін. Таке покриття стійке при температурах до 30…50 °С. При більш високих температурах шар мастила розріджується, і воно стікає з поверхні металу, який залишається без захисту. Тому варіантом такого способу для об'єктів великих розмірів є використання гарячого (70…100 ºС) масла або нанесення його першого шару на заздалегідь нагріту металеву поверхню з наступним подвійним змащуванням і доведенням товщини покриття до 0,5 мм.

Ще одним різновидом цього способу є метод консервації *нанесенням густих мастил на холоді*, який використовується рідко для зменшення тертя та зносу. При цьому, покриття наносять жорсткою щіткою або пензлем, воно має бути товстим (мінімум 0,5 мм). Таке покриття має бути рівномірним і суцільним, не мати слідів пензля або щітки, а вироби у подальшому потребують розконсервації.

Метод консервації *заливкою масла* використовується для тривалого захисту важкодоступних поверхонь шляхом заливки виробу маслом в ємкості до його верхнього рівня з наступним зливанням надлишків.

Слід мати на увазі, що наявність на металі мастила при його подальших переробленнях у багатьох випадках є небажаним і навіть шкідливим (наприклад, при термічній обробці). Тоді споживачі металу вимушені розконсервовувати метал за допомогою органічних розчинників, що пов'язано зі значними матеріальними витратами. Крім того, цілісність таких плівок легко порушити. З часом під дією середовища настає ослаблення або навіть повна втрата їх захисних властивостей.

Цей процес називається *старінням покриття*. Його головна причина – окиснення вуглеводнів киснем повітря. Тому стан поверхні виробу, захищеного маслами або мастилами, слід періодично перевіряти, і у разі потреби очищати прокородовані місця і заново їх консервувати. Ця операція називається *переконсервуванням металевих виробів*.

Незважаючи на вказані недоліки, масла і мастила залишаються основним простим і економічним засобом тимчасового захисту металів.

Деформування металу часто супроводжується появою так званих *ювенільних поверхонь*, вільних від оксидних шарів та активних щодо прискорення корозії. Тут корисним стає короткочасний захист металовиробів (на строк до декількох тижнів), що може бути досягнутим за допомогою пасивації застосуванням *тонкоплівкових антикорозійних засобів*. Преваги такої пасивації – простота операції, невисока вартість і

можливість отримання грунту під лакофарбні покриття. Недолік – короткочасність ефективної захисної дії.

Пасиваторами, які застосовують для міжопераційного захисту, являються деякі неорганічні солі (фосфати, нітрити, біхромати лужних металів та ін.) або готові концентрати. Бажаний час захисту регулюється концентрацією пасиваторів. У результаті обробки ними на поверхні металу утворюється захисна консерваційна плівка товщиною від декількох до декількох десятків мікрометрів.

Прикладом такої обробки є *фосфатування.* Воно полягає в обробці металовиробу водним розчином фосфорнокислих солей, в результаті чого на його поверхні утворюється шар нерозчинних фосфатів. Зазвичай товщина такої плівки 1…30 мкм.

Для здійснення відповідного процесу температура розчину повинна підтримуватися в дуже вузькому інтервалі (98…100 °С), що супроводжується сильним випаром води. Утворення фосфатного покриття триває впродовж 1…1,5 год. Прискорення процесів фосфатування досягається уведенням до розчину різних хімічних реагентів, а також застосуванням інших особливих прийомів.

В якості прискорювачів процесу широко застосовують окисники – нітрати і нітрити лужних металів, цинку і мангану в кількостях, що перевищують концентрацію самого фосфату в два-три рази, хлорати і гіпохлорати калію та цинку та ін.

Підготовка поверхні металу перед фосфатуванням сильно впливає на кінетику процесу і якість отриманих покриттів. З поверхні металу мають бути повністю видалені окалина і жирові плівки. Тому метал перед фосфатуванням треба піддавати травленню з подальшим видаленням травильного шламу за допомогою механічного очищення щітками.

Найбільш якісна фосфатна плівка утворюється на поверхні, очищеній дробеструменевим або дробеметним способом. У цьому випадку процес фосфатування можна успішно здійснювати безпосередньо після очищення без іншої додаткової обробки. При можливості попадання жирових мастил на поверхню очищеного металу, його необхідно заздалегідь знежирити в 5…10% лужних розчинах при 75…80 °С.

Особливо ретельно треба готувати поверхню металу при холодних способах фосфатування, оскільки навіть незначні забруднення призводять до утворення тонких, нерівномірних за структурою покриттів зі зниженими захисними властивостями.

Фосфатування ефективне для захисту саме низьковуглецевих марок сталей. Наявність інших пасивних плівок на поверхні сплавів (зокрема, легованих і високолегованих сталей) перешкоджає утворенню якісних захисних фосфатних плівок.

Захисні властивості фосфатної плівки дуже обмежені, оскільки вона пориста і крихка. Проте вона характеризується виключно високою адгезією до металу, стійкістю в широкому інтервалі температур (від -75 до 500 °С), нерозчинна у воді і є прекрасним ґрунтом для лакофарбних і масляних покриттів. В результаті, корозійна стійкість одночасно фосфатованих і фарбованих виробів у декілька разів перевищує корозійну стійкість тих же виробів, покритих тільки фарбою.

Підвищення ефективності захисту тонкоплівковими антикорозійними засобами досягається загортанням пакетів металу в спеціальний папір, що інгібує, з наступним відповідним пакуванням. Таку технологію застосовують на деяких металургійних заводах для оберігання, зокрема, «сріблянки» (шліфованих і полірованих сталевих прутків) від корозії.

Процес подібної тимчасової консервації металу полягає, наприклад, у наступному. Пасивацію металу здійснюють в 10% водному розчині нітриту натрію, після чого виріб змащують веретенним маслом. Це забезпечує захист металу від корозії на час приймання його відділом технічного контролю. Далі, метал піддають знежиренню і пасивації, обробляючи його при температурі 75…80 °С у мийній машині послідовно 2% водним розчином тринатрійфосфату, 2% водним розчином кальцинованої соди і, нарешті, 30% водним розчином нітрату натрію. Після сушки метал щільно обгортають одним шаром інгібуючого паперу, обробленого сумішшю нітрату натрію й уротропіну, та

пакують у спеціальні дерев'яні ящики. При цьому слід мати на увазі токсичність інгібуючого паперу та суворо дотримуватися правил поводження з ним.

Більш прийнятним способом захисту в аналогічних випадках є нанесення на поверхню металу захисних плівок.

Відповідним прикладом є застосування композиції на основі 12,5% ланоліну з добавками масла, окисно-хромового пігменту та інгібітору корозії в органічному розчиннику.

При малій товщині покриття такі засоби характеризуються значно більшою ефективністю та тривалістю дії, ніж обробка неорганічними солями. Їх можна наносити методами занурення, змащування або розпилення. Товщина покриття регулюється відповідною кількістю розчинника.

Після випарування розчинника на поверхні виробу, що захищається, залишається тонка прозора захисна плівка, нечутлива до дії агресивних компонентів атмосфери. Залежно від виду використаної упаковки і умов зберігання термін дії такого захисту складає до 2 років. Недоліками покриттів на основі ланоліну являються їх мала механічна міцність і токсичність розчинників.

Досить поширеними є *лакофарбні захисні покриття*, які поділяються на фарби, лаки, емалі, грунтовки, оліфу і шпаклівки. Проте цей спосіб захисту порівняно дорогий, і застосування його для тимчасового оберігання прокату від корозії доцільно лише у тому випадку, коли таке покриття у споживачів металу не знімається, а використовується, зокрема, як основа для наступного нанесення декоративного захисного покриття. Тому сфера застосування лакофарбових матеріалів у металургії обмежена певними видами прокату. В основному, це листовий прокат, а також фасонні профілі загального і спеціального призначення з терміном захисту на період транспортування і зберігання впродовж року.

Вимогами до такого покриття є неперешкоджання газокисневому різанню і зварюванню металу та якості зварного шва, нетоксичність газо– і пиловиділень в робочій зоні різальника і зварювальника. Матеріал покриття повинен висихати впродовж 3…5 хвилин, характеризуватися високою адгезією до металу, легко відновлюватися при ушкодженні.

До складу лакофарбних покриттів входять плівкотворні речовини, наповнювачі, пігменти, пластифікатори, розчинники, каталізатори. Покриття такого роду не лише добре захищають виріб у різних атмосферах, але й надають йому приємного зовнішнього вигляду. Крім того, змінюючи склад і використані матеріали, отримують покриття зі специфічними властивостями (з підвищеною міцністю, жаростійкістю, кислотостійкістю, струмопровідністю, такі, що світяться, декоративні тощо).

Захист металу від корозії лакофарбними покриттями як явище зумовлюється:

– механічною ізоляцією металу від корозійного середовища;

– гальмуванням електродних реакцій, які характерні корозійним процесам.

Застосування *механічної ізоляції* може бути ефективним лише у разі, коли покриття повністю ізолює метал від дії довкілля. Для цього воно має бути непроникним для води, кисню й іонів електроліту, тобто мати високі щільність, міцність та товщину. При цьому, будь-яке ушкодження покриття, а також збільшення його пористості будуть зумовлювати розвиток корозійного процесу. Для пригнічення корозійних процесів до складу покриття вводять різні інгібітори.

Лакофарбні покриття наносять на поверхню металу одним з наступних способів:

– зануренням або обливом, зокрема, струминним обливом з подальшою витримкою в парах розчинника;

– пневматичним або безповітряним розпиленням;

– електростатичним осадженням.

Однією з основних стадій технологічного процесу формування якісного лакофарбного покриття є *сушка*.

Найбільш поширеними методами штучної сушки лакофарбових покриттів є конвективна, терморадіаційна і індуктивна.

Конвективний метод сушки полягає в нагріві пофарбованих виробів гарячим повітрям.

Суть *терморадіаційної сушки* міститься в тому, що виріб піддається інфрачервоному опромінюванню та нагріву крізь шар лакофарбного покриття.

Індукційний метод сушки полягає в тому, що пофарбований метал поміщають в змінне електромагнітне поле підвищеної або високої частоти, під дією якого відбувається його нагрів і, як наслідок – сушка покриттів.

Захисні лаки є окремою підгрупою засобів тимчасового захисту металовиробів. Вони представляються композиціями органічних смол, модифікуючих добавок (інгібіторів корозії, пластифікаторів) і органічних розчинників. Їх нанесення на металеві вироби здійснюють зануренням, пензлем або розпиленням.

Метою цього покриття являється захист виробів тільки до початку наступної операції або до початку їх експлуатації. Тому вони повинні легко зніматися з поверхні, що захищається.

За способом видалення вони поділяться на ті, що змиваються, і ті, що зриваються.

Лакові покриття, що змиваються – це тонкі (менше за 20 мкм), прозорі і тверді покриття, яким притаманна висока адгезія до металевої основи. Вони можуть бути легко змиті органічними розчинниками. Основними компонентами цих речовин є вінілові й акрилові синтетичні смоли. Покриття цього типу застосовують для короткочасного захисту дрібних металевих виробів.

Лакові покриття, які зриваються, характеризуються низькою адгезією до металевої основи і великою еластичністю, завдяки чому їх легко можна видалити з поверхні механічним впливом. Їх основна перевага – мала трудомісткість операції розконсервації виробу. У зв'язку з невеликою захисною дією такі покриття використовуються, головним чином, для захисту від механічних пошкоджень захисно-декоративних гальванічних покриттів або непрецизійних виробів, зокрема, напівпродуктів, жерсті та деяких видів прокату.

Захисні покриття силікатними емалями застосовують для виробів, що використовуються при високих температурах, тиску, в дуже агресивних та хімічно активних середовищах (*емаль* – це склоподібне неорганічне покриття, міцно зчеплене з поверхнею основи).

Формування емалевого захисного покриття на металевих виробах можливе двома способами: «сухим» (нанесенням порошку) або «мокрим» (нанесенням пасти).

При нанесенні емалі слід мати на увазі, що промисловість випускає емаль у вигляді плиток. Отже, передусім її необхідно перетворити на порошкоподібний стан з розміром часток до 0,01 мм, оскільки великі частки важко розподілити рівним шаром по поверхні металу.

Процес формування емалевого покриття проходить у декілька етапів. Спочатку безпосередньо на очищений виріб наносять грунтову емаль, яка покращує адгезію, а також зменшує термічні і механічні напруження. Її спікання проводять при температурі 880…920 ºС. Далі виріб покривають шаром покривної емалі, яку потім спікають при температурі 840…860 ºС.

Кожен об’єкт, який обпалюється у печі, необхідно поміщати на спеціальну підставку, від якості якої багато в чому залежить успіх обпалювання. Підставка повинна відповідати наступним вимогам: не змінювати форми при нагріванні; не вступати в сполуки з розплавленим емалевим покривом; не повинна прилипати до емалі та не утворювати на своїй поверхні окалини.

Якщо потрібно нанести декілька шарів емалі, відповідну операцію проводять декілька разів.

Якщо після першого накладення і обпалення емалі на виробі виявляються незначні дефекти – тріщини, пузирі, оголені місця металу, то їх виправляють: повторно наносять емаль, просушують і обпалюють.

Основним недоліком емалевого захисного покриття є його крихкість. Але цей засіб є найбільш радикальним рішенням проблеми захисту трубопроводів від корозії. Емальовані труби широко застосовують при транспортуванні агресивних середовищ і чистих продуктів при тиску в 10…12 атм.

Для важких умов зберігання і транспортування використовують *покриття з полімерних матеріалів*, які можна легко зняти з поверхні предмета.

Такі покриття наносяться двома способами:

– зануренням виробів у розплавлену массу;

– нанесенням розчинів синтетичніх смол в органічних розчинниках за допомогою пензля або розпилювального пристрою.

Основним компонентом маси, використовуваної *в першому випадку*, є похідні ацетилцелюлози. Сюди додаються пластифікатори, що зменшують твердість і підвищюють еластичність, масла і смоли, які зменшують в'язкість розплавленої маси, і стабілізатори, що запобігають її термічному розкладанню. При використанні смол характерним є вживання полімерів: полістирол, поліетилен, поліпропілен, поліізобутилен, фторопласти, епоксидні смоли.

Відповідна технологія нанесення покриття передбачає очищення металевого виробу і занурення його на декілька секунд у ванну з розплавленою масою при температурі 180…185 °С. Після витягування виробу з ванни маса застигає та твердне, утворюючи гладке прозоре покриття завтовшки 1…2,5 мм.

З розчинів отримують покриття тонші, ніж з розплавленної маси: їх товщина не перевищує 20 мкм. Тому їх антикорозійні і механічні властивості гірші. За складом вони подібні до лакових покриттів і містять полівінілові і поліетиленові смоли, пластифікатори, інгібітори корозії, компоненти, що *зменшують* зчеплення покриття з металом, і органічні розчинники. Їх використовують при зберіганні і транспортуванні протягом тривалого часу або для захисту середньої тривалості ретельно оброблених деталей та інструментів.

Покриття, що легко знімаються, використовуються для захисту окремих прецизійних деталей або їх частин, різального інструменту. Такий захист є ефективним протягом тривалого терміну зберігання і транспортування виробів у складних умовах (навіть до 5 років). Розконсервовування виробів перед споживанням не вимагає багато роботи: після надрізу покриття його можна легко зняти.

Слід врахувати, що більшість покриттів, що легко знімаються з виробу можуть бути переплавлені і використані повторно.

Один з поширених способів нанесення полімерних покриттів полягає в наклеюванні полімерної плівки (зазвичай, це полівінілхлорид товщиною 0,2…0,4 мм) на поверхню холоднокатаних смуг. Отримувана продукція називається *металопластом* і використовується як декоративно-конструкційний матеріал, наприклад, для оздоблення пасажирських купе залізничних вагонів.

Нанесення такого покриття відбувається на агрегатах безперервної дії, на яких послідовно виконуються наступні основні операції: розмотування рулонів, зварювання кінців смуг, підготовка поверхні метала (знежирення, фосфатування, пасивація), нанесення клею на поверхню смуги валковим методом, підсушка клею, нанесення плівки з притисненням її роликами, підігрів смуги з покриттям, тиснення візерунка, змотування смуг у рулони.

Плівку частіше наклеюють з одного боку смуги. Продуктивність лінії – до 100…120 тис. т/рік.

Недоліком описаних полімерних покриттів є їх порівняно висока вартість.

Для захисту від негативного впливу багатьох кислот і лугів в умовах дії на виріб ударних, розтягуючих, знакозмінних навантажень зовнішнього середовища та

необхідності забезпечення діелектричних властивостей у різних ємностях, трубопроводах, цистернах, хімічних апаратах, резервуарах для перевезення і зберігання хімічних речовин тощо використовують *гумові захисні покриття*. Руйнуючий вплив на гумові покриття можуть здійснювати лише сильні окиснювачі.

Таке захисне покриття за необхідності може бути сформоване з м'якої або твердої гуми. М'якість гуми регулюється добавками сірки. М'яка гума містить від 2% до 4% сірки, а тверда – 30…50%.

Наносять гуму на заздалегідь очищену і знежирену поверхню, спочатку обробляючи її гумовим клеєм, потім валиком видавлюючи накопичене повітря. Завершальним етапом в гумуванні є вулканізація.

При експлуатації виробів з гумовим покриттям слід враховувати, що з часом вони можуть старіти.

Для отримання особливо міцного захисного покриття застосовують ебоніт.

При проєктуванні *захисту металевими покриттями* слід враховувати, що у вологій атмосфері утворюється гальванична пара з металів основи та поверхневого шару. Тому, у залежності від співвідношення їх електродних потенціалів, захист металевими покриттями поділяють на *анодний* і *катодний*.

В інформаційних джерелах має місце певна плутанина у визначенні цих категорій. У подібних випадках слід користуватися термінологічними стандартами.

Так, згідно з ДСТУ 3830 «Корозія металів і сплавів. Терміни та визначення основних понять» та ДСТУ ГОСТ 9.101 «Єдина система захисту від корозії та старіння. Основні положення» *катодний захист* – це електрохімічний захист металів, який здійснюється катодною поляризацією від зовнішнього джерела (електричного) струму або шляхом з'єднання з металом, який має більш *від'ємний потенціал*, ніж метал, який захищають. Одночасно існує категорія: *«анодний протектор»* – це метал, який має більш від'ємний (електричний) потенціал, ніж метал, який він захищає (від електрохімічної корозії). Іншими словами, *катодний захист здійснюється анодним протектором*.

Анодним захистом називають електрохімічний захист металів, який здійснюється від зовнішнього джерела (електричного) струму або або шляхом з'єднання з металом, який має більш *позитивний потенціал*, ніж метал, який захищають. Відповідним чином, *анодний захист здійснюється* «*катодним протектором*» – металом, який має більш позитивний (електричний) потенціал, ніж метала, який захищають.

Прикладом катодного захисту є покриття заліза цинком або кадмієм. При цьому, матеріал покриття (у даному випадку – цинк або кадмій) стає анодним протектором. У присутності вологи, перш за все, проходить розчинення (окиснення) матеріалу покриття, що захищає метал основи. Важливим аспектом при цьому є те, що покриття буде виконувати функції захисту від корозії навіть за наявності в ньому пор і подряпин.

Прикладом анодного захисту є покриття заліза оловом, міддю, сріблом, золотом тощо. При цьому, матеріал покриття (у даному випадку – олово, мідь, срібло і т.д.) стає катодним протектором. У присутності вологи першим буде руйнуватися метал основи. Для запобігання цьому при анодному захисті покриття має бути суцільним і рівномірним, великої товщини, без пор і подряпин. Анодний захист вуглецевих сталей здійснюють рідко, оскільки таке покриття захищає виріб лише механічно, а реалізують його згідно з іншими причинами, зокрема, гігієнічними – для олова, необхідної поверхневої електропровідності – для міді, відбиваючої здібності – для срібла і золота тощо.

У деяких випадках анодний захист також може бути *хімічно* ефективним, зокрема, при утворенні пасивного шару оксидів між поверхнями покриття та металу-основи. Це має місце при покритті катодними протекторами деяких легованих сталей.

Нанесення металевих покриттів здійснюють такими способами:

– зануренням виробу у ванну з розплавленим металом (це так званий, гарячий спосіб нанесення захисного покриття);

– гальванічним (електролітичним) осадженням металу або сплаву з водних розчинів їх солей на поверхню виробу;

– плакіруванням (термомеханічний спосіб) – нанесенням на поверхню основного металу іншого, більш стійкого до агресивного середовища, застосовуючи прийоми ливарного виробництва або обробки тиском у процесах спільної прокатки, пресування, кування тощо;

– напиленням – шляхом нанесення на оброблювану поверхню розплавленого металу за допомогою повітряного потіку;

– використанням дифузійних процесів – за рахунок проникнення металопокриття в поверхневий шар основного металу під впливом високої температури.

Як правило, нанесення захисних покриттів на прокатну продукцію здійснюється у потоці технологічного процесу виробництва.

Одним з масових типів прокатної продукції є її оцинковані різновиди. Як було сказано вище, цинк на залізі виконує роль анодного протектора, захищаючи залізний виріб і хімічно, і механічно. Шар оксиду на цинковому покритті досить міцний, він також істотно сповільнює корозію.

Цинкування – отримання цинкових покриттів на металопродукції – здійснюється різними способами.

Цинковані листи виготовляють як зануренням у розплав цинку (гаряче цинкування), так і його електроосадженням.

При гарячому цинкуванні товщина покриття сягає 50 мкм, при електролітичному – до 10 мкм. Електроосаджені покриття дещо пластичніші, ніж отримані з розплаву.

Найбільшого поширення у вітчизняній практиці для листової продукції отримав *спосіб гарячого цинкування*.

До складу агрегату гарячого безперервного цинкування *листів* входить різноманітне устаткування, на якому в єдиному комплексі виконуються різні механічні, фізико-хімічні і термічні операції: розмотування холоднокатаних рулонів, зварювання кінців смуг у стик, хімічне і електрохімічне очищення поверхні металу, термообробка (відпал або нормалізація), флюсування, покриття цинком, пасивація цинкового покриття, дресирування (застосовується не завжди), змотування смуг в рулони або різання на листи.

Безпосередньо оцинкування здійснюють шляхом пропускання смуги крізь ванну з розплавленим цинком при температурі ~454 ºС. Товщина покриття регулюється віджимними роликами або струменями газу з регульованим тиском («газовими ножами»). Пасивація цинкового покриття здійснюється в розчині хромового ангідриду Cr_2O_3 при 80…85 ºС.

Швидкість проходження смуги через агрегат гарячого безперервного цинкування – до 4 м/с; продуктивність агрегату – до 500 тис. т/рік.

Після гарячого цинкування ретельно контролюють товщину і зовнішній вигляд покриття, а також – однорідність і адгезію, що здійснюється в ході різних простих фізичних і лабораторних тестів [1].

Цинкуванням також масово захищають сталевий дріт різних видів (наприклад, колючий) та сталеві труби, що в декілька десятків разів збільшує термін їх служби.

Недоліком такої обробки є вигорання шару цинкового покриття в місцях зварювання, що робить ці ділянки незахищеними від корозії.

Нині для захисту від корозії водогазопровідних труб та дроту застосовують два способи нанесення цинкового покриття: гаряче оцинкування та дифузійне.

Принципово, технологія гарячого оцинкування дроту та труб не відрізняється від аналогічного оброблення листової продукції. Існуючі відмінності щодо підготовки поверхонь, нанесення покриття та методів контролю якості зумовлені, здебільшого, специфікою їх геометрії та використання у споживачів.

Так, *дріт* пропускають крізь безперевні агрегати, аналогічні тим, що використовуються для стрічки. Адгезію покриття до сталевої основи оцінюють за

можливою появою відлущення у ході технологічної проби з навивання дроту на оправку певного діаметра [1].

Труби цілком занурюють у ванни з розплавленим цинком, витримують там до досягнення ними температури ванни, потім витримують на гарячому або холодному повітрі для стікання надлишку цинку.

Більш ефективним з точки зору використання властивостей покриття є *дифузійне цинкування*, яке порівняно широко використовується для водогазопровідних труб.

Суть методу полягає в переході атомів цинку до парової фази і проникненні їх в залізну підложку. При цьому в поверхневому шарі виробу утворюється залізо-цинковий сплав складної фазової структури. Такий процес можливий тільки при температурах 400…450 ºС і в замкнутому просторі реторт або муфелів, заповнених виробами, що цинкуються, і порошковою сумішшю, яка вміщює цинк та активатор.

Для дифузійного цинкування використовують печі, які складаються з контейнера (реторти) циліндричної форми довжиною 900…1500 мм (і більше) з діаметром 300…500 мм, що обертається навколо своєї осі зі швидкістю 2…10 об/хв. Навколо реторти розташовані термоелектричні нагрівальні елементи (ТЕНи) потужністю 15…30 кВт. Продуктивність однієї печі за зміну (8 годин) зазвичай складає 300…500 кг продукції. З декількох печей комплектуються лінії загальною продуктивністю до декількох тонн за зміну.

Переваги методу :

– отримуване покриття рівне, безпористе і має за рахунок дифузійного шару високу адгезію до підложки, у тому числі – при складній конфігурації останньої;

– захисна здатність покриття в 3…5 разів вище, ніж у гарячецинкових покриттів;

– товщина покриття може варіюватися в широкому інтервалі (зазвичай, від 25 до 110 мкм), що визначається часом проведення процесу та вмістом цинку в суміші, яка використовується для цинкування;

– вироби цинкуються в герметично закритих ємностях (ретортах), відходи виробництва не вимагають регенерації, процес, здебільшого, екологічно безпечний.

Недоліки методу:

– відсутність декоративних властивостей (покриття темно-сірого кольору без блиску);

– відносно невелика продуктивність, що лімітується об'ємами реторт для цинкування;

– незначна поява шкідливих аерозолів цинкового пилу (при відкритті реторт).

Іншим масовим видом продукції є *луджена жерсть, або «бляха»* (з олов’яним покриттям). Олово – амфотерний метал, що взаємодіє як з кислотами, так і лугами і відносно стійкий в нейтральних або близьких до нейтральних середовищах. Воно не кородує в м'якій воді. Нетоксичність олова та його солей робить луджену жерсть прийнятною для виготовлення тари для рідких і твердих харчових продуктів.

Олово на зовнішній поверхні лудженої тари є катодом по відношенню до заліза. Проте, на внутрішній поверхні олово майже завжди виконує функцію аноду по відношеню до заліза, і тому виникають умови для катодного захисту сталевої основи.

Олов'яні покриття на сталеву основу наносять як гарячим способом (зануренням у розплав олова), так і електролітичним осадженням, і як правило – з двох сторін.

Суть *гарячого лудіння* полягає в тому, що підготовлений метал пропускається через ванну з розплавленим оловом. Найчастіше гаряче лудіння здійснюється в листах. У зв'язку з цим рулони жесті після дресирування поступають на агрегати поперечного різання, де отримують листи необхідних розмірів. Для гарячого лудіння застосовують агрегати, на яких послідовно виконуються наступні технологічні операції: травлення, промивка, флюсування, покриття оловом, формування покриття, нанесення плівки масла, знежирення, очищення і полірування поверхні. У ванні лудильної машини розплавлене олово має температуру 280…330 ºС.

Перед потраплянням до лудильної ванни листи проходять крізь шар флюсу, що є водним розчином хлористого цинку ($ZnCl_2$) з температурою близько 270 ºС. Ця операція сприяє видаленню з поверхні травлених листів залишків вологи, забруднень і оксидів. Після виходу з лудильної ванни листи проходять крізь жирову ванну, де знаходиться гаряча пальмова або бавовняна олія з температурою 240…250 ºС. Плівка масла на поверхні листів запобігає окисненню незатверділого шару олова при контакті його з атмосферою. У жировій ванні знаходяться три пари роликів, які віджимають надлишок олова з поверхні металу. Листи, що виходять з жирової ванни, обдуваються стислим повітрям з метою прискорення охолодження. Потім вони промиваються гарячим розчином соди і протираються матерчатими щітками. Далі поверхня листів полірується сумішшю висівок і крейди за допомогою матерчатих роликів.

При гарячому лудінні на кожну поверхню листа наноситься шар олова 1,5…4 мкм (22…60 г/м^2). Витрата олова – 15…20 кг/т.

В останні роки гаряче лудіння жерсті витісняється процесом електролітичного лудіння.

Електроосаджені олов'яні покриття рівномірніше отриманих з розплаву, і тому їх можна зробити тонкішими. Середня товщина електролітичних покриттів,наприклад, на консервних банках – 0,5…1,5 мкм (6,7…20 г/м^2) при витраті олова 5…7 кг/т.

Агрегати електролітичного лудіння характеризуються безперервністю дії, високим рівнем механізації і автоматизації, великою продуктивністю (до 300 тис. тонн на рік). У деяких жерстепрокатних цехах для отримання білої жесті встановлюють тільки такі агрегати. Проте електролітично луджена жерсть за корозійною стійкістю поступається жерсті гарячого лудіння. Тому білу жерсть, отриману цим способом, часто додатково покривають лаком.

Принципова схема агрегату електролітичного лудіння майже така, як і при відповідному цинкуванні листової продукції. Тут основною операцією є електролітичне лудіння у ваннах, в яких анодом служать бруски чистого олова, а катодом – сама смуга, що поміщаються між петлями (струм до смуги передається контактними бронзовими роликами).

Електроліт, що знаходиться у ваннах, складається з розчину сірчанокислого олова ($SnSO_4$), сірчаної кислоти (H_2SO_4) і добавок поверхнево-активних речовин, які сприяють стабілізації процесу і отриманню дрібнозернистого рівномірного покриття.

Після лудіння і промивання смуга поступає до установки оплавлення покриття, що дозволяє усунути його пористість. Нагрівання здійснюється за допомогою індуктора або методом електроопору до температури 500…600 ºС. Після оплавлення смуга піддається швидкому охолодженню у воді, внаслідок чого поверхня жерсті виходить блискучою. Пасивація покриття полягає в обробці його хромовою кислотою. При цьому на поверхні олова утворюється найтонша безбарвна плівка, яка оберігає покриття від окиснення. Далі смуга промивається, просушується, промаслюється, проходить дефектоскопію і прямує на моталки або ріжеться на листи.

У промислових масштабах також освоєно виробництво хромованої та алюмінованої жерсті.

Хромування здійснюється електролітичним способом, аналогічно електролітичному лудінню.

Останнім часом, для сталі використовують більш економічне *комбіноване покриття*, що складається з нижнього хромового шару (0,008…0,01 мкм), на якому знаходиться шар оксиду хрому, та зовнішнього органічного покриття. Шар оксиду хрому покращує адгезію органічного покриття. Полімерна плівка, у свою чергу, закриває пори в металевому покритті, збільшує опір протіканню електричного струму, що створюється гальванічними парами.

Така захисна система покриття забезпечує краще збереження продуктів, вищу стійкість до дії сульфідів, хорошу адгезію і стійкість зовнішньої поверхні тари до

ниткоподібної корозії. Проте це покриття важко піддається пайці, що обмежує його використання для консервних банок.

Алюмінієве покриття наноситься або гарячим способом (пропусканням смуги крізь розплав), або металізацією (осадженням пари алюмінію у вакуумній камері). Рідше наносять дифузійні покриття.

При отриманні покриття *з розплаву* у ванну з розплавленим алюмінієм зазвичай додають силіцій, щоб запобігти утворенню крихкого шару. Отримані з розплаву покриття мають підвищу стійкість до окиснення при помірних температурах.

Товщина алюмінієвого покриття, отриманого *металізацією*, складає 0,08…0,2 мм. У більшості випадків його додатково захищають від корозії органічними лаками і фарбами.

Дифузійні покриття отримують барабанною обробкою відносно дрібних виробів сумішшю алюмінієвого порошку, Al_2O_3 та невеликої кількості NH_4C1 в атмосфері водню при температурі близько 1000 °С . В результаті, одержують поверхневий сплав алюмінію із залізом, який забезпечує стійкість як до високотемпературного окиснення на повітрі (до 850…950 °С), так і до корозії в атмосфері, що містить сірку. Але такі покриття на сталі не забезпечують її захисту від корозії у водних середовищах.

В якості металів-покриттів використовуються також нікель, свинець, кадмій та ін.

Нікелеві покриття, в основному, отримують електроосадженням. Метал наносять або безпосередньо на сталь, або іноді на проміжне мідне покриття. Підшарок міді потрібний, щоб полегшити полірування нікельованої поверхні. Це дозволяє також зменшити товщину нікелевого шару (нікель дорожчий за мідь) та забезпечити мінімальну пористість. Для збільшення швидкості нанесення нікелю використовують спеціальні добавки.

Нікельовані металеві поверхні використовують як каталізатори реакцій, тому осаджені шари можуть бути досить товстими.

Свинцеві покриття на сталі отримують зануренням виробів до розплаву або електроосадженням. Для поліпшення зчеплення гарячих покриттів з основним металом у розплав свинцю зазвичай додають декілька відсотків олова. Якщо кількість олова у розплаві наближується до 25%, то таку листову продукцію називають «*лудженою жерстю*».

Покриття зі свинцю або свинцево-олов’янистих сплавів стійкі до атмосферних впливів, причому утворювані оксиди зупиняють подальший корозійний процес.

Свинцеві покриття не можна використовувати у контакті з питною водою і харчовими продуктами внаслідок токсичності навіть малих кількостей солей свинцю.

Кадмієві покриття отримують майже виключно електроосадженням. Різниця в потенціалах між кадмієм та залізом не така велика, як між цинком і залізом, отже ефективність катодного захисту сталі покривним шаром кадмію зі зростанням розміру дефектів в покритті падає швидше. Кадмієві покриття не такі стійкі в атмосферних умовах, як цинкові покриття такої ж товщини. Проте така мала різниця потенціалів забезпечує перевагу кадмієвих покриттів стосовно захисту саме високоміцних сталей.

Кадмій дорожчий за цинк, але він довше зберігає сильний металевий блиск, забезпечує кращий електричний контакт, легше піддається пайці. Він стійкіше до дії водяного конденсату і сольових крапель. Але солі кадмію токсичні, тому ці покриття не повинні контактувати з харчовими продуктами.

Наступними операціями оброблення металопропрокату є перевірка його якості та приймання в ході технічного контролю [1], маркування, пакування, транспортування та зберігання, вимоги до яких регламентуються ДСТУ 3058. Крім цих вимог, у залежності від призначення і потреб споживачів, стандарти на окремі види металовиробів, зокрема, прокат, можуть містити і додаткові вимоги.

Так, якісна кругла сталь зі спеціальною обробкою поверхні згідно з нормативними вимогами, окрім того, що для запобігання корозії повинна бути змащеною та обгорненою в один або більше шарів водонепроникного паперу, має бути упакованою в дерев'яні ящики

визначених габаритних розмірів. Прокат тонколистовий холоднокатаний з низьковуглецевої якісної сталі для холодного штампування не тільки повинний бути змащений з обох боків антикоррозійним шаром мастила, який запобігає корозії, але й упакований за допомогою листів м'якої сталі, укладений на бруси і міцно скріплений сталевими стрічками тощо.

Ідентифікація та простежуваність металургійної продукції

Ідентифікація та простежуваність є важлими складовими діяльності із забезпечення якості продукції і процесів, які відповідають вимогам стандартів ISO серії 9000 щодо побудови *системи якості* [68].

Під «*ідентифікацією*» розуміють можливість відрізнити один *вид* матеріалу або продукції від іншого. «*Простежуваність*» передбачає можливість вирізнити та відстежити пересування в процесі виробництва *ідентифікованого матеріалу* (або продукції чи напівпродукту) *певного виду.* На практиці, основою цих категорій стає «маркування».

Маркування металопродукції представляє із себе надання їй знакової інформації щодо ідентифікації на будь-якому етапі виготовлення та (або) використання для забезпечення простежуваності.

На вимогу замовника, на металовироби можна наносити різноманітне маркування. Вид і розташування маркування (наприклад, смуги, їх ширина, кількість, колір тощо фіксуються в документах щодо постачання продукції.

Розрізняють *тимчасове* та *остаточне* маркування.

Поняття «*тимчасове маркування*» використовують лише для того, щоб підкреслити його певну цілеспрямованість і специфічність для потреб ідентифікації та простежуваності напівпродукта. Проте у ряді випадків тимчасове маркування може перетворитися на «*остаточне*», якщо металовироби не піддають переробленню на цьому підприємстві, а відправляють замовникові.

Маркування металовиробів є комплексом різних операцій.

Найчастіше маркування здійснюють фарбами, бирками, тавруванням або їх комбінацією.

Спосіб маркування металу обирають з урахуванням забезпечення необхідної наочності і збереження знаків, що наносяться на виріб, при мінімальних трудових і матеріальних витратах.

Найбільш поширеними матеріалами для маркування є різні фарби, емалі, лаки, пасти, крейда, спеціальні швидковисихаючі розчини, а іноді – композиції, що світяться.

Маркування фарбами – дуже поширена операція, здійснювана на різних стадіях перероблення металопродукції.

У загальному випадку завдання колірного маркування полягає у забезпеченні наочної інформації, що легко сприймається, про основні характеристики металевого виробу. Часто вона доповнює інші способи, якими є маркування бирками і тавруванням. Написи і смуги, що наносяться на метал кольоровими фарбами, повинні добре контрастувати із сірим фоном сталі і бути помітними на великій відстані, що полегшує роботу з ідентифікації металу на всіх стадіях його перероблення.

Зокрема, діючими стандартами (наприклад, ДСТУ 3058 «Металопродукція. Приймання, маркування») регламентується колірне маркування готового прокату, що поставляється поштучно або пакетами (рисунки 1.57 та 1.58).

Маркувальні знаки наносять як вручну (з використанням пензлей, ручок, штемпелів, накатних роликових машинок, накладних трафаретів), так і із застосуванням спеціальних автоматичних і напівавтоматичних механізованих верстатів і пристосувань.

Зазвичай бирки на продукцію металургії містять наступні відомості: завод-виготівник, марка і номер плавки матеріалу, дані про розміри продукції (наприклад, прокату), маса пакету або число одиниць продукції в ньому. В деяких випадках вказують сортність продукції, вид її подальшої обробки та ін.

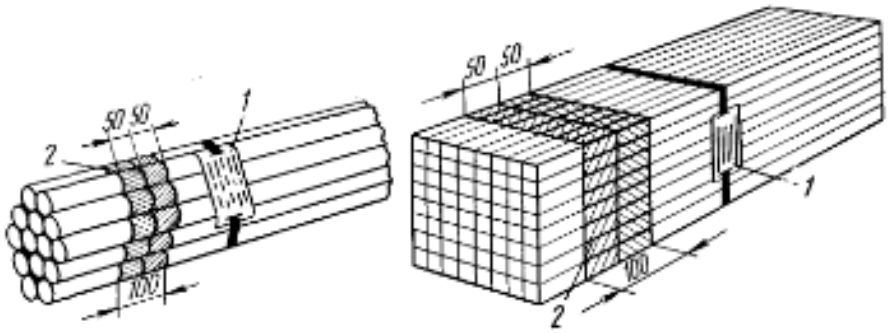


Рисунок 1.57 – Схема маркування пакетів прокату бирками (1) і фарбою (2)

При *маркуванні бирками* можна надати якнайповнішу інформацію про металовиріб. Бирками маркують усі пакети прокату, бунти, а в деяких випадках – окремі штанги крупносортного прокату, що поставляються поштучно.

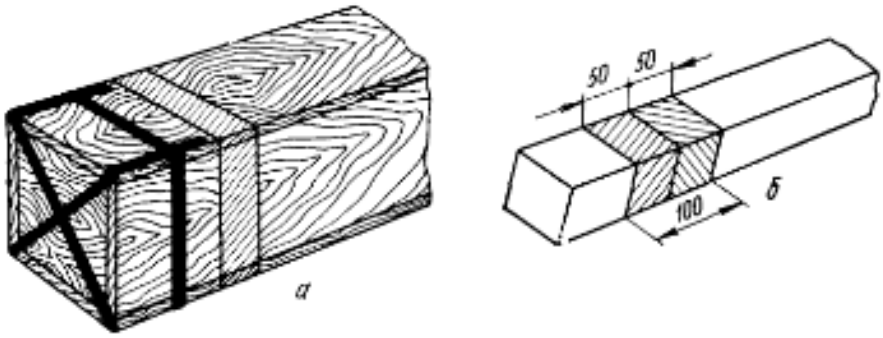


Рисунок 1.58 – Схема маркування прокату, що поставляється в ящиках (*а*) і поштучно (*б*): заштриховані місця нанесення маркування

Оскільки у бирках містяться основні відомості про вироби, а іноді вони є єдиними носіями таких відомостей, то вони мають бути збережені до моменту використання продукції споживачем. Для цього бирки повинні бути достатньо міцними і стійкими до впливу довкілля.

Найбільш високі вимоги пред'являють до товарного виду і характеру інформації бирок для маркування експортних виробів, а також виробів, що доставляються споживачеві водним транспортом. Такі бирки, окрім вищезгаданої інформації, мають містити дані про номер замовлення, місце призначення та ін.

Важливим є закріплення бирок на металовиробі. Так, до прокату бирки прикріплюють за допомогою дроту, катанки або стрічки. Одну з бирок завжди надівають на пакувальну катанку або стрічку, а другу за допомогою дроту прикріплюють до смуг прокату.

Прикладом сучасного використання *маркування* напівфабрикату своєрідними бирками та *простежуваності* є варіант, який добре себе зарекомендував, зокрема, на фірмі «Тойота» (Японія) – це метод «*Канбан*» [68]. Він розглядається як

- засіб створення та передачі інформації;
- інструмент візуального менеджменту;
- інструмент постійного поліпшення в процесі виробництва.

Для реалізації методу «Канбан» попередньо детально описується виробничий процес, а всі його переходи та операції відображаються на інформаційних носіях – Картах Канбан. На них описують вид та кількість кінцевого продукту, деталізують вид та кількість напівпродукту, який необхідно одержати від попереднього процесу (попередньої операції),

наводять дані про постачання від зовнішніх джерел та інформацію про виробництво на своєму та наступному етапах тощо. Ці Карти *супроводжують* («простежують») напівпродукт за усім технологічним циклом. При здійсненні чергового виробничого кроку Карту Канбан переміщують, що є сигналом для всього технологічного ланцюга про необхіжність виконання відповідних дій.

Варіантом аналогічного поточного (тимчасового) маркування та інформування про виконання технології може бути використання електронного табло – «*Дошки Андон*» [68]. Тут додатково до даних, які можуть міститись на Картах Канбан, надається інформація про роботу виробничих ліній (наприклад, червоним кольором сигналів показується призупинка виробничого процесу, жовтим кольором – необхідність переналагодження обладнання, зеленим – нормальна робота тощо).

Маркуваня злитків, заготовки і сортового прокату бирками (або картками «Канбан») в умовах металургійного підприємства може викликати значні труднощі. Окрім наочності, чіткості і зрозумілості маркування, тут необхідно забезпечити їх збереження при операціях зачистки, термічної обробки та/або травлення. Наприклад, тимчасове маркування сортового прокату, що піддається відпалу або травленню, бирками може уявитися достатнім, але при подальшій обробці бирки, які виготовляють з тонкої жерсті, можуть розчинитися у кислоті або окиснитися при термічній обробці, що приведе до знеособлення металу і переводу його у брак. Тому використання сучасних способів ідентифікації, наприклад, штрих-кодом або *QR*-кодом не є достатньо зручними.

Для запобігання вказаним явищам, окрім навішування бирок з нержавкої сталі на пакет або бунт металу, бунти і частини пруткового прокату слід піддавати *тавруванню*, тобто нанесенню на сам виріб знакової інформації їз забезпеченням її збереження у певних умовах. Таврування також застосовують для злитків та крупних заготовок.

Наприклад, сталеві злитки можуть маркуватися наступним чином. При розливанні в головну частину злитка вставляють заздалегідь підготовлені металеві пластинки або скоби (рисунок 1.59, *а*). На них набивають («таврують») номер плавки, номер злитка і індекс способу виплавки. В деяких випадках на тіло злитка у холодному стані додатково накладають (набивають) клеймо і наносять смугу кольорової фарби, які характеризують марку сталі (рисунок 1.59, *б*).

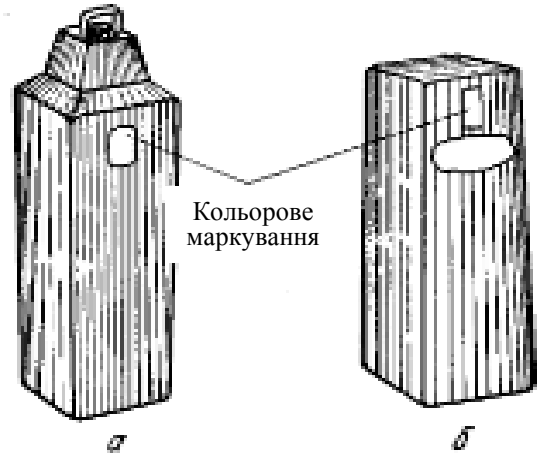


Рисунок 1.59 – Приклади маркування злитків (*позначення позицій – у тексті*)

Для таврування прокату на заводах, де здійснюють прокатку сплавів рядових марок, використовують *спеціальне обладнання*. Залежно від місця, на яке наносять клеймо, таке устаткування поділяють на машини для таврування: а) в торець; б) по бічній поверхні.

Перші використовують при тавруванні блюмів, слябів, заготовок і великих сортових профілів, а інші – при тавруванні фасонних профілів прокату, а іноді – круглих середньосортних профілів.

Машини для таврування в торець за принципом дії поділяють на:

– *таврувальники* з вільно або примусово падаючою головкою, що клеймує. Їх застосовують, коли прокат для таврування зупиняють або коли швидкість його руху складає до 3 м/с;

– *інерційно-маятникові та ротаційні таврувальники* – використовують при великих швидкостях руху прокату без його зупинки. Їх застосовують на трубозаготівельних і безперервно-заготівельних станах, де прокат великої маси рухається по рольгангу зі швидкістю 2…7 м/с. Особливістю ротаційного таврувальника є його універсальність: за його допомогою може здійснюватися таврування заготовок у торець (ударом заготовок об касету, розміщену у виступі головки) і по бічній поверхні (накаткою).

Значну кількість крупносортного прокату піддають тавруванню в торець в процесі його охолодження і сортування на стелажах.

У першу чергу, це стосується усіх залізничних рейок, торці яких фрезерують, після чого таврують, а також практично усього середньосортного прокату, що піддається різцевому або абразивному обточуванню.

Установки для таврування крупносортного прокату в торець, у залежності від конструкції їх кріплення, виконують підвісними або підлоговими.

Машини для таврування по бічній поверхні бувають ударної дії і накатної. У першому випадку клеймо наноситься одиничним ударом клеймувальної головки по прокату, а в другому – втискуванням у метал клеймувальних знаків, поміщених в накатній головці, яка при цьому обертається. Клеймо в цьому випадку наносять *періодично* по усій довжині смуги.

Сила, що необхідні для втискування клеймувальних знаків у поверхню прокату, створюються притискними пристроями різних конструкцій – пружинними, пневматичними або гідравлічними.

Клейма виготовляють штампуванням з інструментальних сталей типу У7, У8, 9ХС, 4ХВ2С та ін. Розмір і форма клейм можуть бути найрізноманітнішими, що залежить від умов експлуатації: машинне таврування або ручне.

Блюми, сляби і заготовку маркують у гарячому стані тавруванням у торець. Зміст клейма залежить від марки сталі і призначення плавки, що, у свою чергу, визначає кількість подальших контрольних випробувань.

Згідно з діючими стандартами, значна кількість продукції середньосортних станів і практично весь крупносортний фасонний прокат повинні піддаватися поштучному тавруванню по поверхні, для чого використовуються накатні машини. При необхідності нанесення *одиничного* клейма такі машини обладнують спеціальними пристроями, що забезпечують або зменшення зусилля притиску, або фіксацію накатної головки в положенні, коли вона не контактує з рухомою смугою прокату.

Складність технології таврування якісних і спеціальних сталей, де потрібна часта зміна клейма або його окремих складових частин, привела до того, що процес таврування тут найчастіше виконують вручну. У кращому разі, механізованим є процес нанесення основного клейма (марка сталі, номер плавки, знак заводу), а вручну набивають додаткові знаки.

Окрім вказаних позначень, клеймо може містити: цифри, що визначають номер сифона при розливці злитка; букви, що визначають положення заготовки відносно висоти злитка; букви, що характеризують спосіб виплавки сталі; знак підприємства та/або бригади, де виготовлено виріб. Клеймо може містити один знак (букву або цифру), або декілька знаків, або навіть повне позначення марки сталі. Загальна кількість знаків в клеймі може сягати 25.

Як приклад, у клеймі:

1Х17Н13М2Т ⊕ Е15526 10 А

міститься наступна інформація: «*1Х17Н13М2Т*» – марка сталі; «⊕» – знак бригади; *«Е»* – спосіб виплавки сталі в електропечі»; *«155246»* – номер плавки; *«10»* – номер злитка; *«А»* – літера, що позначає першу заготовку від головної частини злитка.

Розмір цифр і букв часто регламентується стандартами на певні види продукції.

Таке досить громіздке маркування потрібне, оскільки воно забезпечує коректність відбору зразків для випробувань і дозволяє здійснити розбракування з мінімальними втратами металу і часу у разі незадовільних властивостей окремих заготовок.

Пакування та зберігання металургійної продукції

Останніми кроками технологічного циклу є *пакування* та наступне *зберігання* продукції.

Тут у відповідності з технологічними перероблennями слід розглядати *пакування* (як процес) та *упаковку* (як матеріали) при захисті металовиробів. Зокрема, для металопродукції відповідні вимоги формулюються в ДСТУ 3058.

Роль упаковки дуже важлива, оскільки вона додатково і значною мірою захищає вироби від атмосферної корозії та механічних ушкоджень, дозволяє значно спростити консервацію виробів (*див. вище*) і зменшити товщину захисного покриття, а також надає продукції товарного вигляду.

При підборі засобу і способу упаковки необхідно враховувати міру вразливості виробу, вид використанного засобу консервації, передбачувані умови транспортування і зберігання, форму продажу і вартість виробу. Вироби необхідно пакувати безпосередньо після консервації, в опалювальних сухих і чистих приміщеннях, уникаючи безпосереднього дотику рук робітників.

За розміщенням упаковки відносно виробу, що захищається, вирізняють упаковку:

– внутрішню, що є пакувальним матеріалом, який безпосередньо контактує з виробом, що захищається;

– зовнішню, що захищає продукцію від механічного пошкодження під час транспортування і зберігання, а також від дії атмосфери і вологи.

Для *внутрішньої упаковки* використовують спеціальний папір, плівки з полімерних матеріалів. Вони повинні мати малу вологонепроникність, не повинні взаємодіяти з металом, який захищають.

В якості *зовнішньої упаковки* використовують картонні коробки, коробки і чохли з полімерного матеріалу, дерев'яні ящики й обрешітки, а також герметичні металеві контейнери. Вид такої упаковки залежить, в основному, від типу і цінності виробу, передбачуваних умов транспортування і складування. В деяких випадках (захист прецизійних пристроїв, єлекричної апаратури тощо) зовнішня упаковка повинна також захищати вироби від вібрації. Для цієї мети добре підходить пінопласт, який відрізняється достатньою міцністю і опором удару, малою вологопроникністю. З пінопласту легко виготовляються коробки з гніздами, які в точності відповідають формі об'єктів, що захищаються.

Залежно від використаного пакувального матеріалу вирізняють види упаковки:

– негерметичну (пакувальний папір, картонні, дерев'яні і пінопластні коробки, які використовуються для короткочасного і середньої тривалості захисту дешевих металевих предметів на час їх зберігання і транспортування в малоагресивних середовищах);

– водостійку (герметичні чохли або мішки з полімерних матеріалів, які використовують для будь-яких умов зберігання і транспортування виробів, захищених постійними антикорозійними покриттями або повністю законсервованих виробів);

– паронепроникну (чохли з полімерних матеріалів або металеві контейнери, в яких часто розміщують летучі інгібітори корозії і осушувачі, що застосовуються у разі важких і дуже жорстких умов зберігання та транспортування точних і складних механізмів, які неможливо повною мірою захистити за допомогою контактних засобів тимчасового захисту).

За можливістю циклічного використання вирізняють упаковку багаторазового та одноразового вживання.

Прикладом *упаковки багатократного користування* є герметичні транспортні контейнери. Ця упаковка відповідає багатьом вимогам сучасного транспортування, у тому числі – безпечному і правильному завантаженню, перевезенню і розвантаженню незалежно від виду використаного транспортного засобу (автомобіль, потяг, судно). Контейнери забезпечують захист виробів від механічних ушкоджень і в той же час дозволяють створити навколо виробу нейтральну атмосферу (наприклад, шляхом уведення летких інгібіторів або пониження вологості повітря за допомогою підігрівання і вентиляції).

Одноразова упаковка має бути утилізованою після розконсервації виробу. Зокрема, папір (парафіновий, вощений, бітумний, ламінований полімерами або алюмінієвою фольгою, просочений інгібіторами корозії, а також картон) застосовується для тимчасової упаковки виробів, оброблених, головним чином, маслами і мастилами, а також для обкладання дерев'яних ящиків. Незважаючи на безліч недоліків (мала герметичність, не занадто привабливий вигляд, велика трудомісткість упаковки) він залишається основним пакувальним матеріалом, що зумовлено його дешевизною і достатньою міцністю.

Для одноразового тривалого захисту металевих виробів використовують герметичну упаковку з полімерних матеріалів (пакети, мішки, чохли, які виготовлені окремо, безпосередньо на коробках або безпосередньо на виробах). Герметизація досягається шляхом заварювання або склеювання упаковки стрічкою. До такої упаковки часто вводять легкі інгібітори та осушувачі, а також індикатори вологості.

У прокатному виробництві *пакування* здійснюють за ДСТУ 3760, ДСТУ 7809 ДСТУ 3058 та ін. *пакетуванням* і *ув'язкою* штаб. Це – завершальні виробничі операції, якість виконання котрих, значною мірою, забезпечує ідентифікацію сталей різних марок, полегшує простежуваність і збереження в усіх операціях транспортування і складування металу, визначає товарний вид продукції.

Залежно від профілю і розмірів прокат укладають на спеціальних столах і збирають в круглі або прямокутні (у перерізі) пакети. Середньосортний прокат круглого, квадратного і шестигранного поперечних перерізів, а також практично увесь дрібносортний прокат, що поставляється в прутках, укладають у пакети формою поперечного перерізу, близькою до круглої.

Пакетування дрібносортного прокату здійснюють формуванням кожного пакету із заданої маси прокату або поетапним пакетуванням (спочатку прокат складається в дрібні пучки, які зв'язують, а потім пучки збирають у загальний пакет).

Пакети прокату, який має круглий переріз, збираються в кишенях, як правило, без застосування будь-яких спеціальних пристосувань. У деяких випадках для забезпечення необхідної щільності укладання кишені обладнують спеціальним вібраційним пристроєм або формуючими пристосуваннями.

Пекети прокату, який має квадратний переріз, за наявності мостових кранів з електромагнітами укладають у штабелі «хрест-на-хрест».

Фасонний прокат (куточки, швелери, балки), сталь смугову та ін. збирають в пакети прямокутної форми (рисунок 1.60).

Ув'язку пакетів прокату здійснюють відпаленим низьковуглецевим дротом діаметром від 1 до 7 мм або стрічкою завтовшки від 0,6 до 1,2 мм і шириною 20…30 мм.

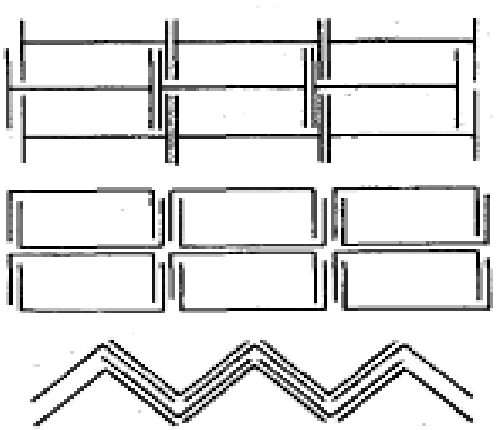


Рисунок 1.60 – Схеми укладання деяких профілів прокату для пакування

Процес якісної *механізованої ув'язки дротом* пов'язаний зі значними технічними труднощами. Стрічка – дорожчий обв'язувальний матеріал, проте застосування її для обв'язування легко механізується, причому покращується товарний вид пакетів.

З метою захисту обв'язувального матеріалу від корозії дріт або стрічку оцинковують. Проте це дуже здорожує операцію ув'язки і застосовується тільки в обмежених випадках для продукції спеціального призначення.

Спосіб скріплення кінців обв'язувальних матеріалів має велике значення для забезпечення збереження форми пакетів при подальшому їх складуванні або транспортуванні. Скріплення кінців дроту здійснюють їх скручуванням не менше, чим на 2…3 оберти, а при малому діаметрі дроту – 4…5 разів. Обв'язувальну сталеву стрічку скріплюють за допомогою різних пряжок, з'єднань «у замок», зшиванням або електрозварюванням.

Характерною особливістю усіх обв'язувальних машин є наявність формуючого пристрою, що забезпечує високу щільність пакету або бунту прокату, і механізму притиску кінців обв'язувального дроту або стрічки до металу, що значно покращує товарний вид пакетів. Недоліком таких машин є складне обслуговування і наладка.

Велике значення для роботи ділянки обробки прокату має правильна і чітка організація *складування металу*, що має забезпечити ідентифікацію металу, полегшення його відвантаження споживачам та раціональне використання площі складу.

Складування на ділянці обробки поділяють на два види:

1) для виготовленої і охолодженої продукції перед обробкою;

2) для металопродукції, обробленої і прийнятої технічним контролем, перед відвантаженням споживачеві.

Далі більш докладно розглянемо *особливості основних видів обробки металів тиском (ОМТ)*, маючи на увазі, що представлені вище операції оброблення металовиробів *після* завершення основного технологічного процесу в тій або іншій мірі притаманні усім її видам.

1.2.2.3 Фізико-технологічні основи процесів обробки металів тиском

Кування (ковка)

Кування – один з найдавніших способів обробки металів тиском. До цього виду ОМТ відноситься велика кількість різних операцій, які здійснюються за допомогою кувального обладнання. Їх головна відмінність – забезпечення *імпульсних (часто – багаторазових)* силових впливів на метал з відносно *невеликими місцевими повторюваними деформаціями* та можливістю *вільного плину* металу у напрямі поверхонь виробу, що не обтискуються. Інструмент при цьому рухається зворотно-поступально з певною періодичністю і має, як

правило, просту форму. Така схема впливу може зумовити локалізацію деформації у приповерхневих шарах поковки, що супроводжується *нерівномірністю* деформації та напружень у металі.

Основною схемою *напруженого стану* металу при цьому є всебічне стискання, а *деформованого* – одноосне стискання та двоосне збільшення розмірів (*див. рис. 1.39 та 1.40*). Це дозволяє деформувати відносно малопластичні метали (сплави). За допомогою одного і того ж інструменту (часто – це плоскі бойки) можна одержувати вироби різних форм і розмірів, які стають заготовкою для наступних стадій обробки тиском або різання [69].

Кування *як процес* обробки металу застосовують для різних цілей, і через це відповідні способи обробки металу можуть бути різними:

– *обтискання криці* – це кування, при якому відбувається ущільнення і зварювання часток, а також виділення шлаків з тістоподібної залізної маси (*криці*);

– *зварювання* – це кування, при якому зрощуються пакети, що складаються з окремих кусків нагрітих заготовок;

– *звичайне кування* – це ущільнення і надання бажаних форм предмету. Цей процес широко застосовують для виготовлення різних кованих виробів як промислового (заготовки валів та інших масивних виробів), так і побутових речей – хвірток, огорож, решіток, світильників, сходів, меблів, предметів інтер'єру, ювелірних прикрас тощо.

Вироби і напівфабрикати, отримувані ковкою, називають «*поковками*».

Зазвичай, кування здійснюють при кувальній температурі, що є різною для кожного сплава і залежить від його складу та фізичних (щільність, температур кристалізації, фазових перетворень і плавлення тощо). Так, для сплавів на основі заліза цей температурний інтервал складає 1250…800 °С, для міді 1000…650 °С, для титану 1600…900 °С, для алюмінієвих сплавів 480…400 °С.

Розрізняють *вільне кування*, при якому поковку формують окремими ударами інструмента без обмеження її розтікання, і *кування в штампах*, де потрібну форму отримують розтіканням у штампі та «втискуванням» метала в нього.

Найбільш розповсюдженими є наступні операції *вільної ковки.*

При ***осаджуванні*** (рисунок 1.61) здійснюється зменшення висоти заготовки за рахунок збільшення площі її поперечного перерізу.

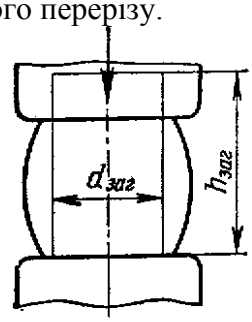


Рисунок 1.61 – Схема осаджування при куванні [70]

Цю операцію використовують, коли необхідно з високої заготовки виготовити більш низьку поковку, наприклад, для отримання поковок для зубчастих коліс з великим поперечним перерізом при відносно малій товщині, як попередню операцію перед прошивкою при виготовленні порожнистих поковок (кільця, барабани), а також як попередню операцію для знищення литої дендритної структури виливку та покращення механічних властивостей металу.

Особливістю цієї операції є локалізація всієї деформації під інструментом (без «зовнішніх зон»). Деформаційною характеристикою осаджування, яка зазвичай використовується, є *коефіцієнт укова*:

$$K_y = \mathrm{h}_{\mathrm{заг}} / \mathrm{h}_{\mathrm{к}}, \qquad (1.60)$$

де $h_{заг}$; $h_к$ – висота заготовки та поковки відповідно.

Знаходять також застосування характеристики: умовна відносна деформація ε (1.11) або (1.12) та логарифмічна деформація e (1.9) або (1.10).

Внаслідок дії сил тертя на контактних поверхнях бокова поверхня заготовки набуває бочкоподібної форми [70]. Для зменшення цього явища на контакт поковки з інструментом наносять ефективні технологічні мастила.

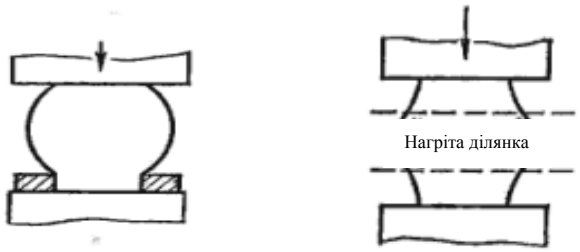
Ще однією вадою процесу може стати втрата подовжньої сталості поковки. Щоб уникнути цього, відношення висоти $h_{заг}$ заготовки, що осаджується, до її діаметра $d_{заг}$ повинно складати не більше 2,5.

Силу P, що потрібна для осаджування злитків, можна визначити за формулою:

$$P = M \cdot p \cdot F_k, \qquad (1.61)$$

де тиск $p = 1{,}15\sigma_T(1 + \frac{f \cdot d_k}{3 \cdot h_{пок}})$; σ_T – вимушена межа текучості матеріалу; f=0,15…0,25 – коефіцієнт тертя; d_k; F_k – діаметр та площа перерізу заготовки при куванні (індекс «k») відповідно, M – масштабний коефіцієнт, який при варіюванні маси поковки від 0,5 до 100 тонн змінюється відповідно від 0,8 до 0,5 [70].

Висаджування (рисунок 1.62) представляє із себе осаджування металу на частині висоти заготовки. Воно здійснюється шляхом обмеження деформації заготовки кільцевим інструментом або нагріванням її певної частини.



а *б*

Рисунок 1.62 – Схема висаджування при куванні [70]: *а* – з обмеженням деформації кільцем; *б* – з диференційованим нагрівом заготовки

Протягування (рисунок 1.63) – збільшення довжини заготовки за рахунок зменшення її поперечного перерізу (наприклад, при виготовленні валів, осей і т.п.). Протягування проводять послідовними ударами або натисканнями на окремі взаємно прилеглі ділянки заготовки з її подачею уздовж осі і поворотами на 90° в обидві боки навколо цієї осі. Протягування можна виконувати плоским і фігурним інструментом.

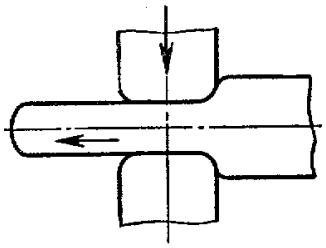


Рисунок 1.63 – Схема протягування при куванні [70]

Часто протягування комбінують з осадженням для збільшення укову металу та покращення його структури.

Протягування на оправці (рисунок 1.64) – операція збільшення довжини порожнистої заготовки за рахунок зменшення товщини її стінок між бойками та оправкою.

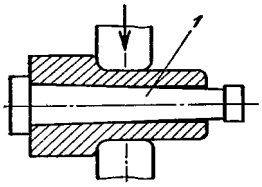


Рисунок 1.64 – Схема протягування ковкою на оправці [70]: 1 – оправка

Таке протягування здійснюють в одному напрямку – до розширеного кінця оправки 1, що полегшує виокремлення з неї поковки після завершення обробки. Для ефективного ведення процесу протягування рекомендується величину поступової подачі l_n заготовки під інструмент визначати за формулою [70]:

$$l_n = (1{,}2...1{,}8)b_0\,, \qquad (1.62)$$

де b_0 – початкова ширина поковки.

Обкатування на оправці (рисунок 1.65) – це збільшення діаметра кільцеподібної заготовки 1, що обертається, за рахунок зменшення її товщини між бойком 3 та оправкою 2, яка закріплюється в люнетах 4.

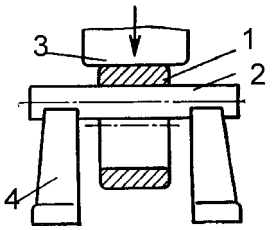


Рисунок 1.65 – Схема обкатування на оправці при куванні [70] (пояснення позицій – у тексті)

Прошивка (рисунок 1.66) – отримання наскрізного або «глухого» отвору в заготовці. Для виконання цієї операції застосовують суцільний або порожнистий інструмент – *про́шивень*. Частину металу, що видаляється у відхід разом з прошивнем, у виробничій практиці називають *«видрою»*.

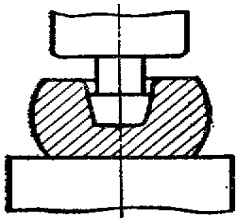


Рисунок 1.66 – Схема прошивки при куванні [70]

Розгонка (рисунок 1.67) – це операція збільшення ширини *частини* заготовки за рахунок місцевого зменшення її товщини.

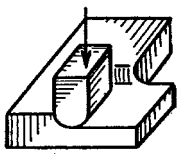


Рисунок 1.67 – Схема розгонки при куванні [70]

Згинання – утворення або зміна кутів між частинами заготовки або надання їй криволінійної форми, наприклад, при виготовленні гаків, колінчастих валів, скоб і т.д.

Закручування – поворот частини заготовки відносно іншої на заданий кут, наприклад, при виготовленні колінчастих валів, свердел і т.п. При закручуванні в якості інструменту використовують спеціальний інструмент: воротки, лебідки, ключі.

Рубання (рисунок 1.68) – повне відокремлення частини заготовки по незамкненому контуру. При цьому використовують інструмент, який званий «*сокирою*».

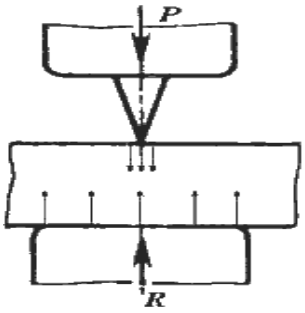


Рисунок 1.68 – Схема рубання як операція кування [70] (*P* – концентрована сила; *R* – розподілена реакція опори*)*

Вільне кування ведеться зазвичай без технологічного мастила з попереднім нагрівом металу і може включати його проміжні підігріви в процесі обробки.

Як видно, при вільному куванні деформація металу не обмежується зовсім або є обмеженою з однієї сторони. Це досить економічний спосіб виготовлення заготовок деталей, який не потребує підготовки складного інструменту та застосовується, здебільшого, при одиничному та дрібносерійному виробництві. Процес використовують також для поліпшення якості та структури металу: при куванні метал зміцнюється, деякою мірою заварюються внутрішні дефекти та подрібнюються крупні зерна, внаслідок чого структура стає дрібнозернистою та набуває волокнистої будови.

Але вільна ковка характеризується низькою продуктивністю та неточністю геометрії виробів.

Підвищення точності виробів досягається при *гарячому куванні в штампах*, яке знаходить переважне вживання у великосерійному виробництві. Для отримання пострібної геометрії виробу в штампах виконуються врізи («*рівчаки*»), які відповідають необхідній проміжній або кінцевій формі виробу. В результаті, на кінцевих стадіях обробки метал набуває форми порожнини штампу (рисунок 1.69).

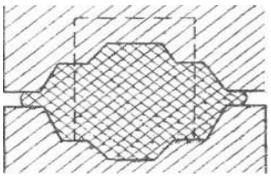


Рисунок 1.69 – Схема формування геометрії продукції куванням у відкритих штампах, а також об’ємною відкритою штамповкою [67] (*опис останньої – див. нижче*)

Підвищення точності виробів тут забезпечується обмеженням поширення металу на завершальній стадії його деформації, що вимагає дозування об’єму заготовки та прогнозування її течії.

Вироби невідповідального призначення з вуглецевих сталей виготовляють у відкритих штампах; деталі більш відповідального призначення штампують у закритих штампах без можливості виходу металу у зазор між штампами. В останньому випадку потрібно використовувати максимально точну за масою заготовку.

При масі заготовки більшій, ніж потрібно для готового виробу, частина металу піде у роз'єм між штампами, формуючи *облой*, який потім має бути видаленим. Це збільшує витратний коефіцієнт метала. Маса заготовки менше, ніж потрібна, або помилки при проєктуванні гравюри штампів супроводжуються невиконанням профілю виробу, що є гіршим, ніж перший випадок. Тому зазвичай для забезпечення доброго заповнення металом робочої поверхні («*дзеркала*») штампа обирають такі розміри заготовки, щоб частиною металу *спеціально* забезпечити утворення всебічного силового стиснення та утворення облою.

Об'ємною штамповкою зазвичай отримують вироби невеликої довжини (молотки, гаєчні ключі, колеса та ін.), виготовлення яких прокаткою або пресуванням (*див. нижче*) утруднене або нерентабельне. Такі вироби, як правило, одразу готові до застосування або потребують незначної механічної обробки.

Іноді вироби отримують у декількох штампах, поступово наближуючи форму напівфабриката до потрібного кінцевого вигляду. Кожна окрема операція у такому випадку називається *переходом*.

Цей процес може здійснюватись без мастила, але для підвищення стійкості інструмента в паузах між циклами обтиснень металу штампи охолоджують розпорошеною водою або емульсією масла, або змащують в'язкими маслами.

У залежності від способу реалізації ковка може бути *ручною* або *машинною*.

Дрібні вироби за індивідуальними замовленнями може вручну виготовляти *коваль*. Таке гаряче кування, зазвичай, здійнюють у *кузні* – спеціально обладнаній майстерні, в якій знаходяться *горн*, *ковадло*, підставка з різними ковальськими і слюсарними інструментами, бак з холодною водою, гострило, свердлувальний верстат, а інколи – і зварювальний апарат.

По суті, *ковальський горн* – це піч для нагріву металу. На відміну від звичайної печі, топка її відкрита, і вона має примусову подачу повітря, працюючи на деревному або кам'яному вугіллі. До самого горну повинен бути доступ с трьох сторін, що необхідно при виготовленні виробів збільшених розмірів при їх укладанні і витягуванні після нагріву.

Ковадло повинно бути добре закріпленим, наприклад, на подушці з піску так, щоб при ударах воно не хиталось.

Третьою основною складовою ручного ковальського оснащення є *ручник* (ручний молот) масою 1…2,5 кг у залежності від фізичних даних коваля.

Для утримання нагрітого матеріалу служать *кліщі*. Основний набір кліщів для стрічкового і круглого матеріалу випускається серійно; кліщі для спеціальних робіт коваль виготовляє собі сам.

Окрім названого приладдя, для художнього кування необхідні також *зубила* (з тонким лезом для гарячої рубання та з більш товстим – для рубання холодного металу), округлі *молотки* для протягування, *борідки*, *підбійки* для висадження і *гладилки*.

Цей основний набір інструментів доповнюють різноманітні *оправки*, *бойні плити*, ковальські *пробійниці, підсічки, кінцівки та обтискачі* тощо, які коваль-художник виготовляє сам у залежності від потреби.

Недоліком ручного гарячого кування є неможливість виготовляти великі вироби і вироби масового вжитку.

Для обробки відносно великих заготовок (масою до 100 тонн і більше) та серійних виробів застосовують *механічні молоти,* що мають масу падаючих частин від 40 до 5000 кг, або *гідравлічні* чи *пневматичні молоти (преси)*, що розвивають силу 2…200 МН (200…20000 тс), а також – *кувальні машини*.

Основною характеристикою молотів, якими кують, є маса частини, що падає. Цей параметр приблизно можна визначити за значенням питомої роботи деформування. Для формозміни вуглецевої сталі ця величина складає 40…50 кДж/м^3, для легованих сталей 60…70 кДж/м^3.

У великих майстернях художнього кування може бути встановлений механічний ресорно-пружинний молот.

У великих кузнях іноді встановлюють пневматичні молоти, кувальні гідравлічні преси, які називають *прес-молотами,* або «*жомами*», а при необхідності забезпечення великих зусиль – *фрикційні (гвинтові) молоти*.

Для кування дрібних поковок масою до 20 кг використовуються пневматичні кувальні молоти. Для поковок середньої маси до 2000 кг – пароповітряні кувальні молоти. На такому молоті верхній бойок кріпиться до падаючої частини молота – *«баби»*, а нижній бойок – до подушки, закріпленої на *шаботі*, не пов'язаному зі станиною молота. Маса падаючих частин молота складає 50…1000 кг (для пневматичного молота) і 1000…8000 кг для пароповітряного. Маса шабота має перевищувати масу падаючих частин в 10…15 разів.

Тривалість окремого циклу деформації при куванні на молотах складає 10…3 с, а темп деформації характеризується швидкістю інструменту 6…6,5 м/с. Аналогічні дані для гідравлічних пресів: десятки секунд та 2…3 м/хв. Отже кування на гідравлічних пресах більше відповідає процесу гарячого об'ємного штампування (*див. нижче*).

Для пересування важких (до 350 т) заготовок при куванні використовують підйомні крани, кантувальники та спеціальні маніпулятори.

Технологічно машинне кування відбувається наступним чином.

Спочатку *нагрівають* попередньо відлиту *болванку* в нагрівальній печі або горні, розташованих поблизу молота. Їх параметри залежать від об'єму виробництва і розміру болванок. Для успішного кування потрібно не тільки забезпечити необхідний ступінь нагріву, але й його рівномірність.

Після вилучення з виливниці болванку, якій не дають остигнути нижче за темно-червоне каління, поміщають у піч. Це робиться для того, щоб уникнути тріщин у внутрішніх шарах металу.

Для нагрівання великих болванок використовують печі на газовому паливі. Орієнтовно, нагрів у печі 30-тонної болванки ведуть приблизно 27 годин, 15-тонної – 12 годин, а 5-тонної – 8 годин. Ступінь нагріву треба узгодити з твердістю сталі: м'яка (низьковуглецева) сталь добре кується навіть при 1300 °С. Тверду інструментальну (високовуглецеву, леговану) сталь вище 1000 °С кувати вже недоцільно. Для сортів сталі із середньою твердістю (середньо– та низьколегована, середньовуглецева) температура 1000 °С є достатньою для кування.

Підвищення температури полегшує умови деформування металу. При цьому слід уникати його *перегріву* і *перепалу* [58].

Занадто низька температура теж не підходить для кування. По-перше, вона сильно утрудняє обробку. По-друге, при цьому з'являються додаткові напруження, які можуть викликати внутрішні надриви і тріщини у металі.

При першому нагріві, у залежності від діаметра болванки, угар металу складає від 1…3 %; при кожному наступного підігріві болванка втрачає ще близько 1% маси. Тому болванку попередньо відливають більшого розміру та маси порівняно з потрібним виробом.

Верхній кінець, так званий *прибутковий*, що завжди містить у собі порожнечі, вважається непридатним для використання, і тому приблизно 1/4 маси болванки відрубують, що носить назву: «*обрубка прибутку*». Для цього застосовують сталеву сокиру (*див. рис. 1.68*). Подібним же чином болванку розділяють на частини, коли вона призначається для виготовлення декількох виробів.

Обробку сталевої болванки молотом умовно поділяють на два процеси: виготовлення заготовки та остаточна (кінцева) обробка.

При *первісному обтисненні* болванки слід мати на увазі, що вона містить усередині раковини і пустоти різної форми і величини (*див. рис. 1.15*). Тому одразу після видачі болванки з печі її ущільнюють обковуванням. Цю операцію ведуть від середини до нижнього кінця болванки, потім – до верхнього, прибуткового. При цьому утворена під час нагріву в печі окалина на поверхні болванки частково сама відпадає при обтисканні, а частково її відбивають ломиками і зчищають щітками.

Для забезпечення відповідного укову приймають відношення площі поперечного перерізу болванки до площі готового виробу у межах 3…4.

Одночасно з ущільненням болванки, їй додають у грубому наближенні необхідні розміри і форму, які залежать від вигляду виробів (суцільний або порожнистий циліндр, кільце, плоска заготовка тощо).

Якщо в процесі обробки на поверхні болванки фіксують тріщини чи інші дефекти, кування призупиняють, а пороки видаляють одним зі способів, що представлені вище.

При куванні великих виробів за один нагрів можна не встигнути обробити всю болванку. У такому разі спершу обковують її нижню половину, потім переносять маніпулятор на вже оброблений кінець, підігрівають останню частину болванки, обробляють її таким самим чином, і, нарешті, відрубують прибуток.

Якщо потрібно на кінці поковки мати уступи або фланці, діаметр яких більше, ніж переріз болванки, то після обтискування і відрубки прибутку болванку встановлюють вертикально і ударами молота осаджують. При цьому, її діаметр, особливо на кінцях, збільшується.

Для виковування валу менших розмірів, або такої довжини, що не поміщається сторч під молотом, застосовують так звану *«балду»*: заготовку підвішують на ланцюзі та осаджують її кінець горизонтальними ударами.

Для заготовки виробів кільцеподібної форми, наприклад, бандажів після попереднього обтиснення, витягування, очищення від окалини і тріщин, відрубання прибутку, розрубання на частини та вторинного нагріву кожен фрагмент болванки трохи осаджують і пробивають отвір за допомогою пробою або прошивня (*див. рис. 1.66)*. Подальша обробка кільця, тобто *обкатування*, робиться вже на оправці (*див. рис. 1.65*).

Для виготовлення більш довгих порожнистих циліндрів таких, наприклад, як скріплюючі гарматні оболонки, спершу відрізують на токарному верстаті прибуткову частину болванки, потім висвердлюють уздовж осі наскрізний отвір близько 30 см у діаметрі і, після нагріву болванки, просовують в отвір порожнисту оправку, на якій і ведуть обтиснення. Така обробка ще носить назву «*кування на штревелі*». Щоб стрижень не нагрівався і не стискався всередині нього постійно циркулює вода.

Заготовку виробів з прямокутним поперечним перерізом здійснюють на плоских ковадлах, де після попереднього обтиснення болванку сплющують спершу наплоско, потім повертають на 90° і кують «*на ребро*». Щоб розширити розміри болванки за цим останнім напрямом, метал піддають розгонці (*див. рис. 1.67*).

При виготовленні складних виробів типу колінчастого валу спершу кують прямокутний брус, в якому, за допомогою сокири, роблять два надрізи. Потім молотом відгинають обидва кінці, відрубують сокирою виступи, що утворилися, і нарешті, обтискують, закруглюють і обробляють шийки. Така робота потребує багато часу, частих нагрівів, спритності та досвідченості коваля.

Взагалі, для різних виробів потрібні різні заготовки. Від адекватності прийомів, що обрані, та послідовності переходів з однієї форми в іншу, особливо, при складних конструкціях залежить успішність кування та мінімізація витрат на нагрів і угар метала.

При обробці сталевих болванок суттєве значення як з економічної сторони, так і стосовно впливу кування на якість виробу має *сила молоту*, тобто відношення ваги G частини, що б'є, до ваги g оброблюваної болванки. Загальноприйняте відношення $G/g = 2$ і доходить до 1. Однак ці значення дуже умовні і залежать від багатьох причин, головним чином, від форми виробу, прийомів кування, властивостей сталі, що допускає більш-менш сильний нагрів і, нарешті, від оснащення молота різними пристроями. Чим важче молот у порівнянні з вагою болванки (тобто, чим більше відношення G/g), тим енергійніше проходіть кування, і тим глибше передається тиск внутрішнім шарам болванки. Слабкі удари передаються, переважно, поверхневим шарам, які, внаслідок цього,

ущільнюються і витягуються більше внутрішніх. В результаті, болванка може отримати увігнуті торці. Подібного роду явища помічаються частіше при куванні великих болванок. Тому для успішності їх кування доводиться мати молоти величезних розмірів або ж вдаватися до частих підігрівів металу.

Треба також позначити, що масою молоту не можна зловживати. Дуже великий місцевий тиск зумовлює появу на поверхні поковки складок і напливів металу, а при недостатньому нагріві можливі й надриви та тріщини в серцевині болванки.

Кінцеву обробку поковки здійснюють після попередніх операцій, коли напівфабрикат має грубу поверхню, для вирівнювання якої залишають деякий запас проти необхідних розмірів. Для цього поковку очищують ще раз від усіх видимих дефектів, після чого легкими і частими ударами обробляють всю її поверхню. Нарешті, остаточно перевіряють поковку за допомогою кронциркулів, лінійок або шаблонів і, якщо виявиться потреба, її додатково виправляють.

Для надання чистішого і гладкого вигляду використовують різного роду *гладилки* і *штампи*. Інколи між ударами молота поверхню поковки поливають водою, унаслідок чого здійснюється очищення від окалини, і виріб виходить чистішим. Така обробка здійснюється наприкінці, коли метал вже охолоджений до буро-червоного світіння і тому носить назву *холодного кування,* або *наклепки*.

При наклепці метал стає твердішим, менш в’язким, і в ньому утворюються внутрішні напруження. Унаслідок цього інколи на поверхню поковки можуть виходити внутрішні тріщини. Щільність сталі після такої операції декілька зменшується, а міді та срібла – збільшується.

Наклепку застосовують при виготовленні таких виробів, як різці, інструменти, клинки і т.п. Але що стосується крупніших речей (наприклад, локомотивних або вагонних вісей), для яких наклепка виходить лише *поверхневою*, що викликає внутрішні напруження, цей спосіб скоріш шкодить виробу, навіть при застосуванні відпалу.

Внутрішні напруження з'являються у поковці майже завжди унаслідок того, що різні частини болванки доводиться кувати при різних температурах та наявності нерівномірного охолодження концентричних шарів металу. Цей ефект проявляється тим сильніше, чим більше діаметр болванки і чим різкіше перехід від однієї форми перерізу по її довжині до іншої.

Коли виріб має досить просту форму і коли він ще червоний (гарячій), для запобігання тріщин і викривлення його одразу ж після кування закопують у гаряче середовище. В іншому разі потрібно піддавати виріб *відпалу* (*див. підрозділ 1.2.2.2*).

Також слід мати на увазі, що у приповерхневому шарі виливка при розливанні та твердінні сплаву утворюються газові бульбашки з окисненою поверхнею, що запобігає їх зварюванню при обтисканні. Це зумовлює появу *волосовин* (*див. підрозділ 1.2.1.3*) та рихлості у поверхневому шарі поковки. Тому виріб після кування часто піддають кінцевому зачищенню (*див. вище*) на токарних або стругальних верстатах, для чого треба мати відповідний запас металу.

За необхідності поковки піддають *термічній обробці* (*див. вище*) в результаті якої змінюють структуру металу, покращують його механічні та технологічні характеристики, наприклад, оброблюваність різанням.

Зазвичай термообробку поковок здійснюють на термічній ділянці ковальського цеху, оснащеному газовими або електричними печами.

Основними операціями термічної обробки сталевих поковок є відпал, нормалізація, загартування і відпускання (*див. вище*).

Часто застосовують процеси термообробки з використанням кувальної теплоти. Для цього поковку відразу після деформації направляють до термічної печі, що істотно скорочує витрати на нагрівання металу та підвищує продуктивність процесу.

Після деформації та термічної обробки з поверхні поковок *дробометним чи дробоструменевим очищенням, галтовкою* або *травленням* видаляють окалину (*див. вище*),

очищення від якої є необхідним для підвищення стійкості ріжучого інструменту при наступній механічній обробці, а також для виявлення дефектів на поверхні поковок.

У ряді випадків менш трудомістким і більш економічним може стати технологічний процес ***холодного кування (холодної ковки)***.

В основу цього процесу покладена робота з холодним металом, який піддають циклічній ударній обробці. Холодна ковка створює оптимальні умови для автоматизації технологічного процесу, що досягається завдяки відсутності такої операції, як нагрів металу до кувальної температури. Тут ковані вироби і деталі, які можливо тиражувати, отримують з листової або сортової заготовки.

Прикладами продукції холодної ковки можуть стати: ковані вироби для оформлення екстер'єру і прилеглої території (забори, ворота, віконні або балконні грати тощо, які не лише огороджують ділянки, але й стають їх прикрасою), деталі інтер'єрної обстановки в приміщеннях, ювелірні вироби. Для поліпшення їх декоративних характеристик можуть використовуватися і допоміжні технології, зокрема, напилення позолотою, покриття шаром декоративного металу тощо.

При художній обробці металу холодна ковка утруднена, оскільки метал під дією ударів швидко нагартовується, втрачає пластичність і для подальшої обробки тиском потребує відпалу.

Іноді для здійснення машинної холодної ковки попередньо вирізають за допомогою спеціального обладнання первинні *типові* елнменти заготовки. Потім ці напівфабрикати обробляють за допомогою машини та одержують форму майбутніх виробів. Ковані елементи з'єднують зварюванням, що значно зменшує час виготовлення і підвищує якість виробів. Вироби, виготовлені таким чином, набагато дешевше своїх «гарячих» аналогів і не є унікальними.

Об'ємна штамповка

Процес об'ємного штампування (формовки) подібний до кування в штампах (*див. рис. 1.69*). Різниця між ними зумовлена динамікою навантаження метала, який деформується, і є досить умовною. Особливістю об'ємної штамповки можна вважати обов'язкове використання штампу, який складається з двох роз'ємних частин, внутрішні порожнини яких в зібраному вигляді утворюють рівчаки, та обмежену кількість (як правило – 1…4, а при штампуванні вельми великих поковок – до 20) силових впливів на метал з *відносно великими разовими деформаціями*. Тому в цьому процесі *нерівномірність* деформації металу та викликана ними нерівномірність напружень зумовлені, більшою мірою, формою гравюри штампу, ніж локалізацією деформації у приповерхневих шарах поковки [69, 72].

Плин металу при об'ємній штамповці обмежується, як і при куванні у штампах, формою і розмірами внутрішньої порожнини інструменту. Штамповкою отримують дуже складні за формою вироби масою від декількох грамів до декількох тонн, які неможливо отримати прийомами вільного кування, а їх якість регламентується ДСТУ EN 10250, ДСТУ EN 10222 та ін. Поковки повинні відрізнятися високою точністю форми, меншими допусками і високою чистотою поверхні. Це при штамповці забезпечує значну економію металу, знижує трудомісткість подальшої механічної обробки, підвищує коефіцієнт використання металу і збільшує продуктивність устаткування.

З урахуванням високої вартості штампів, штамповку найчастіше застосовують в серійному і масовому виробництві: в автомобільній, тракторній, транспортній, авіаційній та інших галузях промисловості, а також – при виробництві кріпильних виробів (болтів, гайок, заклепок й ін.).

Розрізняють штамповку

– *однорівчакову*, яка використовується, головним чином, для виготовлення поковок відносно простої конфігурації;

– *багаторівчакову* – найбільш розповсюджений спосіб, який складається з кроків поступового деформування заготовки в декількох рівчаках одного і того ж штампу з одержанням готової поковки в останньому рівчаку;

– *розгалужену*, яка здійснюється в двох або більшій кількості штампів, які встановлено на машинах одного типу;

– *комбіновану*, яка передбачає остаточне деформування та отримання готової поковки з попередньою ковкою напівфабрикату на машині іншого типу.

В якості заготовок для гарячого об’ємного штампування використовують прокат круглого, квадратного, прямокутного профілів, а також періодичний прокат. При цьому, прутки розрізають на окремі (мірні) заготовки, хоча іноді штампують заготовки з прутка при почерговому відокремленні його частин безпосередньо на штампувальній машині (*див. нижче – виготовлення кріпильних виробів*).

Застосовують гаряче і холодне об'ємне штампування. Гаряче об'ємне штампування знаходить ширше вживання, ніж холодне. Хоча при холодному об'ємному штампуванні відсутні витрати на нагрів металу, поширенню цього процесу перешкоджають необхідність великих потужності та енерговитрат штампувальних машин, низька стійкість штампів і недостатня пластичність багатьох сталей і сплавів у холодному стані.

При об'ємному штампуванні використовують два основні види рівчаків інструменту – відкритий і закритий. Штампи з відкритими і закритими штампувальними рівчаками інколи називають відповідно *відкритими* і *закритими штампами* (рисунок 1.70).

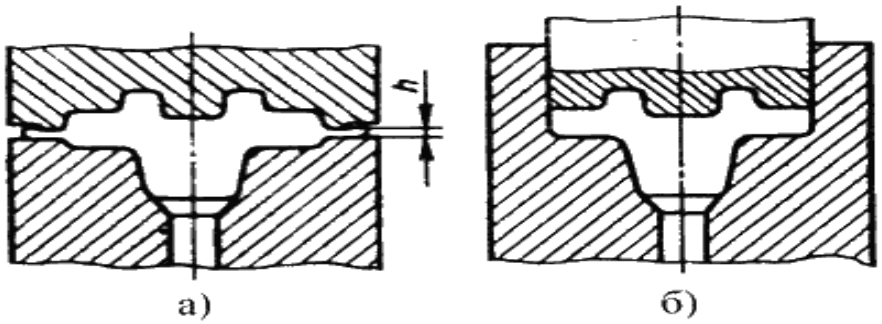


Рисунок 1.70 – Схеми штампів: *а* – відкритий; *б* – закритий

Штампування у відкритих штампах характеризується змінним зазором між рухомою і нерухомою частинами штампу. У цей зазор величиною *h* витікає частина металу, що формує *облой*, який закриває вихід з порожнини штампу і примушує решту металу заповнювати всю порожнину. У кінцевий момент деформації до облою з порожнини вичавлюються надлишки металу, і це дозволяє не пред'являти надвисокі вимоги до точності заготовок за масою. Штампуванням у відкритих штампах можна отримати поковки всіх типів.

Штампування в закритих штампах характеризується тим, що порожнина штампу в процесі деформації залишається закритою. Зазор між рухмою і нерухомою частинами штампу постійний і невеликий, що запобігає утворенню облою. Конструкція таких штампів залежить від типу машини, на якій штампують. Наприклад, нижня половина штампу може мати порожнину, а верхня – виступ (на пресах), або верхня – порожнину, а нижня – виступ (на молотах). Закритий штамп може мати дві взаємно перпендикулярні площини роз'єму. При штампуванні у закритих штампах необхідно строго забезпечити рівність об'ємів заготовки і поковки, а відокремлення заготовок одна від одної повинне здійснюватись з високою точністю. У закритих штампах отримують, в основному, деталі з кольорових металів.

Устаткування і метод штамповки обирають залежно від форми і розмірів поковки, властивостей матеріалу, потрібної кількості виробів та інших факторів.

Технологічний процес об'ємного штампування складається з таких операцій: виготовлення вихідних заготовок, їх нагрівання, штампування поковок, обрізання облою (якщо це потрібно), оброблення поковок.

При *виготовленні вихідної заготовки* її об'єм і масу визначають за кресленням поковки з урахуванням облою, наявності *кліщовини* (для захвату заготовки інструментом при штампуванні), вигару. Поковки простої форми одержують розрізанням круглого або квадратного сортового прокату на мірні заготовки кривошипними прес-ножицями, дисковими пилами або газовим різанням.

Нагрівання заготовок здійснюють аналогічно технології кування (*див. вище*). Але тут повторний нагрів не рекомендується через велику втрату металу в угар і погіршення поверхні поковки від утворення окалини.

При штампуванні складних поковок доцільно застосовувати фасонні заготовки, форма яких наближена до поковки. Їх виготовляють попереднім куванням на молотах і кувальних вальцях, але найбільш ефективним є застосування періодичного прокату (*див. нижче*), що дає змогу заощадити до 15% металу і на ~30 % зменшити трудомісткість виготовлення поковок.

Оздоблення (оброблення) поковок може включати їх виправлення, термообробку, очищення від окалини (*див. вище*) і калібрування.

Калібрування застосовують для підвищення точності поковок і виконують в холодному або нагрітому стані. Тут розрізняють площинне та об'ємне калібрування.

Площинне калібрування супроводжується вільним переміщенням металу в горизонтальному напрямі із забезпеченням підвищення точності вертикальних розмірів виробу. Це виконують на спеціальних калібрувальних пресах із зусиллям на повзуні 0,63…31,5 МН при малій швидкості його переміщення в кінці робочого ходу.

При *об'ємному* калібруванні бічні стінки рівчака затруднюють переміщення металу в горизонтальному напрямі. При цьому можуть утворюватися задирки. Гаряче об'ємне калібрування (з нагріванням до 850…900 °С) по суті є доштампуванням поковки до потрібних точних розмірів і здійснюється в однорівчаковому штампі з наступним обрізанням облою.

Поширення гарячого штампування пояснюється можливістю використання різноманітного обладнання, яке зумовлює велику кількість різновидів цього процесу. Серед них штампування: на молотах, пресах, горизонтально-кувальних машинах, витискуванням поковок, вальцюванням на кувальних вальцях, редукуванням на ротаційних машинах тощо. Використання того чи іншого обладнання визначає відповідні особливості процесу.

При штампуванні на молотах застосовують відкриті та закриті штампи, в яких реалізується однорівчакове та багаторівчакове штампування простих і фасонних заготовок масою від 0,1 до 1000 кг. Матеріал штампів обирають стійким до ударної дії. Необхідно, щоб штампи молотів були масивними.

Кінець штампування на молотах фіксується моментом зіткнення верхньої і нижньої частин штампу.

Поковки, що штампують на молотах, поділяють на групи і підгрупи за наступними ознаками:

1) *за способом штампування* на:

– подовжені і зігнуті поковки, що штампуються перпендикулярно осі заготовки («*штампування навзнаки*») і *відносяться до І-ї групи*. Для цих поковок характерна значна величина відношення їх довжини до середньої ширини в плані; деформація заготовки в штампувальних рівчаках протікає, головним чином, при формозміні по двох осях – у напрямі висоти і ширини поковки (по довжині поковки деформація незначна);

– круглі та квадратні поковки або поковки, близькі до них формою в плані (а також поковки з відростками, основні елементи яких близьки до круглої або квадратної форми), які *відносяться до ІІ-ї групи*. Їх штампують уздовж осі заготовки («*штампування осіданням*

в торець»). Тут деформація в штампувальних рівчаках протікає при різних видах формозміни: осадження (висадка), витискування і прошивка;

2) *за формою поковки та співвідношенню її основних розмірів*, що впливають на вибір заготівельних рівчаків;

3) *за формою поперечних перетинів поковки*, що зумовлює характер формозміни при заповненні порожнин штампувального рівчака та необхідність вживання заготівельно-попередніх рівчаків;

4) *за формою головної осі поковки та лінії роз'єму*, що зумовлює застосування особливих заготівельних рівчаків або необхідність урівноваження зусиль, що зміщують, при штампуванні.

Для цього виду штамповки, здебільшого, використовуються *пароповітряні молоти подвійної дії*. В них деформація метала здійснюється за рахунок кінетичної енергії рухомих мас: баби, штока з поршнем і верхньої частини штампу.

Окрім пароповітряних молотів, в ковальсько-штампувальних цехах використовують (у значно меншій кількості) *молоти з дошкою*. Крім того, останнім часом набули деякого поширення так звані *безшаботні молоти*. Безпосередньо до молотів за кінематичними характеристиками близькими є *фрикційні (гвинтові) преси*, які також застосовуються для гарячого штампування.

Кожен тип молотів вносить деякі характерні особливості до процесу штампування. Наприклад, *штампування на молотах з дошкою*, які відносяться до молотів простої дії, пов'язане з неможливістю регулювати висоту падіння баби і, відповідно – енергію удару. Це ускладнює штампування в багаторівчакових штампах, особливо, у разі застосування протяжних і підкатних рівчаків, що вимагають ударів змінної і невеликої сили у порівнянні з ударами в останніх рівчаках.

Штампи для молотів з дошкою аналогічні звичайним молотовим штампам як в частині кріплення, так і в частині розташування рівчаків. Молоти з дошкою відносно тихохідні, і тому (в разі складних конфігурацій поковок) метал охолоджується швидше, ніж завершується процес. Тому найбільш прийнятними для штампування на молотах з дошкою виявляються поковки простої конфігурації. Все ж таки, дешевизна, простота конструкції та управління, а також малогабаритність є позитивними якостями молотів з дошкою. Вони використовуються самостійно та в комбінації з іншими видами ковальських машин, зокрема, для правки поковок. Але завелика ексцентричність розташування рівчаків на таких молотах зменшує стійкість дошок і прискорює розладнання молота.

На фрикційних пресах здійснюється найуспішніше штампування у відкритих і закритих однорівчакових штампах, але реалізується також штампування в багаторівчаковому штампі. Цей вид машин широко застосовують для штампування невеликих серій дрібних і середніх за масою поковок типу заклепок, болтів, гайок й ін. Конструктивно штамп фрикційного преса схожий зі звичайним молотовим. Проте кріплення штампу на фрикційних пресах болтами і прихватами відрізняється від клинового кріплення, який застосовується для молотових штампів.

За кордоном (зокрема, у Великій Британії) мають поширення *ланцюгові молоти* простої дії. Ці молоти мають змінну величину ходу та можливість застосовування багаторівчакових штампів.

Безшаботні молоти мають нешироке поширення внаслідок недоліків конструкції, хоча сам принцип безшаботного молота вельми раціональний. Можливість деформувати метал шляхом зустрічного руху баби і нижнього бойка молота знижує втрати енергії на струс шабота, фундамента і ґрунту, дозволяючи будувати молоти з фундаментами неглибокого залягання, а при необхідності розташовувати їх на металевих конструкціях вище за рівень підлоги.

Також деякого поширення для штампування набули горизонтальні молоти з двостороннім ударом, так звані *імпактори*. Тут для утримання заготовки перед ударом частин штампу застосовують спеціальні механізми. Система управління цими молотами

спрацьовує лише в разі правильного розташування заготовки по відношенню до штампів. Швидкість удару імпактора досягає 60 м/с.

Перевагами використання молотів при гарячій штамповці є:

– можливість регулювати енергію удару. Слабкі удари (за аналогією з ковкою) можуть наноситися з підвищеною частотою;

– можливість здійснювати деформацію в одному рівчаку за декілька ударів, що особливо важливо для штампування в останньому рівчаку. У зв'язку з цим найбільш крупні поковки, зазвичай, штампують лише на молотах;

– великі швидкості деформації, що сприяє доброму заповненню складного рельєфа штампу.

Серед недоліків молотів слід відмітити:

– дорожнечу устаткування у зв'язку з необхідністю наявності котельних або компресорних установок і громіздких фундаментів;

– відносно невисоку продуктивність роботи, особливо – при багаторівчаковому штампуванні, коли при виконанні заготівельних операцій молот працює далеко не на повну потужність, та низький коефіцієнт корисної дії;

– важкі умови праці, шкідливі для будівлі та приладів струси від ударів, часті поломки штоків, складність здійснення механізації і – особливо – автоматизації процесів штампування;

– велика витрата металу від наявності штампувальних ухилів, які мають бути 5…7° через відсутність виштовхувачів;

– невисока точність розмірів поковок (допуск сягає декількох міліметрів).

Більшість вказаних недоліків відсутня при *штампуванні на пресах.*

Для цілей гарячого штампування застосовують *кривошипні* і *гідравлічні* преси.

Кривошипні преси, що придатні для гарячого штампування, використовують, переважно, для штампування у відкритих штампах. Причини незначного вживання такого штампування полягають у відсутності необхідної жорсткості, порівняно невеликому зусиллі, що розвивається, і в їх непристосованості для багаторівчакового штампування.

Тому були розроблені спеціальні конструкції кривошипних пресів для гарячого штампування. Кількість ходів в одиницю часу у таких пресів майже така ж, як у молотів (для рівнозначних машин). Їх переваги в порівнянні з молотами можуть бути розділені на конструктивні і технологічні.

До конструктивних і експлуатаційних переваг кривошипних гарячоштампувальних пресів (КГШП) можна віднести:

– дешевшу експлуатацію в порівнянні з молотами, в основному, за рахунок різниці між вартістю пари і електроенергії, зниження собівартості продукції;

– вищий коефіцієнт корисної дії;

– меншу масу і простоту фундаментів;

– відсутність струсів будівлі.

До технологічних переваг таких пресів відносять:

– вищу продуктивність за рахунок скорочення числа ударів у кожному рівчаку до одного;

– велику точність розмірів поковок (практично можливі допуски 0,2…0,5 мм), їх розмірну, макроскопічну та структурну рівномірність, стабільність режиму штампування, що особливо важливо при автоматизації та механізації;

– збільшений коефіцієнт використання металу;

– підвищену стійкість штампів, пов’язану з їх меншим розігрівом внаслідок коротшого знаходження заготовки в кожному рівчаку, сприятливішими умовами охолодження штампу малої маси, наявністю примусового виштовхування поковок штовхальником, що унеможливлює застрягання поковок, під час якого розігрівання штампів особливо інтенсивне, застосуванням штампів з незначними ухилами (в межах 1…3°), що пов'язане зі зменшенням питомого тиску та наявністю штовхальників;

– можливість застосовувати для інструменту сталі з меншою ударною в'язкістю, але з великим опором зім'яттю та стиранню, що пов’язане з відсутністю різких ударів;

– можливість вживання *складених* штампів, що дозволяє застосовувати дорожчі та зносостійкі сталі без підвищення загальної вартості штампу;

– більш комфортну роботу на пресі і легкість управління, що покращує умови праці пресоналу.

До основних недоліків кривошипних пресів слід віднести:

– високу вартість пресів;

– можливість заклинювання і поломки преса в крайньому нижньому положенні повзуна.

Поковки, що штампують на КГШП, поділяють:

– *залежно від характеру течії металу при формозміні* – на два класи: ті, що отримуються з переважанням процесу осаджування, і ті, що отримуються з переважанням процесу витискування;

– *залежно від конфігурації і складності виготовлення* – на п'ять основних *груп* (рисунок 1.71). В межах груп виділяються *підгрупи* поковок, які визначаються особливостями виготовлення останніх.

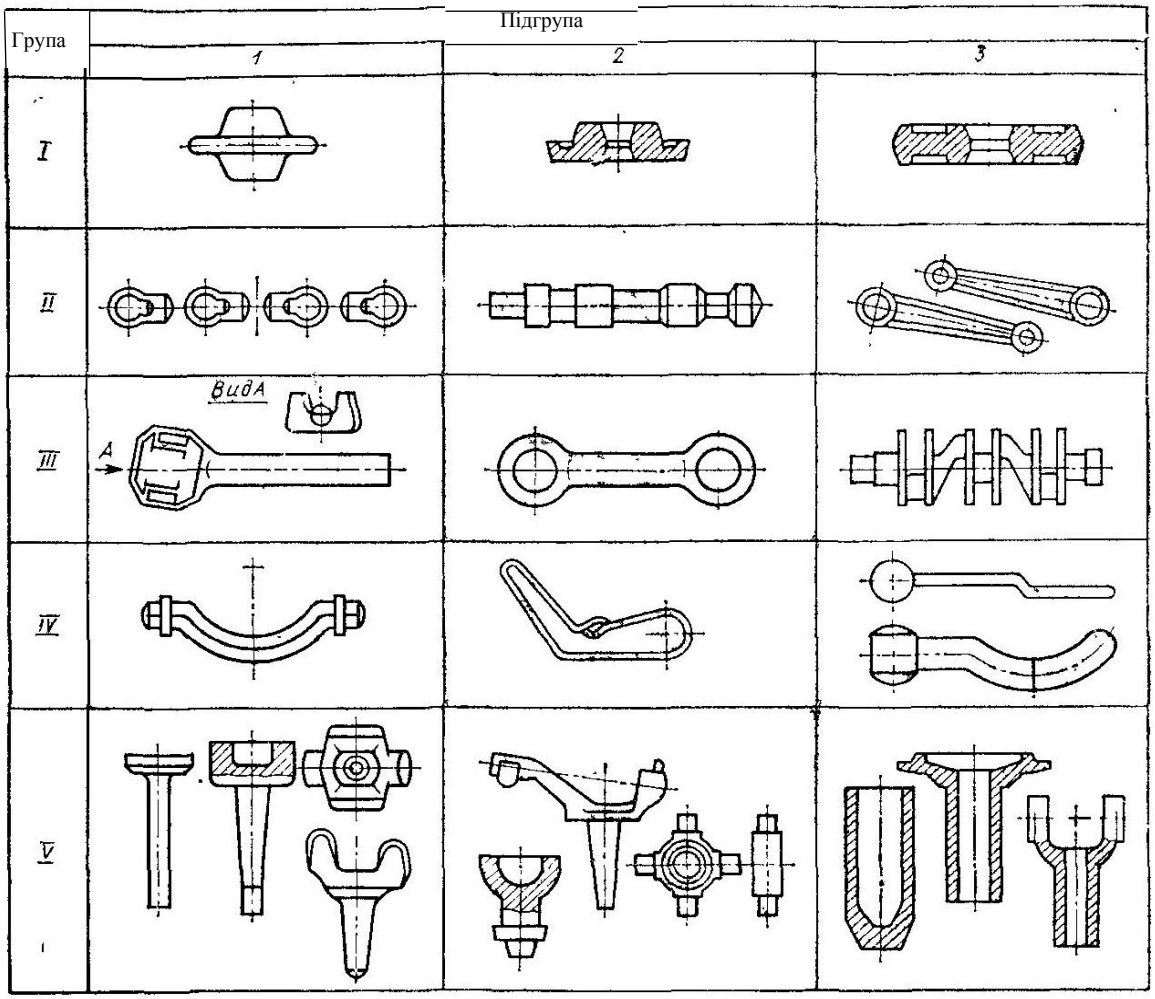


Рисунок 1.71 – Класифікація поковок, що штампують на КГШП, за їх формою та складністю виготовлення [73] (*пояснення – у тексті*)

До I групи відносять осесиметричні поковки, що виготовляють осаджуванням у торець або осаджуванням з одночасним витискуванням. Це поковки круглі та квадратні в плані або близькі до таких форм, а також поковки з відростками. Поковки 1-ої підгрупи цієї

групи штампують за один перехід, 2-ої і 3-ої підгруп – відповідно за два і три переходи у відкритих і закритих штампах.

II група – це поковки подовженої форми з невеликою різницею в площах поперечних перерізів. Штампування здійснюється, як правило, без попередньої підготовки заготовок. Поковки 1-ої підгрупи цієї групи штампують за один перехід, 2-ої підгрупи – за два. Штампування поковок 3-ої підгрупи здійснюють за три переходи. При цьому, незначну різницю поперечних перерізів отримують при спаровуванні поковок; тут підготовка заготовок, як правило, не потрібна або ж вистачає перетискного рівчака.

III група – це поковки подовженої форми із значною різницею в площах поперечних перерізів. Для виготовлення цих поковок необхідні заготовки, заздалегідь оброблені висадкою або витискуванням (1-а підгрупа), вальцюванням на кувальних вальцях або вальцях поперечно-клинової прокатки або на іншому аналогічному устаткуванні (2-а підгрупа) і комбінованими процесами (3-я підгрупа). Метал для відростків поковки може бути набраний при місцевому витискуванні в попередньо-заготівельному рівчаку.

До IV групи відносять поковки із зігнутою віссю. При виготовленні поковок 1-ої підгрупи застосовують штампи із замком, 2-ої підгрупи – вигинаючі рівчаки, 3-ої підгрупи – штампи із замком і вигинаючими рівчаками. При штампуванні особливо складних поковок із зігнутою віссю заготовки часто отримують на окремому устаткуванні, а у штампах, окрім вигинаючих, застосовують усі види рівчаків, у тому числі – при необхідності – і розсікачі.

V група – це поковки, що виготовляються витискуванням. У поковок типу стрижня з потовщенням (1-а підгрупа) стрижньові елементи утворюються прямим витискуванням металу за напрямом осі поковки, а окремі виступи – зворотнім витискуванням (закритою прошивкою). У поковок з потовщеннями або відростками (2-а підгрупа) витискування металу відбувається в напрямах, перпендикулярних до осі поковки, причому витискування може бути і комбінованим, тобто поряд з поперечним витискуванням виконують пряме. У поковок з глухою або наскрізною порожниною (3-я підгрупа) порожнисті елементи утворюються витискуванням металу в замкнуту кільцеву порожнину (заготовки можуть бути суцільними, з отворами і виготовлені з труб); при виготовленні поковок з порожнинами або виступами з двох сторін застосовують роз'ємні матриці і двосторонній рух пуансонів.

Вказана класифікація умовна, оскільки деякі поковки можна віднести до різних груп і підгруп у залежності від обраного варіанту штампування.

Гідравлічні преси після підвищення їх швидкодії почали широко використовувати для штампування кольорових металів і гарячого штампування сталі у відкритих та закритих штампах. За силою, що розвивається, вони перевершили кривошипні. Існують преси із силою до 500 МН (50000 тонн сили) і проєктуються преси до 2000 МН (200000 тонн сили), на яких можна штампувати складні вироби з легованої сталі масою до 5 тонн.

Поковки, що штампуються на гідравлічних пресах залежно від їх форми і технологічних особливостей штампування можна представити наступними типами:

I тип – знарядні корпуси, голівки циліндрів двигунів, довгі втулки, муфти тощо з глибокими порожнинами або наскрізними отворами (рисунок 1.72, *а… д*);

II тип – короткі чашки, втулки, діафрагми, диски тощо суцільні або з невеликими порожнинами (рис. 1.72, *е…к*);

III тип – хрестовини, ступиці, складні фасонні, порожнисті і з поглибленнями деталі, а також – крильчатки, лопаті гвинтів, панелі й інші великогабаритні деталі (рис. 1.72, *л… о*).

Штампування на гідравлічних пресах у відкритих штампах має ті ж переваги, що і на кривошипних пресах, проте гідравлічні преси належать до групи машин, у яких відсутній жорсткий хід. Ця обставина унеможливлює перевантаження машини. Безударний характер дії таких пресів сприятливо позначається на роботі штампів, стійкість яких вища, ніж на молотах. Штампування на гідравлічних пресах особливо ефективне у тих випадках, коли

потрібний великий робочий хід. Наприклад, спеціалізовані гідравлічні преси широко застосовують для прошивних операцій.

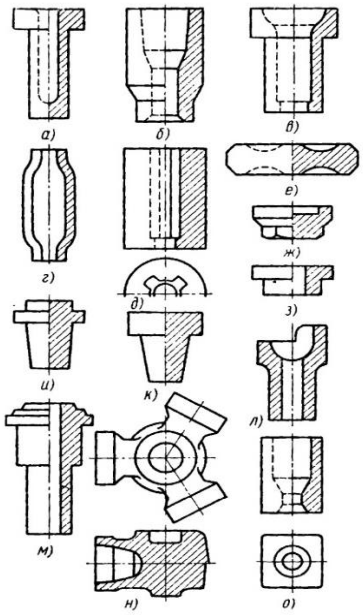


Рисунок 1.72 – Види виробів, що штампують на гідравлічних пресах [72, 73]
(*пояснення позицій – у тексті*)

Штампування на горизонтально-кувальних машинах (ГКМ) можна здійснювати у відкритих і закритих штампах.

Основною відмінністю штампів горизонтально-кувальних машин є наявність у них двох взаємно перпендикулярних роз'ємів. Штампи з просторовим роз'ємом дозволяють отримувати такі форми поковок, які неможливо отримати в розглянутих раніше штампах, причому з відносно невеликими втратами металу.

Тут найбільш доцільним типовим процесом висаджування є штампування від прутка без попереднього розділення прутків на заготовки. Деформування може здійснюватись в декількох рівчаках штампу, розташованих вертикально по висоті блоків. Зазвичай кількість струмків висадочного штампу – два-три, а у виняткових випадках досягає п'яти-шести, що залежить від довжини частини прутка і складності конфігурації поковки, що деформується.

При необхідності на горизонтально-кувальних машинах можна штампувати і мірні заготовки з упором заднього їх кінця (« *із заднім упором*»).

Наявність роз'єму в матрицях дозволяє обходитися без штампувальних ухилів на стінках її порожнини у тих випадках, коли глуха порожнина рівчака потрапляє до роз'єму. Без особливих труднощів можливо отримання висаджених поковок з наскрізними отворами.

Точність висаджених поковок вища, ніж, наприклад, при штампуванні на молотах за рахунок кращого напряму рухомих частин штампів і постійності величини ходу горизонтально-кувальних машин.

Проте, штампування на горизонтально-кувальних машинах має деякі недоліки:

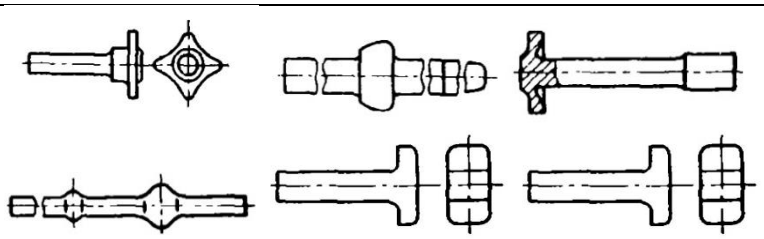
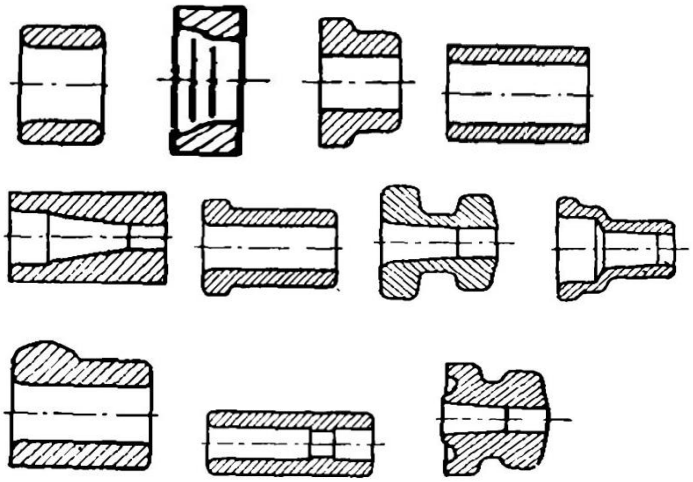
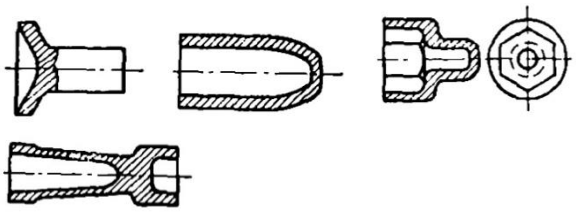
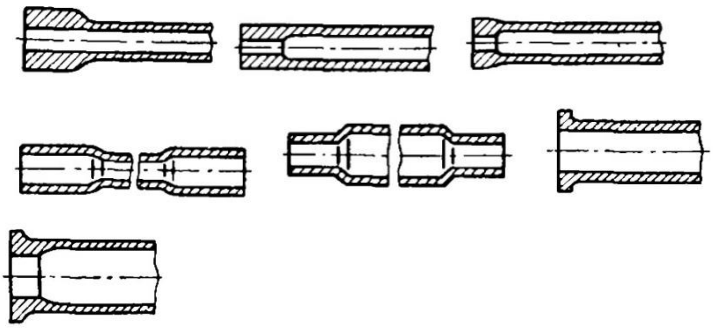
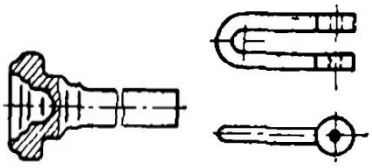
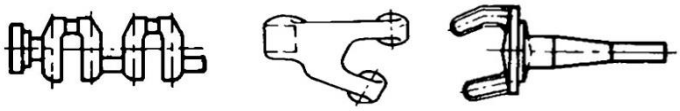
– неможна уникнути зайвих витрат металу на затиск прутків;

– цей різновид штампування застосовується, переважно, для поковок, що штампуються в торець;

– зміна діаметру прутків-заготовки при штампуванні однієї і тієї ж поковки пов'язана з необхідністю заміни штампу.

Поковки, що виготовляються на ГКМ, можна звести, залежно від їх форми і технологічних особливостей штампування, до шести груп, які представлені у таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Класифікація поковок, що виготовляються на ГКМ [72, 73]

Група	Характеристика поковок групи	Вид поковок групи
1	Поковки типу стрижня з одним і декількома потовщеннями, розташованими уздовж вихідного прутка	
2	Поковки типу кілець і втулок з наскрізними отворами	
3	Поковки з порожнинами (глухими отворами)	
4	Поковки порожнисті, штамповані з труб	
5	Поковки змішаної форми	
6	Поковки, що вимагають додаткового штампування на ГКМ	

Окрім основних процесів штампування, представлених вище, існують також його спеціалізовані види:

– гибкові роботи;

– обробка металу на вертикально-кувальних машинах;

– обробка на ротаційно-обтискових і радіально-обтискових машинах;

– вальцювання;

– штампування на гарячештампувальних автоматах;

– штампування на високошвидкісних молотах;

– електровисадження;

– штампування з використанням надпластичності металів.

Іноді у фаховій літературі до процесів штампування відносять і деякі інші спеціалізовані види обробки металу тиском:

– розкочування кільцевих заготовок (*див. «ковку» – вище та «прокатку» – нижче*);

– подовжньо-періодичну поперечну, поперечно-клинову і поперечно-гвинтову прокатку, накатку зубчастих коліс і зірочок (*див. «прокатку» – нижче*).

Штампування у холодному стані може виконуватись і без спеціального нагріву заготовки. Відсутність нагріву створює сприятливі передумови для механізації і автоматизації технологічного процесу, що підвищує продуктивність і покращує умови праці. Але холодне формозмінення супроводжується збільшенням міцності металу і зменшенням його пластичності, що ускладнює деформацію на подальших операціях. Для усунення шкідливого впливу зміцнення металу застосовують його міжопераційну термообробку (*див. вище*).

При використанні для обробки тиском штампового обладнання, а в якості заготовки – листового металу реалізуються процеси ***листового штампування***

Холодна листова штамповка

Цей вид ОМТ є одним з найбільш прогресивних і економічних методів виготовлення деталей. Він застосовується для серійного та масового виготовлення складових автомобілів, літаків, вагонів, хімічних апаратів, електроприладів та радіоелектроніки, багатьох виробів широкого вжитку тощо, а також – в дрібносерійному та одиничному (дослідному) виробництві з використанням універсальних штампів. У деяких варіантах обробка тиском тут здійснюється з використанням енергії вибуху, за допомогою еластичного інструменту, електроімпульсним впливом тощо.

Основним документом, що нормує в Україні якісні показники продукції, виготовленої методами холодного листового штампування, є ДСТУ 7808 «Прокат листовой для холодной штамповки из качественной конструкционной стали. Технические условия (*російською мовою*)».

Деталі, отримані цим видом ОМТ, відрізняються точністю розмірів, взаємозамінюваністю, у більшості випадків не вимагають подальшої механічної обробки, мають високу міцність і жорсткість при малій вазі та низькій витраті матеріалу [71, 74, 75].

В традиційному вигляді операції листового штампування виконують за допомогою двох робочих інструментів – *пуансона* та *матриці*.

Пуансоном називають інструмент, що охоплюється заготовкою, а матрицею – інструмент, що охоплює заготовку в процесі її обробки.

Для отримання виробів методами холодного штампування необхідно виконання ряду регламентованих типів технологічних операцій, до яких відносяться:

– *спеціальні* – для підготовки матеріалу до штампування;

– *контрольні* (проміжні або остаточні) – для перевірки якості напівфабрикату або виробів;

– *штампувальні*, що об’єднують велику кількість різноманітних операцій, які згідно з нормативними документами поділяють на групи:

– *розділові операції*, до яких відносять: відрізку, розрізку, вирубку, пробивку, обрізку, надрізку, прокол, зачистку (рисунок 1.73);

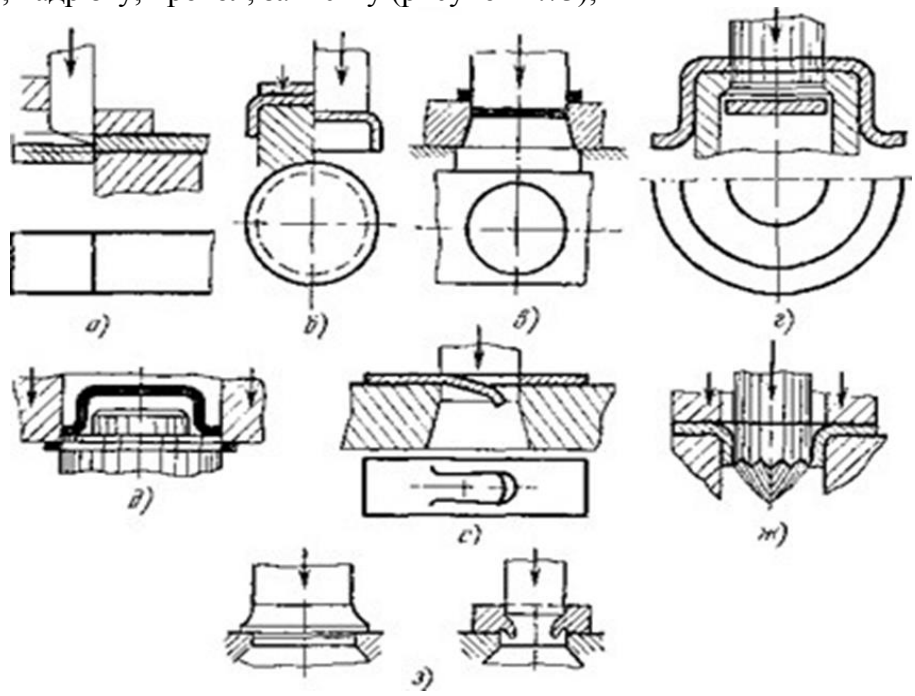


Рисунок 1.73 – Схеми розділових операцій листового штампування [71, 74, 75]:
а – відрізка; *б* – розрізка; *в* – вирубка; *г* – пробивка; *д* – обрізка; *е* – надрізка; *ж* – прокол; *з* – зачистка

– *формозмінні операції,* до яких відносять: вигин; витяжку; відбортовку; загортання; скручування; роздачу; обтиск; формовку; правку; чеканку; калібрування; керніння (рисунок 1.74);

– *комбіновані операції*, які в одному штампі об'єднують виконання двох або більше операцій;

– *складально-штампувальні операції*, засновані на вживанні операцій вигину, формування або відбортовки, при яких у штампі здійснюється з'єднання двох або більше деталей без зварювання або зі зварюванням, наприклад, тиском.

Відрізкою (*див. рис. 1.73, а*) називається розділова операція, при якій здійснюється повне відокремлення частини листової заготовки за *незамкнутим контуром* шляхом зсуву однієї частини заготовки відносно іншої. При використанні гільйотинних ножиць лист, що розрізається, розміщують у зазорі між ножами, фіксують (затискають) спеціальним механізмом та піддають дії ножів. Ця операція в більшості випадків є заготівельною і виконується на ножицях з паралельними або нахиленими ножами (*див. рис. 1.51*). Часто це поєднується з іншими операціями в штампах.

При паралельному розташуванні ножей лист одночасно розрізається по усій поверхні розрізання. Необхідна сила $P_{пар}$ розрізання визначається за формулою [71]:

$$P_{пар} = 1{,}3 \cdot b \cdot s \cdot \tau_{сер}, \tag{1.63}$$

де $b, s, \tau_{сер}$ – ширина, товщина листа та середнє значення опору зсуву матеріалу, що розрізається, відповідно.

Сила відрізання на ножицях з нахиленими під кутом φ ножами визначається за виразом [71]:

$$P_{нах} = 0{,}75 \frac{s^2}{tg\varphi} \tau_{сер}. \tag{1.64}$$

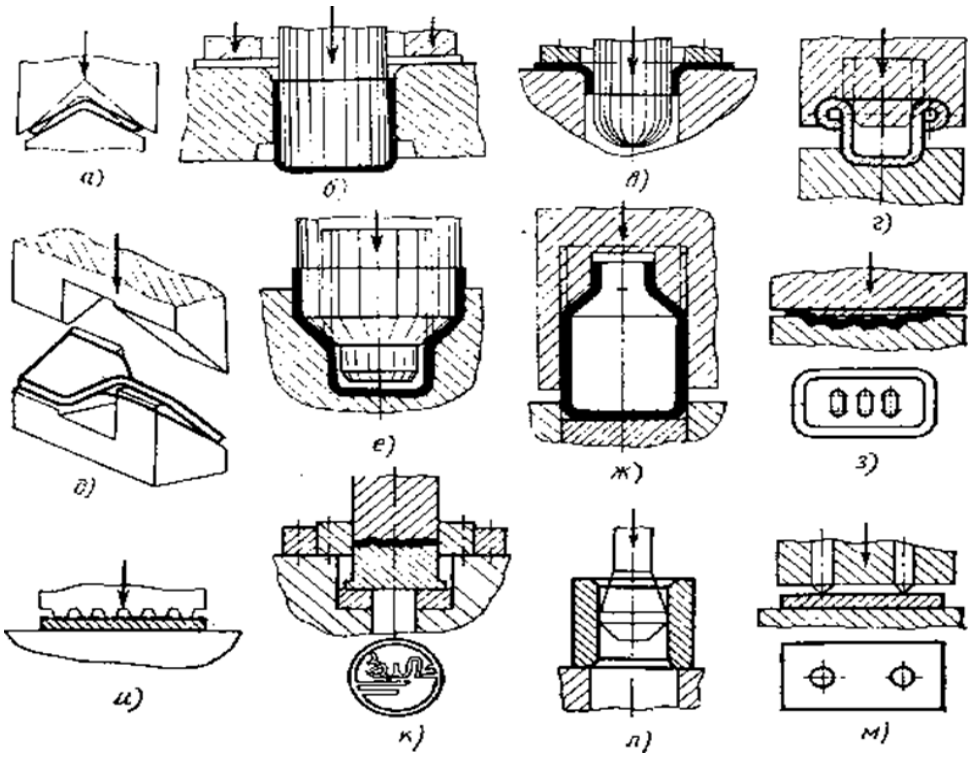


Рисунок 1.74 – Схеми формозмінних операцій листового штампування [71, 74, 75]: *а* – вигин; *б* – витяжка; *в* – відбортовка; *г* – загортання; *д* – скручування; *е* – роздача; *ж* – обтиск; *з* – формовка; *і* – правка; *к* – чеканка (карбування); *л* – калібрування; *м* – керніння

Відрізання також здійснюють за допомогою дискових ножиць, інструментом в яких слугують диски-ножі (*див. рис. 1.52*).

Розрізкою (*див. рис. 1.73, б*) називають операцію відокремлення частини заготовки за *замкнутим контуром* на ножицях. Для відрізки використовують як дискові ножиці з похилими ножами, так і ножиці із зворотно-поступальним рухом ножів (вібраційні). Силові умови розрізки визначаються аналогічно попередньому випадку.

Вирубкою і *пробивкою* (*див. рис. 1.73, в, г*) називають розділові операції, при яких здійснюється повне відокремлення за замкнутим контуром частини листової заготовки в штампі за допомогою пуансона і матриці. При *вирубці* отримують *зовнішній* контур деталі, тобто відокремлювана частина є деталлю (заготовкою, напівфабрикатом). При *пробивці* отримують *внутрішній* контур, а відокремлюваний матеріал є відходом.

Якість поверхні різу, точність деталі, сила вирубки (пробивки) та стійкість інструменту суттєво залежать від величини зазору. Слід при цьому також враховувати знос інструменту [71].

Силові умови цих операцій визначаються в залежності від наявності нахилу ріжучих кромок таким чином:

– при паралельних ріжучих кромках за формулою (1.63), де b – довжина периметру зрізання;

– при наявності нахилу кромок до формули (1.64) уводиться коефіцієнт 0,2…0,6.

На якість процесу вирубки (пробивки) суттєво впливає розкрой матеріалу, який характеризується *коефіцієнтом використання матеріалу*: $КВМ = \Sigma F_{дет} / F_{заг}$ (де $F_{дет}$ – сумарна площа деталей, які розміщено на площі заготовки $F_{заг}$). З точки зору збільшення $КВМ$ перемички між деталями мають бути мінімальними, але при деякій їх критичній величині якість різу знижується.

В залежності від товщини, ширини заготовки та виду розкрою («однорядний» чи «зустрічний») величину перемичок визначають 0,5…3 мм (менші значення вказаного діапазону відповідають однорядному розкрою заготовки меншої товщини та ширини).

Обрізка (*див. рис. 1.73, д*) – це відокремлення крайової частини (припуску) напівфабрикату, отриманого формозмінними операціями. Необхідність обрізки зумовлена рядом причин: утворення фестонів унаслідок анізотропії холоднокатаного металу; неточність фіксації заготовки на матриці; нерівномірність товщини штампованого матеріалу, зазору і мастила тощо.

Надрізкою (*див. рис. 1.73, е*) називають розділову операцію, при якій відбувається часткове відокремлення частини заготовки за незамкнутим контуром з формозміненням частини, що відокремлюється. Часто надрізка використовується для виготовлення безвідходних сіток. Для цього використовується пилкоподібний пуансон (ніж) з поперечним зворотно-поступальним рухом.

Прокол (*див. рис. 1.73, ж*) – це утворення крізних отворів в листовій заготовці без видалення матеріалу у відхід (так, наприклад, виготовляють тірки для овочів).

Зачистка (*див. рис. 1.73, з*) – видалення дрібних нерівностей і вигладжування шорсткості по внутрішньому або зовнішньому контуру напівфабрикату після вирубки або пробивки для одержання точних розмірів деталі і покращення якості поверхні.

Залежно від складності контуру оброблюваної деталі, роду і товщини матеріалу зачистка може бути однократною і багатократною. Для простого (без гострих кутів) зовнішнього контуру деталі завтовшки до 3 мм для всіх металів обмежуються однією зачисткою. При складному контурі (з гострими кутами) для деталей з твердої сталі товщиною до 3 мм потрібно дві операції. Для всіх металів завтовшки 3 мм необхідно застосовувати 2…3 зачистні операції.

Серед *формозмінних операцій холодної листової штамповки* (*див. рис. 1.74*) основними видами є: вигин, витяжка та формовка.

Вигином (*див. рис. 1.74, а*) називають операцію листового штампування, при якій з плоскої або зігнутої заготовки отримують зігнуту просторову деталь шляхом зміни кривизни серединної поверхні заготовки без істотної зміни її лінійних розмірів. Ця операція знаходить широке застосування в різноманітних сферах: при виробництві складних будівельних профілів, при виготовленні полиць, стелажів, металевих корпусів, коробів, кронштейнів, швелерів, куточків, декоративних деталей, огороджень тощо.

На зовнішній поверхні матеріалу, що згинається, виникають напруження розтягнення (що може привести до тріщиноутворення та навіть руйнування), а на внутрішній – стиснення (що може супроводжуватись складкоутворенням).

В результаті, на деякій відстані від поверхні розташовується *нейтральний шар напружень* (з нульовим напруженням). Згідно з даними [53] при вільному згині радіус $\rho_н$ нейтрального шару напружень відносно осі вигину дорівнює:

$$\rho_н = \sqrt{\mathrm{R_з r_{вн}}}\,, \tag{1.65}$$

де $R_з, r_{вн}$ – зовнішній та внутрішній радіуси стрічки при її вигині відповідно.

Між цим шаром та внутрішньою поверхнею вигину на відстані $\rho_д$ від осі вигину має місце *нейтральний шар деформації* (довжина якого не змінюється за цикл деформування).

Радіуси $\rho_н$ та $\rho_д$ у загальному випадку відрізняються від середнього радіуса ρ_c вигину стрічки:

$$\rho_c = 0{,}5(R_з + r_{вн})\,, \tag{1.66}$$

а їх величина визначається в спеціальній літературі [76, 77].

Значення моменту M, який необхідний для здійснення процесу вигину, можна оцінити розрахунком за формулою [53]:

$$M = 0{,}25 \cdot \sigma_T \cdot S^2 \cdot b\,, \tag{1.67}$$

де S, b – товщина та ширина стрічки-заготовки відповідно.

Після зняття навантаження за рахунок пружної віддачі матеріал декілька розгинається.

Момент вигину *з притиском* приблизно в 2,5 рази перевищує значення, що визначаються формулою (1.67).

Процес вигину використовують також для виготовлення зігнутих порожнистих профілів (труб) без наповнювача та з ним. При відсутності наповнювача переріз виробу втрачає початкову форму: коло може перетворитися на овал. Наявність наповнювача зберігає форму виробу, але зумовлює стоншення стінки порожнистого виробу та ускладнює технологію.

Процес вигину у сукупності з подовжнім розтягненням на 1…5% довжини виробу використовують для одержання стрічкових та профільних деталей малої кривизни на спеціальних профілегибочних станках. При цьому суттєво знижується пружна віддача та збільшується точність вигину.

Вигин як елемент технології у сукупності з прокаткою використовується при виготовленні гнутих профілів (*див. нижче*).

Витяжка (*див. рис. 1.74, б*) – це утворення порожнистої деталі з плоскої або порожнистої заготовки. Ця операція реалізується *без стоншування* стінки, в процесі якої заготовка перетворюється на порожнистий виріб будь-якої форми без примусового зменшення товщини стінки, та з її *стоншенням*, коли необхідним стає виготовлення деталі з її змінною товщиною.

Витяжкою з плоскої листової заготовки отримують порожнисті деталі, що мають:

– форму тіл обертання: днища котлів, металевий посуд, деталі освітлювальної апаратурі (наприклад, автомобільних фар) та інше;

– коробчасту форму: паливні баки двигунів внутрішнього згорання, бідони для паливно-мастильних матеріалів, тара для продуктів консервного виробництва тощо;

– одну вісь симетрії: дах автомобіля, його двері, капот та ін.;

– товщину дна більше товщини стінок: гільзи зброї, металевий посуд з товстим дном тощо.

Витяжка з порожнистих заготовок здійснюється на проміжних та заключній операціях після попередньої витяжки з плоскої заготовки. Можна також уявити себе витяжку трубчастої заготовки.

Для запобігання складкоутворення та стабілізації плину матеріалу при витяжці застосовують притискні кільця (*див. рис. 1.74, б*).

Схеми напруженого та деформованого стану металу на різних ділянках осередка деформації при витяжці можуть бути різними. Їх аналіз є корисним з точки зору правильного проєктування цього процесу ОМТ та управління ним.

Так, під притискним кільцем схема *напружень у* металі характеризується нормальним та окружним (тангенціальним) напруженням стискання та радіальним напруженням розтягнення. Схема *деформацій* є близькою до плоскої та характеризується складовими: окружна – стискання, та радіальна – розтягнення.

На ділянці входу металу до отвору матриці на контакті з пуансоном мають місце схеми напружень і деформацій близькі до плоских з однією складовою стискання (в напрямі до кромки матриці), а іншою сладовою – стискання або розтягнення у залежності від умов витягування. Якщо виникають *дві* складові деформації *стискання*, то у місці «вигину» метал стає більш товстим. Це є небажаним, оскільки енергія витрачається спочатку на непотрібне збільшення товщини заготовки, а потім – на обтискування цих місць.

На «протилежних» (з боку пуансона) ділянках металу мають місце близькі до плоских схеми напружень та деформацій із складовими: одна – стискання, інша – розтягнення.

На ділянках стінки «стакана», що формується (в зазорі між матрицею та пуансоном) у процесі витягування без потоншення стінки, схема напружень є близькою до одноосного лінійного розтягнення, а схема деформацій – до плоскої із складовими: лінійна розтягнення та радіальна стискання.

Найменш сприятливими для збереження цілісності металу є схеми напружень та деформацій у місцях переходу стінки «стакана» до його дна. Вони наближуються до тристороннього розтягнення, що часто супроводжується руйнуванням металу (з відривом дна «стакана»).

Для запобігання цьому на контакт заготовки з матрицею подають технологічне мастило, наприклад, емульсію мінерального або рослинного масла, а поверхню пуансона не змащують.

Деформацію при витяжці характеризують *ступенем витягування*:

$$K = \frac{D}{d}, \tag{1.68}$$

де D, d – діаметри заготовки та деталі відповідно.

Але *на практиці* використовують більш зручну для розрахунків величину, яку називають «коефіцієнтом витяжки»:

$$m_n = \frac{d_n}{d_{n-1}}, \tag{1.69}$$

де d – діаметр деталі; n – номер витяжки при багатопереходному процесі.

Меншим значенням m_n відповідає більша деформація заготовки. Цю величину слід відрізняти від коефіцієнта деформації за формулами (1.15) та (1.16), який також називають *коефіцієнтом витяжки*.

Аналогічним чином визначають характеристики деформації при витяжці некруглих у перерізі деталей [70].

Якість виробу суттєво залежить від від (радіусів $r_м$ та $r_п$) робочих кромок матриці (індекс «*м*») та пуансону (індекс «*п*»), а також – величини зазору z між ними [78].

При малих z деформація супроводжується стоншенням стінки s деталі, а при наявності надлишково великих z збільшується ймовірність складкоутворення. Практично, у залежності від властивостей матеріалу, що деформується, рекомендується при витяжці без стоншення стінки для першої операції мати $z = (1{,}3\ldots1{,}5)\cdot s$; для наступних операцій $z = (1{,}2\ldots1{,}3)\cdot s$. Для калібрувальних операцій $z = (1{,}0\ldots1{,}1)\cdot s$.

При витяжці зі стоншенням стінки рекомендується у залежності від виду, товщини заготовки та деяких інших обставин: $z = (0{,}65\ldots0{,}85)\cdot s$.

Величини $r_м$ та $r_п$ визначають у залежності від виду матеріалу та товщини заготовки, номеру операції та деяких інших факторів [78].

Чим більше $r_м$, тим менше сила витягування, стоншення матеріалу, m і більше стійкість штампу. Але надлишкове збільшення $r_м$ може привести до складкоутворення метала.

Радіус $r_п$ для всіх операціяї, крім останньої, приймають рівним $r_м$. На останній операції $r_м$ має дорівнювати необхідному радіусу заокруглення стінок деталі, але не менше, ніж $(2\ldots3)\cdot s$ при $s \le 6$ мм, і $(1{,}5\ldots2)\cdot s$ при $s > 6$ мм.

Силу P деформації витяжкою визначають, виходячи з умови збереження суцільності бічних стінок деталі біля дна:

$$P < L \cdot s \cdot \sigma_B \cdot k, \tag{1.70}$$

де L, s, σ_B – довжина периметру в «небезпечному» перерізі, товщина стінки та межа міцності матеріалу деталі; $k = 0{,}2\ldots1{,}1$ – коефіцієнт, який залежить, перш за все, від m, а також – стану матеріалу (до або після відпалу) та $r_м, r_п$, виду технологічного мастила, і може бути визначений за довідковими даними [78].

Потрібну силу Q притиску орієнтовно можна оцінити за формулою:

$$Q = Fq, \tag{1.71}$$

де F – площа заготовки під притискним кільцем; q – середній тиск притискного кільця, який визначають у залежності від матеріалу заготовки: для сталі q ~3 МПа; для алюмінію q ~1 МПа.

Тоді повна сила P_Σ витяжки для пресів простої дії [70]:

$$P_\Sigma = P + Q. \tag{1.72}$$

Формовкою (*див. рис. 1.74, з*) називають операцію формування поглиблень і опуклостей шляхом забезпечення місцевого потовщення та зтоншування матеріалу. Її застосовують для створення на деталях невеликих ребер жорсткості, поглиблень і виступів.

Силу P рельєфної формовки можна визначити за формулою [70]:

$$P = F \cdot q \cdot k, \tag{1.73}$$

де F – площа рельєфу, що штампується; q – експериментально знайдений параметр, який різний для різних матеріалів: для сталі – 400 МПа, для алюмінію – 200 МПа, для латуні – 250 МПа; k =0,8 при $s<1$ мм; k =1…1,5 при s =1…1,5 мм.

Інші формозмінні операції листового штампування характеризуються наступним чином [70].

Відбортовкою (*див. рис. 1.74, в*) називають операцію формування бортів по зовнішньому або внутрішньому контуру заготовки у залежності від призначення виробу.

Діаметр d отвору під відбортовку визначають за формулою:

$$d = D - 2(H - 0{,}43r - 0{,}75s), \tag{1.74}$$

де D – бажаний діаметр після відбортовки; H – висота бортику навкруги отвору; r – радіус заокруглення між бортиком і площиною деталі.

Формозміну круглої плоскої заготовки в цій операції характеризують *коефіцієнтом відбортовки* $K_{відб} = d/D$, а силу P – за формулою:

$$P \cong 1{,}1 \cdot \pi \cdot s \cdot \sigma_T \cdot (D - d). \tag{1.75}$$

Загортання (*див. рис. 1.74, г*) застосовують для утворення заокруглених бортів на краях плоскої або порожнистої заготовки і здійснюють у штампі або роликами.

Скручування металу (*див. рис. 1.74, д*) – операція, що полягає в повороті однієї частини заготовки довкола загальної осі по відношенню до іншої її частини під певним кутом.

Роздачу (*див. рис. 1.74, е*) застосовують для збільшення периметра поперечного перетину порожнистої заготовки. Цей процес здійснюється за рахунок внутрішнього тиску наповнювача (резина, мастило тощо), який забезпечується рухом пуансона. Для можливості вивільнення деталі після штамповки матриця повинна мати вертикальний роз'єм.

Ступінь деформації при роздачі оцінюють за *коефіцієнтом роздачі* K_p:

$$K_p = \frac{d_p}{d_0}, \tag{1.76}$$

де d_0, d_p – початковий діаметр циліндричної заготовки та найбільший діаметр після штамповки відповідно.

Товщина стінки деталі s_1 після штамповки зменшується згідно із законом постійності об'єму: $s_1 = s\, d_0/d_1$, де d_1 – діаметр у відповідному місці виробу.

Обтиск (*див. рис. 1.74, ж*) – це формозмінна операція, при якій відбувається зменшення поперечних розмірів, незначне зменшення довжини та збільшення товщини частини порожнистої циліндрової заготовки, що піддається деформоції. Ця операція здійснюється за допомогою воронкоподібного конічного пуансона, який насувається на заготовку. Кут конусності пуансона при наявності ефективного мастила приймають 12…16°, а при відсутності мастила – 20…25°.

Формозміна при цій операції характеризується *коефіцієнтом обтиску* $K_{об} = d / D$ (де в чисельнику міститься діаметр деталі, а в знаменнику – діаметр заготовки. Для запобігання складкоутворення рекомендується забезпечувати значення $K_{об}$ для сталі в діапазоні 0,85…0,90, а для алюмінію 0,80…0,85.

Потовщення виробу на його краю можна визначити за формулою:

$$s_1 = s\sqrt{\frac{D}{d}}\,. \qquad (1.77)$$

Правка як операція листової штамповки (*див. рис. 1.74, і*) – усуває спотворення форми заготовки, зменшення радіусів сполучень окремих ділянок заготовки. Тонкі деталі ($s < 1$ мм) виправляють у плоских штампах. При більшій товщині використовують плоскі штампи з рифленими поверхнями. Правку полих деталей здійснюють у спеціальних штампах.

Чеканка (*див. рис. 1.74, к*) – це отримання різних зображень шляхом вибивання (витискування) на листовому металі певного рельєфу.

Калібрування (*див. рис. 1.74, л*) – це метод забезпечення форми і розмірів послідовного ряду перехідних перетинів заготовки.

Керніння (*див. рис. 1.74, м*) – чеканка точкових поглиблень на поверхні заготовки.

Основним устаткуванням сучасного листоштампувального виробництва *є преси.*

В якості заготовки для цього устаткування використовують листи та стрічку з низьковуглецевої сталі і кольорових сплавів з максимальною товщиною до 10 мм і шириною від 1000 до 5000 мм, які попередньо виготовляють прокаткою (*див. нижче*).

Обладнання, яке застосовують при холодному листовому штампуванні, поділяють на штампувальні механічні (кривошипні) та гідравлічні преси та різні автомати, на яких встановлюють штампи різноманітних типів.

Деякі *розділові* операції здійснюють також і на механічних ножицях різних типів (кривошипних гільйотинних з паралельними чи похлими ножами або на дискових), які представлені вище.

На практиці найбільше застосовування отримали *кривошипні преси*. За конструкцією вони дуже різні, що пояснюється особливостями операцій, які на них здійснюються.

За способом дії на заготовку це обладнання поділяють на преси простої і подвійної дії.

Кривошипні преси простої дії (тип КД з номінальним зусиллям від 100 до 630 кН та ходом повзуна, що регулюється, від 5 до 100 мм відповідно) призначені для вирубки, гибки, неглибокої витяжки. Вони мають один повзун, що приводиться у зворотно-поступальний рух 1…4 кривошипами від електродвигуна за допомогою механічної передачі.

Особливістю *кривошипних пресів подвійної дії* є наявність двох повзунів: зовнішнього, який призначений для вирубки і притиску заготовки, і внутрішнього – для витяжки (тип КА з номінальним зусиллям внутрішнього повзуна від 1000 до 6300 кН і ходом від 420 до 850 мм та зовнішнього – від 630 до 4000 кН з ходом від 260 до 530 мм відповідно).

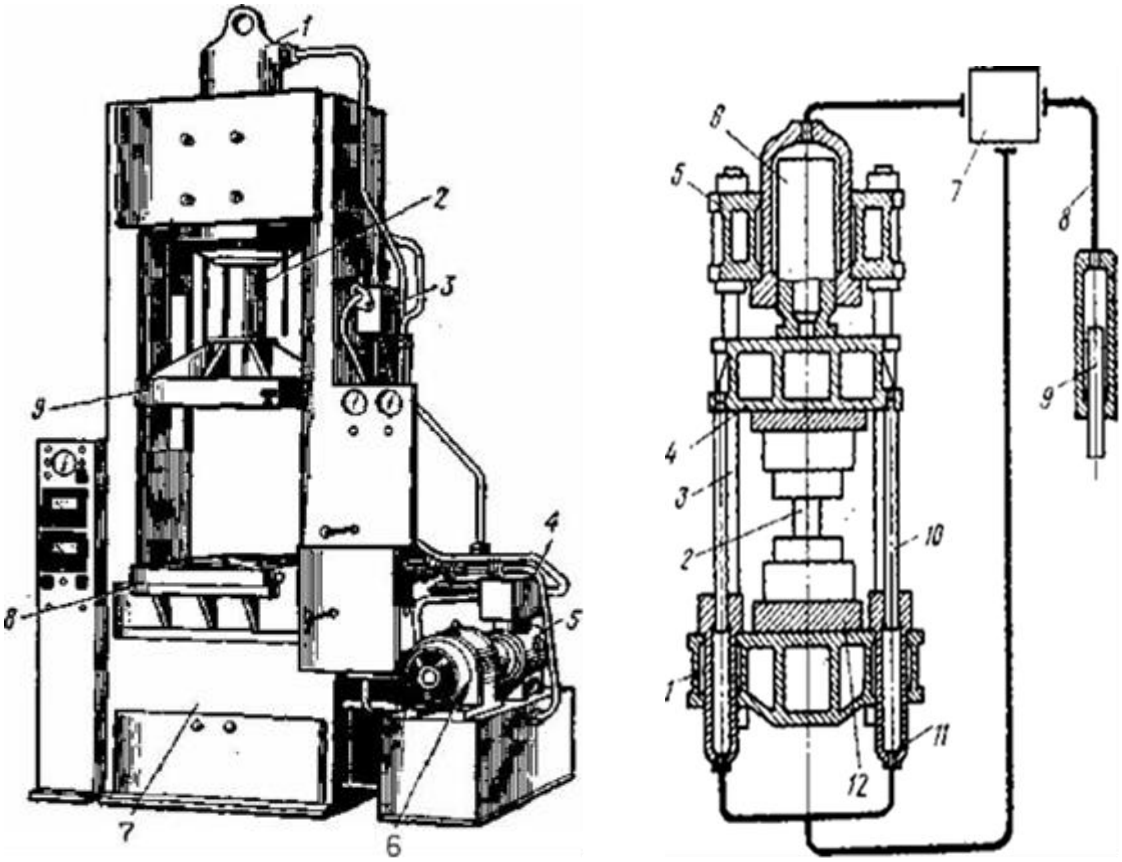
Перевагою *гідравлічних пресів* є те, що швидкість руху плунжера в них може бути різною (максимальна – до 0,3 м/с). При цьому можна забезпечити плавну або ступінчасту зміну зусилля, витримку під дією постійної або змінної сили. Вид і схема гідравлічного преса наведені на рисунку 1.75.

За функцією, що виконується, ***штампи для холодного листового штампування*** можна представити трьома групами:

1) штампи простої дії, або одноопераційні;

2) штампи послідовної дії;

3) штампи поєднаної дії.



а *б*

Рисунок 1.75 – Вид (*а*) і схема (*б*) гідравлічного преса [71, 74, 75]: *для виду а:* 1 – робочий циліндр; 2 – плунжер; 3 – колонни; 4, 5 – насоси; 6 – електродвигун; 7 – станина; 8 – стіл; 9 – траверса; *для схеми б:* 1 – нижня нерухома поперечина; 2 – заготовка; 3 – колонна; 4 – рухома поперечина; 5 – верхня нерухома поперечина; 6 – плунжер робочого циліндра; 7 – органи управління; 8 – трубопровід; 9 – плунжер насоса; 10 – поворотний плунжер, 11 – поворотний циліндр; 12 – рухомий стіл

У *штампі простої дії* за один хід повзуна виконується лише одна операція. Пуансон і матриця цих штампів мають форму в залежності від конструкції деталі і виконуваної операції. За видом штампувальної операції розрізняють штампи для гибки, вирубки і т.д. (*див. вище*)

Штампи послідовної дії за один хід повзуна виконують кілька операцій листового штампування *при послідовному переміщенні заготовки* від однієї позиції штампа до наступної.

В *штампі поєднаної дії* за один хід повзуна виконується дві чи більше операцій без переміщення заготовки. В результаті, забезпечується підвищення точності виробів.

Для автоматизації подачі до робочої зони штампа стрічкового або листового матеріалу широко застосовують валкові пристрої, які можуть бути односторонніми і двосторонніми. Перші бувають тягнучими (розташовані за штампом) або штовхаючими (встановлені перед штампом). Найчастіше ж використовуються пристрої двосторонньої подачі, які можуть і штовхати, і тягнути стрічку на крок подачі при русі повзуна вгору. При робочому ході повзуна подача стрічки не відбувається.

З технологічної точки зору матеріал, який вибирають для листового штампування, характеризується штампівністю («здібністю до штампування»). Рівень цього параметру можна оцінювати за відношенням величин σ_T, σ_B (*див. вище*), а також – за рівнем

відносного видовження δ та $\delta_{рівн}$ (останнє – «*рівномірне видовження*» [57, 58]). Вважають, що прийнятну здібність до штампування мають матеріали, у яких $\sigma_T / \sigma_B \le 0{,}65$, а δ >28%.

Представлені вище процеси обробки металів (матеріалів) тиском характеризуються, здебільшого, дискретним впливом інструмента на метал, що деформується.

Найбільш прийнятним для виготовлення масової та крупносерійної продукції з точки зору її якості, керованості процесів, продуктивності, можливості автоматизації та механізації являються види ОМТ з безперервним потраплянням довгомірної заготовки до зони деформації. До таких процесів відносяться прокатка, виробництво гнутих профілів і волочіння дроту.

Загальна характеристика процесів прокатки

Прокаткою називають процес ОМТ, при якому заготовка обтискується ***приводними*** (від окремого двигуна) валками, які обертаються та втягують метал у зону деформації.

Великий вклад в розвиток теорії та технологій для майже усіх видів і перероблень прокатного виробництва внесла дніпропетровська школа прокатників, яку очолювали відомі вчені: Виноградов О.П., Ємельяненко П.Т., Чекмарьов О.П., розвивали Сафьян М.М., Мутьєв М.С., Ханін М.І., Діннік О.О., Друян В.М., Данченко В.М., Ваткін Я.Л., Клименко П.Л. та ін.

Основна схема *деформацій* при прокатці – одностороннє стискання (обтиснення) та двостороннє збільшення розмірів (на витягування, або витяжку та поширення), а схема *напружень* – всебічне стискання (за рахунок обтиснення металу валками та дії «підпираючих» сил тертя при відповідному «плині» металу).

Слід мати на увазі, що при наявності в зоні формозміни металу суттєвої нерівномірності його деформації, наприклад, пов'язаної із застосованими формою заготовки і профиля валків, можуть з'явитися *додаткові напруження*, які зумовлюють зміну загальної або місцевої схеми напружень та/або деформацій. Наслідком цього можуть стати руйнування розкату та/або спотворення його подовжнього та/або поперечного профилю, у тому числі – і після виходу метала з осередка деформації внаслідок дії заликових напружень у ньому.

Процеси прокатки класифікують за такими ознаками:

– *за температурою проведення процесу* прокатку поділяють на *гарячу* (температура металу при реалізації процесу вище за температуру рекристалізації) і *холодну* (температура металу суттєво нижче температури рекристалізації); також має місце так звана *тепла* прокатка – обробка в області проміжних температур;

– *за взаємним розташуванням осей валків і розкату* розрізняють *подовжню* (вісь розкату є перпендикулярною осям валків), *поперечну* (вісь розкату паралельна осям валків) і *поперечно-гвинтову*, або «косу прокатку» (осі валків знаходяться під деяким кутом один до одного та до осі розкату), що відображено на рисунку 1.76. Різновидом прокатки за останньою категорією можна прийняти процес, при якому *подовжня ось калібра* (рівчака) розташована на циліндричній поверхні валків *по спіралі*, що має місце, наприклад, при прокатуванні куль.

Найбільшого поширення набула подовжня прокатка (*див. рис. 1.76, а*), якою отримують листи, штаби, смуги, стрічки та сортовий метал різноманітної форми поперечного перерізу (круглого, квадратного, шестигранного, фасонного, періодичного та ін.):

– *за характером впливу валків на розкат і умовами деформації* прокатка буває симетричною та несиметричною. *Симетричною* прокаткою називають процес, при якому вплив валків на розкат з протилежних сторін є практично однаковим; якщо ця умова суттєво порушується, процес слід віднести до несиметричної прокатки (строго кажучи, симетричною прокатка може бути лише теоретично);

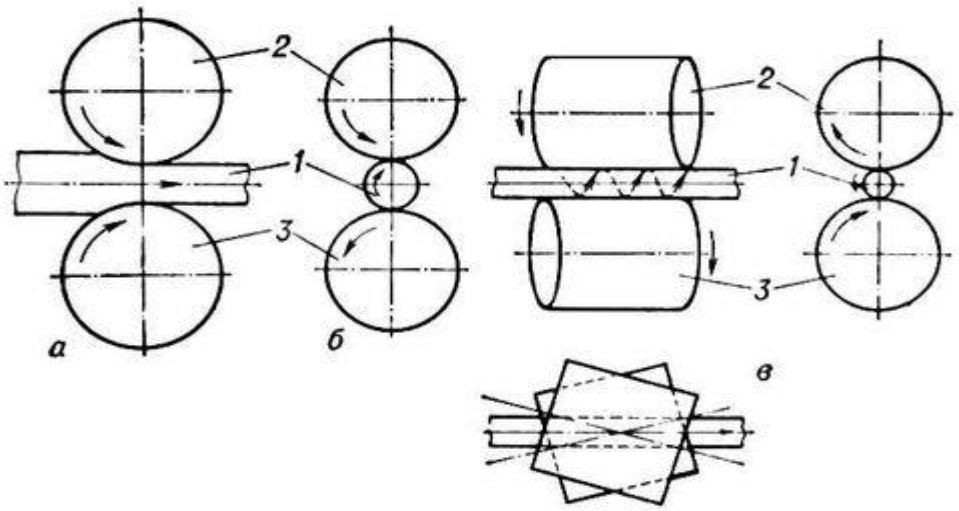


Рисунок 1.76 – Схеми подовжньої (*а*), поперечної (*б*) і поперечно-гвинтової (*в*) прокатки: 1 – метал, що прокатується; 2, 3 – валки [7]

– *за наявності або відсутності зовнішніх сил, прикладених до кінців розкату,* виділяють вільну і невільну прокатку. Прокатка називається *вільною*, якщо на метал діють лише сили, прикладені з боку валків; *невільна* прокатка здійснюється з натягом або підпором від зовнішніх пристроїв. У зв'язку з цим виділяють *безперервну прокатку*, при якій розкат знаходится одночасно під впливом декількох прокатних клітей;

– *за видом продукції, що виготовляється, формою та розміром її перерізу* розрізняють обтискову та заготівельну прокатку, сортову (крупносортову, средньосортову, дрібносортову та дротову, виготовлення простих, фасонних, фланцевих профілів), листову прокатку, трубну прокатку, а також прокатку спеціальних профілів (коліс, кілець, шестерен, куль тощо). Кожен з названих видів включає підвиди відповідного процесу. Наприклад, при обтискному виробництві виготовляють *блюми* та *сляби*; сортова прокатка включає профілі постійного та змінного перерізу (періодичні профілі); прокатка листа поділяється на товстолистову та тонколистову; прокатка труб розрізняється за відносною товщиною стінки на товстостінні, тонкостінні та особливо тонкостінні, а за їх призначенням – на нафтопровідні, водогазопровідні тощо (*див. нижче*);

– іноді з урахуванням *точності* забезпечення вимог до продукції (хімічний склад, структура та мікроструктура, розміри, якість поверхні тощо) виділяють *прецизійну* (тобто, особливо точну) прокатку.

Безпоседньо, деформування металу при прокатці здійснюється у прокатній кліті валками з легованої сталі або чавуну з відбіленим поверхневим шаром.

Відомою схемою представлення інформації з технології прокатного виробництва, що зазвичай використовується, є базування навчальних матеріалів на категорії «*за видом продукції, що виготовляється»* (обтискове виробництво, листопрокатне, сортопрокатне, трубопрокатне тощо). При цьому, в рамках однієї технологічної схеми часто вимушено поєднуються різні види прокатки за категорією щодо «*взаємного розташування осей валків і розкату».* Між тим, остання категорія класифікації є важливою для розуміння сутності й єдності процесів виготовлення продукції та реалізації технічного контролю її якості.

Тому у наведених нижче матеріалах акцент зроблено саме на цій базовій категорії з безумовним урахуванням *кінцевої продукції*.

Процес подовжньої прокатки використовують при виготовленні заготовок (слябів та блюмів), стрічки та смуги різної товщини і ширини у рулонах або – рідкіше – у вигляді окремих карток («листів»), разноманітних сортових профілів (квадратного та круглого

пререрізів, кутиків, швелерів, балок, рейок та ін., деякі з яких зображені на рисунку 1.77), сортового прокату з періодичним перерізом по довжині, а також труб.

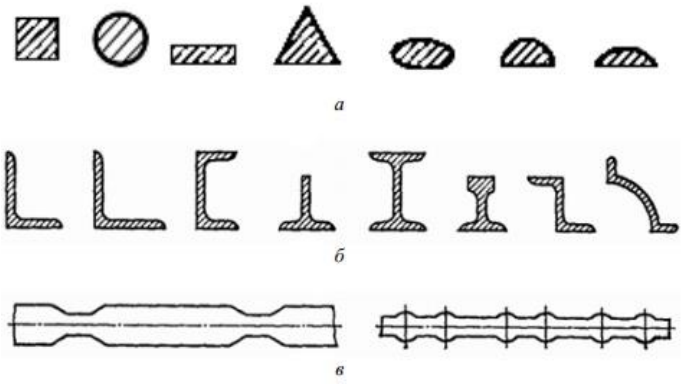


Рисунок 1.77 – Вигляд деяких перетинів сортового прокату [6, 38, 39. 41] у поперечних перетинах простих (*а*) та фасонних (*б*) профілів; подовжніх перетинів прокату періодичного профілю (*в*)

При подовжній прокатці (*див. рис. 1.76, а*) метал обтискується валками, що обертаються в протилежних напрямках.

На рисунку 1.78 в якості прикладу представлена загальна схема будови прокатного валка стана подовжньої прокатки. Він має середню робочу частину – *бочку*.

По обидві сторони бочки розташовані *шийки* валка, якими він спирається на підшипники (останні розташовуються в подушках станини прокатної кліті). Кінцеві частини валка (*трефи*) використовуються для з'єднання зі шпинделем, що передає обертання валкам від приводу (рисунок 1.79). Бочка валка для прокатки плоских виробів може бути практично циліндричною (точніше – з невеликою ~ 0,05…0,15мм опуклістю чи увігнутістю) або мати на своїй поверхні кільцеві виточки-рівчаки, які звуться *калібрами* та використовуються при прокатці неплоских видів прокату (*див. рис. 1.77*).

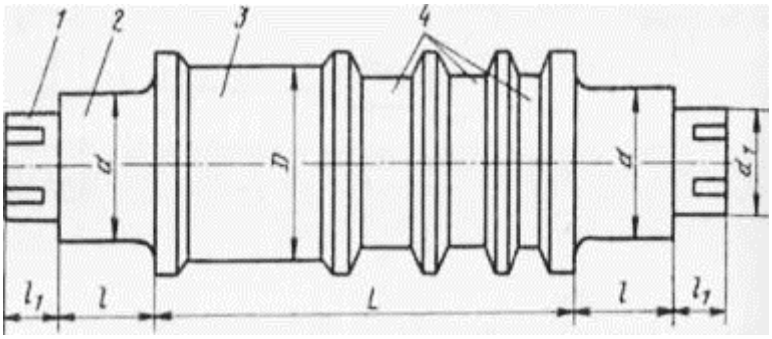


Рисунок 1.78 – Схема прокатного валка блюмінга [6]: 1 – трефи; 2 – шийки; 3 – гладка ділянка бочки валка; 4 – рівчаки на бочці валка

Валки листопрокатних станів зазвичай циліндричні (точніше – профільовані по центру або біля шийок з опуклістю (або увігнітістю) на долі міліметра). Валки станів подовжньої трубної прокатки мають рівчаки, переріз яких наближується до радіального.

Поперечний переріз виробу в процесі прокатки металу формується проміжком між валками. Часто «*калібром*» називають саме просвіт між валками. Такий калібр може утворюватись парою валків («двовалковий калібр»), трьома валками («тривалковий калібр») або чотирма валками («чотиривалковий калібр»).

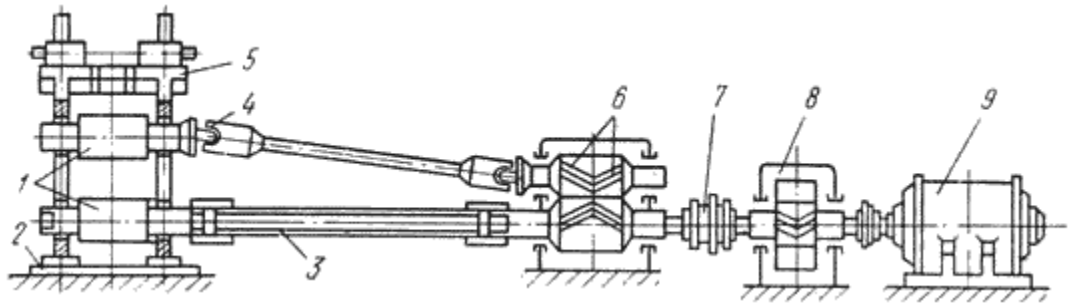


Рисунок 1.79 – Схема головної лінії прокатного стана [6]: 1 – прокатні валки; 2 – плита, 3 – трефовий шпиндель, 4 – універсальний шпиндель, 5 – робоча кліть; 6 – шестеренна кліть; 7 – муфта, 8 – редуктор; 9 – двигун

При утворенні чотиривалкового калібру осі валків можуть знаходитись в одній площині або попарно в площинах, які відстоять одна від одної уздовж осі прокатки. Зокрема, калібр, що утворений двома парами приводних циліндричних валків називається «*універсальним калібром*».

Форма поперечного перерізу розкату, що входить у валки, так само як і на виході з валків, може бути досить різною. У випадках, коли відрізняються діаметри (і окружні швидкості верхнього та нижнього валків) має місце *несиметрична прокатка*.

При подовжній прокатці, коли метал проходить між валками, висота h його перетину зменшується, а ширина b і довжина збільшуються. Різниця висот перерізу металу до (*індекс «0»*) та після (*індекс «1»*) проходу між валками називається *лінійним (абсолютним) обтисненням*:

$$\Delta h = h_0 - h_1 \ . \tag{1.78}$$

Відношення цієї величини до початкової висоті h_0, виражене у відсотках, називається *умовним відносним обтисненням* ε, що є аналогом величини за формулами (1.11) та (1.12). За один прохід обтиснення металу може становити 5…60%, а іноді і більше.

Заготовка і розкат, який виходить з валків, мають швидкості v_0 и v_1 відповідно, причому $v_0 < v_1$ завдяки пластичній деформації. Зростання довжини (і швидкості!) прокатаного металу характеризується *коефіцієнтом витяжки* μ, який розраховують за формулами (1.15) або (1.16) – це відношення довжини металу після його виходу з валків до первісної довжини.

Деформація металу в напрямку ширини його перетину називається *розширенням,* яке також розглядається як *абсолютне* Δb, так і *відносне (до початкової ширини* b_0*)*. Розширення зростає з підвищенням обтиснення, діаметра валків і коефіцієнта тертя між металом і поверхнею валків. Воно тим менше, чим ширшим є розкат.

Основне обтиснення металу відбувається в *осередку деформації* – зоні між валками, де прокатуваний метал безпосередньо з ними стикається.

Геометрично при прокатці *на гладких валках* з радіусом R, що більш притаманне виготовленню листової продукції, довжина l_o осередку деформації визначається формулою [6]:

$$l_o = \sqrt{R \cdot \Delta h} \ , \tag{1.79}$$

а його границі у подовжньому перерізі обмежується *кутом* α *контакту* («кутом захвату») – центральним кутом від осі валка до точок початку і кінця осередку деформації [6]:

$$\alpha \approx \sqrt{\frac{\Delta h}{R}} \ . \tag{1.80}$$

Важливою характеристикою висоти осередка деформації є так званий *«фактор форми»* $\Phi = l_\partial / h_c$ (де $h_c = 0{,}5(h_0 + h_1)$ – середня висота розкату в зоні його контакту з валками). При Ф<1 розкат умовно вважають високим, а при Ф>3…4 – тонким.

Фактично, деформація метала відбувається і поза межами геометричного осередка деформації. При прокатці високих заготовок з'являється суттєва деформація металу *до* геометричних границь зони його контакту з валками (так звана, *утяжка*). Прокатка тонких і, особливо – *холодна* прокатка тонких стрічок супроводжується пружною деформацією валків і штаби, що виводить реальний контакт за межі геометричного. Тому формула (1.79) може доповнюватись параметрами, які враховують сплющування [54], а ділянки, що примикають з обох сторін до геометричного осередка деформації, називаються *позаконтактними зонами деформації*.

Осередок деформації, у цілому, при подовжній прокатці складається з двох основних ділянок: *зони відставання*, в якій середня швидкість металу менше горизонтальної складової окружної швидкості валків, і *зони випередження*, в якій швидкість металу вище (на 2…6%) за окружну швидкість валків. Геометрична границя між цими зонами називається *нейтральним перетином*. У деяких випадках прокатки (наприклад, при гарячій деформації високих смуг) окіл нейтрального перетину утворюється так звана *зона прилипання (або зона утрудненої деформації)*, в якій *місцева* деформація металу майже не відбувається, швидкість часток металу практично дорівнює швидкості валків, а загальна формозміна здійснюється за рахунок середніх шарів, тобто переноситься усередину зони деформації [51].

Захоплення металу валками і стабільність протікання процесу обумовлюються силами тертя, що виникають на контактній поверхні металу з валками. Сили тертя, що діють на прокатуваний матеріал від валків у зоні випередження, спрямовані проти напряму його руху, а в зоні відставання – за напрямом прокатування. Саме останні і зумовлюють залучення металу до осередка деформації та реалізацію процесу прокатування.

З моменту контакта металу валками на нього з боку кожного валка діє сила, яку можна розкласти на нормальну (радіальну) і дотичну (тангенціальну) складові. Для залучення метала в осередок деформації є необхідним виконання умови, щоб тангенс кута $\alpha_з$ захоплення (індекс «*з*») не перевищив коефіцієнт тертя $f_з$ [54] при захопленні, тобто:

$$tg\alpha_з \le f_з, \qquad (1.81)$$

де $\alpha_з$ можна оцінити за формулою (1.80).

У випадках, коли до чистоти поверхні виробів не пред'являють високих вимог, прагнуть до збільшення $f_з$, наприклад, насіканням поверхні валків, що дає можливість підвищити $\alpha_з$ і відповідне максимальне обтиснення металу за пропуск. Але при цьому збільшується сила прокатки, що може стати лімітуючим фактором для реалізації процеса.

Слід також мати на увазі, що після захоплення металу валками та заповнення ним осередку деформації умова здійснення усталеного процесу прокатки у порівнянні з виразом (1.80) змінюється [58]:

$$tg\frac{\alpha_з}{2} \le f_у, \qquad (1.82)$$

де $f_у$ – коефіцієнт тертя при сталому процесі прокатки, причому у загальному випадку $f_y \ne f_з$.

Практично, при гарячій прокатці $\alpha_з$ знаходиться в наступних межах: для гладких валків 20…26°, для насічених – 27…34°.

При холодній прокатці кути захоплення, які використовують на практиці, забезпечують обтиснення у межах 10…15%, що пов'язано з меншим рівнем тертя,

порівняно високим значенням межі текучості металу, збільшенням *сили прокатки* та її обмеженням міцністю прокатного обладнання.

За самою простою схемою, силу P прокатки можна визначити у відповідності з формулою [54]:

$$P = p_c \cdot b_c \cdot l_\partial , \tag{1.83}$$

де b_c – середня ширина розкату в осередку деформації; p_c – середній тиск металу на валки.

Останню величину зазвичай розраховують по одній з відомих теоретичних формул. Зокрема, формула Целікова О.І. має вигляд:

$$p_c = \sigma^*_{Tc} \cdot \frac{2h_1}{\Delta h(\delta - 1)} \cdot (\frac{h_\gamma}{h_1}) \cdot [(\frac{h_\gamma}{h_1})^\delta - 1], \tag{1.84}$$

де $(\frac{h_\gamma}{h_1}) = [\frac{1 + \sqrt{1 + (\delta^2 - 1) \cdot (\frac{h_0}{h_1})^\delta}}{\delta - 1}]^{(-\delta)}$; $\delta = \frac{2 f_y \cdot l_\partial}{\Delta h}$; h_γ – товщина розката в нейтральному перерізі осередка деформації; вимушена межа текучості σ^*_{Tc} метала визначається при урахуванні положень, викладених вище, з використанням формул (1.38) та (1.46)…(1.48).

Аналіз представлених формул показує, що за інших рівних умов сила прокатки тем менше, чим менше радіус робочих валків. Але при цьому зменшується їх здібність підтримувати власну прямолінійну форму осі та загальну міцність, зокрема, на скручування. Ці обставини використовуються при розробці конструкцій валкових вузлів, здебільшого – листопрокатних станів. Зокрема, прагнуть до зменшення діаметрів *робочих валків*, використовуючи *опорні валки* для збільшення жорсткості валкового вузла на прогин, а також визначають доцільну схему передачі крутного моменту: через трефи робочих або опорних валків [6, 41…43].

При цьому слід обов'язково здійснювати перевірку оснащення прокатної кліті (валків, підшипників, станини тощо) на міцність за правилами прикладної механіки та опору матеріалів.

Конструктивно, для збільшення жорсткості валкового вузла та зменшення прогину робочих валків використовують так звані *багатовалкові прокатні кліті*. Так, при наявності, окрім пари робочих валків в *кліті «дуо»* (рисунок 1.80, *а*), ще й додаткових (опорних) валків, які розташовані в тій самій площині і на які спираються робочі валки, отримуємо *кліть трио-Лаута* (рис. 1.80, *б*) або в *кліть «кварто»* (рисунок 1.80, *в*). Використовуються також конструкції, в яких кожен робочий валок спирається на два опорні валки – *шестивалкові кліті* (рис. 1.80, *г*), які можуть спиратися на свої опорні валки (рис. 1.80, *д, е*). В результаті, отримуємо 12-валкові та 20-валкові кліті (див. рис. 1.80, *б*).

Реверсивні стани кварто мають довжину бочки валків до 2300 мм (частіше 1200…1700 мм). Вони призначені, в основному, для прокатки смуг з вуглецевих і легованих сталей товщиною більше 0,5 мм, хоча іноді (при невеликих обсягах виробництва) їх застосовують і для прокатки жерсті товщиною 0,2…0,3 мм. Швидкість прокатки тут становить 10…20 м/с.

Багатовалкові, зокрема, 20-валкові кліті застосовуються, головним чином, для прокатки тонких і найтонших смуг і стрічок з легованих сталей і сплавів. Найбільшого поширення набули кліті з робочими валками діаметром від 3 до 150 мм при відповідній довжині бочки 60…1700 мм. У сортамент цих станів входять стрічки і смуги мінімальною товщиною відповідно 0,002 мм і 0,1 мм, шириною до 1000…1500 мм. Швидкість прокатки на них сягає 10…15 м/с.

Недоліком багатовалкових станів є складність їх конструкції. Тому постійно ведуться роботи зі створення таких конструкцій клітей, які б дозволили застосовувати робочі валки малого діаметра і мати високу жорсткість при більш простий валкової системі. Прикладом можуть служити стани кварто типу MKW, вже освоєні в промисловості. Для запобігання прогину робочих валків малого діаметра в горизонтальній площині служать

опорні ролики, які можуть мати двостороннє розташування. Приводними в станах *МКW* є опорні валки.

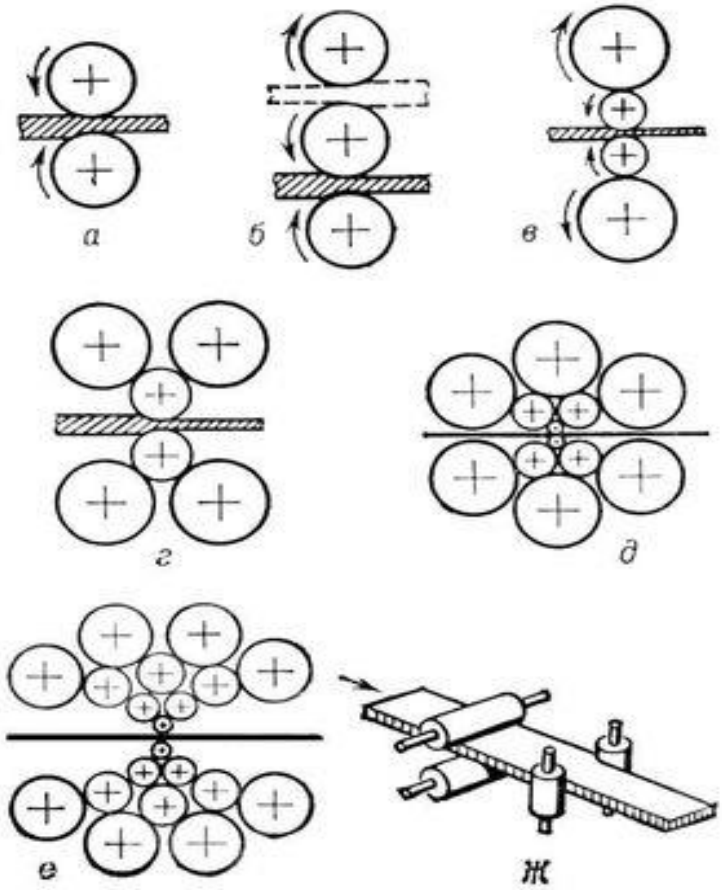


Рисунок 1.80 – Схеми одноклітьових реверсивних станів різних конструкцій [6, 43]: *а* – дуо; *б* – трио Лаута; *в* – кварто; *г* – 6-валкові типу *НС*; *д* – 12-валкові (стан Тейлора); *е* – 20-валкові; *ж* – схема «універсальної» прокатки (з обтисненням кромок стрічки)

Також отримали промислове застосування 6-валкові стани з розташуванням усіх валків в одній вертикальній площині (стани типу *НС – див. рис. 1.80, г*). При такому розташуванні валків забезпечується їх високий опір вигину, однак виникають труднощі в утриманні валків від бічних зсувів.

П’ятивалкові стани Тейлора (на рисунку *не показані*) займають проміжне положення між станами кварто і 6-валковими типу *НС*. Використання навіть одного валка зменшеного діаметру дозволяє суттєво збільшити можливу величину обтиснень.

Для забезпечення площинності продукції поздовжню *листову* прокатку ведуть в циліндричних валках, які зазвичай мають невелику (долі міліметра) опуклість або увігнутість, тобто – *профілювання* поверхні. Вказаним прийомом прагнуть компенсувати прогин валків під дією сили прокатки.

Використанням *універсального калібру* (рис. 1.80, *ж*) забезпечують (за необхідності) обтиск розкату вертикальними валками по кромках.

Процес подовжньої прокатки добре піддається механізації та автоматизації, навіть при практично досягнутих швидкостях (до 120 м/с).

У зв’язку з обмеженими можливостями металів та сплавів щодо їх деформування, прокатку зазвичай ведуть за *переробленнями*, по етапах [6]. При цьому, перетин заготовки поступово наближають до перерізу готової продукції з урахуванням забезпечення необхідних пластичних властивостей металу, наприклад, за допомогою проміжної термічної обробки (*див. вище*).

Подовжня прокатка може здійснюватись за варіантами:

– за декілька проходів в одній кліті тільки в одному напрямку або з можливістю реверса. В останньому випадку таку кліть називають «*реверсивною*»;

– послідовно у клітях, які розташовані в одну або декілька ліній (на «лінійних станах», станах із *Z*-подібним розташуванням обладнання та ін.);

– у послідовно розташованих клітях. Якщо *весь* розкат встигає вийти з валків попередньої до потрапляння у наступну кліть прокатного агрегата, прокатку називають *«послідовною»*. Якщо розкат деформується *одночасно* у двох або більше послідовно розташованих клітях, прокатку називають *«безперервною»*. У такому разі метал у кожній кліті піддається тільки одному обтисненню, а напрямок прокатки не змінюється.

Особливістю процесу безперевної прокатки є виконання так званої умови «*постійності секундних об'ємів металу*», які проходять у кожний момент часу крізь певний i-й перетин робочої лінії стану, включаючи осередки деформації:

$$v_i \cdot F_i = const \quad (1.85)$$

Різновидом безперервної прокатки можна вважати *нескінченну* прокатку, коли окремі заготовки зварюють перед їх першим потраплянням до валків прокатної кліті.

При холодній прокатці формозміну метала, як правило, ведуть з технологічним мастилом, в якості якого застосовують рослинні або мінеральні масла або їх емульсії. Таке мастило часто поєднує функції зниження тертя та охолодження валків [61].

При гарячій прокатці процес зазвичай ведуть без технологічного мастила та з інтенсивним охолодженням валків водою. Корисним для якості продукції при цьому є видалення окалини з поверхні заготовки, наприклад, водою під тиском до 100…150 атм.

Іноді ефективним (особливо, при гарячій листовій прокатці) методом стає застосування технологічного мастила, в якості якого використовують рослинні або мінеральні масла у вигляді емульсій або масляного тумана, які подають до осередка деформації зі сторони входа розката у валки. В результаті вдається на 5…10% зменшити енерговитрати на деформацію метала та підвищити у 1,5…3 рази стійкість валків.

Сортову подовжню прокатку, яку інколи називають «*профільною*», реалізують у валках з калібрами (рівчаками), зазор між якими відповідає формі бажаного профілю (*див. рис. 1.77*).

Процес подовжньої прокатки труб здійснюється у майже круглих калібрах (що мають випуски) з обтиском по діаметру і стінці на оправці або зі зменшенням діаметра при відсутності оправки. Останні операції відповідно називають *калібровкою,* а у випадку значного зменшення диаметра – *редукуванням.*

Наявність випусків калібрів викликає відхилення профілю труби від круглої форми. Це зумовлює необхідність контрольованого обтиснення відповідних ділянок перерізу труби шляхом її обертання уздовж осі. Для уникнення такого обертання осі *валків* трубної (а іноді – і сортової) прокатки розташовують *почергово* горизонтально і вертикально або під кутом 45 градусів до горизонту і 90 градусів почергово одна до одної. Відповідний монтаж прокатного інструмента називають: «горизонтальні валки», «вертикальні валки», «нахилені валки».

При подовжній прокатці труб у калібрах геометрія осередка дефомації нагадує прокатку суцільного сортового круглого профілю. Але наявність порожнини у трубі, яка може містити (а може, й не містити) оправку зумовлює певні відмінності.

У цьому процесі найбільше обтиснення має місце по вершині рівчака калібра. В місцях роз'єму калібрів валків обтиснення найменше. Це супроводжується тенденцією до різних значень відповідного місцевого видовження, появою *залишкових* напружень у трубі (по вершині калібрів – подовжнє стискання, а в місцях їх роз'єму – розтягнення) та овалізацією перерізу труби. Наявність оправки суттєво зменшує овалізацію. Найбільша нерівномірність деформації має місце в широких калібрах (з великою *розвалкою*).

На усіх ділянках калібру при наявності оправки та без неї в осередку деформації має місце схема *деформованого* стану металу (*див. рис. 1.39*), яка характеризується стисканням за діаметром та стінкою та розтягненням по осі прокатки.

Напружений стан металу (*див. рис. 1.40*) в осередку деформації різний на різних ділянках перерізу труби. На ділянках, які знаходяться при вершині калібру, має місце всебічне стискання металу. В місцях випусків діють напруження стискання в радіальному та тангенціальному напрямах і напруження розтягнення в поздовжньому напрямі (уздовж осі труби).

Геометричні та кінематичні характеристики осередка деформації при подовжній прокатці труб в калібрах відображено в спеціальній літературі [44].

У цьому процесі розрізняють:

– коефіцієнт видовження, або коефіцієнт витяжки (всієї труби):

$$\mu = \frac{(D_0 - S_0)S_0}{(D_1 - S_1)S_1} \; ; \tag{1.86}$$

– коефіцієнт обтиснення по стінці труби:

$$\lambda = \frac{S_0}{S_1} ; \tag{1.87}$$

– коефіцієнт обтиснення по середньому діаметру труби:

$$k = \frac{D_0 - S_0}{D_1 - S_1} = \frac{D_{0c}}{D_{1c}} , \tag{1.88}$$

де індекс «0» відповідає стану до проходу; індекс «1» – після проходу; індекс «*с*» – середнім значенням діаметра та товщини стінки D, S відповідно.

Якщо в якості значень D_0 та S_0 приймають відповідні розміри заготовки, а D_1 та S_1 характеризують розміри *готової* труби, то формулами (1.86)…(1.88) визначають характеристики $\mu_\Sigma, \lambda_\Sigma, k_\Sigma$ *сумарної* деформації.

Захоплення заготовки валками (так зване, *первинне захоплення*) без оправки та сили, що примусово заштовхує заготовку до осередку деформації, здійснюється при контакті металу з двома точками калібру, які знаходяться симетрично його осі. Відповідна умова первинного захоплення, виходячи із силової рівноваги та геометричних співвідношень, аналогічно рівнянню (1.81) має вид:

$$f_з \geq tg\alpha \cdot \cos\Theta , \tag{1.89}$$

де $f_з$ – коефіцієнт тертя при захопленні [61]; Θ – кут між перпендикуляром до дотичної контура калібра і вертикаллю з віссю валка; кут захвату α в перерізі первинного дотику металу та валків визначається формулою:

$$\alpha = \arccos(1 - \frac{\Delta D_r}{2R}) ; \tag{1.90}$$

ΔD_r – місцеве обтиснення гільзи по діаметру; R – радіус валка в цьому перерізі.

При прокатці гільзи без оправки та сили, що примусово заштовхує заготовку до осередку деформації, у першому калібрі калібрувального або редукційного стану умова стабільного процесу прокатки аналогічно (1.82) має вигляд:

$$f_y \geq tg\alpha , \tag{1.91}$$

де f_y – коефіцієнт тертя при усталеному процесі [61]; кут захоплення при вершині калібру може бути визначений за виразом: $\alpha = \arccos(1 - \frac{D_0 - D_1}{D_в})$; $D_в$ – діаметр валка при вершині калібру; D_0, D_1 – зовнішній діаметр заготовки та труби відповідно.

При наявності сили, що заштовхує заготовку до калібру, умова стабільного процесу прокатки має вигляд [44]:

$$tg\alpha \le \frac{2f_y}{1-f_y}. \qquad (1.92)$$

Після захоплення металу валками відбувається стадія осаджування (редукування) заготовки (гільзи).

При редукуванні без натягу стінка труби, як правило, збільшується. За даними Шевченка А.А. це збільшення $\Delta S_{зб}$ у залежності від початкових зовнішнього діаметра D_0, товщини стінки S_0 та зовнішнього діаметра D_p труби після редукування можна визначити за емпіричною формулою:

$$\Delta S_{зб} = \frac{2(D_0 - D_p)}{D_0} + 0{,}2S_0 - 0{,}8. \qquad (1.93)$$

Відомі також й інші аналітичні вирази аналогічного призначення [44].

Прокатку труб в автоматичному або безперервному стані (*див. нижче*) здійснюють на нерухомій конусній короткій або рухомій довгій циліндричній оправці. При цьому, чисте осаджування заготовки реалізується до моменту зіткнення внутрішньої поверхні металу з оправкою. Цей момент характеризує так зване *вторинне захоплення*.

Умова вторинного захоплення у першому проході при наявності короткої конусної оправки на автомат-стані має вигляд:

$$tg\alpha_{on} \le \frac{2B - tg\alpha}{1 + 2Btg\alpha}, \qquad (1.94)$$

де $B = \frac{1}{W}(f \cdot \sqrt{(\frac{tg^2\beta}{W^2} + 1)} - tg\beta$; $W = A \cdot f + 1$; $A = f_{on} + tg\beta$; $\beta \approx 10^0 -$ кут конусності оправки; $\alpha -$ кут первинного захвату; $f -$ коефіцієнт тертя (без індексу – на контакті з валком; індекс «*on*» відповідає контакту на оправці).

Геометрія осередка деформації при вторинному захопленні визначає обмеження на величину абсолютного обтиснення ΔS по стінці труби. Так за даними джерела [44] для умов прокатки на автомат-стані (*див. нижче*):

$$\Delta S < \frac{(D_в - \delta_{on})(2B - tg\alpha)tg\beta}{2((1 + 2Btg\beta) + (2B + tg\beta)tg\alpha)}, \qquad (1.95)$$

де $\delta_{on} -$ діаметр паска оправки.

Аналогічно, умова вторинного захоплення та обмеження обтиснення по стінці при прокатці труб на довгій циліндричній оправці в безперервному стані (*див. далі*) мають вигляд [44]:

$$tg\alpha_{on} \le \frac{2f - tg\alpha}{1 + 2Btg\alpha}, \qquad (1.96)$$

$$\Delta S_{\max} < \frac{D_в - \delta_{on}}{2}(\frac{\sqrt{(1 + tg^2\alpha)(1 + 6f^2)}}{1 + f^2 + 2f \cdot tg\alpha}. \qquad (1.97)$$

Силові умови деформування металу при подовжній прокатці труб у калібрах визначаються аналогічно простим випадкам прокатки, які наведено вище, згідно з формулами (1.83) та (1.84).

Суттєвими тут стають обставини, які пов’язані з формою осередка деформації та кінематикою процесу прокатки.

Так, для визначення площі F_k горизонтальної проєкції поверхні контакту металу з валками при урахуванні середньої ширини b_c та довжини $l_д$ осередка деформації можна користуватися формулою Анісіфорова В.П.:

$$F_k = b_c l_д = (1 + \frac{D_i}{12(D_i - d_k)}) \cdot b_k \sqrt{(\frac{\Delta D}{2}(D_i - d_k)}, \qquad (1.98)$$

де D_i – ідеальний (без урахування калібра) діаметр валка; d_k – висота калібра або діаметр труби після прокатки; b_k – ширина калібра; $l_о$ – довжина осередка деформації; ΔS – обтиснення труби по діаметру.

Слід також мати на увазі, що при подовжній прокатці труб на короткій та довгій оправці є суттєва різниця в деформаційних та силових умовах формозміни металу на ділянках: редукування по діаметру (індекс «1») та обтиснення стінки (індекс «2»). Тому при визначенні сили P прокатки, на відміну від формули (1.83), більш правильним уявляється роздільне врахування вказаних складових:

$$P = p_{c1}F_{k1} + p_{c2}F_{k2}\,. \tag{1.99}$$

При наявності оправки нормальна сила з боку валків на метал лише на 80…90% передається на оправку, оскільки частину її сприймають ділянки труби, що знаходяться в зоні випусків калібру.

Крім нормальної, на оправку діє осьова сила Q.

При використанні довгої циліндричної оправки (як у безперевному стані) за даними Лаврова П.П. для визначення сили Q можна користуватися формулою:

$$Q = 2f_{оп}(P - 2\sigma^*_{Tc}S_в l_д)\cdot\frac{0{,}5\pi - \alpha_в}{\sin(0{,}5\pi - \alpha_в)} \approx 0{,}23 f_{оп}(P - 2S_в l_д\sigma^*_{Tc}\,, \tag{1.100}$$

де P – сила прокатки; $S_в$ – товщина стінки труби у випуску калібру; $\alpha_в \approx 0{,}25\pi$ – кут випуску калібру.

При використанні короткої нерухомої оправки її зазвичай установлюють так, щоб середина її циліндричної ділянки співпадала з лінією центрів валків. Тоді за умов урахування складових площі контактної поверхні, середнього нормального напруження p_c в зоні обтиснення, кута β конусності оправки, коефіцієнта тертя $f_{оп}$ між металом та оправкою, $\delta_{оп}, \delta^1_{оп}$ – діаметрів оправки в циліндричній частині та на початку зони обтиснення відповідно, обтиснення ΔS по стінці труби, значення діаметрів труби на початку зони обтиснення $D_{об}$ та після виходу металу з осередку деформації D_k осьову силу можна розрахувати за рівнянням [44]:

$$Q = 1{,}57\,p_c(D_{об} + D_k)\frac{\delta_{оп} + \delta^1_{оп}}{2\delta_{оп}}\Delta S\,\frac{tg\beta + f_{оп}}{tg\alpha + \beta}\,. \tag{1.101}$$

Процеси подовжньої періодичної прокатки труб реалізується в гарячому стані металу на пілігримових станах, а у холодному і теплому – на станах холодної прокатки труб (ХПТ) і холодної прокатки труб роликами (ХПТР).

При ***гарячій прокатці труб на пілігримових станах*** попередньо підготовлена труба-заготовка *(«гільза»*) з розміщеним та закріпленим усередині циліндричним стрижнем *(«дорном»*) прокатується в круглому калібрі, який має змінний перетин по колу поверхні валка (рисунок 1.81, *а*) [44].

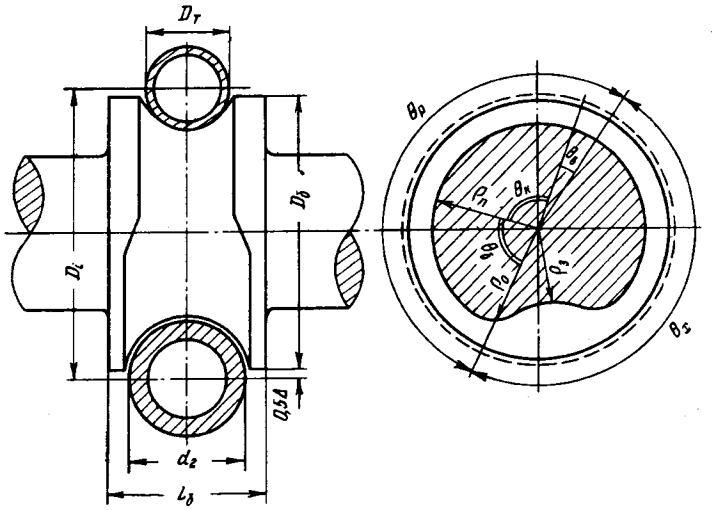
Робочу частину калібра валка поділяють на три складові (*див. рис. 1.81, б*):

– передній конус («*бойок*»), обмежений центральним кутом $\theta_б$, на якому здійснюється основна деформація метала, а радіус валка змінюється від ρ_0 до ρ_n;

– полірувальна ділянка, обмежена центральним кутом θ_n, на якому труба отримує остаточні розміри за диаметром D_1 и товщиною стінки S_1;

– подовжній випуск з центральним кутом $\theta_в$ для плавного переходу від полірувальної ділянки до холостої.

На ділянках подовжнього випуску та холостій відбувається поступове зменшення радіуса валка від R_n до радиуса $R_з$ його зіву.

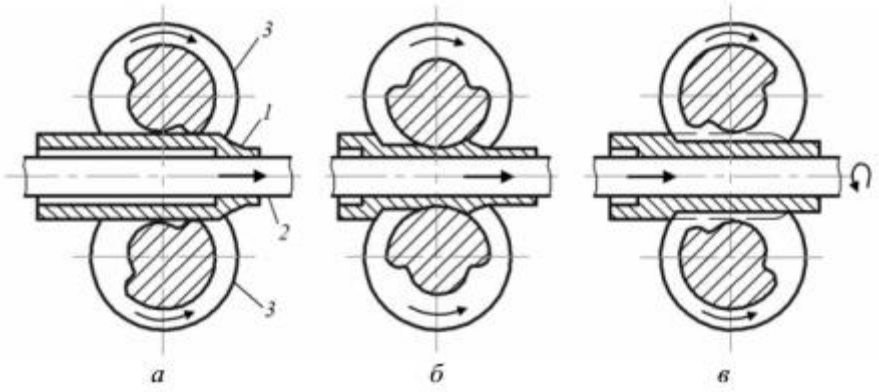


а *б*

Рисунок 1.81 – Валок пілігримового стана: *а* – вид перпендикулярно осі труби; *б* – переріз самого валка по дну калібра

Перед прокаткою дорни змащують сумішшю бітума з графітом та (або) тальком, або солевими мастилами (наприклад, кухонною сіллю або триполіфосфатом натрію), які плавляться при температурі прокатки.

Поперечний переріз валка по вершині калібру та стадії процесу гарячої пілігримової прокатки відображені на рисунку 1.82 [6].



а *б* *в*

Рисунок 1.82 – Основні стадії процесу пілігримової прокатки (*стрілками визначено напрям обертання валків і руху труби з дорном*)

При максимальному радіусі рівчака калібра труба (з дорном) за допомогою апарату, що подає, вільно пересувається уперед до зазору між валками на величину подачі *проти руху їх обертання* (*див. рис.* 1.82, *а*). При подальшому повороті валків на ділянці переднього конуса відбувається обтиснення зі зменшенням діаметра і товщини стінки труби-заготовки (*див. рис.* 1.82, *б)*. При цьому, заготовка переміщується *за ходом обертання валків і супротив напряму виходу готової труби* з кліті.

При подальшому повороті валків на полірувальній ділянці рівчака обтиснена частина металу калібрується (*див. рис.* 1.82, *в*), а труба, у цілому, як і раніш, переміщується *за напрямом обертання валків і супротив напряму виходу готової труби* з кліті.

Частина поперечного перерізу труби-заготовки, яка *потрапляє у зазор між валками*, не отримує обтиснення і відходить від дорна. Тому перед кожною подачею дорн з трубою

обертають *(«кантують»*) уздовж осі на 90°. Для цього дорну спеціальним механізмом, крім зворотно-поступального руху, забепечують також обертовий рух.

У подальшому цикл повторюється з обтисненням наступної ділянки гільзи. Кінцева ділянка металу *(«пільгерголовка»*) не прокатується, і її видаляють.

Ефективність пілігримової прокатки труб та якість виробів суттєво залежать від калібровки інструмента, яка визначається раціональною формою подовжньої розгорткою зазора між поверхнями калібра валка (ролика) і дорна (оправки).

При проєктуванні такої калібровки застосовують підходи на основі:

– постійності часткових видовжень (витягувань) по довжині осередка деформації (за О.І. Целіковим);

– постійності обтиснень по товщині стінки труби (за П. Грюнером) або лінійної зміни цього параметра (за П.Т. Ємельяненко);

– зростання часткових видовжень (витягувань) (за О.О. Пляцковським);

– зменшення зміщеної площини (за П.К. Тетериним);

– прямолінійної (або згідно з іншою залежністю) зміни опору деформації (за П.К. Тетериним і О.О. Чорнявському) та ін.

Тоді, задаючись профілем дорна (оправки) можна розрахувати профіль калібра валка або навпаки [44].

При пілігримовій прокатці, на відміну від подовжньої, елементарний об’єм метала багаторазово деформується, а геометричні, кінематичні і силові параметри осередка деформації згідно з обертанням валків безперервно зміюються. Тому тут можна говорити про осередок деформації, який відповідає конкретному моменту контакта метала з валками, тобто про *«міттєвий осередок деформації»*. Відповідним чином, розрізняють *часткову деформацію* в осередку і *сумарну деформацію* при порівнянні гільзи (заготовки) з готовою трубою.

Згідно з «*принципом П.Т. Ємельяненко*», коефіцієнти часткової деформації визначають у залежності від *величини подачі*.

Величиной подачі m («*пілігримовим кроком*») називають довжину кільцеподібної ділянки гільзи, яка обтиснюється і розкатується за один оберт валків.

Об’єм V_0 метала, що подається, та площа поперечного перерізу гільзи $F_0 = \pi S_0(D_0 - S_0)$ пов’язані співвідношенням:

$$V_0 = mF_0 . \tag{1.102}$$

Через багаторазовий вплив валків на ділянки метала довжина труби, яка відповідає початковому значенню m, збільшується аж до виходу виробу з валків, отримуючи послідовно для кожного оберта валків значення $m_1, m_2 \ldots$ і т.д.

При цьому, для кожного циклу обробки *коефіцієнти часткової деформації* аналогічно формулам (1.86)…(1.88) мають вигляд:

– для видовження (витяжки):

$$\mu_i = \frac{(D_{i-1} - S_{i-1})S_{i-1}}{(D_i - S_i)S_i} ; \tag{1.103}$$

– для обтиснення по стінці:

$$\lambda_i = \frac{S_{i-1}}{S_i} ; \tag{1.104}$$

– для обтиснення по діаметру:

$$k_i = \frac{D_{i-1} - S_{i-1}}{D_i - S_i} = \frac{D_{(i-1)c}}{D_{ic}} , \tag{1.105}$$

де $1 \le i \le n_o$ – номер циклу впливу валків на метал в осередку деформації. Відповідним чином, при $i = 1$ геометричні характеристики відносяться до заготовки.

Кількість циклів часткових деформацій:

$$n_o = \frac{3L}{m(1+2\mu_\Sigma)}, \qquad (1.106)$$

де L – довжина розгортки профілю бойка та полірувальної ділянки калібра валка. Реальний діапазон значень $n_o = 6...12$.

Кінематичні та силові умови гарячої пілігримової прокатки представлені у спеціальній літературі [44].

Зокрема, силу P прокатки можно визначити за рівнянням:

$$P = p_c F_r, \qquad (1.107)$$

де середнє нормальне напруження можна розрахувати за формулою Ю.Ф. Шевакіна:

$$p_c = n_\sigma \sigma_T (1{,}06 + 0{,}22 \frac{\sqrt{2R_x \Delta S_x}}{S_x}); \qquad (1.108)$$

$n_\sigma = 1{,}07...1{,}08$ – коефіцієнт напруженого стану метала за виразом (1.55); σ_T – межа текучості з урахуванням темпратури, швидкості та ступеня деформації згідно з формулами (1.46)…(1.48); $R_x, S_x, \Delta S_x$ – радіус валка по вершині калибра, товщина стінки труби та обтиснення по стінці у миттєвому осередку деформації відповідно; горизонтальна проєкція площі контакта у миттєвому осередку деформації:

$$F_r = \eta d_c \sqrt{2R_{xc} \Delta S_x}; \qquad (109)$$

η =0,96…1,13 – коефіцієнт форми контактної поверхні; R_{xc}, d_c – середній радіус валка по вершині калибра та середній діаметр калібра миттєваго осередка деформації.

Повну максимальну силу прокатки можна також розрахувати за відомими емпіричними формулами [44], наприклад, використовуючи формулу Ю.Ф. Шевакіна:

$$P_{\max} = (8{,}5 - 0{,}0059 \cdot t) \cdot (1 - \frac{0{,}025\sqrt{m\mu R_n}}{S_T}) \cdot D_T \cdot \sqrt{m\mu R_n}, \qquad (1.110)$$

де t – температура прокатки, ^{0}C; R_n – радіус валка на полірувальній ділянці; D_T, S_T – діаметр і товщина стінки труби.

Основні закономірності деформування при ***холодній (теплій) періодичній прокатці труб*** аналогічні тим, что мають місце на пілігримовому стані гарячої прокатки при урахуванні особливостей, притаманних холодному (відповідно – теплому) стану металу. Тому цей процес іноді називають «*холодною (теплою) пілігримовою прокаткою*».

До складу *стану холодної прокатки труб – стану ХПТ* (рисунок 1.83) входять стіл для прийому пакета труб та подачи їх по одній на прокатку; власне стан з робочою кліттю, головним приводом, розподільчим механізмом, що подає, врівноважуючим пристроєм, механізмами установки і відведення оправки («стрижня»); стіл видачі з кишенею для прийому труб після прокатки та обладнання подачі мастила.

Поширення у вітчизняній і зарубіжній практиці станів холодної прокатки пояснюється рядом переваг, завдяки яким досягаються: висока точність розмірів труб (поперечна різностінність не перевищує 5…10% від номінального розміру); висока чистота зовнішньої і внутрішньої поверхні (в межах 7…11-го класів); великі обтиснення (до 80…95%) за один прохід при коефіцієнті витяжки 2…7; значне зміцнення металу за рахунок великих деформацій із забезпеченням однорідності механічних властивостей і дрібнозернистої структури металу; можливість прокатки особливо тонкостінних труб і труб зі змінними діаметром і товщиною стінки.

Недоліками цього процесу є низька продуктивність станів, трудомісткість виготовлення та порівняно низька стійкість інструменту.

Для виробництва труб певного сортаменту розроблений ряд типорозмірів станів, які *класифікуються за максимальним діаметром труб, що прокатуються*: ХПТ-32, ХПТ-55,

ХПТ-75, ХПТ-90, ХПТ-120, ХПТ-250, ХПТ-450, характеристика найбільше поширених з них наведена у таблиці 1.4.

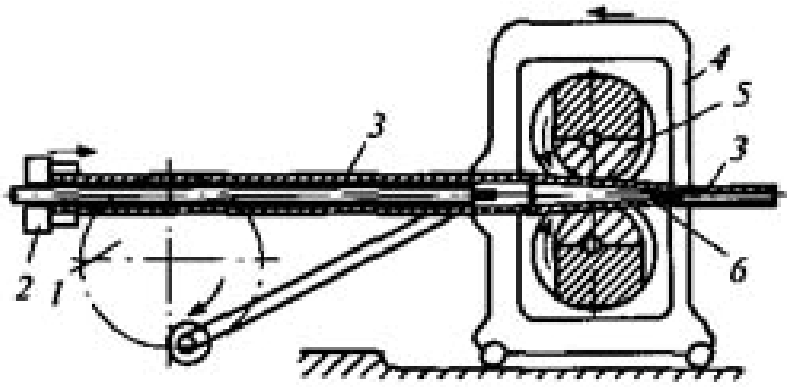


Рисунок 1.83 – Схема стану холодної прокатки труб [44]: 1 – привод; 2 – подавально-зворотний механізм; 3 – труба; 4 – робоча рухома кліть; 5 – валки; 6 – оправка

Таблиця 1.4 – Характеристика деяких станів ХПТ

Показники	Типорозмір стану			
	ХПТ-32	ХПТ-55	ХПТ-75	ХПТ-90
Діаметр заготовки, мм	22…42	38…67	57…90	63…114
Товщина стінки заготовки, мм	1,35…6	1,75…12	2,5…20	2,5…20
Довжина заготовки максимальна, мм	5500	5000	5000	5000
Діаметр готової труби, мм	16…32	25…55	40…80	40…95
Товщина стінки готової труби, мм	0,4…5	0,6…10	0,75…15	1…16
Число подвійних ходів кліті в хвилину	120	90	70	60
Подача, мм	2…30	2…30	2…30	2…30
Діаметр валка, мм	300	364	434	434
Довжина ходу робочої кліті, мм	452	625	705	705
Довжина робочої частини оправки, мм	300	400	500	500
Довжина обтискної частини оправки, мм	240	320	400	400

Робоча кліть – основний вузол стану, в якому здійснюється деформація порожнистої заготовки і перетворення її на готову трубу.

Більшість станів ХПТ мають рухому станину (*див. рис. 1.83*), яка переміщується на повзунах в напрямних рамах, але в ряді випадків, коли маса робочої кліті стає великою (стани великих типорозмірів, багатониткові стани), застосовують нерухому станину з рухомим вузлом робочих валків.

Розрізняють стани ХПТ з бічним та торцевим завантаженням заготовок, що впливає на їх компонування та, відповідною мірою – на технологію.

Робоча кліть стану ХПТ з рухомою станиною має валки, встановлені у підшипниках кочення. Масивні стійки станини сприймають вертикальну силу прокатки. Конструкція кліті повинна забезпечувати легкий доступ до основних деталей (валки, калібри, оправка тощо), бути досить жорсткою та міцною, оскільки максимальна сила при деформації сягає декількох меганьютонів.

Кліть стану здійснює зворотно-поступальний рух від двостороннього кривошипно-шатунного привода (*див. рис. 1.83*). Повному оберту кривошипа відповідає *подвійний хід кліті*: *прямий* хід у напрямку подачі заготовки та виходу труби і *зворотний* хід.

Процес прокатки труби (рисунок 1.84) здійснюється на нерухомій оправці 1, діаметр якої зменшується по довжині, калібрами 5, закріпленими у вирізах валків 6, що мають по колу струмок змінного перерізу 3.

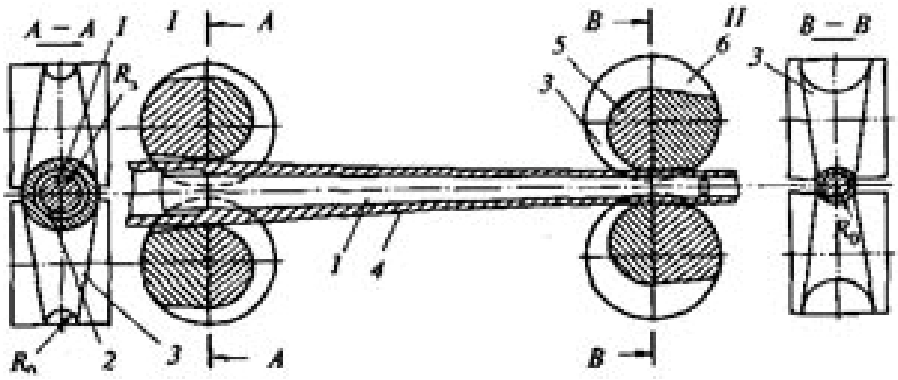


Рисунок 1.84 – Схема прокатки труб на стані ХПТ [44]: I – переднє і II – заднє положення кліті; 1 – конічна оправка; 2 – кільцевий зазор; 3 – струмок калібру валка; 4 – труба, що прокатується; 5 – калібр; 6 – робочий валок

У вихідному положенні «I» робочої кліті трубна заготовка за допомогою спеціального механізму переміщується «вперед» (це – «*прямий хід*») у напрямку прокатки на деяку відстань, звану «*подачею*». Відповідне переміщення валків називається «*ходом валків*». Рухаючись поступально, робочі валки за допомогою своїх шестерен та нерухомої зубчастої рейки повертаються навколо своїх осей на кут, який називають «*кутом розвороту валків*». При цьому відбувається редукування поданої ділянки заготовки за діаметром і обтиснення по стінці в кільцевій щілині, яка утворена струмком калібрів та оправкою і поступово звужується. Задній кінець заготовки є затиснутим і нерухомим в осьовому напрямку. Конічна частина заготовки змінного перерізу називається *робочим конусом*.

Весь метал у кліті знаходиться у стані всебічного стискання, окрім областей, які знаходяться у випусках калібра. Для того, щоб деформувати ці ділянки, трубу наприкінці прямого або зворотного ходу механізмом подачі і повороту обертають («кантують») на кут 60…90° відносно її подовжньої осі.

При зворотному русі (званому – «*зворотним ходом*») робочої кліті *прокатаній* ділянці труби калібрами надається правильна форма кола заданих розмірів, і робочий конус обкатується на оправці Такі впливи на метал повторюються з частотою 20…120 (до 200) циклів на хвилину в залежності від типорозміру стану (*див. табл. 1.4*).

Створення змінного обтиснення по довжині осередка деформації в стані ХПТ так саме, як і в пілігримовому стані, забезпечується змінною величиною радіусу калібра. В кліті встановлюють два або три валки з калібрами, що мають змінний по окружності радіус струмка. Початковий розмір струмка має відповідати зовнішньому діаметру заготовки, кінцевий розмір – зовнішньому діаметру готової труби. На калібрах на початку і в кінці струмка є виточки, звані *«зівамі»*, завдяки яким заготовка-труба при подачі і повороті не затискається калібрами.

Для зменшення кількості технологічного інструменту валки станів ХПТ виготовляють складеними. Застосування знайшли три види калібрів: напівдискові, кільцеві і підковоподібні.

Найбільш поширеною на так званих короткоходових станах є конструкція валка з напівдисковим калібром (рисунок 1.85).

Такий валок виготовляють зі сталі 30ХГСА і піддають об'ємному загартуванню до твердості 250…320 *НВ*. Він має виріз, в якому кріпиться змінний напівдисковий калібр, що виготовляється зі сталі ШХ15, 60ХФА або 60С2ХФА. Після термообробки твердість поверхні струмка калібру повинна бути не менше 56…60 *HRC*. При використанні такого

калібру з центральним кутом 180° кут обертання валка забезпечують у межах 185…215°. Цей кут визначається довжиною ходу кліті і радіусом початкової окружності провідної шестерні.

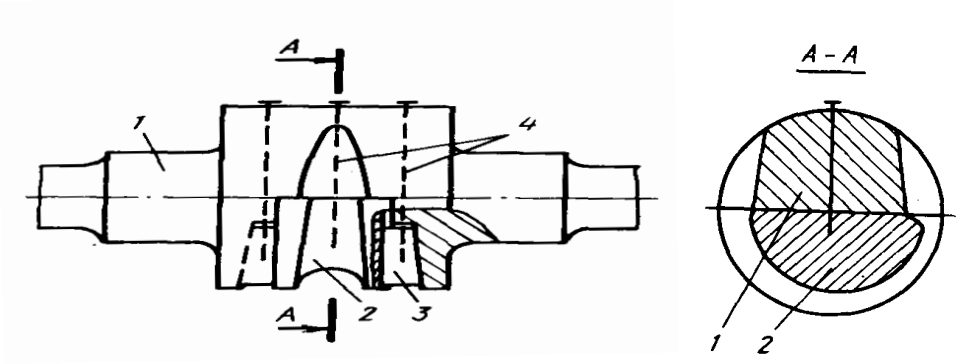


Рисунок 1.85 – Схема валка стану ХПТ з напівдисковим калібром [44]:
1 – валок; 2 – калібр, 3 – клин кріплення калібру; 4 – кріплення калібру болтами

Шестерні робочих валків виготовляють зі Сталі 45Х з поверхневим загартуванням зубів до твердості не менше 45 *HRC*.

У свою чергу, для мінімізації ковзання металу в струмку і осьового зусилля, що діє на трубу-заготовку, величина радіуса початкової окружності провідної шестерні повинна дорівнювати середньому значенню *природного катаючого радіуса калібру*. Цей радіус визначається в точці поверхні калібра, в якій лінійна швидкість поверхні валка дорівнює швидкості виходу труби (при відсутності доданих до неї осьових зусиль). Він залежить від розміру заготовки і труби та змінюється по довжині струмка.

Останнім часом напівдискові калібри витісняються кільцевими калібрами, які встановлюють у довгоходових станах. Вони дозволяють збільшити протяжність зони деформації без збільшення діаметра валків і тим самим підвищити продуктивність станів. Але для зміни таких калібрів потрібний демонтаж робочих валків.

Значно простіше здійснювати заміну підковоподібних калібрів. Їх встановлюють так само, як і напівдискові калібри – в пазах робочих валків. Використання підковоподібних калібрів дозволяє збільшити довжину струмка у порівнянні з напівдисковими калібрами приблизно на 20% і підвищити продуктивність станів на 14…17%.

Найчастіше прокатку ведуть на конічній оправці з конусністю $2tg\alpha$ = 0,01…0,04 (рисунок 1.86).

Іноді використовують криволінійні або ступінчасті оправки, які забезпечують раціональні умови формозміни металу.

На рис. 1.86 також показані кутові ділянки струмка калібру і його розгортка. В осередку деформації на довжині $l_{о.д.}$ виділяють зони:

– редукування (позначена $l_{ред}$);

– обтиснення стінки (позначена $l_{обт}$)

– калібрування стінки – передоброблювана ділянка (позначена l_n);

– калібрування діаметра – калібруюча ділянка (позначена $l_к$).

Форма осередка деформації дозволяє визначити умови формозміни металу та сили, що виникають при прокатці.

Якщо прокатка ведеться на конічній оправці, осередок деформації труби з оправкою приблизно можна представити як усічений конус, діаметри основ якого дорівнюють діаметрам заготовки і готової труби, а висота – ходу валків. У реальних умовах параметри робочого конуса відрізняються від теоретичних. Це пояснюється зміною відстані між осями робочих валків і віссю прокатки внаслідок пружної деформації робочої кліті, а також

відносним зсувом перерізів робочого конуса, що зумовлено наявністю зазорів у зубчастих зацепленнях, а також – осьовим переміщенням оправки та заготовки в процесі прокатки.

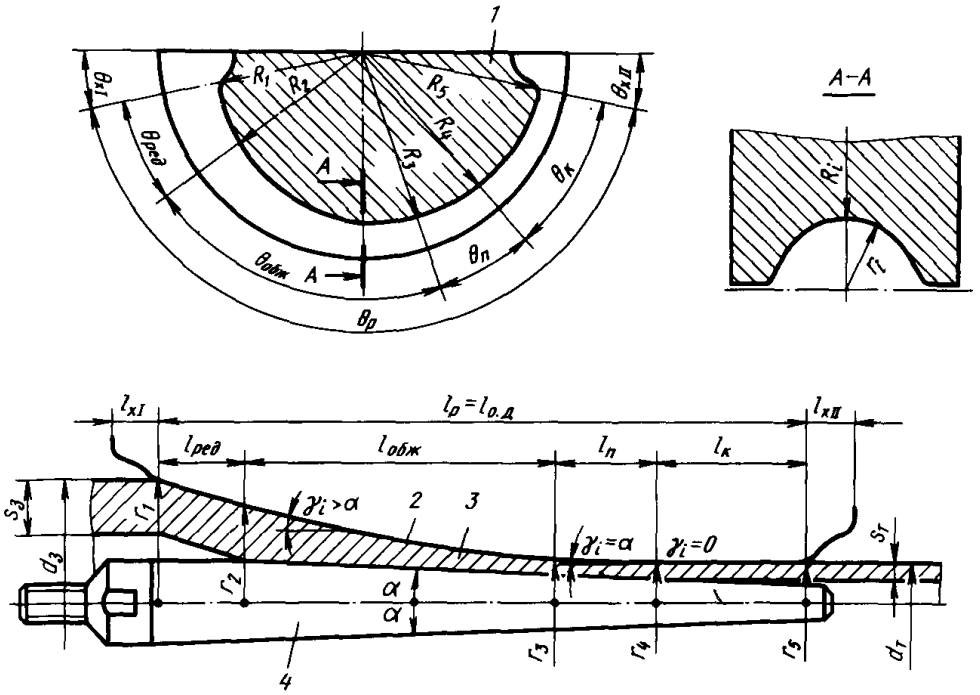


Рисунок 1.86 – Ділянки профілю рівчака калібру, його розгортка і осередок деформації на конічній оправці в стані ХПТ [44]: 1 – напівдисковий калібр; 2 – розгортка по вершині струмка калібру; 3 – осередок деформації (робочий конус); 4 – конічна оправка

Коли калібр робочого інструмента представляє собою два змінних напівдиски зі змінними радіусами, які вставляютья у вирізи валків, максимальна довжина рівчака

$$L_{p\max} = \pi R_б, \tag{1.111}$$

де $R_б$ – радіус бочки валка.

При виконанні калібра за всією окружністю валка (наприклад, за допомогою кільцевих вставок):

$$L_{p\max} = 2\pi R_б, \tag{1.112}$$

а продуктивність стана може бути суттєво збільшена.

При роботі стана у кожний момент часу обтискується невелика порція металу змінної довжини $l_о$ (у *«миттєвому»* осередку деформації), а після кожного подвійного ходу з оправки сходить ділянка готової труби. Таким чином, послідовно забезпечується прокатка труби за всією її довжиною, оскільки подача m здійснюється за допомогою наступної заготовки.

За період подвійного ходу (з урахуванням часу подачі та кантовки) за межі осередка деформації виходить ділянка готової труби, довжина («*лінійне зміщення*») ΔL_T якої складає:

$$\Delta L_T = m\mu_\Sigma. \tag{1.113}$$

Обтиснення ΔS_x у миттєвому осередку деформації визначають за формулою П.К. Тетерина:

$$\Delta S_x = m\mu_x(tg\gamma_{xc} - tg\alpha), \tag{1.114}$$

де миттєве видовження $\mu_x = F_0 / F_x$; γ_{xc} – середній кут конусності рівчака у перерізі x; кут конусності оправки при врахуванні діаметра $D_ц$ її циліндричної частини знаходять з рівняння [44]:

$$tg\alpha = \frac{D_ц - (D_T - 2S_T)}{2L_{роб}}. \qquad (1.115)$$

Сумарне обтиснення ΔS_Σ складається на 70…80% із сумарних обтиснень прямого ходу і, відповідно, на 30…20% сумарних обтиснень зворотного ходу. Наявність обтиснень зворотного ходу суттєво розвантажує обладнання та дозволяє збільшити подачу m.

Силові умови холодної періодичної прокатки труб з відповідним урахуванням міцнісних властивостей металу визначаються таким же чином, як і при гарячій пілігримовій прокатці з використанням виразів (1.107) …(1.110). При цьому приймають, що форми контактної поверхні при прямому і звортному ходах аналогічні.

Проєкція площі контакта у миттєвому осередку деформації може бути визначеною, наприклад, за формулою (1.109), у якій коефіцієнт форми контактної поверхні η=1,26…1,30.

Урахування ж сплющування інструмента, що є характерним для холодної ОМТ, дозволило Ю.Ф. Шевакіну запропонувати формулу:

$$F_r = B\eta\left(\sqrt{2r_{Tx}\Delta S_x + \left(\frac{p_{сер}r_{Tx}}{9500}\right)^2} + \frac{p_{сер}r_{Tx}}{9500}\right), \qquad (1.116)$$

де ширина осередку деформації $B = 2r_T \sin\frac{180}{n}$; n – кількість валків (роликів – для станів ХПТР, розглянутих нижче), які формують калібр; r_T – радіус труби, що прокатується; η – коефіцієнт форми контактної поверхні, який дорівнює 1,2…1,25 при n=2, 1,08…1,10 при n=3 і 1,0…1,04 при n=4; $p_{сер}$ – тиск металу, усереднений за поверхнею контакта:

– для прямого ходу кліті:

$$p_{сер} = \sigma_B\left(\beta + f\left(\frac{S_0}{S_x} - 1\right)\frac{R_x}{R_ш}\frac{\sqrt{2R_x\Delta S_{пр}}}{S_x}\right); \qquad (1.117)$$

– для зворотного ходу кліті:

$$p_{сер} = \sigma_B\left(\beta + (2{,}0...2{,}5)f\left(\frac{S_0}{S_x} - 1\right)\frac{R_ш}{R_x}\frac{\sqrt{2R_x\Delta S_{звор}}}{S_x}\right); \qquad (1.118)$$

σ_B – межа міцності металу при даних ступеню, швидкості деформації та температурі; β=1,155 – коефіцієнт Лоде, який враховує вплив середнього головного напруження; S_0 – товщина стінки заготовки; $\Delta S_{пр}, \Delta S_{звор}$ – обтиснення при прямому та зворотному ході відповаідно; $R_ш$ – початковий радіус провідної валкової шестерні.

Для оціночних розрахунків повної сили P_Σ прокатки без попереднього визначення впливу калібровки та миттєвих обтиснень можна застосовувати формули Ю.Ф. Шевакіна [44]:

– для стана ХПТ:

$$P_\Sigma = K_\sigma\sigma_{B50}(D_0 + D_T)\sqrt{m\mu_\Sigma(S_0 - S_T)\frac{R_{сер}}{l_1}}, \qquad (1.119)$$

де коефіцієнт, який залежить від виду та характеру зміцнення металу, K_σ=1,42 для сталі і K_σ=1,10…1,17 для міді; σ_{B50} – межа міцності металу при ступеню деформації 50%; середній радіус обтискної зони рівчака $R_{сер} = R_б - 0{,}5(r_0 + r_T)$; l_1 – довжина робочої частини рівчака без калібрувальної ділянки;

– для стана ХПТР (*див. нижче*):

$$P_\Sigma = k\sigma_{Bcce}(D_0 + D_T)\sqrt{m\mu_\Sigma(S_0 - S_T)\frac{R_к}{l_{обт}}}, \qquad (1.120)$$

де середнє значення межі міцності з урахуванням властивостей заготовки і труби $\sigma_{Bcep} = 0{,}5(\sigma_{B0} + \sigma_{Bm})$; k =1,6…2,2 – коефіцієнт, який враховує вплив позаконтактних зон, нерівномірність деформації, умови зовнішнього тертя та ін.; R_k – катаючий радіус ролика; D_0, D_T – діаметр заготовки і труби відповідно.

Найбільш ефективна прокатка труб на стані ХПТ, коли максимально використовується її основна перевага – високий ступінь сумарної деформації. При прокатці труб найбільша ступінь деформації знаходиться у межах 80…85%, що відповідає коефіцієнту видовження (витяжки) μ_Σ= 5…8,3. Фізично, граничне значення ступеню деформації визначається запасом пластичності металу, який прокатується, і міцністю основних механізмів станів.

Проте в практиці роботи станів у даний час максимальна деформація обмежується, більшою мірою, точністю та якістю труб, оскільки у разі великих лінійних зсувів металу спостерігається підвищена різностінність, погіршується якість поверхні, виникає хвилястість поверхні, пов'язана з періодичністю процесу прокатки. Тому максимальні ступені деформації застосовують при прокатці проміжних розмірів труб, що піддають подальшому волочінню або чистовій прокатці.

Вдосконалення конструкцій станів ХПТ йде шляхом збільшення швидкохідності, зменшення рухомих мас, використання касет, в яких розміщено дві і більше пари валків, виготовлення клітей з легких сплавів тощо. Зокрема, застосування клітей-тандем з двома рядами валків, що здійснюють безперервну прокатку, дозволило збільшити довжину осередку деформації. Додатковий позитивний ефект у підвищенні спроможності металу до деформування створює взаємодія рядів валків. У результаті, на станах-тандем ХПТ-90-4В, ХПТ-55-4В, ХПТ-32-4В (чотиривалкові) отримують коефіцієнт видовження металу за прохід до 8…12, шо дозволило скоротити циклічність виробництва, підвищити точність труб, підняти продуктивність до 400 м/год.

Істотно збільшується продуктивність при застосуванні багатониткових станів ХПТ: на двониткових (наприклад, 2ХПТ-40), прокатують одночасно дві сталеві труби у двох струмках; триниткові стани використовують, здебільшого, в кольоровій металургії.

Особливий різновид станів холодної періодичної прокатки труб – це стани зі стаціонарною робочої кліттю (ХПТС). Робота стану ХПТС і характер деформації в ньому такі ж, як у пілігримових (*див. рис. 1.83*): валки мають рівномірне обертання в одному напрямі, заготовка і труба спільно з оправкою здійснюють зворотно-поступальний рух, обтиснення проводиться тільки при прямому ході заготовки (валок обкатує метал від заготовки до труби). Діючі стани типорозмірів ХПТС 7-16, 2ХПТС 8-40 класифікуються за діапазоном діаметрів труб.

Обтиснення тільки прямим ходом сприяє підвищенню деформованості металу, в зв'язку з чим в стані ХПТС досягаються дуже високі сумарні обтиснення і коефіцієнти видовження.

Випробування попередньо напружених клітей великої жорсткості дозволило підвищити точність труб, а зниження рухомих мас у порівнянні зі станами ХПТ близьких типорозмірів – створити високу частоту обертання валків.

Разом з тим, робота валків з попереднім притисненням і відсутність через це регулювання відстані між ними в діючих конструкціях клітей (що потрібно для компенсації зносу калібрів), а також відсутність деформації при зворотному ході знижують можливості станів щодо забезпечення точності труб і роблять їх раціональними лише при виробництві труб з важкодеформівних сталей і спеціальних сплавів, прокатуваних невеликими партіями.

Зменшення прояву інерційних явищ досягають шляхом приводу до зворотно-поступального руху не всієї рабочої кліті, а тільки її валкового вузла. Це реалізується на ***роликових*** *станах холодної прокатки труб* (станах ХПТР), конструкція яких розроблена у середині 20 ст. В.В. Носалем, В.А. Вердеревським та ін. для прокатки труб з особливо тонкими стінками.

Схема деформування металу на цих станах аналогічна станам ХПТ. Труби прокатують на циліндричній оправці за допомогою 2…4 роликів, які розміщені навкруги осі прокатки. На їх поверхні нарізають круглий рівчак постійного радіуса, який дорівнює радіусу готової труби. Ролики закріплюють у спеціальній обоймі *(«сепаратрі»*), що з'єднена з приводом кривошипно-шатунного механізма. Ролики спираються на планки, які мають спеціальний профіль. При русі по ним ролики обтискують трубу-заготовку на оправці, причому наприкінці прямого ходу вони формують замкнений круглий калібр.

Перед початком прямого ходу у зазор між роликами на величину m подають трубу-заготовку. Під час прямого ходу заготовка обтискується за діаметром і стінкою.

Після закінчення зворотного ходу ролики відводять від заготовки, що дає можливість наступної подачі і кантовки виробу на 60^0. Така досить складна кінематика забезпечується спеціальною системою важелів.

Процес холодної прокатки на станах ХПТ і ХПТР характеризується високою дробністю деформації n_∂, що зумовлює збільшення технологічної пластичності («деформівності») металу, зокрема, за рахунок зменшення рівня залишкових напружень у ньому. Є дані також щодо такого ж позитивного впливу знакозмінного навантаження у цьому процесі. Досить відомим прийомом для підвищення μ_Σ також є реалізація теплої прокатки.

Як при гарячій (*див. вище*), так і при холодній пілігримовій прокатці слід прагнути до скорочення зони редукування, оскільки вона погіршує умови захоплення та обмежує обтиснення заготовки по стінці. Для цього зменшують зазор між дорном (оправкою) та внутрішньою поверхнею гільзи (труби-заготовки). Але це обмежує можливості уніфікації зовнішнього діаметра заготовки для розширеного сортаменту готових труб.

Процес поперечно-гвинтової (гинтової, «косої») прокатки здійснюється у двох або трьох валках: бочкоподібних (рисунок 1.87), дискових або грибоподібних, які обертаться в в одну сторону [44]. При цьому, осі валків розміщують під кутом *(«кутом подачі»)* α =4…12^0 (до 18^0) *один до одного* і під кутом (*«кутом розкатки»)* δ =17…30^0 до подовжньої осі заготовки.

Такий процес застосовують при прошивці суцільної заготовки для отримання чорнової труби (гільзи), при розкатці гільзи в трубу та для виготовлення товстостінних труб з важкодеформівних сталей (наприклад, підшипникових).

За характером взаємного розташування осей валків і заготовки процес являється проміжним між подовжньою (*див. вище*) і поперечною (*див. нижче*) прокаткою. При цьому, тангенціальна (паралельна колу) складова швидкості валка забезпечує обертання заготовки, а подовжня (уздовж осі заготовки) дає їй поступальний рух. У результаті, кожна точка поверхні заготовки отримує гвинтовий рух.

Для того щоб заготовка безперервно обтискувалася, валки мають конусність на вхідній ділянці, яка зменшує зазор між ними. На цій ділянці «миттєва» схема напружень представляється радіальним та подовжнім стисканням і тангенціальним розтягненням, а схема деформацій – радіальним стисканням та подовжнім і тангенціальним збільшенням розмірів.

Особливістю процесу *гвинтової прошивки* є те, що *ділянки* суцільної заготовки які поддавалися стисканню валками в радіальному напрямі та отримували тенденцію до розтікання в ортогональному напрямі, при обертанні заготовки з подовжнім переміщенням піддаються «розтягненню». Одночасно, зона колишнього «розтягнення» у наступний момент стискається. Це здійснюється багаторазово. В результаті, всередині металу утворюється розпушення (аж до утворення радіальної порожнини!), яка полегшує формування порожнистої гільзи конусоподібною оправкою. Оправку по осі попередньо нагрітої заготовки встановлюють на упорі так, щоб «розпушення» металу до його зустрічі з її носиком не відбулося, і внутрішня поверхня гільзи не мала порушень суцільності.

На вхідній ділянці контакта з валками гільза дістає тенденцію до овалізації, оскільки метал частково потрапляє до зазору між ними в поперечному напрямі.Тому поперечний плин металу обмежують боковими лінійками (*див. рис. 1.87*).

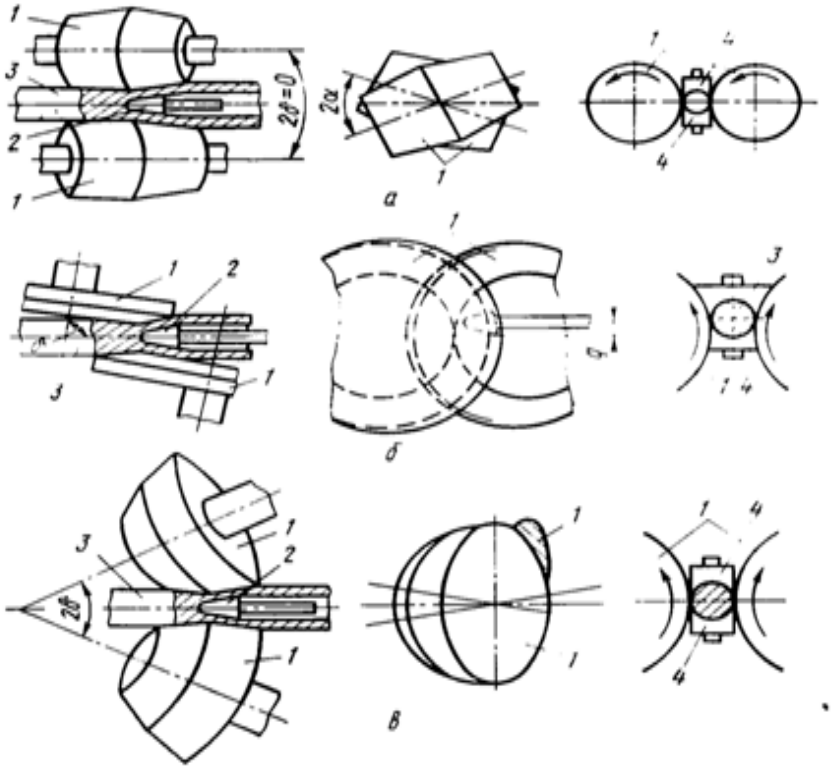


Рисунок 1.87 – Схеми поперечно-гвинтової прокатки труб [44, 79]: *а* – бочкоподібними валками: *б* – дисковими валками; *в* – грибоподібними валками (1 – валки; 2 – оправка на стрижні; 3 – труба-заготовка; 4 – бокові лінійки; α – кут подачі; δ – кут розкатки)

При використанні бочкоподібних валків їх діаметр D_x на вхідній ділянці збільшується з кутом конусності β аж до максимального значення $D_в$ у так званому *перетиску*, після чого зменшується на вихідній ділянці валка зі зворотньою конусністю з кутом γ.

У процесі гвинтової (косої) прокатки заготовка піддається скручуванню, яке зумовлено різними лінійними тангенціальними швидкостями валків у суміжних перерізах з координатою x.

При зростанні D_x діаметр заготовки зменшується, а скручування збільшується. Від перерізу перетиску величина D_x зменшується, діаметр заготовки збільшується, а скручування змінює напрям (знак). Така деформація має впливати на механічні властивості металу, але до наявного часу це питання не знайшло достатнього відображення в дослідженнях.

Величину вказаного скручування розраховують за різними формулами, які наведені в технічній літературі [44].

Коефіцієнти деформації при гвинтовій прошивці суцільної заготовки мають вигляд:

– по осі:

$$\mu = \frac{L_г}{L_з}; \tag{1.121}$$

– по стінці:

$$\lambda = \frac{S_г}{r_з}\ ; \tag{1.122}$$

– по середньому периметру (зі зменшенням або збільшенням):

$$k = \frac{D_г - S_г}{r_з}, \tag{1.123}$$

причому:

$$\mu \cdot \lambda \cdot k = 1\ , \tag{1.124}$$

де індекс «*з*» відповідає заготовці, а «*г*» – гільзі (прошитій заготовці).

У подовжньому перерізі осередку деформації прошивного стана виділяють ділянки:

– прошивки;

– розкатки на оправці;

– безоправочного редукування.

У поперечному перерізі також можна виокремити характерні зони:

– контакт з робочим валком, де відбувається основна деформація;

– контакт с лінійкою, де відбувається додаткова деформація;

– позаконтактна зона деформації.

Основні параметри осередка деформації наближено можуть бути визначені наступними формулами [44]:

– величина обтиснення перед носком оправки:

$$\varepsilon_н = \frac{D_0 - D_н}{D_0}, \tag{1.125}$$

де D_0 – діаметр заготовки; $D_н$ – відстань між поверхнями валків у перерізі установки носка оправки;

– кути конусності вхідної β' та вихідної γ' ділянки осередку деформації:

$$\beta' = \beta - \delta\ ; \tag{1.126}$$

$$\gamma' = \delta - \gamma\ , \tag{1.127}$$

де β, γ – кути нахилу твірних поверхні валка; δ – кут розкатки;

–відстань між валками у перетиску:

$$B = \frac{D_0(1-\varepsilon)tg\gamma' + (\delta + 2S_г)tg\beta' - 2L \cdot tg\beta' \cdot tg\gamma'}{tg\beta' + tg\gamma'}, \tag{1.128}$$

де δ – діаметр оправки; $S_г$ – товщина стінки гільзи; L – довжина робочої частини оправки;

–висування носка оправки за переріз перетиску:

$$k = \frac{D_0(1-\varepsilon) - (\delta + 2S_г) + 2L \cdot tg\gamma'}{2(tg\beta' + tg\gamma')}; \tag{1.129}$$

–довжина осередка деформації:

$$l_д = \frac{D_0 - B}{tg\beta'} + \frac{D_г - B}{tg\gamma'}\ . \tag{1.130}$$

До кінематичних параметрів гвинтової прокатки, в основному, відносять швидкість обертання заготовки n_x (об/хв.) та величину L_x її осьового переміщення за період одного обертання (тобто крок гвинтової лінії руху точки на поверхні прокату).

Базовою величиною тут виступає окружна швидкість точки на поверхні валка:

$$U_x = \frac{\pi D_x n}{60}, \tag{1.131}$$

де D_x – діаметр валка у певному перерізі x; n – частота обертання валка, об/хв.

Якщо розкласти вектор окружної швидкості U_x на дві складові: уздовж осі прошивки V_x та перпендикулярно до неї V_y, одержуємо:

$$V_x = U_x \cdot \sin\alpha; \tag{1.132}$$

$$V_y = U_x \cdot \cos\alpha, \tag{1.133}$$

де α – кут нахилу осі валка до осі прошивки (кут подачі).

Тоді з достатньою для практики точністю

$$n_x = n \cdot \cos\alpha \cdot \eta_T \cdot \frac{D_x}{\xi_x \cdot d_x}, \tag{1.134}$$

де d_x, ξ_x – діаметр та коефіцієнт овалізації металу (заготовки) у перерізі x (зазвичай, ξ_x= 1,014…1,023); коефіцієнт тангенціальної швидкості:

$$\eta_T = \frac{V_{м.у}}{V_y}; \tag{1.135}$$

$V_{м.у}$ – лінійна швидкісь обертання заготовки (металу);

$$L_x = \pi \cdot d_x \cdot tg\alpha \cdot \xi_x \cdot \frac{F_г \cdot D_в \cdot \eta_0}{F_x \cdot D_x \cdot \eta_T}, \tag{1.136}$$

де $F_г, F_x$ – площа поперечного перерізу гільзи та заготовки відповідно; $D_в$ – діаметр валка у перерізі виходу гільзи; коефіцієнт осьової швидкості

$$\eta_0 = \frac{V_{м.х}}{V_x}, \tag{1.137}$$

де $V_{м.х}$ – швидкість осьового руху заготовки (металу).

Останню величину також визначають за емпіричними формулами, наприклад, за даними Ю.М. Матвеєва [44]:

–при прошивці злитків:

$$\eta_0 = 0{,}75 + 0{,}01 \cdot \varepsilon - 0{,}008 \cdot \alpha \cdot \sqrt{D_{зл} - 300}; \tag{1.138}$$

–при прошивці заготовок:

$$\eta_0 = \frac{3{,}2}{V_{оберт}} + 0{,}005 \cdot \varepsilon + (0{,}025 - 0{,}000135 \cdot d_{заг}) \cdot \alpha, \tag{1.139}$$

де ε – максимальне відносне обтиснення металу, %; $D_{зл}, d_{заг}$ – діаметр злитка та заготовки відповідно, мм; $V_{оберт}$ – обертова швидкість валків, м/с; α – кут подачі, радіан.

З умови постійності секундних об’ємів сумарний коефіцієнт видовження (витяжки) при гвинтовій прокатці:

$$\mu = \frac{F_0}{F_г} = \frac{V_г}{V_0}. \tag{1.140}$$

На практиці: μ=1,25…4,5.

При косовалковій прошивці суцільної заготовки розрізняють захоплення:

–первинне, коли заготовка зустрічається з валками і одержує обертовий та поступальний рух;

–вторинне, коли заготовка зустрічається з носком оправки.

Кількісні вирази для визначення умов захоплення металу валками наводяться в технічній та науковій літературі [44].

Зокрема, при врахуванні силових умов осьового захоплення та умов обертання валків для першого етапу прошивки П.К. Тетерін одержав формулу:

$$f \geq \sqrt{tg^2(\delta-\beta)+\frac{\pi}{2}(1+\frac{d_з}{D_x})\cdot tg(\delta-\beta)\cdot tg\alpha}\,. \qquad (1.141)$$

Для забезпечення вторинного захоплення шляхом налаштування процесу прокатки на стані, обтиснення перед носком оправки повинно бути не менше за величину $\varepsilon_{\min}$, яка забезпечує наявність сили подачі і дорівнює силі опору оправки. Так, П.К. Тетерін визначив [44]:

$$\varepsilon_{\min} \geq \frac{\pi\cdot g\cdot n_d}{2\cdot[\sqrt{f^2-\frac{\pi}{2}(1+\frac{d_{заг}}{D_x})\cdot tg\alpha\cdot tg\beta\cdot\frac{\eta_o}{\eta_T}}-\sin\beta]\cdot\sqrt{\frac{2\pi}{1+\frac{d_{заг}}{D_x}}\cdot\frac{\eta_o}{\eta_T}\cdot\frac{tg\alpha}{tg\beta}}}, \qquad (1.142)$$

де g – відношення нормального тиску на носку оправки до нормального тиску на поверхні валка; n_d – відношення діаметра носка оправки до діаметра заготовки.

Силу прокатки визначають за виразами, які аналогічні формулі (1.83) або (1.107).

Для цього з достатньою точністю середній тиск p_c при урахуванні вимушеної межі текучості можна розрахувати за формулами (1.46)…(1.48), а площу поверхні:

– в конусі прошивки:

$$F_1 = 0{,}67\cdot b_n\cdot l_1\,; \qquad (1.143)$$

– в конусі розкатки:

$$F_2 = 0{,}8\cdot b_n\cdot l_2\,, \qquad (1.144)$$

де ширина контактної поверхні в перетиску валків (з використанням позначень наявної роботи):

$$b_n = \sqrt{\Delta d_n\cdot\frac{D_n\cdot d_{заг}}{D_n+d_{заг}}}\,; \qquad (1.145)$$

– $D_n, d_{заг}$ – діаметр валка та заготовки у перерізі перетиску;

– абсолютне обтиснення в перетискку валків:

$$\Delta d_n = d_{заг}-d\,; \qquad (1.146)$$

– d – діаметр металу у перерізі перетиску;

–складова довжини на конусі прошивки:

$$l_1 = \frac{d_{заг}-d}{2\cdot tg\beta}\,; \qquad (1.147)$$

–складова довжини на конусі розкатки:

$$l_2 = \frac{d_г-d}{2\cdot tg\gamma}\,, \qquad (1.148)$$

–загальна довжина поверхні контакту металу з валком:

$$l = l_1+l_2\,. \qquad (1.149)$$

За відомими формулами можна також розрахувати сили, які діють на натискні гвинти зі сторони входу заготовки у валки, зі сторони виходу гільзи з валків, на лінійки, осьові сили, а також – аналогічним чином – силові умови прокатки при використанні грибоподібних і дискових валків (*див. рис. 1.87*) [44].

Суттєві особливості має процес гвинтової розкатки гільзи на довгій оправці, який реалізується на тривалкових розкатних станах (рисунок 1.88).

Взагалі, осередок деформації тривалкового стана косої прокатки утворюється валками, які мають декілька ділянок з різною конусністю. Тут напрям деформації видовження співпадає з напрямом вектора руху металу (гелікоїдальний напрям), а деформація уширення – перпендикулярна їй.

Аналіз умов деформування при такій розкатці показує, що співвідношення поздовжньої та поперечної деформації суттєво впливає на характер формозміни металу, розміри труб, швидкісні та силові умови процесу.

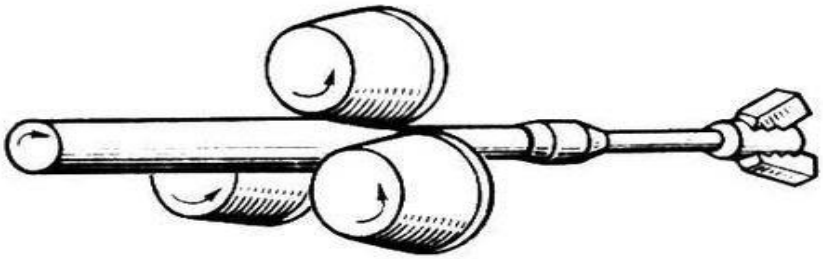


Рисунок 1.88 – Схема поперечно-гвинтової прокатки на тривалковому розкатному стані при використанні довгої оправки, що утримується [44, 79]

Повну деформацію заготовки у конкретному діаметральному перерізі можна представити такими складовими (індекс «0» – для заготовки, індекс «1» – для труби):

– уздовж осі труби (деформація зміни довжини l – деформація видовження):

$$\varepsilon_l = \ln \frac{l_1}{l_0} > 0 ; \qquad (1.150)$$

– деформація обтиснення по товщині S стінки:

$$\varepsilon_r = \ln \frac{S_1}{S_0} < 0 ; \qquad (1.151)$$

– деформація в діаметральній площині по діаметру d (редукування):

$$\varepsilon_\theta = \ln \frac{d_1}{d_0} < 0 ; \qquad (1.152)$$

– деформація скручування, яка може бути охарактеризованою деформацією найбільш розтягнутого волокна за величиною кута ϕ скручування (*див. вище*):

$$\varepsilon_{скр} = 0{,}5 \cdot (\phi + \sqrt{\phi^2 + 4} . \qquad (1.153)$$

У найбільшій мірі на енергосилові параметри процесу розкатки впливає величина ε_r [44].

Більш-менш «екзотичним» представником поперечно-гвинтової прокатки виступає прокатка куль, представлена схемою на рисунку 1.89. Поверхня куль формується рівчаками косорозміщених валків при їх обертанні (*додаткову коротку інформацію про процес прокатки куль – див. нижче*).

Процес поперечної прокатки (*див. рис. 1.76, б*) характеризується паралельністю подовжніх осей виробу і валків (роликів, дисків), які обкочуються по поверхні металу та обертаться в одну сторону. Метал, що деформується, обертається у протилежну сторону, а подовжнє переміщення заготовки забезпечується зовнішньою силою яка штовхає або тягне. При цьому, заготовка і виріб є тілами обертання,

Схеми напружень і деформацій тут є близькими до тих, що мають місце при гвинтовій прокатці (*див. вище*), а силові умови формозміни метала можна оцінити за формулами (1.83) або (1.107) аналогічно іншим видам ОМТ.

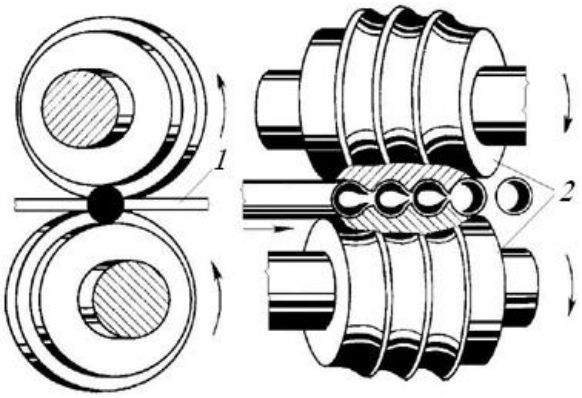
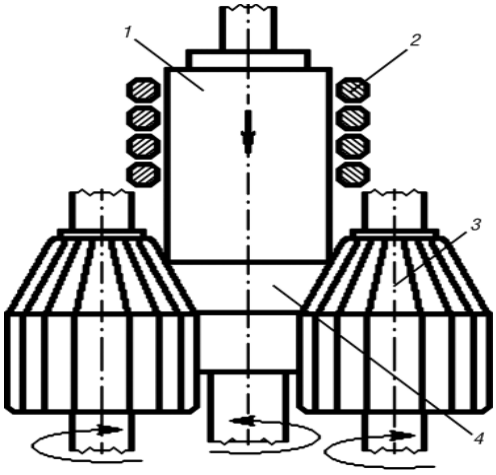


Рисунок 1.89 – Схема поперечно-гвинтової двовалкової прокатки куль [44, 79]: 1 – заготовка; 2 – прокатні валки

Цей процес зручний для прокатки шестерен (рисунок 1.90, *а*), свердел та інших подібних виробів. На готовому профілі можна отримати і змінний діаметр (гофри), якщо забезпечити зведення та розведення валків за копіром (рис. 1.90, *б*).

Помітного розповсюдження процес поперечної прокатки «у чистому вигляді» не отримав через обмежений сортамент продукції.



а *б*

Рисунок 1.90 – Схема поперечної прокатки при виготовленні шестерен [80]: 1 – заготовка; 2 – направляючі та утримуючі ролики; 3 – валки (стрілками показані напрями руху)

Представлені процеси ОМТ та супутні оздоблювальні процеси можуть використовуватись осібно, але частіше – комплексно у наскрізних виробничих технологіях.

Нижче коротко розглянуто основні технології прокатного виробництва та їх відповідне технічне оснащення.

Тут слід мати на увазі наступну особливість при позначені обладнання.

У технічній літературі та виробничій практиці під терміном «*прокатний* ***стан***» можуть мати на увазі:

– *машину*, що має робочі валки, станину з їх кріпленням (подушки, підшипники тощо), натискні пристрої, привалкову арматуру (проводки, лінійки тощо) та ін., і – обовязково – привід (*див. попередні матеріали*);

– *все обладнання – прокатний* ***агрегат*** *– що забезпечує процес прокатки*: нагрівальні пристрої (печі, колодці), саму прокатну кліть з її складовими, рольганги, розкатні столи, кантувачі, моталки, охолоджуючі пристрої тощо.

На прокатному *агрегаті* може використовуватись різне обладнання, яке виконує функції *підготовки заготовки до деформування* (наприклад, розрізання на мірні довжини, нагрів, видалення окалини, нанесення захистних покриттів, змащування тощо), безпосереднє деформування (зокрема, з використанням не тільки прокатних клітей, але й, можливо – пресів, волочильних станів та ін., причому прокатка може здійснюватись як подовжня, так і в комплексі з косою чи поперечною) та оздоблення (термічна обробка, розрізання на мірні довжини, правка, пакування тощо). Всі технологічні операції супроводжуються контролем якості процесів, продукції та напівфабрикату.

Тому там, де це не є очевидним, прокатну кліть з її складовими будемо називати «*прокатним станом*», а весь комплекс вказаного обладнання об'єктів – «*прокатним агрегатом*».

Зазвичай, прокатні агрегати маркують, здебільшого, за назвою кінцевого прокатного стану наступним чином:

– обтискні (блюмінги, слябінги) та сортопрокатні – *згідно з номінальним діаметром робочих валків* (без урахування глибини калібрів) *чистової групи клітей*. Наприклад, прокатний стан прокатного агрегату «Блюмінг 1150» має валки номінальним діаметром ~1150 мм (з можливістю їх переточки через зношування); в прокатних клітях *чистової* групи клітей дрібносортного прокатного агрегату («стану») «250» використовуються валки з номінальним діаметром 250 мм;

– листопрокатні – *згідно з довжиною бочки робочих валків*, що визначає максимальну ширину листової продукції, яка в них прокатується. Наприклад, основні прокатні кліті листопрокатного агрегату («стану») «400» мають довжину бочки ~400 мм, що дає можливість прокатувати стрічку шириною до ~320 мм;

– трубопрокатні – *згідно із зовнішнім діаметром (діапазоном діаметрів) труб*, що в них прокатуються. Наприклад, сортамент трубопрокатного агрегату з безперервним розкатним станом «30-102» передбачає випуск труб у діапазоні номінальних зовнішніх діаметрів від 30 до 102 мм; на прокатному агрегаті зі станом холодної прокатки труб «ХПТ 75» зазвичай прокатують труби діаметром до 75 мм;

– колесопрокатні та кільцепрокатні, кульопрокатні тощо.

Отже, приклади прокатних агрегатів, які представлені нижче, можуть відображати сукупність та взаємозв'язок різних видів обробки металу, зокрема – різних видів та різновидів ОМТ.

На прокатних агрегатах деформуюче та оздоблювальне обладнання часто об'єднують у групи: *чорнову* та *чистову*. Іноді виділяють і *проміжну* групу обладнання.

Зокрема, якщо чорнова група агрегату представлена одним прокатним станом, і в ньому здійснюється реверсивна прокатка, а в чистовий групі, що складається з декількох клітей – безперервна прокатка, то такий агрегат зазвичай називають «*напівбезперервним станом*».

Використання комбінації послідовної та безперервної прокатки в рамках одного агрегата також робить його *напівбезперервним*.

Обтискне виробництво

Першим деформаційним переробленням *при подовжній прокатці* зазвичай виступає ***обтискне виробництво***, основною метою якого є обтиснення злитків з виготовленням прокатаних *слябів*, *блюмів* та *трубної заготовки,* перетин яких попередньо наближений до форми кінцевої продукції: листа, сорту та труб відповідно.

Поперечний перетин злитків буває квадратним, прямокутним, круглим, багатогранним, хвилястим, але найбільш поширеними формами є квадрат, прямокутник та

круг. При цьому застосовують як злитки, одержані на машинах безперервного лиття, так і ті, що відливаються у виливниці (*див підрозділ 1.2.1.3*).

В Україні ***сляби*** як заготовку для наступного перероблення у листову продукцію прокатують на ПАТ «Запорізький металургійний комбінат «Запоріжсталь», ПрАТ «Дніпроспецсталь» (м. Запоріжжя) та ПрАТ «Маріупольський металургійний комбінат».

Сляби мають перетин близький до прямокутного (100…250)х(300…2000) мм із заокругленими кутами. Вони поставляються довжиною в межах 1300…5000 (до 12000) мм, масою до 50 тонн і більше. Їх виготовляють тільки звичайної точності. Скручування слябу не повинно бути більше 4 градусів на 1 метр довжини. Кривизна слябу – не більше 2% довжини.

На підприємстві «воротами» прокатного агрегату «слябінг» є *відділення нагрівальних колодязів*, де здійснюється нагрів злитків, що надходять зі стриперного («роздягального») відділення сталеплавильного цеху.

Практично, температуру нагріву металу встановлюють на 150…250 °С нижче за температуру плавлення і на 100…120 °С нижче за температуру перепалу відповідної марки сталі. Для сталей більшості марок діапазон температур нагріву знаходиться у межах 1050…1300 °С.

За температурою перед посадкою у колодязі злитки поділяють на *гарячі* та *холодні*. Холодними вважають злитки з м'яких сталей (СтО…Ст5сп, сталі 10…20, 09Г2, 09Г2Д тощо), температура поверхні яких нижче 300 °С, гарячими – більше за 300 °С.

Холодними вважають злитки з відносно міцних сталей (Ст6, сталі 35…45, 30Х, 35Х, 30ХГС, 40ХН, 14Г2, 10ХСНД, 15ХСНД, 19Г2 та деякі інші), температура поверхні яких менше 500 °С, гарячими – більше 500 °С. Тривалість нагрівання злитків залежить від температури їх посадки і складає 1…2 години при 950 °С, біля 4 годин при 600 °С, 6…7 годин при 300 °С. Загальний час нагріву включає декілька годин витримки (томління) для якісного прогріву металу.

Перед холодною посадкою злитків з міцних сталей стінки осередків колодязів охолоджують до 400 °С.

Посадку злитків у колодязь, виїмку їх та розміщення у *злитковозах* виконують підлогові крани, які пересуваються вздовж фронту колодязів або поперек нього.

Далі злиток передають на *ваговій рольганг*, де метал зважують і при необхідності повертають на 180° у горизонтальній площині вузьким кінцем уперед (для полегшення наступного захоплення злитку валками).

В якості обтискного *стану* в цеху «Слябінг» зазвичай використовують *універсальну* робочу кліть дуо, оснащену парою вертикальних приводних валків (на інших підприємствах – рідше – кліть дуо «блюмінг-слябінг», валки якої мають як циліндричну ділянку для прокатки слябів, так і рівчаки для прокатки блюмів, як це показано на рис. 1.78).

Зокрема, на *стані* ***слябінг 1150***, який застосовують тільки для прокатки слябів, горизонтальні валки робочої кліті виконують циліндричними (без рівчаків) номінальним діаметром 1150 мм з довжиною бочки 2800 мм; кожен валок обертається від індивідуального електродвигуна постійного струму потужністю 2х5000 кВт з частотою обертання 0 – 60 – 120 об/хв; підйом верхнього валка до 1520 мм.

Основне обтиснення металу здійснюється горизонтальними валками. Вертикальні валки меншого діаметра, розташовані *перед* або *за* горизонтальними (див. рис. 180, *ж*), зумовлюють видалення окалини, отримання слябів з рівними бічними гранями, знімають поширення металу в наступних проходах. Кращим є таке взаємне розташування валків, при якому останнє обтиснення розкатів здійснюється у вертикальних валках, які для більш високої технологічності мають бути на задній стороні стану, тобто з боку виходу металу з валків та ножиць.

Оскількт прокатка металу на слябінгу здійснюється одночасно у вертикальних і горизонтальних валках, тобто по суті є безперервною, забезпечують постійність секундних об'ємів металу за формулою (1.85).

Прокатку ведуть по одному злитку; ритм прокатки при цьому становить 50…60 с. Швидкість прокатки досягає 5…7 м/с.

Спочатку злиток подають до робочої кліті в положенні «на ребро» для отримання за 1…3 пропуски необхідної ширини при наступній прокатці сляба в горизонтальних валках і видалення окалини з його широких граней. Потім злиток кантують на 90° і ведуть прокатку в інтервалі температур 1250…1000 °С з обтисненнями, у середньому, 70 мм за пропуск при їх загальній *непарній* кількості (усього – 9…15 пропусків із забезпеченням виконання умов (1.81) і (1.82) вибором розмірів прокату).

Стан оснащений *маніпулятором* з чотирма *лінійками*, розташованими перед робочою кліттю і за нею, і *кантувачем*.

Прокатаний метал у потоці піддають суцільному або вибірковому зачищенню на *машині вогневої зачистки (див. вище)*.

Далі прокат на рольгангу надходить до *ножиць*, на яких обрізають кінці розкатів, а також здійснюють розділення розкату на мірні сляби.

За ножицями передню торцеву грань слябів таврують у *пристрої для таврування* (*див. вище*).

Після таврування готові сляби передають рольгангами до *прибиральних пристроїв*, де сляби *зіштовхувачем* з рольганга переміщуються на *штабелювальний стіл* для укладання в пакет, або до нагрівальних печей наступного прокатного агрегату (*див. далі*).

На агрегаті «слябінг» також передбачені засоби для прибирання скрапу і окалини, системи змащення та охолодження механізмів і машин, гідро– і пневмопристрої, електроприводи та системи автоматизації.

Середня потенційна річна продуктивність агрегату Слябінг 1150 – до 3300000 тонн.

Заготовкою для подовжньої прокатки *сортових профілей* є блюми, які прокатують ***на прокатних агрегатах «Блюмінг».*** Технологія та схеми розташування обладнання блюмінгів, в основному, аналогічні слябінгам. Тільки тут замість робочої універсальної кліті використовують одну кліть дуо реверсивну (або рідше – дві послідовно встановлені кліті дуо).

Як правило, злитки, призначені для прокатки блюмів, мають висоту біля 2 метрів, масу до 16 тонн і більше та поперечний перетин близький до прямокутного зі стороною 540…600 мм унизу та 700…800 мм на верхній основі.

Валки стану «блюмінг» мають рівчаки (*див. рис. 1.78*), прокатка в яких забезпечує випуск блюмів з перетином близьким до квадратного зі стороною до 350 мм або прямокутного з перетином (200…250)х(220…300) мм з гранічними відхиленнями ±6…8 мм та заокругленнями в кутах радіусом 30…45 мм.

Часто *стан* блюмінг використовують у потоці з крупносортним або рейкобалочним станом (*див. нижче*) і монтують їх в одному цеховому прольоті. Таким прикладом може стати «Блюмінг 1050» ПрАТ «Євраз-Дніпровський металургійний завод».

Першою технологічною операцією перероблення злитків у блюми є нагрів заготовки. Для цього використовують *регенеративні реверсивні* та (або) *рекуперативні* колодязі, які розрізняються оснащенням.

Регенеративні реверсивні колодязі об'єднують у групи, кожна з яких складається з чотирьох камер (колодязів) місткістю по 6…10 злитків. Відокремлена нагрівальна піч має з обох сторін по два регенератори для підігріву суміші коксового та доменного газів і повітря.

Ці колодязі працюють безупинно в автоматичному режимі, що створює сприятливі умови служби кладки внутрішніх стінок.

Окиснення металу в колодязях цього типу становить приблизно 2…2,5% від маси злитків. Окалина, що відділяється від поверхні злитків, взаємодіє з магнезитовим порошком і утворює сполуку, яка при добавках феросиліцію стає легкоплавкою, стікає похилим подом крізь вікна до *мульд* і використовується в сталеплавильному виробництві.

Середня продуктивність однієї групи регенеративних нагрівальних колодязів приблизно 350 тис. тонн на рік.

Недоліком таких колодязів є неоднакове розташування злитків відносно теплового потоку і, отже, їх нерівномірний нагрів. При цьому можливі оплавлення і перепал крайніх злитків.

За останні роки поширення набули рекуперативні колодязі. В них повітря нагрівається приблизно до 800 °С в керамічних рекуператорах, а газ – до 300…350 °С в металевому трубчастому рекуператорі.

Рекуперативні колодязі більш прості за конструкцією, ніж регенеративні. В них досягається більша рівномірність нагріву злитків по висоті і перетину. Нагрівання в таких колодязях також автоматизоване. Паливо і повітря до них підводиться або з центру подини, або підковоподібно. Пальники встановлюють на протилежних сторонах осередків та ще й зі зміщенням осей.

Більше 90% колодязів *агрегатів* «блюмінг» працюють на гарячому (850…950 °С) всаді злитків.

Для подачі нагрітих злитків до приймального рольгангу *стану* «блюмінг» при *подовжньому розташуванні* нагрівальних колодязів у двох паралельних прольотах використовують два злитковози. При цьому, зворотно-поступальний пробіг злитковозів зменшується в два рази, полегшується транспортування злитків із сталеплавильних цехів до відділення колодязів, яке в цьому випадку також стає в два рази коротше.

З метою наближення нагрівальних колодязів до прокатного стану (число груп колодязів може досягати 12…16) застосовують поперечне розташування прольоту нагрівальних колодязів по відношенню до станового прольоту. При цьому, пробіги злитковозів також різко зменшуються. Однак таке розташування прольоту колодязів утруднює транспортування злитків із сталеплавильних цехів до прольоту нагрівальних колодязів та ускладнює залізничні шляхи в пічному і становому прольотах агрегату.

З ростом продуктивності сучасних блюмінгів до 5 млн. тонн на рік і більше потік нагрітих злитків до стану різко збільшується, довжина прольотів нагрівальних колодязів сягає 250 м, і при ритмі прокатки 40…50 с швидкість одного слітковозу повинна становити 12 м/с і більше, що супроводжується суттєвими інерційними явищами.

Для запобігання цьому застосовують *кільцеву злітkоподачу* за допомогою трьох-чотирьох злітковозів, що рухаються в одному напрямку зі швидкістю приблизно 4 м/с за замкненим кільцевим рейковим шляхом. Управління злітковозами автоматизовано.

На стані блюмінг 1050 використовують робочі валки з максимальним діаметром 1050 мм і довжиною бочки 2600 мм. Зазвичай матеріал валків – кована сталь 50ХН. Вони встановлюються у текстолітові підшипники. Охолодження валків – водяне, а додаткове підшипників – густим мастилом.

Для поліпшення захоплення металу дно рівчаків перших двох калібрів валків блюмінга загрублюють. Стійкість валків за одну установку складає 65…70 тис. тонн прокату. Привід робочих валків здійснюється від електродвигуна потужністю 10 МВт з частотою обертання 0…60…200 об/хв через шестеренну кліть і універсальні шпинделі.

Натискний пристрій верхнього валка – електромеханічний з приводом від двох електродвигунів потужністю 80 кВт кожен. Швидкість переміщення верхнього валка 5 мм/с. Максимальне переміщення 600 мм.

Температура початку прокатки більше 1150 °С; по закінченні прокатки – більше 1100 °С.

Для калібрування валків блюмінгу використовують систему *ящичних калібрів* з їх послідовним або симетричним розташуванням на бочці валка (рисунок 1.91) [6].

Основна перевага ящичних калібрів порівняно з усіма іншими системами калібровки, застосовуваними для прокатки «квадратів», полягає в тому, що для однакових перетинів потрібна найменша глибина врізу у валки, що підвищує їх міцність, можливий кут захоплення, рівномірне обтиснення, мінімізацію енергетичних витрат, зручність механізації стану при передачі розкату з одного калібра до іншого.

Злитки на стані прокатують у залежності від їх розмірів і блюмів з проміжними кантовками за 9…15 і більше проходів при урахуванні умов (1.81) та (1.82).

Робочу кліть блюмінга обладнують *маніпуляторними лінійками* та *кантувачем*. Кантувач призначений для повороту розкату або злитку навколо його подовжньої осі на 90 градусів. Положення розкату щодо калібрів робочих валків із задньої сторони стана фіксується *ребристими роликами*.

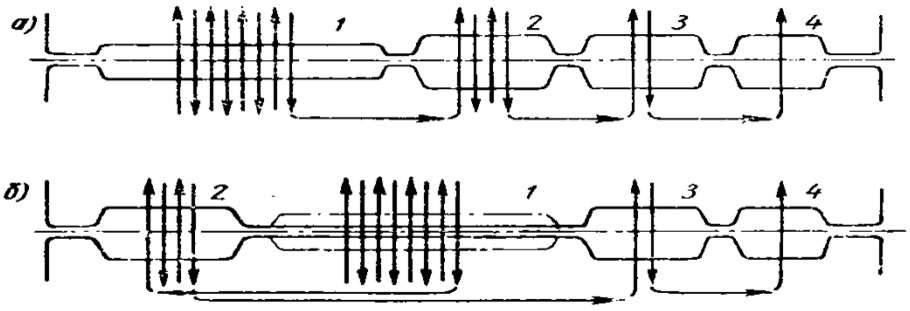


Рисунок 1.91 – Схема калібрування валків блюмінгу з послідовним (*а*) або симетричним (*б*) розташуванням калібрів (*стрілками та цифрами показані проходи металу при прокатці*)

Прокат, що надходить з блюмінга, ріжуть на *парогідравлічних ножицях* з горизонтальним різом. Температура металу при різанні 1000…1050 °С. Обрізь прибирають *ланцюговим конвеєром*.

Блюми, не призначені безпосередньо для наступної прокатки, *тавруют* і розміщають на *стелажі*, з якого їх після охолодження прибирають за допомогою електромостового крану і спеціальним візком транспортують до *складів* блюмів.

Блюми, що знаходяться на складах, зачищають на *машині вогневої зачистки* або вручну вогневими різаками та пневматичними молотками.

Як правило, продукцію обтискного виробництва (сляби та блюми) використовують як заготовку («напівфабрикат») для наступного перероблення іншими видами ОМТ і, перш за все – прокаткою.

Так, зі слябів виготовляють гарячекатані лист та стрічку, а з них – на наступних переробленнях – гнуті профілі та холоднокатані полосу, стрічку, жерсть, фольгу.

Блюми зазвичай спрямовують для гарячої прокатки сортових профілів різного призначення, зокрема, круглої в перетині непорожнистої трубної заготовки, з якої у подальшому виготовляють гарячекатані, а потім – і холоднодеформовані труби.

Розглянемо послідовно вказані перероблення прокатного виробництва.

Листопрокатне виробництво

Листовий прокат класифікують за багатьма ознаками: геометрією, хімічним складом металу, рівнем фізико-механічних властивостей, призначенням та ін. [4, 6, 54].

Для оцінки його якості застосовують єдині терміни і визначення, установлені у ДСТУ 2658 «Прокат черных металлов. Термины и определения дефектов поверхности» (*російською мовою*) та ДСТУ 2924 «Прокат чорних металів. Терміни та визначення». Для кожного конкретного виду листової продукції регламентовані показники якості наводяться у відповідних стандартах (*див. Додаток А*) або в технічних умовах ТУ У.

При класифікації листового прокату ***за геометрією*** враховують його товщину, ширину і довжину.

Залежно від товщини весь листовий прокат поділяють на дві основні категорії:

– товсті листи – товщиною від 4 до 350 мм (іноді – більше), шириною від 600 до 5300 мм, смуги – довжиною до 50 м, які виробляють, в основному гарячою прокаткою;

– тонколистова продукція – товщиною менше 4 мм, що виробляється як горячою, так і холодною прокаткою у вигляді смуг (у рулонах) та листів (карток).

При ширині смуг більше 600…700 мм їх називають *широкими*, а відповідні прокатні стани – *широкосмуговими*. Вузькі смуги шириною менше 300 мм (при товщині менше 2 мм) прийнято називати *стрічками, а стани – стрічковими*.

У стандартах на тонколистову сталь виділяють такі її види ***за призначенням:*** конструкційна, броньова, «декапірована» (відпалена та травлена), покрівельна, корозійностійка (нержавіюча), електротехнічна (динамна та трансформаторна) та ін.

Особливим видом листової продукції є *шарові* листи, що складаються з різних металів. Найчастіше зустрічаються двошарові листи, звані *біметалом*, рідше – тришарові. Такий матеріал поєднує властивості основного, більш дешевого металу, який забезпечує, наприклад, загальну міцність виробу, а дорожчий *метал, що покриває* (*плакірує),* надає виробу цінні додаткові властивості – високий опір корозії, зносостійкість й ін. Інколи шарові вироби відносять до *композиційних матеріалів* (*див. нижче*).

Розширюється виробництво тонколистової сталі з неметалевими (полімерними) покриттями, в якості яких використовують різні лаки, фарби, пластизолі, синтетичні плівки. Випускаються також листи (смуги) з подвійним покриттям: металевим і полімерним.

Більша частина різновидів листового прокату ***за хімічним складом*** – це *сталеві листи*. З них основну частину займають листи з вуглецевих (близько 78%) і низьколегованих (20%) марок сталі. Частка листових легованих сталей становить близько 1%, але вона поступово зростає.

Широке застосування отримали листи з *рядових* (Ст1кп, Ст1пс, Ст1сп, Ст2кп, Ст2пс, Ст2сп, Ст3кп, Ст3пс, Ст3сп тощо) і *якісних конструкційних низьковуглецевих листових сталей* (08кп, 08пс, 08Ю, 08Фкп, 08, 10кп, 10пс, 10, 15кп, 15пс, 15, 20кп, 20пс, 20, 25, 30). До числа поширених *низьколегованих листових сталей* відносяться марки: 09Г2…16Г2, 12ГС…17ГС, 15ГФ, 09Г2Д, 09Г2С, 09Г2СД, 15Г2СФ, 14ХГС, 20ХГСА…35ХГСА, 10ХСНД, 15ХСНД та ін.

Леговані листові сталі також дуже різноманітні за хімічним складом, але серед них можна виділити дві особливо великі групи: корозійностійкі (нержавіючі, або нержавкі) та електротехнічні.

Корозійностійкі сталі, містять у своєму складі велику кількість хрому та нікелю або тільки хрому. До перших (хромонікелевих) відносяться марки 08Х18Н10, 08Х18Н10Т, 12Х18Н9, 12Х18Н9Т, 12Х18Н10, 12Х18Н10Т, 17Х18Н9, 12Х21Н5Т, 20Х23Н18 та ін; до хромистих – марки 08Х13…40Х13, 08Х17Т, 12Х17 та ін

Електротехнічні сталі (динамні та трансформаторні) вирізняються високим вмістом силіцію (1,0…3,5%) і дуже низьким вмістом вуглецю (менше 0,01%), що зумовлює їх добрі електромагнітні властивості.

За нормованими характеристиками листовий прокат поділяють на категорії: I…V – для гарячекатаного стану, та VI для зміцненого стану. Для позначення відповідної категорії до марки сталі додається номер категорії, наприклад, Ст3пс1, Ст4сп3. Категорію прокату споживач вказує в замовленні, а при відсутності вказівок категорію визначає підприємство-виробник.

У деяких випадках пред'являються певні вимоги до структури металу в готових листах. Наприклад, при гарячій прокатці листів із середньо– та високовуглецевих сталей глибина зневуглецьового шару не повинна перевищувати 2,5% на сторону, а сумарна товщина такого шару не повинна бути більше 4% від фактичної товщини листа.

Є види листової продукції, для яких регламентований тільки хімічний склад металу, але у більшості випадків стандартами передбачається також певний рівень механічних властивостей.

За твердістю листи, смуги та стрічки зі сталі і кольорових металів випускаються трьох ступенів: *м'які* (відпалені), *напівтверді* (напіввідпалені) і *тверді* (невідпалені). Для деяких видів листів передбачена додаткова ступінь – *особливо тверді*.

Деякі додаткові категорії класифікації та відповідні вимоги, які притаманні різновидам листової продукції, представлені нижче.

Виробництво гарячекатаної листової сталі низьковуглецевої звичайної якості, якісної та легованої, що поставляється в рулонах товщиною 0,8…20 мм або у вигляді плит товщиною 50…350 мм та листів товщиною 3…50 мм з обрізаною чи необрізаною кромкою, *складається з наступних технологічних операцій*: підготовка і нагрів заготовок, прокатка, термообробка й оброблення.

Вихідною заготовкою для гарячої прокатки листів служать литі (на МБЛЗ різних типів) і катані сляби (*див. вище*), рідше – злитки.

Стан поверхні злитків часто суттєво негативно позначається на якості прокату.

Злитки багатьох кольорових металів і деяких легованих сталей піддають суцільний зачистці шляхом стругання, фрезерування або шліфування. Для отримання необхідних структури і механічних властивостей металу відношення товщини литого сляба до товщини готового листа має бути не менше 5…8 для рядових вуглецевих сталей, і 8…10 – для легованих сталей. При підвищенні якості лиття ці значення можуть бути знижені.

У разі отримання листів з алюмінію та деяких інших кольорових металів на ливарно-прокатних агрегатах вихідним матеріалом може бути рідкий метал.

До якості *товстолистового прокату* (ДСТУ 8803 «Прокат толстолистовой из углеродистой стали обыкновенного качества. Технические условия» – *російською мовою*) у порівнянні з іншими видами листа пред'являються найменш жорсткі вимоги. На його поверхні не повинно бути рванин, наскрізних розривів, розкатаних пригару і кірочок, а також бульбашок, здуттів, гармошки, тріщин, плівок, забруднень і вкатаної окалини (*опис дефектів наведено у розділі 2*). Допускаються дефекти (рябизна, риски й інші місцеві дефекти), що не виводять прокат за граничні розміри.

Усунення поверхневих дефектів прокату всіх товщин, що виготовляють на товстолистових станах, здійснюється зачищенням. Допускається заварювати зачищені ділянки прокату товщиною більше 10 мм, а при видаленні зачищенням дефектів з поверхні прокату допускається зменшення його товщини не більше ніж на 5% від номінальної, але не більше 3 мм. При цьому площа окремої зачищеної ділянки поверхні прокату не повинна бути більше 100 см^2, а сумарна площа всіх зачищених ділянок на одному листі – не більш 2% його площі. На обтиснутих кромках не повинно бути розшарувань, рванин, тріщин, бульбашок-здуттів, плівок, забруднень, вкатаної окалини, волосовин і рисок, що виводять прокат за граничні розміри по ширині.

Заготовки після ремонту зважують на вагах і рольгангом передають до методичних печей, де здійснюється нагрів металу до температури 1150…1280 °С. Для зменшення втрат при нагріванні металу на угар і окалиноутворення та отримання якісної поверхні прокату іноді використовують захисні технологічні покриття (обмазки, емалі) слябів.

Товстолистові прокатні агрегати можуть включати 1…2 стани з клітями дуо, за іншими варіантами – першу кліть дуо, другу – кварто або дві кліті кварто з довжиною бочки валків до 3500…5500 мм. Іноді перед цими клітями додатково встановлюють кліті з вертикальними валками для обтиснення бокових кромок листів.

На одноклітьових агрегатах чорнові і чистові пропуски здійснюють в одній *реверсивній* кліті; на двоклітьовому агрегаті – в чорновій і чистовій реверсивних клітях відповідно.

На двоклітьових агрегатах, оснащених кліттю з вертикальними валками, *прокатку проводять у наступній послідовності*.

Спочатку нагрітий сляб надходить до кліті з вертикальними валками, де для розпушування окалини його обтискають, як правило, за один пропуск. У чорнову кліть розкат задають до валків вузьким або широким торцем (у залежності від співвідношення розмірів сляба і готового листа) і прокатують до отримання підкату для чистової кліті із заданими товщиною і шириною. Прокатка в чорновій кліті ведеться за 5…11 пропусків. Періодично після 2…4-го пропуску розкат повертають у кліть з вертикальними валками для усунення опуклості кромок і вирівнювання за шириною. Після досягнення необхідних розмірів розкат передають до чистової кліті, в якій за 5…9 пропусків його прокатують до необхідної товщини листа.

На двоклітьових станах одночасно можна прокатувати два розкати: один в чорновій, а інший – в чистовії кліті.

Для прокатки листів товщиною 6…8 мм, використовують безперервні та напівбезперервні широкосмугові прокатні агрегати (стани).

У сучасних листопрокатних станах застосовують кліті з попередньо напруженими станинами, системи противовигину валків, автоматичне регулювання і програмне керування процесом прокатки, подачу технологічного мастила і т. і. [6].

В якості типового прикладу реалізації виробництва *тонкого гарячекатаного листа* можна навести дані про безперервний широкосмуговий тонколистовий стан (БШТС) «1680» ПАТ «Запорізький металургійний комбінат «Запоріжсталь»».

Цей агрегат постачає прокат в листах і рулонах товщиною 2,0 (до 1,2)…8,0 мм., шириною 860…1500 мм і масою рулону до 16 тонн згідно з вимогами ДСТУ 2834, а також технічних умов і стандартів підприємства. Тут допускається прокатка листа товщиною до 10,2 мм (заготовка для цехів гнутих профілів і холодної прокатки). Максимальна річна виробнича потужність агрегату – до 3,7 млн. тонн.

Основне обладнання агрегату БШТС «1680» розміщено в центральному становому прольоті, двигуни приводу валків – в прольоті, який є паралельний становому. У допоміжних прольотах розміщуються термічні печі, обробні агрегати, дресирувальний стан, травильні установки та майстерні. До складу прокатного агрегату також входять компресорна, насосна високого тиску, установка для підігріву валків струмами промислової частоти та інше допоміжне оснащення.

Безперервний широкосмуговий стан складається з двох груп клітей – чорнової (послідовної прокатки) і чистової (безперервної прокатки). Чорнова група клітей складається з першої дуо (чорновий окалиноламач) та чотирьох клітей кварто, оснащених вертикальними валками. До складу чистової групи входять 6 клітей кварто.

В якості вихідної заготовки на цьому прокатному агрегаті використовують сляби з вуглецевих і низьколегованих марок сталей, що прокатані на Слябінгу 1150 (*див. вище*), з товщиною 100…200 $^{\pm 2}$ мм, шириною 855…1520 $^{+10}$ мм і довжиною до 12300 мм.

Холодні сляби зі складу, який розташований перпендикулярно становому прольоту, подають на завантажувальний рольганг методичних печей.

Методичні нагрівальні печі на БШТС 1680 – чотирьохзонні рекуперативні з двостороннім нагрівом, дворядні з торцевою посадкою і видачею. Опалюються вони сумішшю доменного, коксового і природного газів.

Для безперервних широкосмугових станів надзвичайно важливими є температурні умови деформування металу, які залежать від марки сталі, конструктивних особливостей прокатного стану (схеми розташування основного обладнання, протяжності технологічних ліній) та технологічного процесу (товщини підкату і готової смуги, деформаційно-швидкісного режиму прокатки тощо). Регламентована температура нагріву заготовки з конструкційних сталей складає 1140…1260 ºС при температурі кінця прокатки не нижче 800…850 ºС, для інструментальних сталей – 1150…1230 ºС та 750…900 ºС, а для окалиностійких, нержавіючих, жаротривких сталей і сплавів з високим омічним опором

1100…1280 ºС та 750…900 ºС відповідно. Основним чинником, що визначає максимальну температуру нагріву сталі є вміст у ній вуглецю (з підвищенням вмісту вуглецю максимальну температуру нагріву знижують).

Для зменшення витрат на нагрів заготовки на агрегаті реалізована так звана *транзитна* (наскрізна) прокатка слябів, випущених зі Слябінгу 1150. За цією технологією гарячі сляби без зупинки та попереднього підігріву в методичних печах спрямовують одразу до чорнової групи клітей стану 1680, що зменшує витрати палива у декілька разів.

Значний вклад у розробку та дослідження ефективності цієї технології, окрім технологів підприємства, внесли вчені кафедри Обробки металів тиском Національної металургійної академії України (НМетАУ) під керівництвом професора Сафьяна М.М., доцента Молчанова О.І. та старшого наукового співробітника Солтана С.Л.

Протягом усього процесу прокатки з поверхні розкату постійно збивають окалину. Збивання окалини при прокатці сталей I…III груп (*див. вище*) здійснюється водою високого тиску (не менше за 80 атм) насосами, які забезпечують повне видалення окалини з поверхні металу, а також допустиму температуру кінця прокатки. Цьому сприяє бічне обтискання розкату вертикальними валками клітей чорнової групи.

Перед чистовою групою клітей встановлений двовалковий чистовой окалиноламач. Всі інші кліті кварто *чистової групи* виконують однаковими для уніфікації вузлів та деталей. Врівноважування валків – гідравлічне; установку їх здійснюють електричними натискними механізмами.

Номінальний діаметр робочих валків 620 мм, а опорних – 1240 мм. Матеріал валків: у кліті дуо (чорновий окалиноламач) – кована Сталь 50ХН; у клітях кварто: робочі валки – кована Сталь 9ХФ або 9Х2МФ, опорні валки – кована Сталь 9ХФ; у вертикальних валків – кована Сталь 50 або Сталь 55.

Для широкосмугової прокатки характерним є прогин осей валків під дією сили прокатки. Внаслідок цього, існує тенденція збільшення поперечної різнотовшинності смуги (її перетин стає чечевицеподібним).

Для запобігання цьому використовують механічне *профілювання* робочих валків (шліфуванням забезпечують перевищення їх діаметру на декілька десятих міліметра у центральній частині у порівнянні з периферійними зонами) або – рідше – їх теплове профілювання (місцевим нагрівом). Зазвичай же використовують багатовалкові кліті, наприклад, кліті кварто, в яких відносно тонкі робочі валки спираються на масивні опорні, кліті отримують натяг з підвищенням жорсткості валкового вузла за допомогою гідравлічного розпору шийок опорних валків, а між шийками робочих валків встановлюють гідроциліндри для забезпечення їх регульованого противигину. Саме така схема використовується на стані 1680, зокрема, на клітях №№ 9 і 10. Це забезпечує прокатку смуги з мінімальною різнотовщинністю та її контролем за допомогою рентгенівського товщиноміру (на виході зі стану).

Взагалі, використовуються й інші засоби компенсації поперечної різнотовщинності та регулювання площинності листів, наприклад, зміщенням робочих валків, що мають пляшкоподібну форму, в поперечному до напряму прокатки напрямі [6].

Постійний натяг між клітями таких агрегатів забезпечують електричними, гідравлічними або пневматичними петлеутримувачами. З передньої і задньої сторін клітей встановлюють проводки для центрування смуги щодо осі прокатки.

Особливістю листових безперервних станів є наявність *«температурного клина»* по довжині смуги, тобто суттєвої нижчій температурі передньої частині розкату відносно задньої. Наслідком цього стає відповідна нерівномірність опору металу деформаціїї та поява *подовжньої* різнотовщинності прокату.

Для запобігання цьому на виході з чорнової групи клітей встановлюють перемотувальний пристрій «Coilbox», який змотує прокат на високій швидкості з подальшим розмотуванням матеріалу на нижчій швидкості перед його задачею в чистову групу клітей.

Для забезпечення регламентованих охолодження смуг та структури металу застосовують *душирувальні установки*. Охолодження в них може бути як *ламінарне* (потоки води вільно падають на поверхню смуги), так і *струминне під тиском*. Останнє зазвичай застосовують для охолодження смуги знизу.

Смуга після виходу металу з чистових клітей змотується *моталками* у *рулони*. Для цього використовують багатороликові моталки. На них при температурі 500…800 °С та швидкості до 15 м/с формується рулон зі смуги товщиною 1,5…6 мм і масою 15…30 т. Найбільші відомі потужні моталки здібні змотувати смугу товщиною 8…11 мм.

Після формування рулон передають до операцій оброблення (*див. вище*). Частину рулонів направляють до різальних машин, після яких метал у вигляді листів пакують для відправлення замовнику.

Термічну обробку (нормалізація, відпал, відпуск, закалка або закалка з відпуском) та (або) травлення проводять у разі потреби.

Для правки штаб використовують роликоправильні машини.

Для остаточної обробки поверхні листів, зменшення різнотовщинності, усунення хвилястості і коробоватості листовий метал піддають *дресируванню*, тобто прокатці з невеликими (до 5%) обтисненнями. Дресирувальні кліті встановлюють в лініях агрегатів поперечного різання або окремо.

При виготовленні тонкого гарячекатаного листа на *напівбезперервних агрегатах*, напівфабрикат («підкат») для безперервної групи прокатують на реверсивних обтискних клітях, де режим обтиснень визначається, виходячи з умов (1.81) та (1.82) захоплення металу валками. Всі інші технологічні параметри листової прокатки приблизно такі ж, як і при прокатці на безперервному стані.

Рідше, але також застосовують більш «екзотичні» схеми прокатки, наприклад, в реверсивній кліті з пічними моталками або з використанням планетарної кліті [43]. В останній обтиснення заготовки здійснюється багаторазовим впливом великої кількості робочих валків малого діаметру, які розташовані *навкруги* опорного валка та спираються на нього. Опорний валок обертається *за ходом руху* розкату, а робочі – *проти*. Тому подачу металу в осередок деформації здійснюють спеціальні *задавальні валки*. При такій прокатці за один пропуск метал може отримати до 90% обтиснення, але його поверхня стає хвилястою, що потребує додаткового прогладжувального пропуску.

Холодною прокаткою виробляють листи і смуги товщиною менше 0,3…3,0 мм, аж до декількох мікрон, шириною до 2350 мм із забезпеченням високої якості за всіма показниками продукції: точність розмірів, чистота поверхні, фізико-механічні властивості тощо [6, 43, 80, 81].

Приблизно 80% випуску холоднокатаних листів складає низьковуглецева конструкційна сталь товщиною 0,5…2,5 мм, шириною до 2300 мм. Таку сталь використовують в автомобілебудуванні, тому часто її називають *автолистом*.

Методом холодної прокатки виготовляють майже всю жерсть (смуги товщиною 0,07…0,5 мм і шириною до 1300 мм), що йде у великих кількостях на харчову тару, зокрема, консервні банки. Матеріалом для жерсті (бляхи) служить низьковуглецева сталь, яку часто виготовляють із захисним покриттям, частіше за все – олов'яним (таку продукцію називають *білою жерстю*).

До числа найпоширеніших видів холоднокатаної листової продукції також відносять: *декапир* (травлену і відпалену листову сталь, що застосовується при виробництві емальованого посуду та інших виробів з покриттями), *покрівельний лист* (часто випускається оцинкованим – *див. вище*), низьколеговані конструкційні сталі.

У кольоровій металургії холодна прокатка застосовується для отримання тонких смуг, листів та стрічок з алюмінію, міді, нікелю, титану, цинку, свинцю та багатьох інших металів та їх сплавів. Хоча частка такої листової продукції становить лише близько 2% у загальній масі листового прокату, її економічне значення незрівнянно більше.

Тонколистовий холоднокатаний прокат товщиною менше 0,1 мм називається *фольгою*. Наприклад, алюмінієва фольга випускається у вигляді смуг мінімальною товщиною 0,005 мм і шириною до 1000…1500 мм.

До якості сталевого холоднокатаного листового прокату згідно з ДСТУ 8971 «Прокат листовий холоднокатаний. Основні параметри і розміри» пред'являються наступні вимоги. Він поставляється шириною 500 мм і більше, товщиною від 0,35 до 5,00 мм – в листах, і від 0,35 до 3,50 мм – у рулонах.

Такий прокат поділяють *за точнітю виготовлення по товщині* – на високої (ВТ), підвищеної (АТ) та нормальної (БТ) точності; *за точністю виготовлення по ширині* – на високої (ВШ), підвищеної (АШ) та нормальної (БШ) точності; *за точністю виготовлення по довжині* (крім прокатаного окремими картками-листами) – на високої (ВД), підвищеної (АД) та нормальної (БД) точності; *за точністю виготовлення по площинності* – на особливо високої (ПЗ), високої (ПВ), поліпшеної (ПУ) та нормальної (ПН) точності; *за характером крайки* – на обрізну (О) та необрізну (НО). Також регламентують серпоподібність листів, розміри, масу і телескопічность рулонів прокату. Внутрішній діаметр рулону повинен бути від 500 до 1000 мм. Маса рулону повинна бути від 1,5 до 20 т.

Холоднокатаний тонколистовий прокат за якістю обробки поверхні відповідно до вимог ДСТУ 2834 «Прокат тонколистовий з вуглецевої сталі якісної та звичайної якості загального призначення. Технічні умови» поділяють на три групи:

– I – особливо високої обробки (на лицьовій стороні прокату не допускаються дефекти, крім окремих рисок і подряпин довжиною менше 20 мм; на зворотній стороні прокату не допускаються дефекти, глибина яких перевищує ¼ суми граничних відхилень по товщині, а також плями забруднень, кольори мінливості, сірі плями; на глянсовій поверхні шорсткість $Ra \leq 0{,}6$ мкм, на матовій – $Ra \leq 1{,}6$ мкм, на шорсткій допускається $Ra > 1{,}6$ мкм);

– II – високої обробки (на лицьовій стороні – кращій за якістю поверхні – не допускаються риски і подряпини довжиною більше 50 мм; на обох сторонах прокату не допускаються дефекти, глибина яких перевищує половину суми граничних відхилень по товщині та які виводять прокат за мінімальні розміри по товщині, а також кольори мінливості на відстані, що перевищує 50 мм від країв);

– III – підвищеної обробки (допускається видалення поверхневих дефектів зачищенням дрібнозернистим наждаковим або фетровим кругом з наждаковою пастою із залишковими слідами абразивного зачищення; на обох сторонах не допускаються дефекти, глибина яких перевищує ½ суми граничних відхилень по товщині та які виводять прокат за мінімальні розміри по товщині; для підгрупи *III,а* кольори мінливості не допускаються на відстані більш за 200 мм від країв; для підгрупи *III,б* кольори мінливості допускаються по всій поверхні прокату).

Різноманітність сортаменту холоднокатаної листової продукції забезпечується застосуванням прокатних станів різної конструкції (*див. рис. 1.80*) з дуже різними технічними характеристиками та рівнями продуктивності в рамках агрегатів, які за технологічним призначенням поділяють на прокатні, дресирувальні та прокатно-дресирувальні.

Найвисокопродуктивнішими є *безперервні* агрегати (стани), що складаються з двох-шести послідовно розташованих клітей.

Для виробництва конструкційних листів з вуглецевих і низьколегованих сталей як масового виду продукції застосовують чотири– п'ятиклітьові безперервні агрегати (стани), розраховані, в основному, на прокатку смуг товщиною 0,3…3,0 мм, шириною 600…2350 мм. Тут використовуються прокатні кліті кварто з робочими валками діаметром 500…660 мм, опорними валками діаметром 1300…1600 мм і відповідною довжиною бочки. Максимальна швидкість прокатки сягає 25…30 м/с.

При прокатці смуг з кольорових металів знаходять застосування, головним чином, дво– та триклітьові безперервні стани. У чорній металургії такі стани також використовуються, але, в основному, для вторинної (додаткової) прокатки тонких смуг і жерсті після проміжного відпалу.

При необхідності прокатки малих партій листів, у тому числі – із широкої номенклатури легованих сталей доцільним є застосування одноклітьових реверсивних станів, які порівняно прості в налаштуванні і дозволяють вести прокатку з будь-якою необхідною кількістю проходів.

Заготовкою для станів холодної прокатки найчастіше служать гарячекатані смуги в рулонах (в окремих випадках – гарячекатані листи) товщиною 1,8…6,0 мм при виробництві сталевих листів, і товщиною 3…12 мм при виробництві листів з кольорових металів.

Всю гарячекатану заготовку перед холодною прокаткою піддають видаленню окалини на травильних агрегатах та промаслюванню поверхні (*див. вище*).

Сумарне обтиснення при холодній прокатці вуглецевих і низьколегованих конструкційних сталей у більшості випадків знаходиться в межах 50…80%.

Важливе значення має розподіл часткових обтиснень по клітях (а на реверсивних станах – по проходах). Це впливає на точність прокатки, завантаження устаткування, продуктивність агрегату.

На практиці застосовуються різні варіанти такого розподілу. Одним з найпоширеніших є варіант, який характеризується послідовним *зменшенням* відносних обтиснень від першої кліті до останньої. При такому режимі вдається забезпечити приблизно рівномірне завантаження клітей за силою та потужністю прокатки, оскільки зниження обтиснень деякою мірою компенсує зростання тиску при збільшенні наклепу зменшенням площі контакту металу з валками (*див. формули (1.79) та (1.83)*)

Іноді технологічний маршрут передбачає застосування невеликого відносного обтиснення в першій кліті. Перевагою такого режиму є те, що в першому проході відбувається вирівнювання смуги по товщині, тобто зменшується подовжня різнотовщинність. На практиці зустрічаються й інші схеми обтиснень, наприклад, відносні обтиснення приймаються приблизно однаковими.

Холодна прокатка смуг майже завжди ведеться з *натягом*. При безперервній прокатці він створюється примусово за рахунок певної неузгодженості швидкостей валків у послідовних клітях (у порівнянні з вільною прокаткою). В останній кліті стану передній натяг створюється моталкою. На реверсивних станах моталки створюють передній і задній натяг.

Позитивна роль натягу полягає, по-перше, в тому, що знижується тиск металу на валки, і по-друге, забезпечується отримання більш планшетних смуг. Застосування занадто високих натягів є небезпечним через ризик виникнення розривів смуг при прокатці. Зазвичай величину питомого натягу між клітями встановлюють у межах (0,2…0,5) від межі текучості σ_{T1} металу з урахуванням його наклепу. Питомий натяг між останньою кліттю і моталкою приймають менше $0{,}1\,\sigma_{T1}$, щоб уникнути формування надмірно щільних рулонів і зварювання витків у них при подальшому відпалі.

Промислова холодна прокатка вимагає ***використання технологічного мастила***. Основне його призначення – зменшення сил зовнішнього тертя на контактних поверхнях в осередку деформації. Завдяки цьому, знижується сила прокатки і скорочується витрата енергії, а отже, з'являється можливість збільшення інтенсивності виробництва. Крім того, технологічне мастило сприяє зменшенню зносу валків, запобігає, значною мірою, налипанню металу на валки, впливає на мікрорельєф і чистоту поверхні смуг.

Значний вклад в розвиток теорії і практики ефективного застосування технологічних мастил при прокатці та інших видах ОМТ здійснили наукові колективи: НМетАУ під керівництвом д.т.н. Грудєва О.П., Інституту чорної металургії НАН України (д.т.н. Мазур В.Л., к.т.н. Адамський С.Д. та ін.), Державного науково-дослідного інституту трубної

промисловості (к.т.н. Чуйко П.І., к.т.н. Брескіна А.І. та ін.), а також деяких інших установ, зокрема, Державного приазовського технічного університету (м. Маріуполь).

При холодній прокатці в якості технологічного мастила зазвичай застосовують водо-масляні емульсії [61]. Вони являють собою суміш води з 2…10% масляної фази. В якості останньої найчастіше використовують мінеральні масла (олії), до яких можуть бути введені поверхнево-активні домішки.

Сама по собі система «масло – вода» не є стійкою: вона швидко розщеплюється на масло та воду. Для стабілізації до такої системи уводять спеціальні речовини – *емульгатори* (наприклад, натрієві або калійні солі жирних кислот (мила) та ін.).

На маслохімічних підприємствах навіть виробляють спеціальні композиції, що складаються з масла і емульгатора; їх називають *«емульсолами»*. У даний час в цехах холодної прокатки вітчизняних заводів все ще застосовують емульсоли «Т», «ОМ», «Укрінол 211М» та ін; в зарубіжній практиці – емульсоли «Прозойль ЗА», «Квакерол 41СВ» та ін. У прокатному цеху шляхом розчинення у воді емульсолу готують *емульсію* необхідної концентрації.

Емульсії при прокатці та деяких інших випадках виконують функцію не тільки технологічного мастила, але й охолодження інструменту. В результаті, вони відносяться до класу *«мастильно-охолоджуючих рідин»*. Оптимальна температура при їх подачі на валки становить близько 40…50 °С.

Для подачі емульсії на прокатні валки і смугу, їх наступного збору та регенерації застосовують емульсійні системи циркуляційного (замкненого) типу. До їх складу входять насоси, колектори з форсунками, піддони для збирання емульсії під прокатною кліттю, магнітні сепаратори (для відокремлення металевих частинок), баки-відстійники, фільтри, холодильники.

Крім емульсій, у важких деформаційно-силових умовах прокатки в якості технологічного мастила іноді застосовують масла (наприклад, касторове масло) у чистому вигляді або з добавками поверхнево-активних речовин.

Правильний вибір властивостей технологічного мастила може запобігти появі *«пригарів»* та інших дефектів, які пов’язані із зажиреністю поверхні прокату і виявляються при наступній термічній обробці, зокрема при відпалі (*див. вище*).

Відпал холоднодеформованої стрічки здійснюють в колпакових печах в рулонах (іноді – в пачках) або у безперервних агрегатах світлого відпалу (у захисній атмосфері).

Останні у порівнянні з колпаковими печами мають значно більш високу продуктивність (до 60…80 т/год.), компактність, потребують менших капітальних витрат, меншого за чисельністю обслуговуючого персоналу, зручні для автоматизації та варіювання режимів термообробки, забезпечують отримання однорідної структури і стабільних властивостей металу.

Після відпалу тонколистову сталь зазвичай піддають *дресируванню* для формування тонкого наклепаного приконтактного шару металу. Якщо це не робити, то при витягуванні в процесі наступної листової штамповки (*див. вище*) поверхня виробів стає грубо шорсткою: утворюється так звана *«апельсинова кірка»*. Вироби з такою поверхнею мало придатні для фарбування, емалювання або нанесення інших покриттів.

До складу устаткування дресирувальних станів входять одна або дві робочі кліті кварто. За конструкцією вони аналогічні прокатним клітям. Іноді застосовуються дресирувальні кліті дуо. Дресирування смуг товщиною більше 0,3 мм ведеться за один пропуск.

Раніше дресирування проводили на сухих валках. Нині доведено, що кращі результати дає дресирування з технологічним мастилом. Застосування мастила (емульсії) дозволяє знизити тиск на валки і, найголовніше, – сприяє видаленню забруднень з поверхні смуг.

Після дресирування частина рулонів може відвантажуватися споживачам. Значна ж їх частина надходить на обробні агрегати для поперечного і подовжнього різання на листи і більш вузькі смуги згідно із замовленнями. Близько 30% такої продукції випускається із захисними покриттями після обробки на агрегатах оцинкування або нанесення полімерних плівок. Готова продукція піддається технічному контролю та пакуванню.

В Україні (а також – у деяких інших країнах) історично склалося так, що можна говорити про чітку спеціалізацію металургійних підприємств щодо випуску продукції певного виду. Так, у цеху *холодної* прокатки № 1 (ЦХП 1) на ПАТ «Металургійний комбінат «Запоріжсталь» на безперервному чотириклітьовому стані «1680», одноклітьових реверсивних станах «1680» і «1200», двох безперервних вузькосмугових чотириклітьових станах, двадцятивалковому стані «1700», двох безперервних вузькосмугових чотириклітьових станах «450» і «650» можна виготовляти холоднокатаний прокат з вуглецевої і низьколегованої сталі товщиною від 0,2 до 2,0 мм і шириною від 10 до 1500 мм у листах і рулонах.

У цеху холодної прокатки № 3 цього ж підприємства на стані «2800» можна прокатувати великогабаритний холоднокатаний (і гарячекатаний) лист товщиною 1,5…5,0 мм, шириною 1000…2500 мм і довжиною до 4000 мм з вуглецевих, легованих і нержавких марок сталі.

Сортова прокатка (прокатка профілів)

Сортова прокатка простих і, тим більш – фасонних профілів (*див. рис. 1.77*) відзначається ускладненим (у порівнянні з прокаткою листової сталі) характером плину метала в осередку деформації, що висуває додаткові умови до якості технологічних процесів і продукції [6, 41, 82].

Металургійна промисловість випускає сортовий прокат, види якого вирізняються формою поперечного перетину і розмірами. Ці вироби, перелік яких називається *сортаментом*, як правило, стандартизовані (*див. Додаток А*).

Основні обсяги виробництва продукції *сортопрокатного виробництва* в Україні можуть забезпечувати: металургійний комбінат ВАТ «АрселорМітал Кривий Ріг, ПАО «Металургійний комбінат «Азовсталь» (м. Маріуполь), ПАТ «Дніпровський металургійний комбінат» (м. Кам'янське, Дніпропетровська область), ЧАО «Дніпровський металургійний завод», деякі металургійні підприємства Донецької області. Вони забезпечують майже весь український ринок чорних металів.

Сортовий прокат поділяють на прості і фасонні профілі. Прокат з перетином у вигляді кола, квадрата, прямокутника відносять до *простих профілів*. Прокат складного поперечного перетину відносять до *фасонних профілів*. У залежності від призначення фасонні профілі поділяють на профілі загального, або масового споживання (кутовий профіль, швелери, двотаврові балки, шестигранні профілі тощо) і профілі спеціального призначення (рейки; профілі для сільськогосподарського машинобудування, електропромисловості, нафтової промисловості та ін.)

Іноді групу виробів сортового прокату доповнюють різновидами *спеціальних профілів*, до яких відносять:

- деякі профілі спеціального (галузевого) призначення (ресорно-пружинні; для рейкових скріплень, вагонобудування та автомобільної промисловості; для виготовлення ковзанів, віконних затворів тощо);
- періодичні профілі для армування залізобетонних конструкцій, які прокатують у спеціальних клітях;
- гнуті профілі;
- колеса суцільнокатані різного призначення, прокатувані на спеціальних колесопрокатних станах, кістяки кранів та ін.;
- бандажі, кільця і погони прямокутного і фасонного перетинів різного призначення, що виробляються на бандажопрокатних станах;

- кулі катані, що виготовляють на кулепрокатних станах (*див. вище*);
- періодичні профілі круглого перетину, одержувані методом поперечно-гвинтової прокатки на тривалкових станах та ін.

Найбільше місце у споживанні спеціальних профілів сталевого прокату займає залізничний транспорт, гірничодобувна промисловість і гірниче машинобудування, а також транспортне та сільськогосподарське машинобудування.

Загальні нормативні вимоги до якості прокату зумовлені його призначенням і містяться в стандартах і технічних умовах.

Суттєву роль при цьому відіграє точність продукції. За системою ISO міру точності визначають *квалітети* – ступені стандартних допусків, що відповідають одному рівню точності для всіх номінальних розмірів.

Система допусків і посадок встановлює 20 квалітетів стандартних допусків, позначених IT01, IT0, IT1....IT18 для інтервалу розмірів від 0 до 500 мм включно і 18 квалітетів стандартних допусків в інтервалі розмірів від 500 до 3150 мм (включно), позначених IT1...IT18 [83]

У залежності від квалітетів, шорсткості поверхні і глибини залягання допустимих дефектів встановлено 6 груп (*А…Е*) обробки поверхні сортової сталі. Причому для груп обробки *А, Б* і *В* визначено норми шорсткості $R_a = 0{,}32\ldots1{,}25$, мкм, а дефекти поверхні взагалі не допускаються.

Найменш жорсткі вимоги пред'являються до прокату сортового (і товстолистового – *див. вище*) зі сталі вуглецевої звичайної якості (ДСТУ 4484).

Поверхня такого прокату повинна бути без плівок, розшарувань, наскрізних розривів, бульбашок-здуттів, розкатаних бульбашок, плям злипання після зварювання, порізів, надривів, вкатаної окалини, перетравів, недотравів, смуг нагартування, вкатаних металевих і сторонніх часток (вигляд вказаних дефектів – *див. підрозділ 2*). Допускаються без зачищення лише окремі розкатані бульбашки, забруднення, рябизна, відбитки, риски, а також наявність зачищень або вирубки інших дефектів, які не виводять розмір профілю за межі мінусового відхилення.

Більш жорсткі вимоги пред'являються до якості поверхні прокату, що використовується у машинобудуванні і призначений для наступної переробки штампуванням, волочінням або пресуванням, коли необхідна висока якість поверхні виробів. Наприклад, прокатана кругла якісна сталь діаметром 0,20…50 мм зі спеціальною обробкою поверхні за ДСТУ 7809 повинна бути піддана видаленню поверхневого шару шліфуванням, обточуванням або обдиранням з наступним полірування.

За якістю поверхні прокату сортового каліброваного зі спеціальною обробкою встановлено дві групи: *«А»* (переважно, для гарячої обробки тиском) і *«Б»* (для холодної механічної обробки).

На поверхні прокату з якістю поверхні «групи *А»* дефекти повинні бути вилучені положистою вирубкою або зачищенням, ширина яких повинна бути не меншою за їх п'ятикратну глибину. Регламентується також глибина зачищення дефектів.

На поверхні прокату допускаються без зачищення лише окремі риски, вм'ятини і рябизна глибиною в межах половини допуску на розмір, а також розкатані бульбашки і забруднення глибиною, що не перевищує чверті допуску на розмір, але не більш 0,20 мм.

На поверхні прокату з якістю поверхні «групи *Б*» допускаються місцеві дефекти глибиною, що не перевищує мінусового граничного відхилення на розмір.

Допускаються відбитки, рябизна і риски глибиною не більше 0,20 мм, а також окремі розкатані бульбашки глибиною не більше 0,15 мм.

Фасонні профілі поставляють гарячекатаними за першою групою – для застосування без обробки поверхні. На поверхні профілів допускаються без зачистки окремі розкатані бульбашки, рябизна, відбитки і риски, які не виводять розміри профілів за межі мінусового відхилення. Інші види дефектів повинні бути видалені зачисткою або вирубкою глибиною, що не виводить розміри профілю за межі мінусового відхилення. Розшарування прокату не

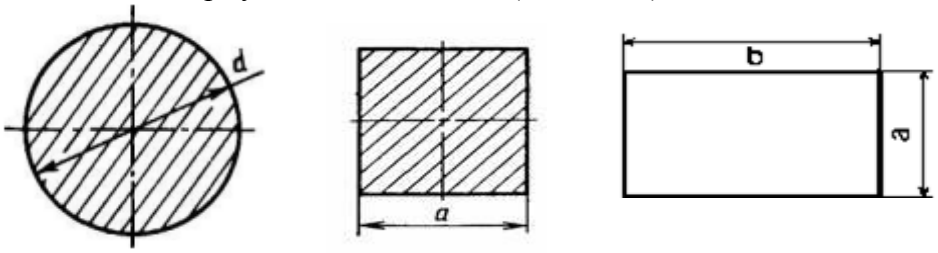
допускається. Такий прокат повинен бути обрізаним. При порізці профілів у холодному стані на поверхні торця допускаються хвилястість і відколи, які не виводять довжину профілю за номінальний перетин і граничні відхилення за довжиною. Косина різу не повинна виводити довжину штанг за їх номінальний розмір і граничні відхилення за довжиною.

Висота задирок при різанні ножицями не повинна перевищувати 1,0 мм при товщині фасонного прокату (полиць) понад 5,0 до 10 мм включно і 0,1 товщини – при товщині більше 10 мм. Висота задирок при різанні фасонного прокату пилами не повинна перевищувати 3 мм. На вимогу споживача задирки повинні бути вилучені.

Можливі й інші вимоги на замовлення споживача.

У стандартах на конкретні види сортового прокату наводяться і *спеціальні вимоги* до відповідної продукції.

Так, якість *круглого гарячекатаного прокату* (рисунок 1.92, *а*), який випускається діаметром $d = 5…330$ мм, нормується ДСТУ 4738 (EN 10060).



а *б* *в*

Рисунок 1.92 – Вигляд перетинів простих профілів прокату: *а* – круг; *б* – квадрат; *в* – смуга

При цьому, такий прокат поділяють:

– *за точністю:* особливо висока – *АО1*; висока – *А1, А2, А3*; підвищена – *Б1*; звичайна – *В1, В2, В3, В4, В5*);

- *за довжиною при поставці споживачеві:* мірна – *МД*; мірна з немірною – *МД1*; кратна мірній – *КД*; кратна мірній з немірною – *КД1*; немірна – *НД*; обмежена в межах немірної – *ОД*; обмежена з немірною довжиною – *ОД1*; у мотках – *НМД*);

- *за граничними відхиленнях по довжині прокату*: мірна – *БД*; кратна мірній довжини – *ВД*;

- *за кривизною:* I, II, III і IV класи, -

і регламентуюь номінальний діаметр прокату, граничні відхилення за ним, овальність, площу поперечного перерізу і масу 1 м довжини.

Прокат діаметром до 10 мм (катаний дріт, або «катанку») виготовляють у мотках, а понад 10 мм – у прутках.

Основним стандартом на катанку є ДСТУ 2770, згідно з яким катанку з вуглецевої сталі звичайної якості виготовляють двох класів: *П* – призначена для наступного волочіння з отриманням дроту; *С* – для використання у стані постачання для використання в якості будівельної арматури, пакування та інших цілей.

Катанку круглу телеграфну, призначену для наступного волочіння з отриманням дроту для ліній зв’язку та проводів електропередач, прокатують з діаметрами 5,5; 6,0; 6,5 та 7,0 мм. Відхилення по діаметру допускаються у межах ±0,5 мм.

Катанку сталеву канатну (ДСТУ 3683), що призначена для виготовлення канатного дроту, прокатують з діаметрами 5,5; 6,0; 6,5; 7,0; 8,0; 9 та 10 мм. У залежності від якості та призначення таку катанку виготовляють трьох классов: *ЗЯ* – звичайної якості з допусками по діаметру ±0,5 мм; *ПЯ* – підвищеної якості (±0,4 мм); *ВЯ* – високої якості (±0,3 мм). На поверхні *катанки* класів *ВЯ* та *ПЯ* розкатані бульбашки не допускаються.

Катанка зі зварювальної сталі (ДСТУ EN 10016-1), яка призначена для виготовлення електродного дроту, виробляється з діаметрами 5,5; 6,0; 6,5мм, допуском по діаметру (+0,3; -0,4 мм) та овальністю не больше 0,4 мм.

Вимоги до *прокату (заготовки) квадратного перерізу* (*див. рис. 1.92, б*) визначено у ДСТУ 4746).

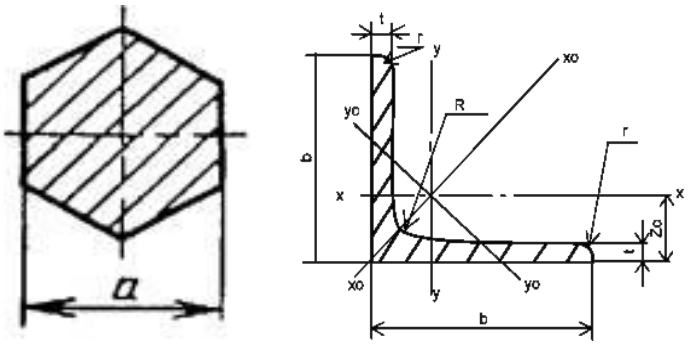
Такий прокат виготовляють підвищеної точності (*Б*) та звичайної точності (*В*) і регламентують розмір сторони $a = 6…200$ мм, довжину, кривизну та скручування прутків, граничні відхилення за ними, притуплення кутів перетину та його площу, масу 1 м, а також правила відповідних вимірювань та приймання. Квадратний прокат виготовляють у прутках (за узгодженням зі споживачем прокат з $a \le 14$ мм виготовляють у мотках).

Відповідно до замовлення прутки виготовляють довжиною: 2…12 м – з вуглецевої звичайної якості і низьколегованої сталі; 2…6 м – з якісної вуглецевої і легованої сталі; 1,5…6 м – з високолегованої сталі: мірної довжини, кратної мірній довжини, немірної довжини.

Вимоги до якості сталевої гарячекатаної смуги (*див. рис. 1.92, в*) загального призначення і для виготовлення гайок шириною від 11 до 200 мм і товщиною від 4 до 60 мм регламентуються ДСТУ 4747. Такі смуги прокатують підвищеної (*А*) і нормальної (*Б*) точності.

Довжина смуг від 3 до 10 м – з вуглецевої сталі звичайної якості, низьколегованої і фосфористої; від 2 до 6 м – з вуглецевої якісної і легованої сталі. У залежності від призначення смуги виготовляють мірної довжини; кратної мірній довжини; мірної довжини із залишком не більше 15% маси партії; кратної мірній довжини із залишком не більше 15% маси партії; немірної довжини. За узгодженням виробника зі споживачем смуги виготовляють у мотках (рулонах). Для цього профілю також регламентують граничні відхилення розмірів, притуплення кутів перетину, серпоподібність, масу 1 м, а також правила відповідних вимірювань та приймання.

Вимоги до якості *шестикутника* (рисунок 1.93, *а*) визначено в ДСТУ 4737.



а *б*

Рисунок 1.93 – Вигляд перетину шестикутника (*а*) та кутника (*б*)

За точністю такий прокат виготовляють: підвищеної точності (*Б*) та звичайної точності (*В*) у прутках довжиною від 1,5 до 12 м: мірної довжини; кратної мірній довжини; немірної довжини. Допускається за погодженням виробника зі споживачем виготовляти його в мотках. Для цього профілю регламентують діаметр вписаного кола ($a = 8…100$ мм і більше за узгодженням виробника зі споживачем) та площу перерізу, граничні відхилення за ними, різницю розмірів між паралельними гранями прокату в одному і тому ж перерізі (*див. рис. 1.93, а*), притуплення кутів, масу 1 м довжини, кривизну прутків та їх скручування, а також правила відповідних вимірювань та приймання.

Характеристика *кутників, або куточків, або кутів* (*див. рис. 1.93, б*) гарячекатаних рівнополочних наведена в ДСТУ 2251. Їх виготовляють за №№ 2…25. Для визначення у мм характерного розміру *b* рівнополочного кутника (*див. рис. 1.93, б*) слід його номер

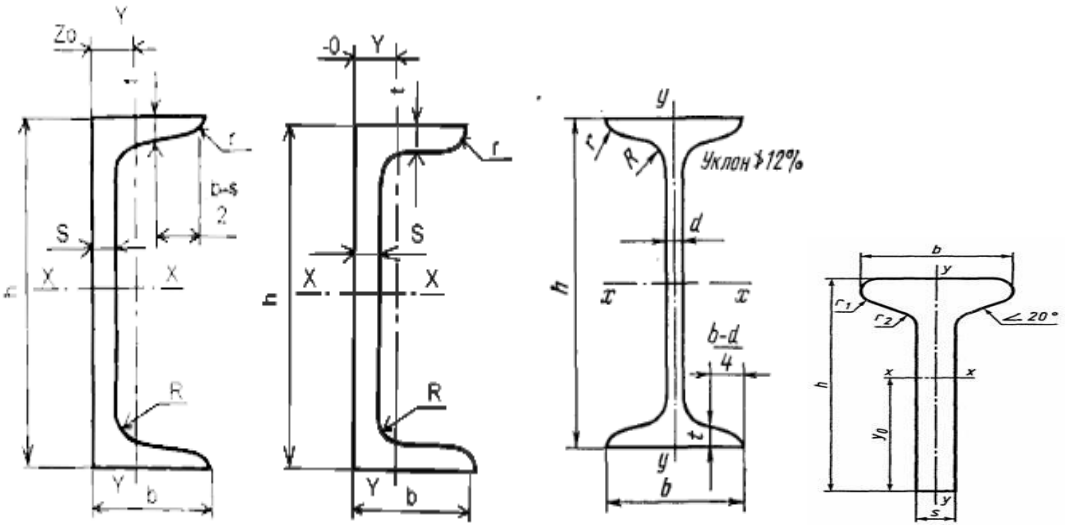
помножити на 10. За точністю прокатки кутники виготовляють метричної та дюймової серій: високої точності (*А*) та звичайної точності (*В*) довжиною від 4 до 12 м: мірної довжини; кратної мірній довжини; немірної довжини; обмеженої довжини в межах немірної. Допускається виготовляти кутники довжиною понад 12 м.

Крім розмірів, зазначених на рис. 1.93, *б*, також регламентують граничні відхилення розмірів, відхилення від прямого кута при вершині профілю, притуплення зовнішніх кутів полиць, масу 1 м кутника, кривизну, правила відповідних вимірювань та приймання, момент інерції; радіус інерції; відстань від центру ваги до зовнішньої грані полиць; відцентровий момент інерції. Скручування профілю навколо його подовжньої осі не допускається.

У *нерівнополочних кутників* розміри полиць різні. Номенклатура показників їх якості практично не відрізняється від рівнополочних кутників.

При виготовленні сталевих швелерів №№ 8…40 згідно з ДСТУ 3436 регламентуються розміри, відображені на рисунку 1.94, *а, б*. Для визначення у *мм* характерного розміру h швелера слід його номер помножити на 10.

За точністю прокатки швелери виготовляють: підвищеної точності (*Б*) та звичайної точності (*В*) довжиною від 4 до 12 м: мірної довжини; кратної мірній довжини; немірної довжини. За узгодженням зі споживачем допускається виготовлення швелерів довжиною понад 12 м. Крім цього у стандарті визначено граничні відхилення за розмірами і формою швелерів, притуплення зовнішніх кутів швелерів, площу поперечного перерізу, масу 1 м і довідкові значення для осей, момент інерції; статичний момент опору; радіус інерції, статичний момент напівперерізу, а також правила відповідних вимірювань та приймання.



а *б* *в* *г*

Рисунок 1.94 – Вигляд перетинів швелерів звичайної форми (*а*) та з паралельними гранями полиць (*б*); перетин двотаврової балки (*в*); перетин таврового профілю

Як видно, швелери виготовляють з полицями звичайної форми та паралельними полицями. В останньому випадку зменшується на 1…2% маса погонного метру виробу при однаковій міцності.

Двотаврові балки №№ 14…45 (див. рис. 1.94, *в*) виготовляють у відповідності з вимогами ДСТУ Б В.2.6-73. Для визначення у *мм* характерного розміру h балки слід її номер помножити на 10. За точністю прокатки такі профілі виготовляють: високої точності (*А*) та звичайної точності (*В*) довжиною 4…3 м: мірної довжини; кратної мірній довжини; мірної довжини із залишком до 5% маси партії; кратної мірній довжини із залишком до 5% маси партії; немірної довжини. При цьому визначають форму, розміри, кривизну стінки по висоті перерізу, несиметричність фланців полиць балок щодо вертикальної осі, притуплення зовнішніх кромок полиць, площу поперечного перерізу профілю, довжину,

масу 1 м, відповідні допуски, момент інерції; момент опору; радіус інерції, статичний момент напівперерізу, а також правила відповідних вимірювань та приймання.

Серед фасонних профілів прокату є також *тавровий* профіль (ДСТУ EN 10055), який представляє із себе половину висоти перерізу двотаврової балки (*див. рис. 1.94, г*).

При виготовленні *рейок* для залізничного транспорта, рудничних (*Р*), кранових (*КР*), трамвайних жолобчастих та іншого призначення використовують відповідні нормативні документи, перелічені в таблиці А1 Додаттку А, а також у Технічнх умовах України ТУ У 27.1-05393056-257-2004; ТУ У 27.1-00190319-1326-2004; ТУ У 27.1-05393056-257-2004; ТУ У 27.1-05393056-265:2009 та ін.) [84, 85].

Регламентовані властивості відповідних різновидів такої продукції відображають специфічні умови її використання. Перш за все, це стосується сталі, з якої виготовляють рейки, її механічних властивостей, форми профілю поперечного перерізу (рисунок 1.95), розмірів та допусків.

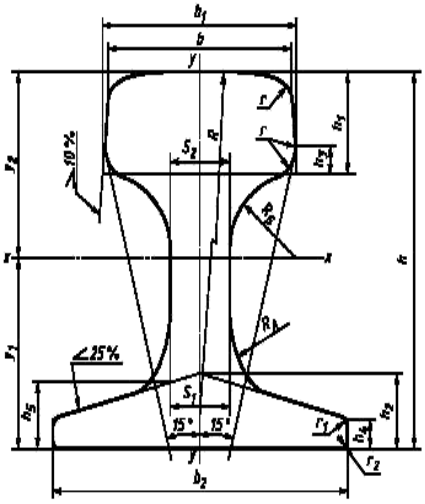


Рисунок 1.95 – Вигляд поперечного перетину рейки кранової [85]

Наприклад, рейки кранові КР70, КР80, КР100, КР120, КР140 за ДСТУ 2484, які використовують для підкранових шляхів підйомних кранів, прокатують зі сталі з хімічним складом, у мас. %: 0,53…0,73 *C*; 0,60…1,00 *Mn*; 0,15…0,35 *Si*; ≤ 0,050 *P*; ≤ 0,050 *S*; ≤0,30 *Cr*; ≤0,30 *Ni*; ≤0,30 *Cu*. Вміст азоту у готових рейках не повинен перевищувати 0,008%. Механічні властивості таких рейок повинні відповідати таким вимогам: $\sigma_B \geq 730$ Н/мм^2; $\sigma_T \geq 370$ Н/мм^2; відносне видовження $\delta \geq 6\%$; твердість за Бринелем – не менше 212 *НВ*.

Механічні властивості (включаючи твердість) рейок визначають на плавках із вмістом вуглецю на нижній межі (0,53%) та при вуглецевому еквіваленті $C_{екв.}$=C+0,25(Mn+Si)%≤0,72. За вимогою споживача твердість рейок повинна бути 321…390 *НВ* без нормування відносного видовження.

Значна кількість різновидів рейок має профіль, подібний до рис. 1.95. Але прокатують рейки й з іншими параметрами. Наприклад, рейки трамвайні жолобчасті безшеєчні за ТУ У 27.1-05393056-257-2004 виготовляють зі сталі, що має плавочний хімічний склад, у мас.%: 0,71…0,82 *C*; 0,75…1,05 *Mn*; 0,20…0,35 *Si*; ≤0,040 *P*; ≤ 0,040 *S*; ≤ 0,30 *Cr*; ≤ 0,30 *Ni*; ≤ 0,30 *Cu*; ≤0,008 *N*.

При цьому регламентуються: механічні властивості рейок, розміри їх перерізу, несиметричність поперечного перетину рейки відносно вертикальної осі (якщо це застосовно), увігнутість підошви, допуски, номінальна маса 1 погонного метру профілю, правила відповідних випробувань та приймання.

Рейки виготовляють звичайної та підвищеної точності прокатки. Їх поставляють довжиною: мірною 9,0…12 м та немірною – від 4,0 до 12,0 м, що обумовлюють у контракті.

Скручування рейки не допускається. Кривизна рейки нормується. Кінці рейок повинні бути рівно обрізані (при певних допусках косини різу) та відповідним чином оброблені (термічно, правкою, пробивкою отворів тощо).

Флокени (*див. розділ 2*) у металі рейок не допускаються. На поверхні прокату не допускаються тріщини, закати, рванини, напливи та розкатані забруднення. Торці рейок не повинні мати слідів усадкової раковини, розшарувань та тріщин.

На поверхні прокату допускається наявність поодиноких розкатаних пухирів, закатів та тріщин, а також слідів видалення дефектів пологою вирубкою або зачисткою, якщо глибина вказаних дефектів, рахуючи від фактичного розміру, не перевищує нормативних вимог. При цьому, *поперечна* вирубка дефектів на рейках не допускається.

Кожна штанга рейки повинна бути маркована з визначенням типу рейки, ознакою сортності та номером плавки.

Сортамент профілів сортової прокатки вельми широкий, що викликає складнощі при розробці режимів обтиснень, калібровці та підготовці прокатного інструменту (валків, привалкової арматури тощо), а також – засобів контролю якості продукції [1]. В якості прикладу можна навести перерізи ще двох типових профілів (рисунок 1.96), які вимагають суворого дотримання вимог відповідних нормативних документів.

а *б*

Рисунок 1.96 – Вигляд поперечного перетину профілів стійки шахтної: *а* – полособульб за ДСТУ ISO 657; б – штабобульб за ДСТУ EN 10067)

Значна частина сучасного експорту української продукції сортопрокатного виробництва формується за рахунок відносно дешевих крупних профілів: «круг» та «квадрат» (див. рис. 1.92, *а, б*), – які у наступному в інших країнах можуть перероблятися у середньосортні та дрібносортні профілі зі збереженням їх власних матеріальних та екологічних ресурсів. У цьому сенсі доцільним є виготовлення в Україні металопродукції з *глибоким* поточним переробленням.

Одним з таких видів продукції відповідального призначення є *арматурний прокат*.

У залежності від службових властивостей такий прокат поділяють на:

– зварюваний (індекс «С» – від російського «*свариваемый*») та незварюваний (без такого індексу);

– тривкий до корозійного розтріскування під напругою (індекс «К») та нетривкий до корозійного розтріскування (без такого індексу);

– зварюваний та тривкий до корозійного розтріскування під напругою (індекс «СК»).

Арматурний прокат поділяють на класи *у залежності від показника механічних властивостей* – встановленого стандартом нормованого значення умовної або фізичної границі текучості в Н/мм^2.

Отже, арматурний прокат в Україні виготовляють з наступним маркуванням класів:

– А240С – з гладким (круглим у перерізі) профілем;

– А400С, А500С, А600С, А600К, А800, А800К, А800СК і А1000 – з періодичним профілем (рисунок 1.97). Число у маркуванні арматури означає рівень межі текучості металу, не нижчий за означений, наприклад, *зварюваний* арматурний прокат класу А500С повинен мати межу текучості не менше за 500 МПа.

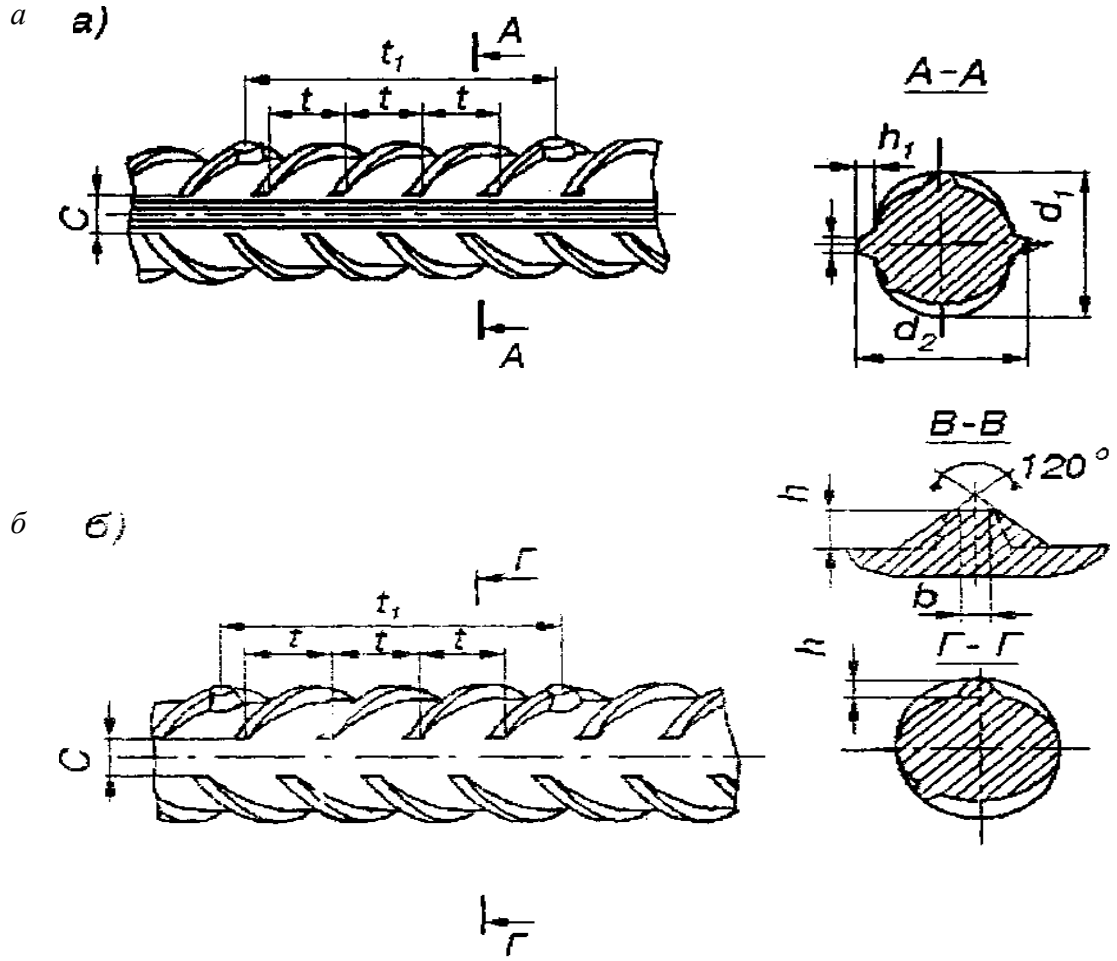


Рисунок 1.97 – Вигляд видів арматурного прокату періодичного профілю за ДСТУ 3760: *а* – з подовжніми виступами; *б* – без подовжніх виступів

Слід зауважити, що в країнах ЄС та світі використовують аналогічну продукцію, яка відрізняється за формою перетину і властивостями.

Арматурний прокат з гладкою поверхнею виготовляють діаметром від 5,5 до 40 мм зі звичайною точністю; з періодичним профілем – від 6,0 до 40 мм. Його поставка здійснюється за номерами (номер відповідає номінальному діаметру d_1) в прутках мірної і немірної довжини від 6 до 12 м (допускається за контрактом виготовлення прутків й іншої довжини і з іншими періодичними профілями. Зокрема, за ТУ У та зарубіжними НТД), а також у бунтах. Прутки арматурного прокату періодичного профілю повинні мати поперечні виступи серпоподібної форми, які не з'єднуються з подовжніми виступами (*див. рис. 1.97, а*). Подовжні виступи не обов'язкові (*див. рис. 1.97, б*).

У стандарті регламентують форму і розміри арматурного прокату, масу 1 погонного метра прутка, овальність, кривизну прутків, хімічний склад сталі, механічні властивості (σ_B, $\sigma_{0,2}$ або σ_T, δ_5, відносне рівномірне видовження після розриву δ_P, повне відносне видовження при максимальному навантаженні δ_{max}, кут згину при випробуваннях на вигин у холодному стані), допуски, а також правила відповідних вимірювань, маркування, пакування та приймання.

Зварюваність арматурного прокату та стійкість до корозійного розтріскування забезпечуються хімічним складом матеріалу та технологією виготовлення. Не допускається зниження тимчасового опору зварного з'єднання щодо регламентованих норм більше, ніж на 10%. Арматурний прокат класу А600С і вище для попередньо напруженого залізобетону повинен відповідати нормам механічних властивостей після електронагріву до температури 400…450 °С.

Розвиток суспільства свідчить, що задоволення вимог різних сфер економічної діяльності потребує постійного розширення сортаменту прокатної продукції.

У цьому зв'язку вельми важливою стає діяльність з розробки відповідних технологій і, перш за все – побудова та контроль систем калібрування валків сортопрокатних клітей. Таку роботу в прокатному цеху забезпечує спеціаліст з калібрування – *калібрувальник*, робота якого є результатом комплексу його професійних знань та умінь і, значною мірою – майстерності, та навіть – своєрідного мистецтва.

Все ж таки, на цій ниві практикою визначено основні схеми прокатки певних видів продукції, які можуть служити базою при розробці технологій виготовлення нових профілів на будь-яких прокатних станах [6].

Схема калібрування повинна передбачати можливість отримання на прокатному стані різних профілів при мінімальних витратах на заміну валків (*«перевалку»*) і перенастроювання стану для отримання різних профілів, бажано, з використання одних і тих же валків чорнових клітей. При цьому для певного швидкісного режиму прокатки забезпечують обтиснення металу, необхідне для досягнення відповідної структури та властивостей останнього, а для умов безперервної прокатки – також виконання умови постійності секундних об'ємів. Додатковими умовами стають: відсутність защемлення розкату в калібрі, рівність обтиснень по обидві сторони роз'єму калібра для забезпечення прямолінійності виходу розката з валків, мінімізація нерівномірності деформації металу по перерізу профілю тощо.

Так, у *схемах калібровки* використовують декілька систем калібрів.

У перших чорнових клітях зазвичай застосовують *ящичні калібри*, в наступних – користуються калібрами однієї із систем (рисунки 1.98…1.101): *овал-квадрат, овал-коло, овал-ребровий овал, шестикутник-квадрат* та деякі інші (*уявляється доцільним, щоб студенти самостійно або з допомогою викладача за представленими схемами калібровок знайшли та навели відповідні приклади*).

Певні складнощі виникають при калібруванні фасонних профілів. Зокрема, відомо кілька способів прокатки кутової сталі (рисунок 1.100, *а*): з прямими полицями (*аІ*); з розгорнутими полицями в закритих калібрах (*аІІ*); у відкритих калібрах (*аІІІ*).

Зокрема, при використанні способу прокатки профілів з розгорнутими полицями (*див. рис. 1.100, аІІ, аІІІ, б*) їх вигин дозволяє значно зменшити глибину врізу калібрів у валки у порівнянні зі способом на рис. 1.100, *аІ*, застосувати більш інтенсивні обтиснення і зменшити число пропусків.

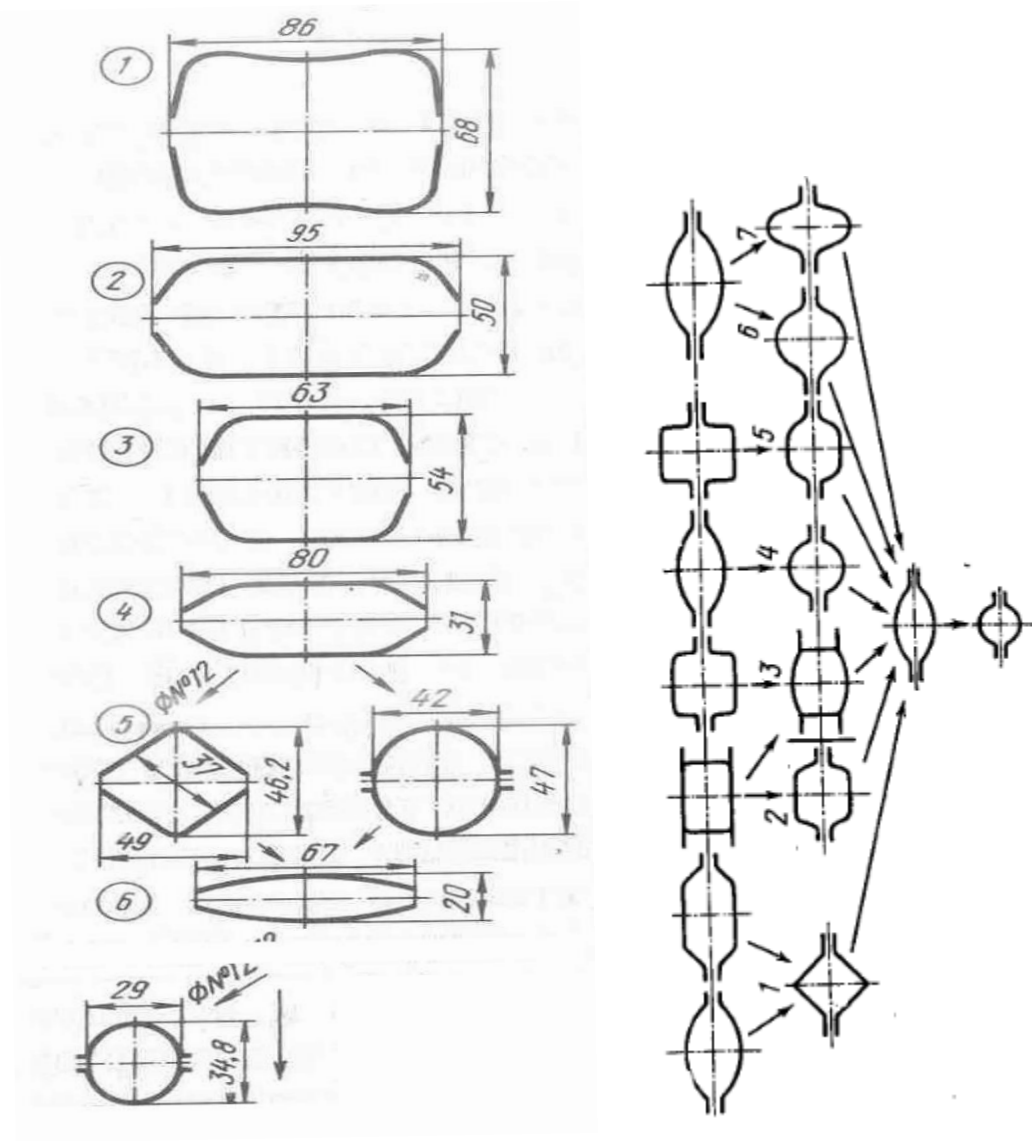
Прокатка у відкритих калібрах з вільним розширенням дає можливість використовувати одні й ті ж калібри для отримання, наприклад, кутників різних розмірів по ширині і товщині полиць, скоротити парк валків, спростити їх відновлення переточуванням при зносі.

Прокатування балки здійснюють за різними схемами калібровки валків, зокрема *аналогічно* схемі, що наведена на рисунку 1.100, *б*.

Слід зауважити, що прокатку балок на спеціалізованих рейко-балкових станах можна також здійснювати в універсальних калібрах, які формуються парами гладких горизонтальних та вертикальних валків (рисунок 1.101, *а*). Аналогічним чином можна прокатувати і рейки залізничні та кранові (*див. вище*) [84]. Але у більшості випадків рейки прокатують на сортопрокатних станах за схемою, що відображена на рис. 1.101, *б*.

При цьому для формування профілю треба використати декілька *підготовчих* калібрів, які поступово змінюють форму перетину металу від вихідної квадратної або прямокутної заготовки до необхідної для деформування на готовий профіль.

Зазвичай перші калібри є *розрізними*. В цих калібрах починається формування елементів профілю, і максимальна деформація здійснюється виступами рівчаків верхнього та нижнього валків, які називають *гребенями* калібра.



а *б*

Рисунок 1.98 – Варіанти схем прокатування круглої заготовки у чорновій (*а*) та чистовій (*б)* групах клітей на дрібносортному прокатному стані 250 [6]

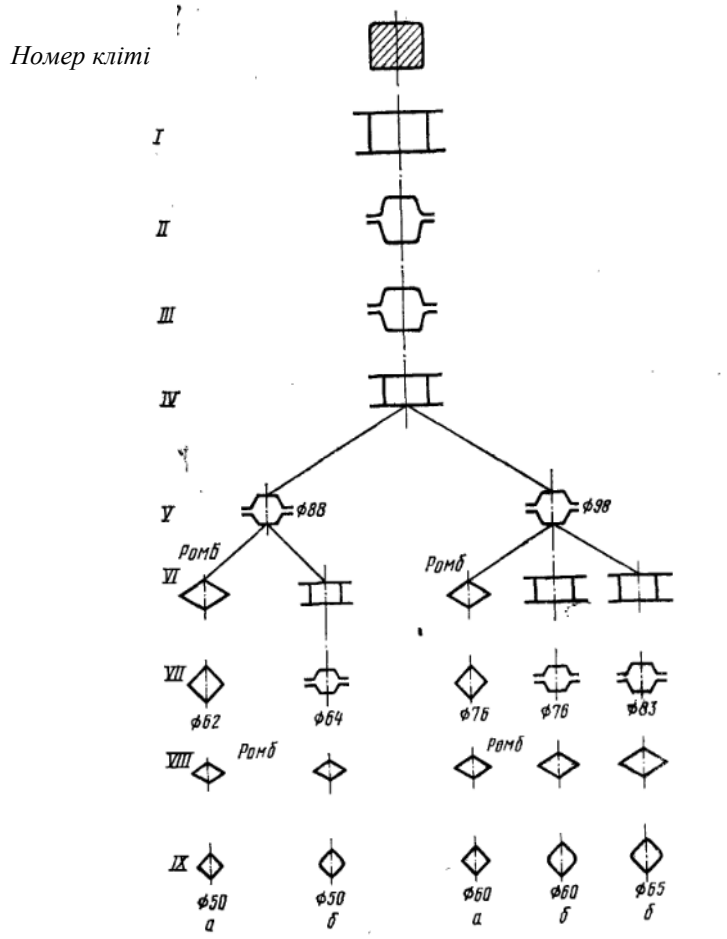
Після розрізних застосовують *фасонні підготовчі* калібри, в яких форма та розміри елементів поступово наближуються до заданих розмірів готового профілю.

Наприклад, в обох схемах «*а*» і «*б*», представлених на рис. 1.101, *б*, спочатку застосовують підготовчі («таврові») калібри, а потім – рейкові калібри.

За схемою, представленою на рис. 1.101, *б*-«*а*», прокатка ведеться в закритих калібрах, і при невеликій ширині підошви рейки це забезпечує необхідну точність профілю.

При прокатці рейок з широкою підошвою, наприклад, трамвайних – застосовують прокатку за схемою, представленою на рис. 1.101, *б*-«*б*». У першому калібрі гребенем рівчака нижнього валка проводиться суттєве «розрізання» блюма. Це важливо, тому що

середня частина заготовки, як правило, рихла, цей дефект не повністю усувається при прокатці на блюмінгу, є також різні включення і забруднення. Після розрізання блюму при подальшій прокатці цей об’єм металу піде на формування найменш відповідальної ділянки рейки – середньої частини її підошви.



а *б*

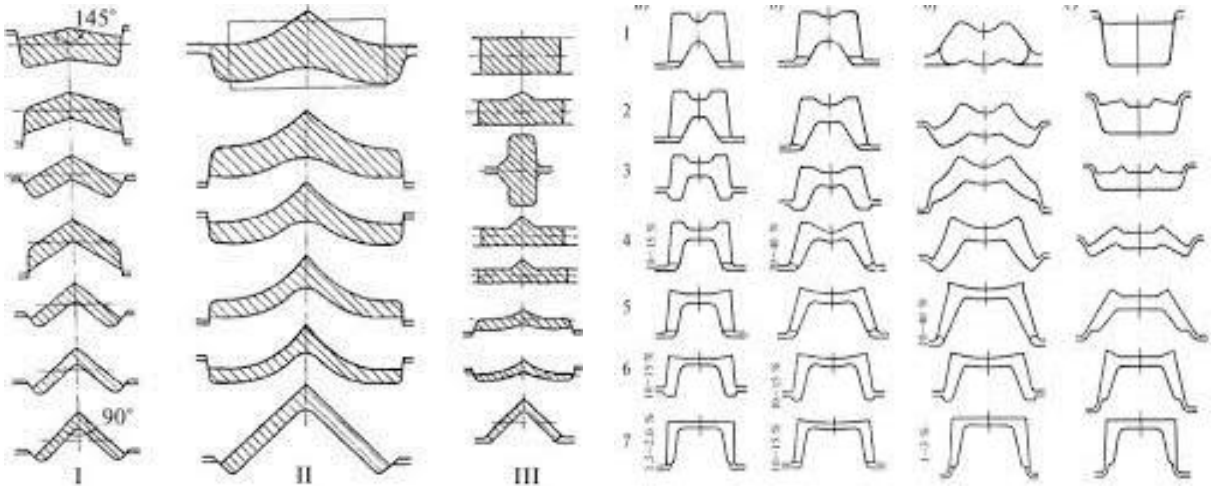
Рисунок 1.99 – Варіанти схем прокатування квадратного профілю на дрібносортному прокатному стані 250 [6]

Наступні два підготовчі калібри необхідні для швидкого нарощування ширини підошви. Тут ділянки майбутньої підошви рейки піддаються значно більшій деформації, ніж ділянки головки і стінки. За рахунок їх взаємодії виникає значне вимушене поширення.

Перший рейковий калібр – розрізний, і з нього починається формування головки і стінки рейки.

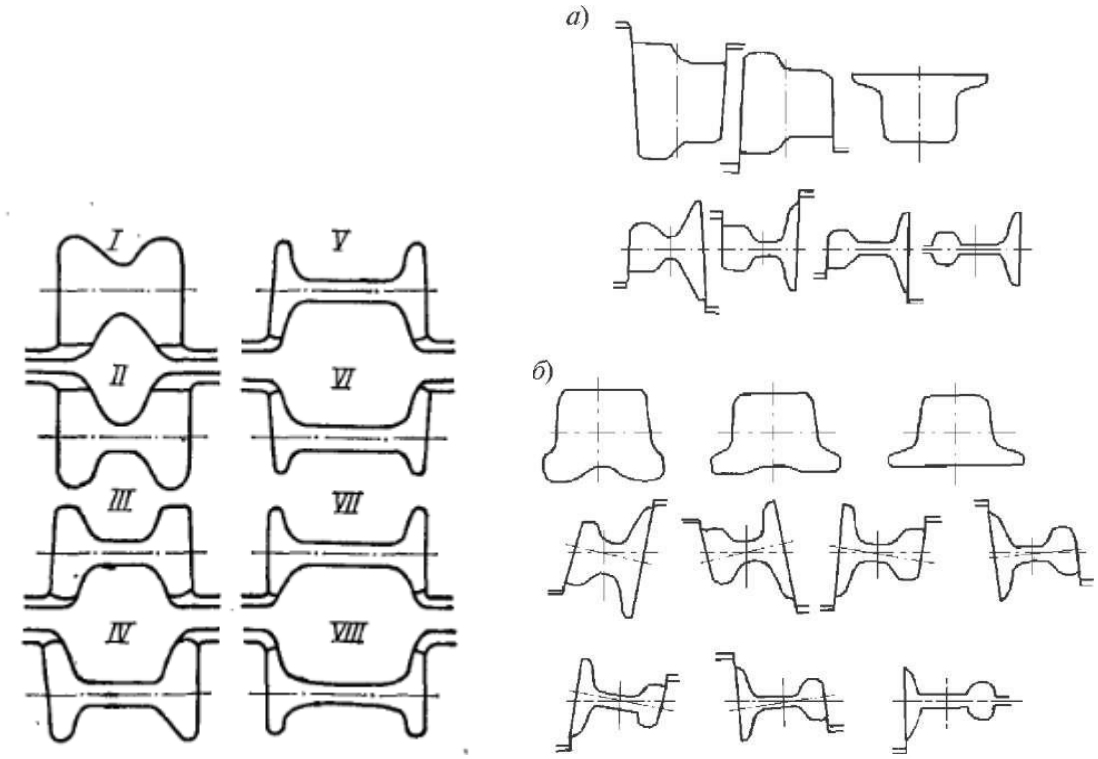
В обох схемах калібрування («*а*» і «*б*») застосовуються *закриті* рейкові калібри з чергуванням роз'ємів, як в балкових калібрах. Тільки чистовий калібр для формування головки рейки має бути відкритим, щоб забезпечити необхідні форму і радіуси заокруглень.

За схемою, представленою на рис. 1.101, *б*-«*а*», роз'єми калібрів розміщують з одного боку, і калібри розташовуються у валках прямо. Це забезпечує менший вріз рівчаків у валки, ніж за схемою 1.101, *б*-«*б*», і відсутність осьових сил на валках при прокатці. Проте схема з похилими калібрами (див. рис. 1.101, *б*-«*б*») дозволяє зберігати паралельними площини підошви і головки.



а *б*

Рисунок 1.100 – Способи калібровки при прокатці кутової сталі (*а*) та швелеру (*б*): *I* – без вигину полиць; II та III – з вигином полиць [85]



а *б*

Рисунок 1.101 – Варіанти схем прокатки двотаврових балок (*а*) та рейок (*б*) [85]

Аналогічним чином будують схеми прокатки і для інших профілів з урахуванням форми їх перерізів, розмірів, наявності конкретних типів прокатних станів та необхідних етапів технології.

Основними технологічними операціями (перероблennями) при цьому є:

– підготовка та складування заготовки;

– передача заготовки до нагрівальних печей прокатного агрегату зі складу;

– нагрів заготовки;

– прокатка профілів у відповідності з визначеною схемою прокатки;

– термічне зміцнення металу в потоці стану;

– розкрій прокату на прутки за допомогою пил гарячого різання (або формування бунтів);

– таврування пруткового прокату;

– охолодження прокату;

– правка пруткового прокату;

– контроль якості процесу, заготовки напівпродукту та продукції;

– маркування, пакування та складування продукції.

При формуванні сортаменту прокатного агрегату одного або суміжних металургійних підприємств слід мати на увазі, що більш «важкі» квадратні та круглі у перерізі профілі нерідко стають заготовкою для прокатки відносно легких простих та фасонних профілів (*див. вище – схеми прокатки*).

Так, *умовно* можна побудувати наскрізний «ланцюг» виготовлення сортових профілів: чавун $\Rightarrow$ сталь $\Rightarrow$ злиток (або безперервнолита заготовка) $\Rightarrow$ блюм (або прокатана заготовка) $\Rightarrow$ крупносортний профіль $\Rightarrow$ середньосортний профіль $\Rightarrow$ дрібносортний профіль (або катаний дріт).

Подовжньою прокаткою можна одержати і *періодичні профілі*. Це здійснюється шляхом виконання на прокатних валках рівчаків, які мають змінній профіль за колом і формують калібр (зазор) змінного перерізу за їх периметром. Така прокатка називається *періодичною.*

Сортовою періодичною покаткою одержують періодичні профілі: арматурні (*див. рис. 1.97*), автомобільні осі, ступінчасті та конічні вали, шпинделі текстильних веретен тощо [6]. Виробництво сортових періодичних профілів часто виступає ефективною альтернативою токарному обточуванню заготовки початкового постійного, наприклад, круглого перетину. При цьому, економія металу може сягати 25%.

Для конкретного прокатного агрегату (стану) ***розробка раціональної схеми*** виготовлення всього його сортаменту вимагає комплексного підходу з урахуванням наступних аспектів:

– обґрунтований вибір сортаменту, розподіл профілів на групи з мінімізацією кількості технологічних варіантів («ліній») прокатки;

– забезпечення стабільного технологічного процесу прокатки та виконання вимог нормативної документаціїї (ДСТУ, EN, ISO та ін.) до якості продукції;

– створення умов максимальної автоматизації та механізації виконання всіх технологічних операцій на стані;

– простота та взаємозамінність обладнання та оснащення (валки, підшипники, привалкова арматура тощо);

– мінімізація простоїв стану при переході з одного профілю на інший, максимізація техніко-економічних показників виробництва.

Сортові прокатні агрегати (стани) класифікують за наступними основними ознаками [6]:

– за схемою розташування клітей, їх приводу та принципом ведення технологічного процесу прокатки;

– згідно з розмірами та номенклатурою основних профілів, які прокатуються, що визначає діаметр валків *чистової* кліті. Для класифікації сортових прокатних станів за цією ознакою умовно за основу приймають прості (круглі і квадратні в перетині) профілі, а потім, відповідно до їх площ, беруть й інші профілі, в числі яких можуть бути і фасонні;

– у відповідності зі спеціалізацією стану тощо.

Так, *за схемою розташуванням клітей та принципом ведення технологічного процесу* прокатки сортопрокатні стани поділяють на:

– *лінійні*, вживані зазвичай у тих випадках, коли немає достатніх площ для розміщення обладнання;

– *з послідовним розташуванням клітей*, але *на декількох* (зазвичай трьох) *паралельних лініях* (найбільш поширені);

– *з послідовним розташуванням клітей в одну лінію*.

При лінійному розташуванні клітей зазвичай один електродвигун приводу може обслуговувати одну, дві або три кліті.

При послідовному розташуванні клітей привід може бути груповим (на дві кліті і більше) або індивідуальним – для кожної кліті.

На сучасних сортопрокатних станах прокатку ведуть як *вільну*, так і *безперервну з натягом або без нього*.

При вільній прокатці можна одночасно прокатувати дві смуги, що реалізується, наприклад, у чорнових тривалкових клітях крупносортних і рейкобалкових станів.

Привід безперервних станів може бути або індивідуальним (на кожну кліть самостійний двигун, що є більш прийнятним для управління процесом), або груповим (на декілька клітей один двигун з передачею моментів, що крутять, через розподільний редуктор). В останньому випадку один електродвигун може обслуговувати від двох до семи клітей.

За ознакою *прокатки розмірів та у відповідності до видів основних профілей (див. вище)* стани поділяють на наступні групи [6].

***Крупносортні стани*,** діаметр прокатних валків чистових клітей у яких становить 450…950 мм і більше. На таких станах прокатують сталь круглу діаметром 50…400 мм; сталь квадратну зі стороною 50…200 мм; періодичні профілі арматурної сталі до № 40 і вище; сталь кутову (50х50)…(100х150) мм відповідно (у дужках визначені розміри полиць); двотаврові балки і швелери №№ 25…60; рейки типів до Р70 та до КР140 (число при позначенні рейки «*Р*» або кранової рейки «*КР*» відповідає масі її погонного метру в кг); сталь смугову товщиною 4…80 мм і шириною 10…200 мм відповідно.

Типовим прикладом є крупносортний прокатний агрегат (стан) 950/800 ПАТ «ЄВРАЗ – ДМЗ» (м. Дніпро), який розрахований на продуктивність 1,2…1,3 млн. т/рік.

Перед станом розташований блюмінг. Тому блюми можуть подаватися прямим потоком на стан. Методичні рекуперативні печі тризонні з нижнім підігрівом, торцевими завантаженням і видачею блюмів, працюють на природному газі; в печі п'ять регульованих зон.

До складу агрегату входить обтискна реверсивна кліть дуо 950 («малий блюмінг»), дві кліті тріо 800 та чистова кліть дуо 800, розташовані лінійно. Швидкість виходу розкату з чистової кліті 5,0…10 м/с. В клітях агрегату використовують чавунні (марка СШХН з модифікацією магнієм) і сталеві (з кованої Сталі 55Х) валки.

За діаметром валків чистової кліті близькими до крупносортних станів є деякі *спеціалізовані стани* для прокатки круглих і квадратних профілів тільки великих розмірів з легованих сталей і спеціальних сплавів. Сортамент продукції подібних станів може включати і деякі фасонні профілі. Такі прокатні агрегати часто оснащені специфічним обробним (оздоблювальним) устаткуванням.

Окрему групу станів, також близьких до крупносортних, складають *спеціалізовані рейкобалкові стани*, на яких прокатують двотаврові балки та швелери (№ 45 і більше), зокрема, з паралельними полицями, а також – важкі рейки (до № 65 і більше). У складі відповідних прокатних агрегатів досить часто використовують універсальні кліті, а також – специфічний склад обробного устаткування.

Прикладом може бути рейкобалковий агрегат (стан) 800 ПАТ «ЄВРАЗ–ДМЗ», який складається з трьох однакових реверсивних робочих клітей дуо 800, розташованих в одну лінію. Прокатка на стані здійснюється трьома потоками у відповідності з технологічними картами монтажу калібрів на робочих валках.

Заготівельна кліть агрегата прокатує квадратну заготовку зі стороною 150…170 мм і підкати, а також трубну заготовку діаметром 130…180 мм. Чорнова і чистова кліті прокатують рейки, фасонні профілі, спеціальні профілі, квадратну заготовку перерізом 100×100 мм та ін.

Якщо в потоці потрібно виконати ***термічну обробку готового профілю***, останній подається до спеціальної термічної печі, встановленої у загальному технологічному ланцюзі розташування всього устаткування.

Для термообробки рейок по всій їх довжині застосовують три способи:

– об'ємне загартування у маслі;

– поверхневе загартування з індукційного нагріву;

– поверхневе загартування з об'ємного нагріву.

Після охолодження метал подають до ділянок холодного різання, правки на роликових правильних машинах, і далі – на стелажі обстеження.

Після обстеження весь прокат направляють до сортоукладальника. Після закінчення набору пачки сортоукладальник відводять від лінії рольганга для перев'язки пачок, які потім передають на стелажі приймання і маркування з подальшою передачею пачок краном до складу готової продукції. Прокат, що підлягає ремонту, подають у пачках на бригадні ділянки затриманого металу для подальшого доопрацювання.

Чистові кліті ***середньосортних станів*** мають валки діаметром 300…390 мм. Сортамент таких станів включає сталь круглу діаметром 20…50 мм, сталь квадратну зі стороною 20…50 мм; періодичні профілі арматурної сталі №№ 20…32; сталь кутову рівнополочну і нерівнополочну; сталь смугову завтовшки 3…10 мм і шириною 50…80 мм; швелери №№ 10…18, рейки вузької колії типів Р5…Р8 і деякі інші профілі.

Типовим прикладом є середньосортний агрегат (стан) 550 ПАТ «ЄВРАЗ – ДМЗ» який призначений, здебільшого, для гарячої прокатки спеціальних профілів для сільгоспмашино– та автобудування (зокрема, автоободів) шириною до 350 мм і товщиною від 3,8 до 6,8 мм, періодичних профілів для осей автомобілей і деталей вугільних конвеєрів, а також інших профілів.

Прокатка профілів на стані 550 здійснюється із заготовки квадратного або прямокутного перерізу довжиною не більше 6 м, яку нагрівають до температури 1150…1200 ^{0}С у двох методичних печах, оснащених прийомним рольгангом, завантажувальними пристроями, зіштовхівачами та упорами.

Робоча лінія обладнана однією обтискною реверсивною кліттю дуо 670 і сьома нереверсивними клітями дуо 630 *безперервної* групи з відповідним оснащенням рольгангами, кантувателями, шлепперами, пересувними проводками, столами, установками гідрозбиву окалини (перед обтискною і чистовою клітями), а також упорами різної конструкції та призначення.

Перед подачею до першої робочої кліті заготовки проходять через установку гідрозбиву пічної окалини з робочим тиском води 125 атм.

Станина кліті першої кліті стана – закритого типу зі сталевого литва. Її валки – ковані сталеві, матеріал – Сталь 60ХН. В обтискний кліті проводять від 1 до 5 пропусків у відповідності з розмірами вихідної заготовки і калібруванням валків.

Після прокатки в обтискний кліті заготовка послідовно прокатується за один пропуск в однакових клітях нереверсивних дуо 630. Станини робочих клітей відкриті, попередньо напружені, зі сталевого литва. Валки литі чавунні, матеріал – чавун СШХН (можуть застосовуватися і ковані сталеві валки).

При прокатці періодичних профілів замість останньої кліті дуо 630 встановлюють кліть періодичної прокатки – дуо нереверсивну. Вона працює спільно з роликами, що задають розкат у валки при синхронізації початку періодичного рівчака на валках з переднім кінцем заготовки.

Температура кінця прокатки допускається: для сталі першої та другої груп не нижче 800 ^{0}C; для сталі третьої групи – не нижче 780 ^{0}C.

Агрегат оснащений: ділянкою з дев'яти пил гарячого різання, ділянкою з 2-х холодильників, ділянкою холодного різання і правки (включає машину для обрізки «вуса» періодичного прокату в холодному стані; восьмироликову сортоправильну машину, гідравлічний правильний прес, ножиці холодного різання тощо), ділянку стелажів огляду.

Чистові кліті ***дрібносортних станів*** мають валки діаметром 250…270 мм. Тут зазвичай прокатують сталь круглу діаметром 10…25 мм, сталь квадратну зі стороною 10…20 мм, швелери №№ 5…8, періодичні профілі арматурної сталі розміром №№ 10…22; сталь кутову рівнополичну і нерівнополичну (25х25)…(36х36) мм і (25х16)…(32х20) мм відповідно; сталь смугову товщиною 3…8 мм і шириною 20…40 мм.

В якості типового прикладу можна розглянути дрібносортні прокатні агрегати (стани): 250-1 та 250-2 ПАТ «АрселорМітал Кривий Ріг», обладнання яких подібне, а технологія – майже однакова, а також однотипні дрібносортні агрегати (стани) 250-4 та 250-5, особливістю яких є наявність безперервної проміжної групи з чотирьох прокатних клітей.

Вихідною для цих станів служить квадратна заготовка номінальним перетином 80х80 мм і довжиною 10,5…11,8 м зі сталей звичайної якості, якісних та високоякісних.

На станах використовуються двозонні методичні рекуперативні печі з двома зонами опалення. Режим роботи печей – безперервний. Продуктивність однієї печі – 110 т/год. Печі працюють на природному газі. Прокатку всіх профілів здійснюють за затвердженими схемами калібрування і заданим швидкісним режимом з використанням одних і тих же валків чорнової групи для отримання різних профілів.

Привід клітей індивідуальний. Станини усіх горизонтальних клітей закритого типу. Матеріал робочих валків – чавун СШХН-50; СПХН-51, 59, 65.

Прокатку в чорновій і проміжній (якщо вона є) групах клітей ведуть у дві нитки. У чорновій групі прокатка ведеться з натягом.

Летючі кривошипні старт-стопні ножиці, що встановлені на кожній нитці між чорнової і чистовою групами клітей, виконують дві функції: обрізання передньої дефектної ділянки кожного розкату та його аварійну порізку при відмовах роботи обладнання, яке розташоване черговим.

У чистових групах клітей прокатка ведеться в одну нитку з малим натягом, рівень якого контролюється візуально за поведінкою смуги на петлерегуляторах або за величиною провису між суміжними клітями.

Швидкість виходу смуги з останньої кліті станів складає до 30 м/с.

Після прокатки в чистових групах клітей здійснюють ряд послідовних операцій обробки металу: поточне термічне зміцнення (наприклад, у процесі його термомеханічної обробки – *див. вище*), порізку розкату (дві останні вказані операції – у наведеній або зворотній послідовності), охолодження на холодильнику, збірка прокату в пакети і, нарешті, переміщення їх до ділянки остаточної обробки, де стаціонарними ножицями холодного різання сформований пакет розрізається на пачки прутків.

Близькими до групи дрібносортних станів є спеціалізовані ***дротяні прокатні стани*** (агрегати), валки чистової групи яких мають діаметр приблизно 150 мм. Основу сортаменту продукції таких станів складає катаний дріт діаметром 5…10 мм різного призначення (для будівництва, виготовлення металовиробів, електрозварювальний, телеграфний, канатний тощо), який поставляється споживачеві у мотках. Крім того, у невеликій кількості на таких станах прокатують квадратну сталь зі стороною 6…9 мм і сталь періодичного профилю №№ 6…9 для армування залізобетонних конструкцій. Використовуються також

дрібносортно-дротяні прокатні стани з відповідним комбінованим сортаментом продукції.

На дротяних станах для отримання катанки зазвичай використовують квадратні заготовки перерізом 125х125 мм, які після огляду і ремонту (в разі необхідності) нагрівають у методичній печі.

Такі прокатні агрегати, як правило, ключають декілька безперервних груп клітей з відповідним оснащенням.

Зазвичай прокатку у чорновій групі клітей здійснюють з невеликим натягом розкату між клітями, що забезпечується відповідним деформаційно-швидкісним режимом формозміни металу.

На нових дротових станах застосування комбінації індивідуального та групового (попарного) приводу чорнових клітей дозволяє підвищити точність налаштування стана, спростити заміну (перевалку) валків, больш раціонально розподілити видовження металу між клітями.

На багатониткових дротових станах точність катанки, що отримується, значною мірою, залежить від кількості ниток, що одночасно прокатуються. При повному завантаженні стана за всіма чотирма нитками розміри підкатів, які поступають до *чистових* груп, будут максимальними, оскільки при цьому буде найбільшою пружна деформація валкових вузлів («*пружина валків*») чорнових клітей. Можливі порушення режиму прокатки, застрявання проката («*бурьожки*») та затримки зумовлюють зміну кількості ниток, що одночасно прокатуються, а це відбивається на розмірах підката.

Для підвищення точності розмірів перерізу катанки на багатониткових дротових станах встановлюють жорсткі попередньо напружені кліті.

Підвищення точності також може бути досягнутим за рахунок переходу від чотирьохниткової прокатки до дво– або однониткової, а також шляхом застосування чистовых *багатоклітьових (до 10 клітей) блоків* з дисковими валками, що виготовлені з твердого сплаву ВК-10, та з мінімізацією відстані між клітями блока. Зазвичай при цьому застосовують схему калібровки «овал-коло» (*див. вище*).

При проєктування нових дротових станів враховують тенденцію збільшення перерізу заготовки і маси отримуваних *мотків* (бунтів) катанки (у наявний час – до 2000 кг). Це значно підвищує продуктивність при її наступній переробці в метизному виробництві (*див. далі*).

Типовим прикладом такого обладнання є дрібносортно-дротовий агрегат (стан) 320-150 «Молдовського металургійного заводу» (м. Рибниця, Придністров'я), до сортаменту продукції якого входять: сталь кругла діаметром 10…40 мм, сталь квадратна 10…35 мм; сталь шестигранна 10…38 мм, арматурні профілі №№ 10…40, сталь кутова №№ 2…5, швелери №№ 5…6,5; катанка діаметром 5,5…12 мм.

Агрегат складається з однониткової сортової лінії, що містить 20 робочих клітей, та десятиклітьового дротового блока.

Робочі кліті сортової лінії об'єнані у групи. Чорнова група включає 8 горизонтальних, проміжна – 6 горизонтальних, чистова – 6 горизонтальних і вертикальних клітей, які чергуються. Всі кліти мають індивідуальний електропривід.

На агрегаті безперервнолиту заготовку перерізом 125х125 мм і довжиною 11,3…12 метрів нагрівають у печі з крокуючим подом до 1180…1240 °С. Можливим є нагрів заготовок як гарячими при 780…800 °С, коли вони поступають безпосередньо від машини безперервного лиття (МБЛЗ), так і холодними, що подаються зі склада.

Перед чорновою групою розміщені маятникові ножиці для аварійного обрізання заготовки. Між ножицями та першою кліттю розміщений пристрій для гідрозбивання окалини з поверхні заготовки.

Прокатку в чорновій та проміжних групах клітей ведуть з мінімальним натягом смуги. Кантовку здійснюють кантувальними пристроями та арматурою, що розміщені на брусах робочих клітей.

Після чорнової та проміжних груп розміщені ножиці для обрізання переднього кінця розката або його аварійної порізки.

У міжклітьових проміжках чистової групи встановлені петлерегулятори, які дозволяють, у залежності від профіля смуги, формувати петлі як у вертикальній, так і в горизонтальній площинах.

Летючі ножиці після чистової групи ділять смугу на довжини, які вміщуються на холодильнику. Швидкість прокатки при цьому може бути до 20 м/с.

У зв'язку з інтенсивним режимом деформації та високою швидкістю прокатки температура метала на виході з останньої кліті залишається значною (до 1050…1080 °С). Це дає можливість використовувати таку ситуацію для керованого поточного термічного зміцнення профілів з наступною, у разі необхідності, порізкою прокату на мірні довжини.

Після порізки розкат транспортується крізь установку прискореного регульованого охолодження для зменшення вторинного окалиноутворення і підвищення рівня механічних властивостей.

До складу однієї лінії прискореного *одностадійного* охолодження проката на безперервному стані входить охолоджуюча секція, яка містить прямотокову форсунку та камеру охолодження (за суттю – це труби, крізь які проходить прокат після виходу з кліті) з внутрішнім діаметром 25…30 мм і довжиною біля 4 м. До секції охолодження підводять воду під тиском 2…4 МПа. Відносно крупні профілі додатково охолоджують потоком повітря від вентиляторів.

Охолоджені смуги *дрібносортного прокату* збирають у пакети и подають до багатострумкової правильної машини.

Після правки здійснюють порізку смуг на мірні довжини на ножицях холодної різки з фасонними ножами, пакетування, штабелювання, ув'язку, зважування, маркування і передачу пакетів до складу готової продукції.

Після чистової кліті сортової лінії підкат діаметром 17…19 мм перевідною стрілкою може бути направлений до блоку клітей *для прокатки катанки*. Прокатку в блоці здійснюють з невеликим натягом при швидкості до 100 м/с.

Після блока клітей передбачено одно– або двостадійне охолодження катанки (останнє – за методом «Стелмор», *описаним нижче*).

Взагалі, *одностадійне прискорене охолодження* сталевої катанки водою у трубах перед змотуванням застосовують на багатьох дротових станах. При цьому, поверхню металу охолоджують нижче за точку мартенситного перетворення (*див. вище*). Швидкість такого охолодження сягає 1300…1400 °С/с і залежить від марки сталі.

Так, канатну катанку охолоджують до 620…680 °С, катанку з вуглецевої якісної та легованої сталі, що призначена для виготовлення зварювального дроту, – до 850…900 °С.

Зниження температури сталевої смуги перед змотуванням до 700…800 °С зменшує утворення окалини у 3…4 рази. Цьому сприяють висока швидкість охолодження та використання ефекту гідротранспортування прокату, що дозволяє скоротити довжину ділянки охолодження до 6 м.

Досвід експлуатації установок одностадійного охолодження виявив, що при цьому структура металу стає неоднорідною за перерізом катанки та довжиною її мотка, що пояснюється різницею умов охолодження зовнішніх та внутрішніх витків у мотку. Мікроструктура такої катанки змінюється від сорбіта відпущення у поверхневих шарах до тонкопластинчастого перліта в центрі її перерізу.

Така неоднорідність структури обмежує допустиму сумарну деформацію *при наступному волочінні* катанки приблизно лише до 75% .

Здібність катанки деформуватися у холодному стані без руйнування тим вище, чим більше в її структурі сорбітоутворюючого перліта та рівномірність самої структури в об'ємі.

Необхідний ступінь сорбітізації катанки з прокатного нагріву із забезпеченням

однорідності структури досягається на *установках двостадійного охолодженн*я. Така катанка має малу кількість окалини (2…5 кг/т), незначну та рівномірну за периметром перерізу обезвуглецевість поверхні (не більше за 1…1,5%). Сумарная деформація *при волочінні* сорбітизованої катанки без проміжної термічної обробка може перевищувати 90%.

Найбільш досконалим методом охолодження готової катанки в потоці безперервного стана є способ «Стелмор» [86, 87] (рисунок 1.102).

За цим способом, який має декілька різновидів, система регульованого охолодження катанки з прокатного нагріву включає дві стадії: 1) охолодження у потоці водою під тиском близько 16 МПа до температури, що декілька перевищує точку мартенситного перетворення, розкладання витків катанки на транспортері, а потім – 2) охолодження витків на повітрі до температури нижче за точку перлітного перетворення.

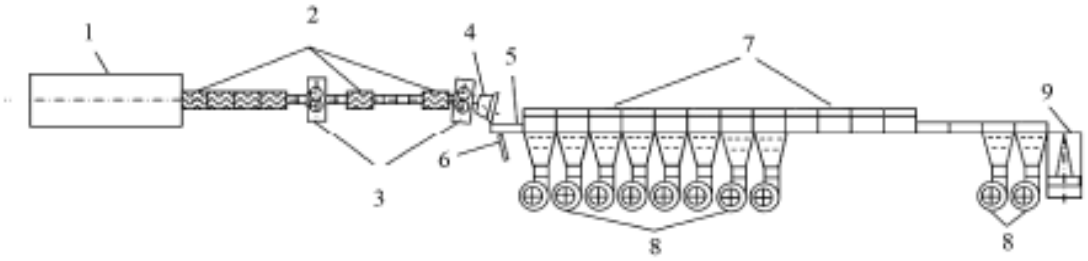


Рисунок 1.102 – Схема розташування основного обладнання на стадії водо-повітряного охолодження бунтового прокату:
1 – дротяний прокатний блок; 2 – ділянка водяного охолодження; 3 – трайбапарати; 4 – виткоутворювач; 5 – приймальний стіл витків прокату; 6 – пірометр; 7 – ділянка регульованого повітряного охолодження з роликовим транспортером і теплоізоляційними кришками; 8 – дуттьові повітряні вентиляторні системи; 9 – шахта виткозбірника [86]

В процесі охолодження температура катанки у залежності від її діаметра та марки сталі ступінчато знижується до 750…850 °С.

Відповідний режим водяного охолодження на ділянці 2 (*див. рис. 1.102*) запобігає зростанню аустенітних зерен, які були подрібнені в процесі деформації, та сприяє отриманню більш однорідної структури в перерізі проката.

Після ділянки 2 катанку спрямовують до виткоутворювача 3, який розкладає її витки діаметром 1050 на роликовому транспортері 4, що рухається зі швидкістю 0,1…1,2 м/с. Тут катанка охолоджується повітряним потоком вентиляторами 5. Швидкість охолодження регулюють шляхом включення/відключення вентиляторів і поворотом жалюзей, які розташовані під транспортером.

Наприкінці транспортера довжиною 80 м розміщено камеру для формування бунтів масою 1400 кг. Під камерою міститься станція 6, яка забезпечує збір витків катанки у бунти та їх передачу до гакового конвеєра (не показаний). Гаковий конвеєр оснащений пристроєм для опресовки та обв’язки бунтів, а також вагами з автоматичним друкуючим пристосуванням.

Така технологія оздоблення забезпечує отримання катанки вищої категорії якості.

На відміну від представлених вище сортопрокатних агрегатів, типи станів, які ***спеціалізуються для виробництва періодичних профілів*** подовжньою прокаткою, здебільшого, класифікуються за *найбільшим характерним розміром (діаметром) заготовки*, що прокатується: 10, 20; 50; 70; 80; 100; 120 та 220 мм. Швидкість прокатки на таких станах 2…6 м/хв. Продуктивність – від 0,02 до 33 т/год.

Суттєвою особливістю процесу прокатки, який здійснюється у рівчаках змінного

перетину та певної форми, нерідко є необхідність синхронізації моменту захоплення металу валками з початковим перерізом виробу, що виготовляється.

В якості заготовки тут зазвичай застосовують сталь круглого перерізу певного діаметра. Довжина заготовки, як і її діаметр, визначаються, виходячи з розмірів кінцевого профілю і загального видовження. Процес такої прокатки на стані може бути безперервним у часі, якщо стан забезпечується необхідною заготовкою.

Далі розкат розрізають на мірні довжини і піддають обробці на наступних технологічних операціях.

Виробництво гнутих профілів

Аналіз процесів ОМТ показує, що в ряді випадків для отримання профільних виробів з перерізом потрібної форми суттєве обтиснення заготовки не є обов'язковим. Так, із застосуванням ***процесу вигину*** можна з листової заготовки виготовляти ряд профілів з вельми складною формою перетину, навіть таких, які сортовою прокаткою отримати неможливо [88, 89].

Відповідні *подовжні* профілі можна отримати *комбінацією процесу поперечного (відносно осі виробу) вигину та подовжньої прокатки* листової заготовки (стрічки, полоси, листа).

Цей вид ОМТ характеризується значними перевагами перед усіма іншими способами отримання профілів складної форми:

– забезпечується можливість отримання профілів майже будь-якої конфігурації в поперечному перетині з різними розмірами по ширині, товщині і довжині зі смугової сталі різних марок, кольорових металів і сплавів;

– забезпечується висока точність розмірів та якість поверхні, які легко контролюються в процесі формозміни смуги;

– мала питома витрата енергії, висока стійкість валків, максимальний коефіцієнт використання металу (99,5…99,8%), стабільність самого процесу;

– створюються умови здійснення в загальному технологічному потоці ряду інших допоміжних операцій (перфорація, зварювання, нанесення покриття і т. д.);

– простота, малі габарити та маса всього механічного обладнання.

Приблизно до 26% загального випуску гнутих профілів використовується у будівництві (будівельні профілі, каркаси і облицювання, водостічні жолоби тощо) та автомобілебудуванні (багажники, стійки сидінь, окантовки вікон і дверей, направляючі, бампери, пороги, санчата, стічні жолоби даху, склоутримувачі та ін.); біля 18% – у важкому, транспортному та авіабудуванні (стрингери, декор, конструктивні елементи тощо); 17% – у суднобудуванні (трапи, огородження палуб та ін.), у вагонобудуванні (дах, стійки, бічні стінки); в сільськогосподарському машинобудуванні та інших галузях.

Сталеві гнуті профілі різні за формою, розмірами та призначенням (за стандартом ДСТУ 8808) виготовляють на профілезгинальних станах з листової рулонної гарячекатаної та холоднокатаної заготовки зі сталей: вуглецевих звичайної якості та якісної конструкційної та низьколегованої сталі. Для виготовлення профілів обирають сталі, у яких тимчасовий опір має бути не більше ніж 740 МПа (75 кгс/мм^2).

На поверхні гнутих профілів не повинно бути тріщин напруження, розкатаних тріщин, прокатних і зливкових пльон, гармошок, раковин від окалини, вкатаної окалини, пухирів-здуття і розкатаних забруднень. Допустимі окремі розкатані пухирі, ум'ятини, відбитки, забоїни, подряпини, риски, шар окалини, який не перешкоджає виявленню поверхневих дефектів, незначна загальна рябизна від окалини, що відпала, які не виводять товщину профілю за допуски розмірів. На крайках і торцях гнутих профілів не має бути зазубрин, розшарувань, розірваної затягненої крайки.

Гнуті профілі всіх типів, незважаючи на їх різноманітність, можна поділити на дві групи: сортові і гофровані (хвилясті).

До сортових гнутих профілей відносяться:

– швелери: рівнополичні за ДСТУ 8806 (рисунок 1.103, *а*) і нерівнополичні за ДСТУ 3436 (рис. 1.103, *б*);

– кутники: рівнополичні за ДСТУ 2251 (рисунок 1.104, *а*) і нерівнополичні за ДСТУ 8769 (рис. 1.104, *б*);

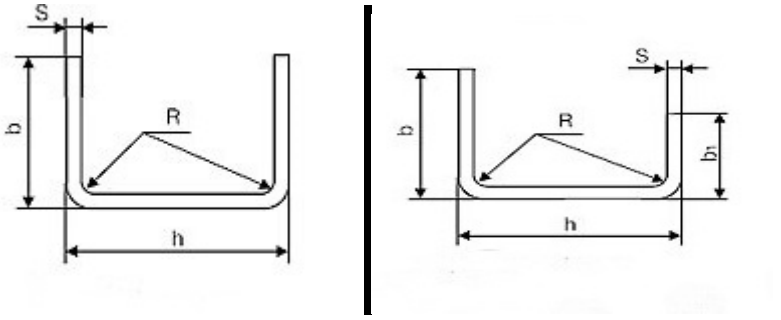
– С-подібні профілі за ДСТУ 8897 (рисунок 1.105, *а*) та коритні профілі за ДСТУ 2252 (рис. 1.105, *б*);

– зетові профілі за ДСТУ 8854: рівнополичні (рисунок 1.106, *а*) і нерівнополичні за ДСТУ 2253 (рис. 1.106, *б*);

– спеціальні профілі для вагонобудування за ДСТУ 2253; для віконних і ліхтарних палітурок промислових будівель;

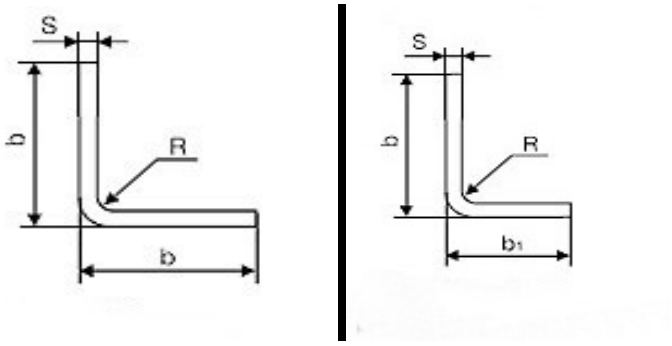
– замкнуті зварні профілі для будівельних конструкцій за ДСТУ Б В.2.6-8-95 квадратні (рисунок 1.107, *а*) і прямокутні (рис. 1.107, б).

Гофровані профілі (ДСТУ 8808, ДСТУ Б В.2.6-9 та ін.) незалежно від числа гофрів, їх форми і розмірів поділяють на дві підгрупи: *профілі з відкритими гофрами*, тобто такі, у яких довжина гофрів дорівнює довжині профілю (рисунок 1.108), і профілі з періодично повторюваними гофрами, тобто такі профілі, по довжині яких гофри періодично повторюються і відокремлені один від одного плоскими ділянками. Профілі з періодичними гофрами бувають: з подовжніми, поперечними, з подовжніми і поперечними гофрами.



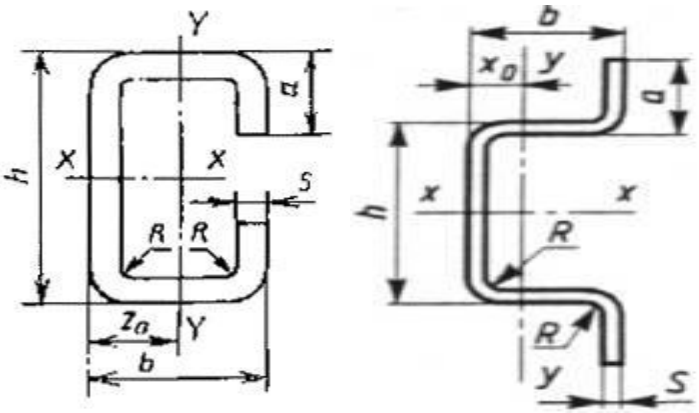
а *б*

Рисунок 1.93 – Швелер рівнополичний (*а*) та нерівнополичний (*б*)



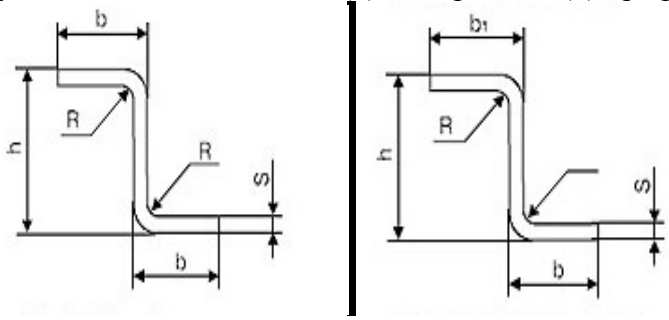
а *б*

Рисунок 1.104 – Кутники: рівнополичний (*а*) та нерівнополичний (*б*)



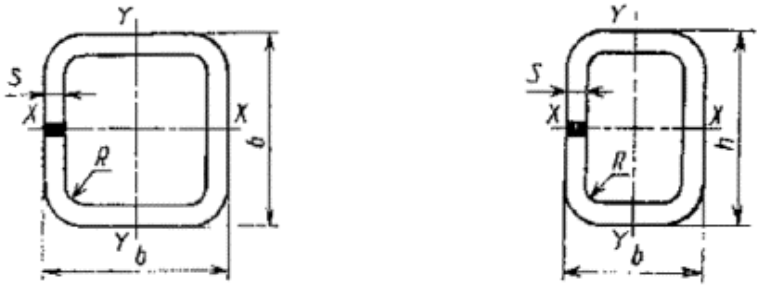
а *б*

Рисунок 1.105 – С-подібний (*а*) та коритний (*б*) профілі



а *б*

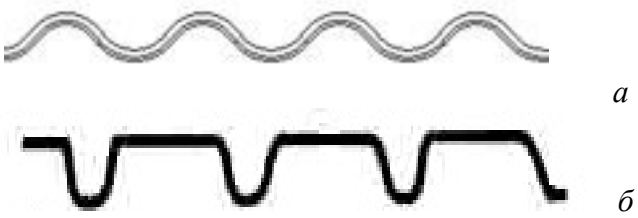
Рисунок 1.106 – Зетовий профіль рівнополичний (*а*) та нерівнополичний (*б*)



а *б*

Рисунок 1.107 – Замкнутий зварний профіль квадратний (*а*) та прямокутний (*б*)

Умовне позначення гнутих профілів наведено у ДСТУ 8808. При цьому відображують: вид профілю, точність профілювання (А, Б, В), розміри або номер профілю, точність прокатування (А, Б), позначення стандарту на сортамент (ДСТУ, ДСТУ EN або ін.), номер цього стандарту; категорія, позначення марки сталі, позначення стандарту на цю сталь.



а

б

в

Рисунок 1.108 – Переріз гофрованих профілів з відкритими подовжніми гофрами: *а* – між гофрами немає прямолінійної ділянки; *б* – гофри, відокремлені один від одного прямолінійними ділянками; *в* – профіль сортовий з гофрами

Наприклад, швелер гнутий рівнополичний високої точності профілювання А, висотою 100 мм, шириною 50 мм, товщиною 3 мм за ДСТУ 8806 із заготовки нормальної точності Б, 2-ї категорії за ДСТУ 2651, зі сталі марки Ст 3сп має бути позначений наступним чином:

$$\text{Швелер}\ \frac{\text{А}100 \times 50 \times 3\ \text{Б ДСТУ 8806} - 2017}{2 - \text{Ст3сп ДСТУ 2651} - 95}$$

Виробництво гнутих профілів реалізують на профілезгинальних станах шляхом безперервної або нескінченої подовжньої формовки рулонної листової стрічки. Процес здійснюють у холодному стані як без подачи технологічного мастила, так і з такою подачею.

Виготовлення гнутих профілів здійснюється у валках, що представляють собою набір окремих шайб, калібрування яких повинне сформувати окремі елементи профілю Це значно спрощує підготовку робочого інструменту до використання.

Теоретично обмежень щодо розмірів початкової смуги для профілезгинальних станів немає, однак за силовими параметрами процесу граничними розмірами вихідної смуги вважають ширину 2500 мм і товщину 20 мм.

Профілезгинальні стани класифікуються, головним чином, за товщиною і шириною заготовки, необхідної для формування профілів визначеного сортаменту.

Так, наприклад, у вітчизняній металургії використовують стани (агрегати): (1…4)х(400…1500); (2…7)х(80...500); (1…4)х(50…300); (2…8)х(100…600) та ін. Перші два числа характеризують діапазон товщин заготовки, два інші – ширину заготовки (в міліметрах).

За складом обладнання всі профілезгинальні агрегати («стани») можна поділити ***на 3 групи***:

– з поштучним процесом профілювання;

– до складу обладнання яких входять найпростіші механізми, що забезпечують підготовку рулонів до деформування і здійснюють передачу готових профілів на подальші операції;

– високомеханізовані й автоматизовані агрегати, на яких усі операції (від розмотування та підготовки рулонів до укладання готових профілів у пакети) виконуються без застосування ручної праці.

Профілезгинальні стани *першої групи* поділяють на:

– *універсальні*, що мають від 8 до 15 клітей і призначені для виробництва гнутих профілів широкого сортамента із заготовок товщиною 0,5…5 мм і шириною 10…730 мм;

– *спеціалізовані*, що мають від 5 до 14 робочих клітей і призначені для виготовлення гнутих профілів обмеженого сортамента із заготовок певної товщини і ширини для кожного конкретного стану.

До складу устаткування профілезгинальних агрегатів *другої групи*, окрім робочих клітей, зазвичай входять найпростіші розмотувачі та устаткування для пакетування готових профілів. Заготовкою на цих станах слугує смуга в рулонах. Іноді до складу їх обладнання входять також накопичувачі рулонів найпростіших конструкцій, завантажувальні пристрої,

правильні машини, ручні або механічні пристрої для обрізки кінців рулонів з наступним їх з'єднанням дуговим або точковим зварюванням. Після профілювання гнуті профілі розрізають на мірні довжини летючими пилами або прес-ножицями. Окремі агрегати оснащені пристроями для подовжнього зварювання кромок замкнутих профілів. Всі стани другої групи не мають механізованих укладальників. Формування пакетів профілів здійснюється скиданням їх до кишені або вручну.

Третя група агрегатів включає стани з поштучним, порулонним і безперервним процесом профілювання. Системи управління забезпечують реалізацію налагоджувальних, ручних та автоматизованих режимів роботи.

Процес профілювання на таких станах полягає у послідовній зміні форми поперечного перерізу смуги при проходженні її через ряд пар горизонтальних валків і вертикальних роликів, що обертаються назустріч один одному (подібно процесу подовжньої прокатки). Вигин металу відбувається в холодному стані. Особливістю такого процесу є поширення осередку деформації далеко за межі прокатних валків на вході і виході смуги.

При проєктуванні процесу профілювання слід враховувати деякі елементи теорії вигину та її технологічні прояви.

Площа поперечного перерізу заготовки та її товщина в процесі деформування майже не змінюються. Напруження, що виникають при затиску заготовки між валками при профілюванні не повинні перевищувати межі пружної деформації. Напруження, що перевищують межу пружності, і пластична деформація в цих випадках мають бути лише в місцях вигину стрічки.

Головними обмеженнями при визначенні схеми технологічних переходів профілювання та режиму формовки є виготовлення продукції із заданими якісними показниками та стабільність технологічного процесу.

При розробці калібрування валків визначають розміри необхідної заготовки, положення профілю у валках, вибирають режим профілювання, розраховують розміри профілю по переходах, визначають форму та розміри валків і привалкової арматури.

При виробництві гнутих профілів використовують одну з 4-х відомих систем калібрування валків: «одночасну», «послідовну», «комбіновану» і «спеціальну».

При «*одночасній*» системі калібрування всі елементи профілю формуються одночасно, наприклад, при виготовленні швелерів.

При «*послідовній*» схемі профіль формується поступово в чергових проходах.

«*Комбінована*» схема калібрування об'єднує риси двох вказаних, а «*спеціальна*» – розробляється окремо для особливих випадків профілювання.

Основним критерієм при виборі послідовних значень кутів вигину елементів профілю є обмеження щодо подовжньої деформації кромок полиць, які вигинаються. Так, на агрегаті (1…4)х(50…300) кут вигину за прохід у закритих калібрах перших трьох клітей не повинен перевищувати 20°. Калібри валків наступних клітей виконуються відкритого типу з кутами вигину за прохід до 18°.

Кількість клітей (до 17), що беруть участь у профілюванні, і швидкісний режим роботи стану (0,2…2,5 м/с) встановлюють у залежності від складності і розмірів профілю, механічних властивостей металу, а також продуктивності ріжучих пристроїв і устаткування «хвостової» частини агрегату.

Між клітями, як правило, встановлюють допоміжні ролики, які мають профільовану поверхню, оскільки вони виконують не тільки роль напрямних, але й додатково здійснюють вигин-утримання профілю.

З метою зменшення тертя між валками і смугою, а також відведення тепла, що виділяється при формовці, полосу орошають емульсією, яку подють на вході у валки кожної кліті.

Після правильно-калібрувальних клітей, які входять до устаткування агрегату та служать для усунення скручування і вигинів профілю, останній надходить до летючих

ножиць, які здійснюють розрізання профілю при швидкості до 150 м/хв. Встановлені за летючими ножицями додаткові робочі кліті використовуються для формування вертикальних полиць профілів до кута 90°.

Далі рольгангом профілі подають на спеціальну установку, де проводиться видалення *надлишку* емульсії здуваннм. Готові профілі промаслюють, якщо на робочі валки стану не подавалася емульсія.

Агрегат обладнують спеціальним інспекційним рольгангом і ділянкою укладальників, де формуються та зважуються пакети продукції з подальшою передачею до складу. Довжина готових профілів – 3…12 м; максимальна маса пакета готових профілів – 5 тонн.

Обладнання агрегату спрощується при *порулонному* профілюванні за рахунок усунення зварювального устаткування, гратознімателя і петленакопичувача, а при *поштучному* – за рахунок вилучення з технологічного потоку дискових пил. При цьому в останньому випадку *перед* агрегатом встановлюють стопку заготовок мірних розмірів, які послідовно задають до його першої кліті.

Виробництво зварних труб

Одним з видів продукції, при виготовлені яких процес подовжнього згинання використовується як один з основних елементів технології, є *зварні труби*. У зв'язку з важливістю та певною самостійністю цього виду виробництва, його короткий розгляд у наявному підручнику представлений окремо.

Деформаційною основою технології виробництва зварних труб є формування поперечного (відносно осі виробу) згинанням тонкої рулонної стрічки або окремих листових карток з отриманням подовжньою прокаткою круглої порожнистої заготовки для наступного зварювання в місці схождення кромок. Такий процес реалізується на агрегатах (станах) безперервної формовки (типу профілезгинальних станів – *див. вище*) із застосуванням згинальних валків з круглими калібрами, що робить подібну формовку *кінематично близькою до подовжньої прокатки*. До речі, формовку листового матеріалу для виготовлення зварних труб можна здійснювати і на профілезгинальних пресах [44].

Зварні труби виготовляють із зовнішнім діаметром 6…1420 мм і відповідною товщиною стінки 0,4…32 мм прямошовними за ДСТУ 8943, спіралешовними з покриттями за ДСТУ 8696 та багатошаровими:

– немірної довжини: при діаметрі менше 30 мм – не менше 2 м; при діаметрі більше 30 до 70 мм – не менше 3 м; при діаметрі більше 70 до 152 мм – не менше 4 м; при діаметрі більше 152 мм – не менше 5 м з регламентованою теоретичною масою;

– мірної довжини: при діаметрі до 70 мм – від 5 до 9 м; при діаметрі бідьше 70 до 219 мм – від 6 до 9 м; при діаметрі більше 219 до 426 мм – від 10 до 12 м. Труби діаметром понад 426 мм виготовляють тільки немірної довжини;

– кратної мірній довжини (з кратністю не менше 250 мм).

Труби мірної і кратної мірній довжини виготовляють двох класів точності:

– I – з обрізкою кінців і зняттям задирок;

– II – без заторцовки і зняття задирок (з порізкою в лінії стану).

Труби діаметром 478 мм і більше повинні відповідати одному з трьох класів точності за овальністю. Овальність кінців труб не повинна перевищувати від зовнішнього діаметра труб:

– для 1-го класу точності – 1%;

– для 2-го класу точності – 1,5%;

– для 3-го класу точності – 2%.

Вказаними нормативними документами також регламентується кривизна труб (не більше 1,5 мм на 1 м довжини або 0,2% від довжини труби).

У позначенні труб відображають: зовнішній діаметр, товщину стінки, довжину з визначенням кратності (за необхідністю), позначення і номер документу; категорію, позначення марки сталі, позначення стандарту, де визначені вимоги щодо сталі.

Приклад умовного позначення труби із зовнішнім діаметром 1020 мм, підвищеної точності виготовлення, з товщиною стінки 12 мм, підвищеної точності по зовнішньому діаметру торців, 2-го класу точності за овальністю, немірної довжини, зі сталі марки Ст 3сп, виготовленої по групі В ДСТУ 8943, має вигляд:

$$\text{Труба}\ \frac{1020\text{п} \times 12 - \text{ПТ} - 02\text{кл ДСТУ } 8943 - 2019}{\text{В} - \text{Ст 3сп ДСТУ } 9843 - 2019}$$

В умовних позначеннях труб, що пройшли термічну обробку всього їх об'єму, після слів «труба» додається буква Т; для труб, що пройшли локальну термообробку тільки зварного шва, додається буква Л.

Узагальнено, технологічний процес виробництва зварних труб включає три основні перероблення: формовка трубної заготовки, зварювання труби, редукування (зменшення діаметра) готових труб.

Технологічні схеми виготовлення зварних труб поділяють у залежності від діаметру труб, кількості (1…4) та форми (прямий або спіральний) зварних швів, а також – виду зварювання (пічне, електричним опором, електричною дугою у захисному середовищі, індукційне, електричним струмом високої частоти, лазерне тощо) [44].

Виготовлення труб ***пічним зварюванням*** є відомим з кінця 19 ст. До наявного часу цей спосіб знаходить застосування для виробництва водогазопровідних труб діаметром 6…114 мм і товщиною стінки 1,8…5,0 мм завдяки високій якості зварного шва, що забезпечує можливість їх використання заготовкою для наступного волочіння з одержанням загальних показників якості, які наближуються до безшовних труб (*див. нижче*).

Особливістю відповідної технології одержання зварних труб, яка суттєво відрізняється від інших, стає безперервний нагрів стрічки в проходній печі до температури 1350…1400 °С, наступне її формування у круглий порожнистий профіль та зварювання завдяки стисненню кромок, які нагріті до температури на 100…150°, вище за температуру плавлення основного металу. В результаті, забезпечуються значні швидкості зварювання (до 600…1200 м/хв.), мінімальний внутрішній грат, можливість використання накопиченого тепла при наступному редукуванні (калібруванні) з натягом.

Суттєвим недоліком такої технології стають значні витрати теплоносія, який застосовується на нагрів усієї труби, в той час як достатньо нагріти лише ділянку зварювання.

Тому найбільш поширеним є застосування електрозварювання при виробництві сталевих труб.

Контактне зварювання електричним опором використовується при виробництві труб діаметром від 6 до 529 мм і товщиною стінки від 0,2 до 20 мм. Процес зварювання здійснюється завдяки підводу електричного струму силою 220…320 А при напрузі 23…30 В електродами, які «котяться» по кромках трубної заготовки при їх конструктивному з′єднанні з валками, що формують профіль труби.

Міцність зварного шва залежить від тиску, який здійснюють валки. Якісний шов при зварюванні низьковуглецевих сталей одержують при тиску 1…1,2 МПа. Існує критична швидкість зварювання, перевищення якої призводить до появи окремих незварених ділянок. Так, при частоті електричного струму більше 200 Гц швидкість не повинна бути більше 30…70 м/хв. Збільшення швидкості знижує температуру металу та потребує збільшення тиску.

Деякою мірою, останньому недоліку можна запобігти, використовуючи при виготовленні труб діаметром 6…15 мм та товщиною стінки 0,7…0,9 мм електроконтактне зварювання постійним струмом.

У всіх випадках грат, що утворюється при зварюванні, знімають у гарячому стані з труби спеціальним пристосуванням.

Основні операції технологічного поцесу наступні:

- прийом, складування і вхідний контроль якості початкового широкострічкового рулонного прокату;
- поплавочна задача рулонів, їх розкрій на агрегаті подовжнього різання з одержанням стрічки заданої ширини, маркування і складування рулонів стрічки на проміжному складі з подальшою передачею до трубоелектрозварювального агрегату (ТЕЗА);
- спрямовування рулонів стрічки до трубоелектрозварювального стау з подальшим стикуванням та зварюванням кінців рулонів із зачисткою зварного шва;
- накопичення стрічки в накопичувачі для забезпечення безперервної роботи ТЕЗА;
- формування згинанням трубної заготовки в горизонтальних приводних та вертикальних неприводних («еджерних») валках з рівчаками, електричне зварювання труб, калібрування, розрізання на мірні довжини, автоматичний контроль якості зварного шва і труб дефектоскопом;
- контроль якості труб відділом технічного контролю (ВТК);
- ремонт труб, відбракованих у лінії стана;
- пакування труб у пачки;
- складування пачок труб;
- відвантаження готової продукції.

Певні особливості, які зумовлені розмірами продукції та кінематикою процесу формування стрічки в заготовку під зварювання, має *процес виготовлення спіралешовних труб*.

Основною машиною відповідного агрегату тут є формувально-зварювальний стан. Він оснащений формувальною машиною («*уліткою*»), в якій початкова плоска стрічка-заготовка обертається навкруги осі і скручується в трубчасту заготовку для наступного зварювання.

Формувально-зварювальний стан встановлений на поворотній рамі, і разом із виходним рольгангом може повертатися на кут, який дорівнює куту спіралі зі стрічки на трубі-заготовці. Це дає можливість одержувати труби різного діаметра зі стрічки однієї ширини.

Захист зварного шва здійснюють за допомогою флюса. Це один з найстаріших способів при виготовленні такої продукції з підвищеною продуктивністю, який застосовний як для прямошовних, так і для спіральношовних труб.

Складність *тривимірного* формування труби-заготовки зумовлює підвищені вимоги до якості бокових кромок стрічки, точності відповідного руху зварювальної головки та флюсоапарату, а великі розміри труби (530…1420 мм) вимагають здійснювати зварювання із зовніщньої та внутрішньої поверхонь з наступним зняттям грату.

Швидкість зварювання відносно невелика – до 2 м/хв. Але спосіб має вельми вагомі переваги:

– можливість виготовлення труб великих діаметрів будь-якої мірної довжини з вузької порівняно дешевої стрічки при відношенні діаметра до товщини стінки D/S >100;

– можливість використання будь-яких методів електричного зварювання;

– підвищена міцність труби, оскільки при інших рівних умовах робоче навантаження на спіральний шов менше, ніж на прямий.

Принципово, представлена технологічна схема виготовлення як прямошовних, так і спіральношовних зварних труб при використанні інших видів зварювання зберігається.

Індукційне зварювання труб використовують при виробництві газоводопровідних труб діаметром 21,5…219 мм (0,5…8″) і товщиною стінки відповідно від 1,5…4 мм до 5…10 мм. Його здійснюють за допомогою прямолінійних індукторів з магнітопроводами. При цьому, кромки трубної заготовки нагрівають до температури 1380…1450 ^{0}С індукційним током частотою 1…8 кГц (іноді – більше) у залежності від товщини стінки труби.

Перевагами цього способу зварювання у порівнянні зі зваркою опором є спрощення підготовки подовжніх кромок заготовки, відсутність необхідності в електроконтактних роликах, які швидко зношуються, збільшення швидкості зварювання до 50…80 м/хв.

При виробництві труб діаметром 8…529 мм і товщиною стінки 0,3…10 мм в останні роки одержав спосіб ***зварювання струмами високої частоти*** (не менше за 440 кГц). Тут енергію електричного струму підводять до місця розігріву металу контактами, що ковзають або обертаються, чи індукторами, які розміщують ззовні або всередині труби.

Основними перевагами цього способу стають універсальність обладнання, можливість збільшення швидкості зварювання до 150 м/хв. і більше, мала чутливість процесу до властивостей матеріалу труби із забезпеченням високої якості зварювання при зменшенні питомих витрат електроенергії.

Потенційним недоліком цього процесу є те, що висока температура місця зварювання ініціює утворення оксидів, які можуть потрапити до зони шва та погіршити його якість. Для запобігання цьому, зокрема, при використання матеріалів, які схильні до окиснення, застосовують ***дугове зварювання в захисних середовищах***.

Так, зварювання електричною дугою при напрузі електричного струму 10…25 В із захистом місця зварювання інертним газом (аргоном або гелієм) використовують для виробництва тонкостінних труб з прямим швом діаметром 6…426 мм і товщиною стінки 0,2…5 мм з високолегованих сталей, нікелю та його сплавів, алюмінію, магнію, цирконію тощо, а також – при виробництві спіральношовних труб діаметром до 2000 мм і товщиною стінки 10…12 мм.

Захисний газ до місця використання підводять спеціальними форсунками. Вид електричного струму визначається матеріалом труби. Так труби з нержавких та хромонікелевих сталей зварюють струмом прямої полярності (дають «мінус» на електроди), труби з алюмінію – струмом зворотної полярності. При цьому використовують неплавкі електроди з вольфраму, який легований торієм чи танталом.

Захист зварного шва можна здійснюють і за допомогою флюса, як це робиться при виготовленні труб великого діаметру (*див. вище*), що розраховані на підвищений внутрішній тиск при експлуатації.

Недоліком цього способу є порівняно низька швидкість зварювання та необхідність ретельного очищення кромок заготовки від забруднень і речовин, що містять вуглець.

Різновидом ефективного дугового зварювання можна вважати ***плазмове зварювання*** труб. Особливістю цього процесу є використання для розігріву метала в зоні шва нагрітого до температури 3000 °С і вище газу (аргон з вуглецевим газом або воднем). Такий газ знаходиться у стані плазми, складові якої (йони та електрони) розганяються електричною дугою та бомбардирують метал, віддаючи йому свою енергію.

Виробництво профільованих труб

Процес вигину як поперечного, так і подовжнього (відносно осі виробу) у комбінації з подовжньою прокаткою є деформаційною основою ***профілювання труб***. Його особливістю стає *використання безшовної або зварної порожнистої (трубної) заготовки.* Цей процес аналогічно виготовленню гнутих профілів при подовжній сортовій прокатці (*див. вище*) можна вважати окремим різновидом такого виду ОМТ, який реалізується без суттєвої зміни товщини стінки, довжин периметру перерізу та заготовки.

Звичайні прямолінійні труби з коаксиальними круглими зовнішнім та внутрішнім контурами перетину є найкращими при розтягненні, крученні та всебічному вигині. Але в

умовах плоского вигину більш раціональним стає використання труб прямокутного перетину. Для теплообмінних апаратів у ряді випадків стає ефективним використання труб зігнутих та (або) гофрованих за зовнішньою поверхнею чи з виступами на внутрішній поверхні. Для деяких конструкцій підвищення результативності використання досягається некоаксиальністю зовнішнього та внутрішнього контурів перерізу і т.д. (рисунок 1.109) [90].

На відміну від труб круглого перерізу, профільні труби можуть служити не тільки за своїм прямим призначенням (передача рідких продуктів, речовин, матеріалів тощо), але й як елемент конструкцій, наприклад, у будівництві. Велика частина профільних труб, які використовують за таким призначенням, має прямокутний або квадратний перетин. Тут достатньо лише згадати зручність прокладки саме прямокутної труби на пласкій поверхні. З таких труб доцільно виготовляти різноманітні каркаси, що забезпечують зручність монтажу та механічну міцність при економії до 25% витрат.

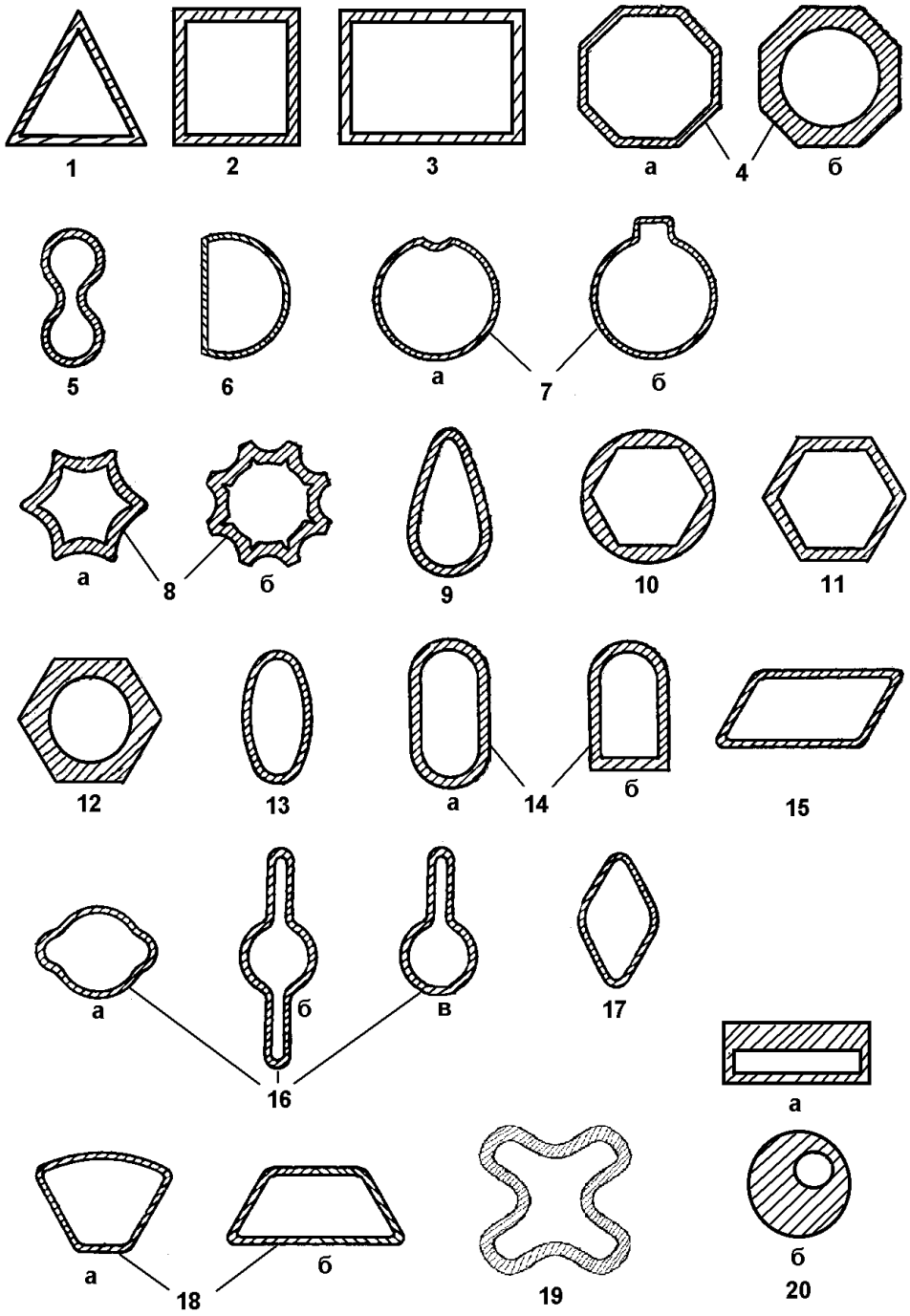


Рисунок 1.109 – Види поперечного перерізу профільних труб (*пояснення позицій – у тексті*)

За ДСТУ Б В 2.6.8-95 та іншими чинними НД визначають нормативно-технічні вимоги на гарячодеформовані, холоднодеформовані, електрозварні та електрозварні холоднодеформовані профільні труби загального призначення з вуглецевої сталі.

Профільні труби виготовляють з металів різних класів і марок, але найчастіше – зі сталей різного складу за групою А чи Б. Такі труби можуть бути піддані спеціальній термічній обробці та мати функціональне, наприклад, захисне або декоративне покриття.

Найбільш «популярні» профілі – це квадратні (*див. поз. 2 на рис. 1.109*) та прямокутні (*див. поз. 3 на рис. 1.109*) труби за ДСТУ 8639. Квадратні профільні труби випускають з розмірами 10…150 мм і товщиною стінки: 1,0…10,0 мм, немірної довжини: 1,5…9 м; мірної довжини: 5…9 м з граничним відхиленням на всю довжину +100 мм; довжини кратної мірній, яка не перевищує встановленої нижньої межі.

Позначення профільних *квадратних* труб визначається довжиною стінки квадрата. Наприклад, якщо довжина сторони 100 мм, то правильними вважатимутися позначення «*Труба профільна квадратна 100×100*» або «*Сталева квадратна труба 100×100*».

Профільні *прямокутні* труби виготовляють з шириною: 10…180 мм, висотою 10…150 мм та товщиною стінки 1…12 мм. Позначення такої труби: «*Труба профільна 40×20×2*» або «*Труба 40×20×2*».

Труби профільні овальні та плоскоовальні (*див. поз. 13 та 14 на рис. 1.109*) за ДСТУ 8940 виготовляють шляхом холодної деформації круглої порожнистої заготовки або електрозварюванням попередньо гнутого профілю за відповідним сортаментом.

Труби овальні повинні мати довжину і граничні відхилення відповідно до ДСТУ 8639, а технічні вимоги до них мають відповідати ДСТУ 8940. Плоскоовальні труби – з розмірами по ширині: 6… 90 мм, по висоті: 8…55 мм з товщиною стінки 0,5…2,5 мм.

При маркуванні таких труб в «чисельнику» вказують характерні розміри овалу, товщину стінки, довжину (мірна, немірна, кратна мірній), а в «знаменнику» – марку сталі і вимоги до неї у відповідності зі стандартом.

Профілювання труб здійснюють на обладнанні, призначеному для виробництва труб круглого перерізу (прокатні чи волочильні стани, преси), використовуючи при цьому відповідний профільований інструмент (валки з рівчаками, монолітні та роликові волоки, матриці), змінюючи при необхідності окремі вузли діючого устаткування.

Окрім використання в якості заготовки круглих безшовних або електрозварних труб, профільні труби іноді виготовляють із вже попередньо профільованих труб. Наприклад, конічну трубу круглого поперечного перерізу можна спрофілювати в конічну за довжиною з квадратним, прямокутним, овальним або ін. перетином на кінцях обо посередині.

До профільних також відносять гнуті труби відносно їх подовжньої осі, виготовлені з прямолінійної труби-заготовки.

Конкретика виготовлення профільних труб пов'язана з наявним обладнанням. Так, наприклад, використання станів холодної прокатки труб роликами (ХПТР) дозволило розробити технологію виробництва тонкостінних труб із зовнішніми або внутрішніми ребрами, шестигранних або інших труб для атомної енергетики, раніше одержуваних волочінням.

Деформаційною основою профілювання є процес вигину металу. Але на відміну від виготовлення гнутих замкнутих профілів (*див. рис. 1.107*), при профілюванні труб з’являються додаткові сили з боку інструмента, які зумовлені використанням замкнутих калібрів. Відповідний аналіз, виконаний в роботах [76, 77], виявив чотири варіанти, які можуть мати місце на різних ділянках перерізу труби в осередку деформації при її профілюванні:

– вигин без оправки з місцевим зменшенням радіусу кривизни профілю;

– розгин без оправки з місцевим збільшенням радіусу кривизни профілю;

– вигин без оправки під дією виступу рівчака калібру (профільного кільця), коли вихідний профіль труби-заготовки спочатку повністю розгинається, а потім згинається, в наслідок чого зовнішня поверхня профілю стає поверхнею вигину (з формуванням подовжнього *зовнішнього* жолобу на профільованій трубі);

– вигин на виступі оправки з формуванням подовжнього *внутрішнього* жолобу на профільованій трубі.

Для цих ввріантів визначено радіуси $\rho_н$ та $\rho_{нд}$ нейтральних ліній напружень і деформації відповідно, які відрізняються від радіуса середньої лінії при вигині $\rho_c = 0{,}5(R_з + r_{вн})$.

За величиною $\rho_{нд}$ у послідовних циклах деформації можна визначити зміщений об'єм металу і, відповідно, ступінь його деформації аналогічно підходу з дослідження [91].

При проєктуванні відповідних технологій також слід мати на увазі вплив внеконтактної та пружної деформації на точність виконання розмірів профільованих труб, особливо – в процесі їх холодного деформування [92].

Виготовлення безшовних труб прокаткою

Найбільш повна класифікація видів труб, що використовуються, включає наступні категорії [44]:

– *за способом виробництва* (безшовні: катані, пресовані, волочені, профільовані; зварені та паяні. Деякі категорії вже описані вище, а остання має обмежене використання);

– *за температурним режимом ОМТ* (гаряче-, холодно– або теплодеформовані);

– *за видом і властивостями матеріалів, що використовуються* (з чорних та кольорових металів і сплавів, біметалеві, з покриттями, неметалеві; з гарантованими механічними властивостями – за групою А або з гарантованими механічними властивостями та хімічним складом – за групою Б);

– *за видом обробки* (для матеріалу – термічно оброблені або нетермооброблені; для поверхні – електрополіровані, з покриттями);

– *за профілем* (круглі, овальні, прямокутні, ребристі, ступінчасті, конічні, зі стінкою змінної товщини, спіральні тощо);

– *за розміром зовнішнього діаметру* (капілярні з діаметром D=0,3…4,8 мм; малого розміру D=5…102 мм; середнього розміру D=102…426 мм; великого розміру D>426 мм. Використовують й інші *градації*, наприклад: менше 70 мм; 70…170 мм; 170…500 мм; 500…1600 мм; більше 1600мм);

– *за відношенням діаметра до товщини стінки* (особливо товстостінні D/S<6; товстостінні D/S=6…<9; нормальні D/S=9…<20; тонкостінні D/S=20…<50; особливо тонкостінні D/S>50);

– *за формою подовжньої осі* (прямолінійні та гнуті);

– *за формою подовжньої твірної зовнішньої або внутрішньої поверхонь* (прямолянійні чи гвинтоподібні);

– *за способом можливого з'єднання між собою при виготовленні трубопроводів* (під зварювання, фланцеві, різьбові);

– *за призначенням* (*для нафтової та газової промисловості*: бурильні, обсадні, насосно-компресорні; *для трубопроводів*: водогазопровідні D=10,2…165 мм та S=2,25…5,5 мм; *нафтопровідні* D=114…426 мм та S=4,5…20 мм; *для магістральних трубопроводів* D=426…1420 мм і більше та S=5…14 мм; *для будівництва*; *для машинобудування*: котельні D=57…152 мм та S=1,5…25 мм; *крекінгові* D=19…219 мм та S=1,5…25 мм; *конструкційні, підшипникові* D=36…200 мм та S=2,25…5,5 мм; *для балонів та суден* D=70…465 мм та S=2,3…34 мм).

Перелік відповідних нормативних документів наведено в таблиці А1 Додатку А.

Нагадаємо, що деформування металу при виготовленні труб може здійснюватись на *оправці,* або *дорні* (суцільному або порожнистому стрижні, який розміщують у трубі-заготовці для збереження необхідної форми при її обтисненні валками за діаметром і стінкою) або без оправки (для обтиснення, здебільшого, за діаметром).

Процес, в якому деформація здійснюється, здебільшого, за діаметром називається *редукуванням*, за діаметром і стінкою – *калібруванням*, а якщо при цьому змінюється ще й форма поперечного перерізу труби (наприклад, з круглої на прямокутну), то *профілюванням* (*також – див. вище*).

Деякі дані стосовно представлення параметрів процесів прокатки труб представлені вище, а докладно інформацію з теорії та технології прокатки труб наведено в спеціальній літературі, наприклад [44].

У промислових технологіях виробництва гарячекатаних труб на трубопрокатних агрегатах використовують у потоці не тільки різні види обладнання для подовжньої, періодичної, косої прокатки, але й комбінують з основним процесом *інші* види обробки металу тиском.

При ***виготовленні безшовних труб*** використовують, здебільшого, різні види прокатки (*див. вище*)**.** Це зазвичай реалізується як частина технологічного процесу на прокатних станах, які входять до складу спеціальних агрегатів.

Узагальнений процес ***гарячої прокатки труб*** включає такі основні операції:

–нагрів суцільної заготовки;

–прошивка – одержання порожнистої гільзи одним із шляхів за допомогою:

– короткої оправки («*прошивня*») на двох– або трьохвалкових станах поперечно-гвинтової («косої») прокатки;

– спеціального інструмента на пресі *(«пресова прошивка»*);

– розточки або свердлення на токарному станку;

– одного з видів лиття (безперервного, відцентрового тощо);

–елонгація («видовження») порожнистої заготовки у двох– або трьохвалковому стані косої прокатки;

–розкатка на розкатному стані гільзи на оправці в чорнову трубу;

–калібрування на оправці (чистова прокатка) та/або редукування (зменшення діаметру) без оправки;

–оброблення (розрізання на мірні довжини, термічна обробка, правка, нанесення покриттів тощо).

Сюди також включають операції уведення оправки в трубу-заготовку перед прокаткою та вилучення її з труби після прокатки.

За видом процесу та відповідним обладнанням для *розкатки гільзи в трубу розрізняють трубопрокатні агрегати* з одним із станів:

–пілігримовий періодичної прокатки (див. вище);

– «автоматичний»;

–безперервний;

–рейковий (ці три останні позиції наведеного переліку відповідають подовжній прокатці, яка узагальнено представлена вище);

–трьохвалковий з «косим» розташуванням валків.

Трубопрокатні агрегати з розкатними пілігримовими станами *(також див. вище*) широко використовують при виробництві гарячекатаних труб для нафто– і газовидобувної промисловості, в тому числі – бурильних, обсадних, котельних та інших завдяки ряду переваг, основними з яких є:

–можливість отримання труб широкого сортаменту (діаметром до 700 мм);

–можливість виробництва особливо товстостінних, гранених і профільних труб спеціального призначення;

–можливість виробництва труб не тільки з катаної заготовки, але й зі злитків і безперервнолитої заготовки;

–порівняно низька собівартість труб;

–високий ступінь механізації й автоматизації процесу.

До недоліків способу пілігримовой прокатки відноситься обмеження сортаменту за марками сталі, оскільки ця технологія характеризується підвищеною тривалістю процесу деформації, що не узгоджується з вузьким температурним діапазоном обробки легованих сталей.

У залежності від розмірів отримуваних труб розрізняють пілігримові агрегати (установки):

– *малі* (для виробництва труб діаметром 22…140 мм з мінімальною товщиною стінки 2,25…4,0 мм);

– *середні* (для виробництва труб діаметром 140…325 мм з мінімальною товщиною стінки 4,5…8,0 мм);

– *великі* (для виробництва труб діаметром 325…700 мм, з мінімальною товщиною стінки 6…13 мм) [44].

Трубопрокатні установки з пілігримовими станами розповсюджені в Європі, Україні, Росії. Наприклад, у ФРН нараховується 11 таких установок. Є аналогічні установки в Чехії, Угорщині, Великій Британії, Франції, Італії та Польщі. Більша частина з них – це установки малого типу для виробництва труб діаметром 21…168 мм.

Насьогодні в Україні працюють 3 трубопрокатні агрегати з пілігримовими станами: два на ПАТ «ІНТЕРПАЙП НТЗ» (для виробництва труб діаметром 168…377 мм з мінімальною товщиною стінки 5,5…8,0 мм) та один – на ПрАТ «Маріупольський металургійний комбінат» для виробництва труб діаметром 219…325 мм з мінімальною товщиною стінки 6,0…8,0 мм.

Для виготовлення труб діаметром більше 140 мм, здебільшого, використовують злитки у зв'язку з труднощами одержання круглої катаної заготовки великого діаметра. Застосовують злитки круглого та багатогранного перетину з конусностью 1% і масою 1,8…3,5 т.

Основним недоліком застосування злитків, одержуваних розливанням у виливниці, є наявність усадкової раковини (до 3,6% об'єму металу), що може супроводжуватись появою розшарувань і пльон на готових трубах. Якщо злитки спокійної сталі уражені підкірковими міхурами, то це може зумовити появу тріщин, волосовин та раковин у готовому прокаті (до 60% усього браку – з вини вихідного метала). Тому основним напрямком підвищення якості труб на агрегатах з пілігримовими станами є застосування безперервнолитої заготовки (*див. вище*).

До складу агрегатів з пілігримовим розкатним станом часто уводять прошивний прес і стан-елонгатор, що дозволяє використовувати безперервнолиту заготовку, зокрема, квадратного перетину.

В якості типового прикладу більш докладно розглянемо відповідні дані щодо агрегату, який встановлений в трубопрокатному цеху № 4 на ПАТ «ІНТЕРПАЙП НТЗ» (м. Дніпро) і який може бути віднесений до *середніх* трубопрокатних агрегатів, оскільки він призначений для виробництва труб діаметром 168…377 мм з товщиною стінки 5,5…60 мм.

Тут виготовляють труби: загального призначення за ДСТУ 3667 та ДСТУ 8938 (зі сталей 10 та 20); обсадні і муфти до них за ДСТУ 8932 зі сталей категорій Д, К, Е, Л (до 70% випуску); для парових котлів; для власного використання, зокрема, як заготовку для наступної прокатки холоднокатаних труб згідно з вимогами технічних умов (сталі 12Х1МФ і 15Х1М1Ф), а також – за стандартами DIN 1629, ASTM A53, ASTM A106, API 5L, API 5CT, EN 10210-1,2, «подвійними» і «потрійними» стандартами (ДСТУ EN, ДСТУ ISO EN тощо) та ін. Потенційна потужність цеху 330 тис. тонн труб на рік.

На агрегаті використовуються круглі і гранені злитки, відлиті в сталеплавильному цеху підприємства, або отримані з інших підприємств.

Труби випускають звичайної за ДСТУ 3667 і підвищеної за API-5ST точності, згідно з якими регламентуються відхилення по діаметру та товщині стінки, овальність, різностінність та кривизна.

Технологічний процес виробництва труб на пілігримовій установці здійснюється за наступними етапами.

Заготовку розвантажують на складі електромостовими магнітними кранами. Після огляду і (при необхідності) ремонту злитки краном складають на вантажні решітки, з яких по рольгангам і шлеперним стелажам подають до завантажувальних машин кільцевих печей. При транспортуванні по рольгангу злитки зважуються.

Посадку злитків у кільцеві печі №№ 1 і 2 здійснють в один або два ряди.

Печі, що працюють на природному газі, чотирьохзонні, в тому числі, одна зона – неопалювальна. Кожна опалювальна зона печі має автоматичне регулювання температури робочого простору, тиску в робочому просторі, співвідношення «газ –повітря», температури підігріву повітря. Максимальна продуктивність кожної печі – 65…70 т/год.

У залежності від марки сталі злитки нагрівають в печах до температури 1250…1290 °С. Кількість злитків у печі визначається часом нагріву і темпом прокатки. Це зумовлює темп видачі металу з печі: при діаметрі заготовки 320…350 мм та при однорядному посаді – 22 шт/год., а при дворядному – 38 шт/год.; при діаметрі заготовки 415…435 мм – 18 шт/год при однорядному та 32 шт/год. – при дворядному посаді; при діаметрі заготовки 545…370 мм – 10 шт/год. при однорядному та 19 шт/год. при дворядному посаді.

Нагрітий злиток маніпулятором видається з печі на транспортний рольганг, який передає їх до поворотного столу. Поворотний стіл автоматично орієнтує злиток за напрямком подальшого руху.

Після цього злиток транспортується до машини гідрозбиву окалини. Видалення окалини здійснюється водою під тиском 100 атм (9,8 МПа), яка подається під кутом $15…18^0$ 17-ю соплами (12 сопел спрямовані проти ходу руху злитка, і 5 – за ходом).

Далі злитки за допомогою системи рольгангів і поворотних кругів подаються до прошивного горизонтального гідравлічного преса силою 20 МН (2000 тс), де здійснюється їх прошивка з отриманням товстостінних стаканів (матеріали, що стосуються схеми пресової прошивки злитка наведено в частині наявного підручника, яка присвячена видам пресування – *див. нижче*).

Прошивка злитків діаметром (з діагоналлю) 330…570 мм і найбільшою довжиною 2100 мм при температурі 1200…1250 °С здійснюється з боку їх донної частини в матриці, яка насувається на злиток спеціальним пуансоном. Внутрішню поверхню матриці і головку пуансона змащують технологічним мастилом (суміш графітового порошку і мінерального масла). Найбільший внутрішній діаметр стакану – 330 мм; його найбільший зовнішній діаметр – 575 мм. Допустима різностінність стаканів у залежності від діаметра (або діагоналі) злитка складає 10…15 мм.

Стакани підігрівають у кільцевій печі до температури 1200…1280 °С упродовж 2 годин. Максимальна продуктивність печі 100 т/год.

Нагріті стакани транспортним рольгангом подаються до приймального жолоба двовалкового стана-елонгатора косої прокатки (*про косу прокатку – див. вище*). Максимальний діаметр валків 875 мм; довжина бочки 960 мм; кут нахилу осі валків до осі симетрії стану (осі прокатки) у вертикальній площині паралельній цієї осі (*кут подачі*) – 3…5º30'. Частота обертання валків 33…55 об/хв. Діаметр «стаканів», які прокатуються, 380…590 мм, довжина 400…4200 мм. Температура металу на виході зі стану 1130 .. 1150 °С. Конструкція стану дозволяє використовувати його і для прошивки злитків діаметром до 325 мм. У цьому випадку прошивний прес не використовують.

Розкатка на стані-елонгаторі, у значній мірі, зменшує різностінність гільзи, що поліпшує умови наступної прокатки на пілігримовому стані і сприяє зменшенню різностінності труб.

Продеформовані на елонгаторі гільзи пересуваються рольгангом, скидаються на транспортний візок і надходять до ділянки внестанової зарядки дорнів одного з двох пілігримових станів, де здійснюються такі технологічні операції:

– подача гільзи і дорна;

– заправка дорна в гільзу за допомогою спеціального візка з гідроприводом;

– передача гільзи із заправленим у неї дорном у жолоб подавального апарату за допомогою маніпулятора, який представляє собою естакаду з двома крановими візками, обладнаними кліщами для захоплення гільз;

– скидання відпрацьованого дорна на візок для передачі на охолодження;

– охолодження дорна у ванні з водою і на повітрі з подальшою передачею його до місця чергової заправки у гільзу.

У зв'язку з особливостями прокатки (*див. рис. 1.82*) для подачі гільзи з дорном у зев валків пілігримового стану та її обертання навколо осі на 90° при кожній подачі використовуються спеціальні апарати.

Кожен такий апарат складається з литої станини та кареток із закріпленим на них повітряним циліндром, шлицевий вал якого з'єднаний з механізмом обертання. Система гальмування рухомої маси – гідравлічна (тиск 100…200 атм), система подачі вперед – пневматична (тиск 2…4 атм). Конструкція апарату забезпечує регулювання його положення за висотою в залежності від розміру гільз, які прокатуються.

Головна лінія пілігримового стана представляє собою складну систему механізмів, що приводять у рух валки.

Станина пілігримовой кліті дуо складається з двох рам, які з'єднуються кільцями. Врівноваженння верхнього валка – гідравлічне. На кліті монтується пристрій для виведення гільзи на вісь прокатки і шибер для утримання труби при виштовхуванні дорна.

Валки обертаються за допомогою шпинделів з шарнірними муфтами через шестеренну кліть від електродвигуна постійного струму потужністю 3000 кВт. Для покращення динаміки приводу у головній лінії також встановлений маховик (діаметром 8,5 м і масою 74 т) та дві пружинні муфти. В лінії приводу стана використовується запобіжний шпіндель.

Частота обертання валків може регулюватися в межах 45…90 об/хв. і встановлюється у залежності від діаметра труби, що прокатується.

У робочій кліті під натискними гвинтами розміщені запобіжні стакани, призначення яких – захистити від руйнування деталі робочої кліті при їх силовому перевантаженні.

Окалину з гільзи вилучають стисненим повітрям.

Подача за кожне обертання валків залежить від навантаження на двигун, температури прокатки, стану поверхні валків і обладнання. Надмірно велика подача може призвести до збільшення різностінності труби та її затиску у калібрах валків.

У пілігримових клітях гільза розкатується в трубу довжиною до 42 м.

Прокатана та звільнена від дорна труба з вивідного рольгангу за пільгер-клітями передається на пристрій для вогневої різки труб, де виконується відрізання пільгерної головки і заправочного кінця, а також нарізка на окремі труби довжиною 5…13 м згідно із завданням.

Газові різаки закріплені на візках, які пересуваються зі швидкістю до 6 м/хв. вздовж труб по балці довжиною біля 44 м, змонтованої на металевих стійках. На цих же стійках укріплена лінійка з поділками. На кожному візку є телекамера, зображення від якої передається на монітор, встановлений на посту управління.

Обрізь попадає на підземні транспортери, якими видається на скрапну дільницю. Там також знаходиться відстійник окалини.

Після нарізки, труби при температурі 550…600 °С маркуються клеймувальною машиною, підігріваються у печі з крокуючими балками до температури 900…1050 °С, після чого калібруються у 12-клітьовому або у 5-клітьовому калібрувальному стані на заданий розмір за діаметром та товщиною стінки.

Розташування клітей 12-клітьового калібрувального стану – під кутом 45°до горизонту і під кутом 90° по відношенню одна до одної. Відстань між клітями – 1400 мм. Діаметр бочки валків – 740 мм. Кожна кліть працює від індивідуального приводу потужністю 180 кВт.

Калібрування труб здійснюється без натягу. Частина клітей – чорнові. У чистових клітях обтиснення практично відсутнє.

П'ятиклітьовий калібрувальний стан призначений для виробництва труб з підвищеними вимогами до точності зовнішнього діаметра. Тип клітей стану – двохвалкові з кільцевою конструкцією станини. Діаметр валків 850 мм. Міжклітьова відстань – 1050 мм. Потужність двигунів індивідуального приводу – 315 кВт. Максимальна частота обертання валків – 50 об/хв. Максимальний діаметр калібру – 370 мм. Максимальна товщина стінки труб – 45 мм.

Після калібрування труби охолоджуються на холодильниках, обробляються в семивалкових правильних станах і поступають на дільницю первинної інспекції та ремонту. Подальша обробка труб залежить від їх призначення за замовленням або стандартом. Далі вони йдуть на склад для наступного відвантаження споживачеві.

В якості наступного типового прикладу розглянемо ***трубопрокатний агрегат з розкатним автоматичним станом 140,*** встановлений на ПАТ «ІНТЕРПАЙП НТЗ» (м. Дніпро).

На агрегаті виготовляють гарячекатані труби із зовнішнім діаметром від 73 до 168 мм і товщиною стінки від 5 до 22 мм:

– з вуглецевих і низьколегованих марок сталей (10, 20, 35, 45, 15Х, 20Х, 40Х, 20М, 50М, 10М2, 09М2С и ін.) за стандартами ДСТУ 3667 та ДСТУ 8938, технічними умовами ТУ 14-3-190-82 та іншою відповідною нормативною документацією (НД);

– зі сталей марок St37, St44, St52, Grade A, B, C, X42 – X52 за стандартами DIN 17121, DIN 1629, DIN 1630, API 5L, ASTM A106, ASTM A53 та іншими іноземними стандартами, що узгоджуються з технологією виробництва труб на підприємстві;

– з нелегованих і низьколегованих сталей марок S235JRH, S275J0H, S275J2H, S355J0H, S355J2H, S275NH, S275NLH, S355NH, S355NLH, S460NH, S460NLH за стандартом EN 10210;

– гладкі насосно-компресорні труби (НКТ) без різьблення діаметром 73 мм із товщиною стінки 5,5 та 7,0 мм групи міцності Д за технічними умовами ТУ 14-3-1724-90;

– НКТ без різьблення діаметром від 73,03 мм до 114,3 мм та муфтова заготовка для них зі сталі класу J55 й N80 за стандартом API 5CT;

– обсадні труби без різьблення з умовним діаметром від 114 до 168 мм групи міцності Д, К та Е за технічними умовами ТУ 14-3-461-76;

– обсадні труби без різьблення діаметром від 114,3 мм до 168,28 мм зі сталі класу J55, K55 й N80 за стандартом API 5CT;

– а також інші види труб у відповідності зі спеціалізацією агрегату.

Труби виготовляють немірної та мірної довжини (у межах від 4 до 12,5 м); довжини кратної мірній (у межах немірної довжини з припуском на кожен різ по 5 мм); приблизної довжини в межах немірної довжини.

Заготовка поставляється на підприємство у вигляді штанг, ув'язаних у пакети, одного розміру, однієї марки сталі та плавки.

Перед розкроєм на прес-ножицях штанги заготовок зі сталей з мінімальною межею міцності до 490 МПа (сталі марок 35, 45, St52 й ін.) для запобігання утворення тріщин на торцях піддають підігріву при температурі не нижче 80 °С у водяній ванні протягом не менш 5 хв. Те ж саме стосується заготовок зі сталей, що піддають вогневому зачищенню дефектів або схильних до розтріскування при різанні. При розкрої штанг заготовок щляхом ламання на пресі (з попереднім повітряно-плазмовим надрізанням) підігрів не застосовують.

Після розкрою заготовки переміщують похилою решіткою від лінії ланцюгового транспортера до рольганга подачі у піч, де попередньо проводять огляд їх поверхні і контроль геометрії на відповідність нормативним вимогам. Виявлені непридатні до виробництва заготовки відокремлюють та маркують ярликом із вказівкою виду дефекту. Рішення щодо подальшого використання відсортованої заготовки приймається адміністрацією цеху разом з відділом технічного контролю (ВТК).

Заготовки, що пройшли розкрій і не потрапили безпосередньо до технологічного потоку, збираються в пакети і складуються. На кожен пакет наносять дані щодо марки сталі, номеру плавки, діаметра і довжини заготовки, кількості штук.

Нагрів заготовок здійснюється в кільцевій печі. Вона призначена для нагрівання природним газом (резервне паливо – мазут) сталевих заготовок довжиною від 1000 до 3800 мм до температури 1240 ± 40 °С.

Піч обладнана системами автоматичного регулювання:

– температури й співвідношення «паливо-повітря» в опалювальних зонах;

– тиску продуктів згорання в робочому просторі печі;

– температури продуктів горіння перед рекуператором;

– тиску вентиляторного повітря.

Нагріті заготовки піддають *прошивці* на прошивному стані косої прокатки (*див. вище*) з грибоподібними валками та конічною оправкою з одержанням гільз заданих розмірів. Кут розкатки 17°. Кут подачі $0...20^0$ (*опис процесу косої прокатки наведений вище*).

Далі за технологічною схемою реалізується *подовжня прокатка труб на короткій нерухомій конічній оправці* послідовно у двовалкових станах № 1 і № 2.

Крім такої схеми, на інших підприємствах використовують також схему дворазової прокатки заготовки *в одній кліті*. Тоді чорнова труба після першого проходу верхнім валком стану передається на вхідну сторону кліті «автоматично», що і дало такому обладнанню відповідну назву [6].

Валки стану № 1 виготовляють зі Сталі 60ХГ з наплавленим робочим шаром зі Сталі 25Х5ФМС. Вони мають діаметр 600...640 мм. Валки стану №2 – з чавуну ТШХН-47 з діаметром 585... 640 мм. Довжина бочки валків 300 ± 1 мм.

Подача гільзи (труби-заготовки) у стани подовжньої прокатки здійснюються при температурі не нижче 900 ºС за допомогою роликів, що задають, або транспортного рольганга.

Перед подачею до валків усередину гільзи подають порошкоподібне технологічне мастило (поварену сіль, триполіфосфат натрію або ін.) у кількості від 10 до 30 г на трубу.

Під час прокатки валки безупинно охолоджують водою. Інтенсивне охолодження оправок здійснюється в паузах між прокатками труб.

Перед подачею труби до стану № 2 її кантують на кут 45…135° (у середньому – 90°).

Робочу поверхню оправок періодично (не рідше, ніж через 50...100 труб) контролюють для оцінки можливості їх подальшого використання.

Контроль товщини стінки труб здійснюють за результатами вимірів на пробах, відрізаних на охолоджувальному столі, а також – додатково за коефіцієнтом видовження (витяжки) в рамках системи простежуваності [1] з періодичною перевіркою довжини труб по розмітках на задніх столах станів № 1 та № 2.

Зовнішня поверхня труб після станів подовжньої прокатки повинна бути без видимих оком дефектів.

Для поліпшення якості поверхні, надання трубі правильної геометричної форми і зменшення різностінності після подовжньої прокатки в лінії агрегату ТПА 140 встановлений додатковий *тривалковий розкатний стан косої прокатки* (*характеристику процесу такої прокатки – див. вище*) Цей стан розташований паралельно лінії ТПА 140, і подача гільз у нього здійснюється почергово. Розкатка ведеться на короткій конічній оправці, що утримується в осередку деформації стрижнем. На стані використовують

чавунні валки діаметром у перетиску 580... 650 мм та довжиною бочки 550 мм. Кут розкатки 7°. Кут подачі – 0...14 °.

Температура початку прокатки на цьому стані повинна бути не нижче 850 °С.

Труби з тріщинами, розірваними передніми або задніми кінцями у стан не задають.

Перед подачею труб до їх середини за допомогою спеціальної установки інжекційного типу або мірною лопаткою закидають технологічне мастило (подрібнену кухонну сіль або ін.).

Прокатка труб проводиться при безперервному охолодженні валків водою. Зношування оправок визначається періодичним (не рідше, ніж через 100...150 труб) виміром й оглядом їх поверхні.

Прокатані в розкатному стані труби передаються рольгангом до індукційних печей, а далі – до редукційного або калібрувального стану.

Передні кінці труб обрізають в гарячому стані за допомогою пил, установлених перед індукційними печами.

Кожна індукційна піч складається з нагрівачів (3 індуктори в лінії калібрувального стана та 4 індуктори в лінії редукційного стана), конденсаторних батарей, перетворювачів частоти електричного струму на 1000 Гц та пускорегулюючої апаратури. Піччю забезпечується нагрів труб довжиною 4,5...12,5 м, діаметром 108...180 мм з товщиною стінки 3...18 мм при продуктивності 28,8...66,5 т/год.

В редукційному та калібрувальному станах здійснюється подовжня безперервна прокатка в калібрах.

Редукційний стан складається з 20 клітей, що мають індивідуальний привод потужністю по 250 кВт. Тип кожної кліті – двохвалкова з нерегульованим положенням валків. Номінальний діаметр бочки валків – 330 мм. Відстань між осями суміжних клітей 330 мм. Характер роботи стана – з натягом і без натягу. Труби, прокатані на довгій оправці, після стану труби мають діаметр 73...114 мм.

Калібрувальний стан складається з 9 клітей, що мають індивідуальний привод потужністю по 1000 кВт. Тип кожної кліті – двовалкова з нерегульованим положенням валків. Номінальний діаметр бочки валків – 450 мм. Відстань між осями суміжних клітей – 750 мм. Після стану труби, прокатані на довгій оправці або без оправки, мають діаметр 98...166 мм.

Максимально припустима швидкість обертання валків обох станів – 65 об/хв. Матеріал валків – чавун ТПХНЦ-60 або ТПХН-60.

Після калібрувального і редукційного станів труби надходять до холодильника.

При настроюванні стана після перевалок, а також у процесі роботи здійснюється контроль геометрії і якості поверхні труб.

У прав***и***льний стан подається поплавочно кожна труба окремо.

Обрізку труб здійснють на двох автоматизованих потокових лініях плазмового різання й обробки торців, а також на двох парах трубообрізних верстатів.

У залежності від вимог замовлення або стандарту труби можуть проходити додаткові операції оброблення (шаблонування, торцювання, випробування гідравлічним тиском, нанесення захисного покриття тощо). У разі необхідності здійснюють контроль ваги і довжини кожної труби.

Після обробки на поточних лініях труби надходять на інспекційні столи, де приймаються працівниками ВТК згідно з вимогами відповідної НД.

Придатні труби, прийняті ВТК, формують у пакети. Відсортовані труби відкладають в окрему кишеню. Рішення про їх подальше використання (ремонт або остаточне відбраковування) приймається ВТК спільно з адміністрацією цеху. При направленні в брак труби маркуються спеціальним умовним знаком.

Основною перевагою трубопрокатних ***агрегатів з розкатним безперервним станом*** являється їхня висока продуктивність. Зазвичай на безперервному стані таких

агрегатів виробляють гарячекатані труби одного діаметра, а шляхом редукування зменшують його до необхідної величини. Наявність у складі таких агрегатів редукційного (редукційно-розтягувального) стану, який працює з натягом, значно розширює сортамент труб, що прокатуються, як за діаметром, так і за товщиною стінки.

Крім редукційно-розтягувального стану, до складу обладнання сучасних агрегатів уводять калібрувальний стан, який, власне кажучи, також є редукційним. Відмінність полягає в тому, що калібрувальний стан має меншу кількість клітей і працює з таким натягом, що товщина стінки труби в процесі редукування не змінюється.

Сучасні агрегати з безперервним станом застосовують для масового виробництва труб діаметром від 16 до 140 мм та товщиною стінки від 2,3 до 15 мм з вуглецевих і низьколегованих сталей.

Наприклад, на трубопрокатному агрегаті ТПА 80 ПАТ «Дніпропетровський трубний завод» з катаної суцільної заготовки виготовляли безшовні труби із зовнішнім діаметром 51…89 мм, товшиною стінки 3,5…10 мм, довжиною 6…12,5 м за ДСТУ 3667 та ДСТУ 8938, а також за стандартом підприємства СТП-244-5-74 для подальшого перероблення.

Технологічна схема виготовлення труб на ТПА 80 включає наступні операції та перероблення.

Заготовка у вигляді штанг довжиною 12 м з діаметром 115, 120 та 130 мм надходить до заводу іззовні. Тут звіряють дані сертифіката з маркуванням заготовок. Контроль якості поверхні здійснюють візуально. На їх зовнішній поверхні не повинні бути тріщин, полос, волосовин, пісочин, закатів, вуса, рванін, включень, раковин, видимих без застосування збільшувальних приладів (*типові дефекти металу – див. розділ 2*).

Заготовку розвантажують електромостовим краном, розподіляють за марками сталі, плавками, розмірами, при необхідності роблять контрольне зважування та розміщують на стелажах для наступного розкрою. Відповідні дані заносять до журналу.

Розкрій заготовок-штанг на довжини здійнюють з точністю не гірше 15 мм згідно із завданням планово-розподільчого бюро. При розкрою не допускають тріщин і напливів на торцах заготовки.

Заготовку, яку підготовано до прокатки й яка не потрапила безпосередньо до технологічного потоку, пакетують, а пакет забезпечують ярликом, на якому вказують діаметр, довжину, марку сталі, номер плавки, кількість штук, масу пакету, дату та зміну, в якій вироблено заготовку. Дані ярлика та місце знаходження пакету заносять до спеціального журналу. Відбраковану заготовку пакетують, забезпечують ярликом і складають окремо.

Розрізані заготовки транспортуються рольгангами, транспортерами, передавальними решітками до кільцевої нагрівальної печі. Піч працює на природному газі з підігрівом до 350 °С повітря в трубчастому металевому рекуператорі.

Перед посадом у піч заготовка повинна бути зацентрована плазменим центрувальником на глибину не більше 20 мм з діаметром отвору від 20 до 30 мм.

Завантаження заготовок у піч здійснюють у два ряди (при довжині 600…1500 мм) або в один ряд (при довжині більше 1500 мм).

Нагрів заготовок у печі здійснюється згідно з технологічним регламентом у залежності від марки сталі, діаметра та довжини заготовки при температурних режимах печі по зонам:

- у першій та другій – 1240…1300 °С;
- у третій – 1220…1280 °С;
- у четвертій – 1180…1250 °С, –

для забезпечення температури прошивки на наступній операції у межах 1190…1240 °С.

Прошивку заготовки на оправці здійснюють на косовалковому прошивному стані з двома валками з діаметром бочки (у пережимі) 800…900 мм. Кут розкатки 7…9°. Кут подачі 0…17°. У процесі прошивки валки, оправки і лінійки повинні безупинно

охолоджуватися водою. У паузах між прошивками оправка повинна додатково охолоджуватися водою зі спрейера.

У результаті прошивки отримують гільзи з діаметром 114…126 мм, товщиною стінки 12…22 мм та довжиною 1850…4000 мм. Зовнішня та внутрішня поверхні гільз не повинні мати порізів, пльон, подряпин. При наявності дефектів необхідно перевірити стан робочого інструменту. Оправки та лінійки прошивного стану замінюють по мірі їхнього зносу.

Наступною технологічною операцією є *прокатка на безперервному 8-клітьовому стані* з з індивідуальним приводом клітей від двигунів постійного струму потужністю кожного 550 кВт через редуктори з передатним числом, яке сприяє виконанню умови постійності секундних об'ємів металу по стану.

Кліті розташовані на відстані 850 мм одна від одної та мають валки діаметром 400 мм та довжину бочки 230 мм.

Розмір труб після безперервного стана: зовнішній діаметр 83 і 95 мм, товщина стінки 3,1…8,0 мм, довжина 6000…13000 мм. Прокатку ведуть на оправках діаметром від 64 до 85 мм та довжиною 10500 мм.

Оправка з температурою 150…200 °С після виходу зі змащувальної машини (мастило – розчин у воді 20…30% триполіфосфату натрію) спеціальним механізмом задається у гільзу.

Прокатку здійснюють з увімкнутою системою гідрозбиву окалини з поверхні гільзи перед першою кліттю. Тиск води проти руху гільзи в спрейєрі 1,17…1,47 МПа.

Різні значення товщини стінок труб отримують використанням різних за діаметром оправок. У процесі роботи допускається знос оправок не більш як 0,2 мм відносно номінального діаметру. Не дозволяється прокатка труб на кривих оправках та таких, які мають дефекти у вигляді раковин, тріщин, рисок, що дають відбитки на внутрішній поверхні труби.

Температура труб, що виходять зі стану, повинна бути не нижче 1030 °С.

Оскільки передній та задній кінці труб прокатують без двостороннього натягу, деформування усього сортамету на безперервному стані ведуть із застосуванням *системи потоншення кінців труб*. Таке потоншення здійснюють на величину 0,3…0,5 мм на довжині до 1,5 м з переднього та заднього кінців труби. Контроль величини потоншення проводять шляхом вимірювання товщини стінки труб мікрометром.

Витягування оправок з однієї або одночасно з двох труб здійснюють дволанцюговим оправковитягувачем при температурі труби не нижче за 450 °С. Після цього оправки охолоджують у 5-секційному проходному спрейері, встановленому в лінії дворівчакового транспортуючого рольгангу. В процесі експлуатації здійснюють контроль стану поверхні та величини зносу довгих оправок.

Після витягування оправок, дисковою пилою на трубах обрізають задні кінці. Далі труби по одній передають до 40-секційної рекуператорної печі для підігріву перед редукуванням. Піч працює на природному паливі та має 6 зон автоматичного регулювання температури у межах 750…1000 °С. Її продуктивність 13,6…25,4 т/год.

Труби у піч задають при температурі 220…550 °С («теплий посад») у випадку надходження безпосередньо з безперервного стану або 20 °С («холодний посад») при надходженні з проміжного карману.

Труби у проміжній печі нагрівають до температури 850…980 °С у залежності від марки сталі.

Нагріті до необхідної температури труби по одній за допомогою рольганга задають у 15-клітьовий редукційний стан подовжньої прокатки (5…13 – чорнові, дві – чистові кліті). Між клітями встановлюють до 7 клітей-проводок. Міжклітьова відстань – 300 мм. Номінальний діаметр валків 330 мм. Під час прокатки валки безперервно охолоджують водою. Привод робочих клітей здійснюється посекційно від 7 електродвигунів постійного струму потужністю 160 кВт кожний.

Розмір труб після редукування: зовнішній діаметр 51…80 мм, товщина стінки – 3,5…16 мм, довжина – 6000…13000 мм.

При необхідності труби після редукування на летючих ножицях на швидкості руху 1,2…3,2 м/с при температурі 750…850 °С розрізають на дві частини.

Після порізки труби подають до двосекційного охолодження, після чого передають до одного з двох однотипних 9-клітьових косовалкових правильних станів.

Після правки труби скидають у кармани та набирають у пакети, маса кожного з яких не повинна перевищувати 4 тонни. На кожний пакет повинен бути навішений ярлик, в якому вказують марку сталі, номер плавки, розмір заготовки, розмір труб, номер пакету, тавро бригади і тавро ВТК.

Деформування ***на рейковому розкатному стані*** за своєю суттю є подовжнім *проштовхуванням* крізь калібр [44], який формується роликами, тобто може розглядатися як один з різновидів пресування (*див. далі*).

Трубопрокатні агрегати з тривалковим розкатним станом, здебільшого, застосовують для виробництва товстостінних гарячекатаних труб підвищеної точності, зокрема, для наступного виготовлення кілець підшипників.

За ДСТУ 8942 відповідні труби виготовляють з підшипникових марок сталі ШХ15, ШХ15СГ, ШХ15В, ШХ15СГВ, ШХ15Ш, ШХ15СГШ і ШХ4.

Тут труби виготовляють із зовнішнім діаметром 70…204 мм при відношенні зовнішнього діаметра до товщини стінки $D_{зовн} / S$ =4…17 та мінімальному внутрішньому діаметрі 48 мм.

Холоднодеформовані труби з $D_{зовн}$=20…32 мм виготовляють за згодою виробника зі споживачем.

Граничні відхилення за розмірами труб не повинні перевищувати:

– за зовнішнім діаметром гарячедеформованих – +0,2 мм; холоднодеформованих
  – при діаметрі від 20 до 60 мм включно – +0,4 мм;
  – при діаметрі більше 60 до 90 мм включно – +0,5 мм;

– за товщиною стінки:
  – гарячедеформованих з відношенням $D_{зовн} / S$ = 11± 15%;
  – холоднодеформованих – +12%.

Труби повинні виготовлятися довжиною:
  – гарячедеформовані – від 2 до 5 м;
  – холоднодеформовані – від 2,5 до 4,5 м.

Овальність і граненість за зовнішнім профілем холоднодеформованих труб не повинна перевищувати 0,8 граничного округлення за зовнішнім діаметром. Різностінність труб не повинна перевищувати граничних відхилень за товщиною стінки. Хвилястість зовнішньої поверхні холоднодеформованих труб не повинна перевищувати 0,3 мм на довжині хвилі не менше 300 мм. Кривизна труб допускається не більше 1 мм на 1 м довжини. Кінці труб повинні бути обрізані під прямим кутом і мати із зовнішньої поверхні фаски шириною 1…3 мм.

Труби не повинні мати тріщин, закатів і пльон. Допускаються інші поверхневі дефекти, що не виводять зовнішній діаметр і товщину стінки за межі мінімальних розмірів. На зовнішній обточеній поверхні труб не допускаються волосовини, чорнота й плями іржі. Шорсткість зовнішньої обточеної поверхні R_z повинна бути від 80 до 40 мкм.

Гарячедеформовані труби повинні виготовлятися з твердістю 207…187 *НВ* для сталей марок ШХ15, ШХ15-Ш, та 217…197 *НВ* для сталей марок ШХ15СГ і ШХ15СГ-Ш.

Холоднодеформовані труби повинні виготовлятися відпаленими з твердістю 255…207 *НВ*.

У зламі загартованого зразка, а також у макроструктурі протравленого поперечного темплету труби не допускаються тріщини, усадочна рихлість, бульбашки, перепал, флокени, розшарування і сторонні включення (*опис дефектів – див. розділ 2*), видимі неозброєним оком. Контроль на злам може не проводитися, відсутність дефектів забезпечується контролем макроструктури.

Мікроструктура готових труб повинна складатися з дрібнозернистого перліту з рівномірно розподіленими карбідами. Точкова неоднорідність у металі вихідної заготовки труб зі сталі марок ШХ15, ШХ15-Ш і ШХ15СГ не повинна бути більше бала 2,5. Залишки карбідної сітки допускаються не вище 3-го бала. Карбідна ліквація в металі готових труб з усіх марок сталі не повинна перевищувати 1,5 бали.

На зовнішній поверхні гарячедеформованих труб обезвуглецювання не допускається, на внутрішній поверхні глибина обезвуглецьованого шару (ферит плюс перехідна зона) не повинна перевищувати 0,7 мм. На зовнішній і внутрішній поверхнях холоднодеформованих труб глибина обезвуглецювання шару не повинна перевищувати 0,3 мм. Також нормується максимально допустима забрудненість металу труб неметалевими включеннями.

Результати оцінки вказують у документі про якість.

Відхилення від вказаних параметрів допускаються за узгодженням виготовлювача зі споживачем.

Труби пред'являються до приймання партіями. Партія повинна складатися з труб одного діаметра, однієї товщини стінки, однієї плавки, одного режиму термічної обробки.

Маркування, пакування, транспортування та зберігання підшипникових труб здійснюють за ДСТУ 3058 з наступними доповненнями:

– на відстані від торця не більше 100 мм або на торці кожної труби повинні бути вибиті: номер деталі підшипника, для якої призначена труба, і умовне позначення марки сталі (Х – для марки ШХ15; Ш – для марки ШХ15-Ш; Г – для марки ШХ15СГ; ГШ – для марки ШХ15СГ-Ш);

– для запобігання корозії труби повинні бути покриті по зовнішній поверхні антикорозійним мастилом;

– у документі про якість додатково повинні бути зазначені найменування підприємства-виробника заготовки та номер деталі підшипника, для якої призначені труби.

У відповідності з наведеними вимогами на агрегаті 200 з тривалковим розкатним станом ПАТ «ІНТЕРПАЙП НТЗ» (м. Дніпро) прокатують труби діаметром 80…183,1 мм і товщиною стінки 7,3…38 мм.

Підшипникові сталі – це сталі заевтектоїдні (*див. підрозділ 1.2.2.2*), в практиці трубопрокатного виробництва застосовуються зрідка. В наслідок особливих властивостей цих сталей виготовлення з них труб вимагає застосування специфічної технології виробництва.

Заготовкою для прокатки таких труб є круглі катані штанги.

Граничні відхилення по діаметру трубної заготовки не повинні перевищувати:

- для діаметрів 100…110 мм – (+ 0,6)…(– 1,7)мм;
- для діаметра 115 мм – (+ 1,0)…(– 1,7)мм;
- для діаметрів 120…150 мм – (+ 1,2)…(– 2,0)мм;
- для діаметрів 160…190 мм – (+ 1,5)…(– 2,5)мм.

На зовнішньому складі сортування заготовки проводять за марками сталі і діаметрами.

Якість заготівки перевіряють співробітники ВТК за даними сертифікату якості і візуально. На поверхні заготовок не допускаються такі дефекти як тріщини, волосовини, раковини, пльони і пісочини. Поверхня заготовки може бути піддана ремонту постачальником шляхом пологої вирубки дефектів, механічною або вогняною зачисткою,

ширина якої не менше п'ятикратної глибини. Допускається наявність без зачистки окремих дрібних подряпин, вм'ятин, дрібних волосовин, рябизни, якщо глибина їх залягання не перевищує сумарного допуску по діаметру. Штанги можуть поступати обточеними по зовнішньому діаметру.

Заготовку, що потрапила в цех, розвантажують кранами, укладають на стелажі преса ломки, розмічають на необхідну довжину за допомогою рулетки відповідно до таблиці прокатки та надрізають автогеном на глибину 15…20 мм. Ломку штанги здійснюють на гідравлічному пресі з максимальним зусиллям 6 МН (600 т).

Після ломки заготовки оглядають, звертаючи увагу на наявність тріщин на кінцях, що не допускається. Нахил торця не повинен перевищувати 5 мм для діаметра заготовок до 120 мм і 7 мм – на діаметрі 120 мм і більше. Якщо нахил торця більш вказаних значень, заготовку направляють у прошивний стан рівним торцем. Далі заготовка транспортується рольгангом до завантажувального пристрою однієї з двох кільцевих печей, які працюють на природному газі. В останні роки через зниження об'ємів виробництва нагрів здійснюють в одній кільцевій печі.

Заготовки проходять крізь одну неопалювальну та п'ять опалювальних зон при повному оберті подини печі. У першій – неопалювальній – зоні, яка суміжна з вікном завантаження печі, відбувається первинний нагрів металу. Тут знімаються залишкові напруження, які можуть виникнути в результаті попереднього нерівномірного охолоджування заготовок у постачальника.

У решті зварювальних зон відбувається інтенсивний нагрів металу. Вирівнювання температури заготовки по усьому її об'єму здійснюється в опалювальній зоні томління.

Загальна тривалість 1…3 години нагріву заготовок залежить від їх діаметра та марки сталі. На вихідний рольганг метал потрапляє крізь вікно видачі.

Після цього заготовку передають до пневматичного центрувальника для нанесення на торці заготовки центровочного поглиблення діаметром 25…30 мм і глибиною 20…25 мм, що забезпечує необхідну установку носика оправки прошивного стана по осі заготовки під час наступної прошивки.

Оптимальним температурним інтервалом прошивки Сталі ШХ15 є діапазон температур 1080…1150 °С. Обробка при температурах близьких до вказаної нижньої межі не завжди можлива, особливо, при виготовленні труб з відносно тонкою стінкою унаслідок збільшення опору деформації металу. Перевищення верхньої межі температур, особливо, при низькій якості металу може привести до кільцевої рихлості або появи пльон на внутрішній поверхні труб.

Нагріту суцільну заготовку прошивають у двовалковому прошивному стані з двома чашоподібними валками (діаметр 1100…1035 мм; довжина бочки 600 мм; кут розкатки – 7°; кут подачі – 0…13°) та обмежувальними лінійками. Привід валків – від електродвигуна потужністю 3860 кВт. Діаметр заготовки 100…250 мм.

Гільза, видана з прошивного стану, скочується по стелажу в жолоб розкатного стану. Притискний пристрій фіксує гільзу в жолобі, а задавання гільзи з оправкою у валки стану здійснюється візком-штовхачем.

Розкатку гільзи в тривалковому розкатному стані проводять на довгій оправці, яка вільно переміщується в осьовому напрямі.

Тривалкова кліть барабанного типу має робочі валки діаметром 450 мм з довжиною 375 мм; кут розкатки (регульований) 4…1°; кут подачі 0…12°; привод – від електродвигуна потужністю 2100 кВт. Розміри прокатуваних труб: діаметр 78…203 мм; товщина стінки 7…50 мм.

Після розкатки оправку витягують з труби за допомогою оправковитягувача.

Калібрування труб здійснюється у тривалковому калібрувальному стані 200 з діаметром робочих валків 335…375мм; зміним кутом подачі 0…14°; кутом розкатки 4°; приводом від електродвигуна потужністю 480 кВт.

Перед задаванням труб у калібрувальний стан 200 їх підігрів і вирівнювання температури здійснюється у печі з крокуючими балками. Дозволяється також робота стану без підігріву труб за умови дотримання стабільності темпу прокатки, що забезпечує регламентовану температуру труб після калібрувального стану. Ця температура повинна бути в діапазоні 870…910 °С, після чого труби охолоджуються вентиляторами до температури не вище 630 °С. Труби з товщиною стінки 12 мм і більше додатково охолоджують у спрейерній установці до температури декілька нижче за точку A_{c1} (для сталі ШХ15 цьому відповідає 750 °С).

Застосування прискореного охолоджування труб у поєднанні з обмеженням температури кінця прокатки на калібрувальному стані дозволяє, здебільшого, отримувати труби без карбідної сітки в металографічній структурі. Проте при виробництві труб з дуже товстою стінкою ці заходи все ж таки не гарантують від появи карбідної сітки, яку доводиться усувати подальшою нормалізацією (*див. вище*).

Прокатані підшипникові труби проходять термічну обробку для отримання рівномірної структури зернистого перліту. Окрім нормалізації, застосовують також сфероїдизуючий відпал в прохідних роликових печах (нагрів за 50 хв. до 800 °С, витримка 1 год. 40 хв., зниження температури до 640 °С упродовж 50 хв., підйом температури упродовж 40 хв. до 760 °С і витримка при цій температурі 1 год., витримка при температурі 735 °С до 4 год. із закінченням процесу через 10 год. при температурі 670 °С).

При оздоблюванні труб здійснюють такі операції:

– відбір проб і проведення випробувань для визначення відповідності властивостей металу вимогам нормативної документації по мікро– і макроструктурі, твердості, карбідній сітці, неметалевим включенням і товщині зневуглецьованого шару;

– правка труб на 7-валкових прав***и***льних машинах;

– обрізання кінців труб із зняттям зовнішніх фасок і внутрішніх заусенців;

– продування труб для видалення окалини;

– механічна обробка труб на безцентрово-токарному верстаті, чистова обточка труб по зовнішній поверхні;

– розрізання на мірні (замовлені) довжини та консервація труб.

Точність гарячекатаних труб, насамперед – зменшення їх овальності по діаметру перед обточкою може бути покращена шляхом уведення додаткової технологічної операції – *обкатки труб по діаметру* перед обточкою на двовалковому стані гвинтової прокатки з лінійкою (рисунок 1.110), який зазвичай використовують для обкатки довгих оправок розкатного стану. Такий операції має передувати нагрів труб у прохідній роликовій печі.

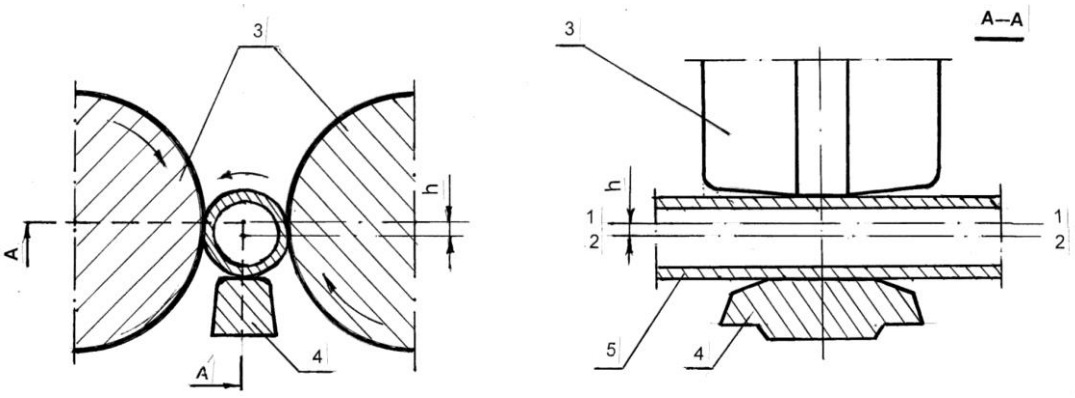


Рисунок 1.110 – Схема обкатки підшипникових труб [44]: 1-1 – вісь обкатного стану; 2-2 – вісь прокатки; 3 – валок стану; 4 – лінійка; 5 – труба

У декілька іншому виді і з валками інших конструкцій процес гвинтової прокатки використовують для одержання куль, свердл тощо.

Зокрема, ще із середини XX ст. відомий ***процес прокатки куль на спеціальних станах*** (*див. рис. 1.89*), який включає наступні операції.

Нагріта заготовка круглого перерізу переміщується між двома косо розташованими валками, що обертаються, кожен з яких має круглий калібр, утворений струмками, що виконані на поверхні валків по гвинтовій лінії. Профіль та розміри калібру відповідають формі та розмірам куль, що виготовляються.

Внаслідок збільшення висоти бурту калібра метал піддається обтиску, набуває форми кулі, а в кінцевому підсумку, відділяється у вигляді кулі від основної маси заготовки.

За один оберт валків отримують кількість куль, що відповідає кількості заходів гвинтових калібрів на валках.

Характеристикою при маркуванні стану є діаметр прокатуваної кулі. У вітчизняній металургії працюють кулепрокатні стани 25…50, 40…80, 80…125.

Продуктивність кулепрокатних станів (45…385 шт/хв.) залежить від частоти обертання валків, їх калібрування та діаметра кулі. При цьому забезпечується допуск 0,2…0,4 мм по діаметру при виготовленні млинових куль діаметром 25…125 мм.

Процес прокатки куль, призначених для підшипників, подібний представленому.

Головними споживачами ***холоднокатаних (холоднодеформованих) безшовних труб*** є машинобудування, авіа– і суднобудування, хімічна промисловість, атомна енергетика та інші. Також виготовляють труби-заготовки для подальшої деформації.

Перелік нормативної документації щодо виготовлення холодно– та теплодеформованих труб наведено в таблиці А1 Додатку А.

Труби виготовляють звичайної, підвищеної та високої точності, що визначається граничними відхиленнями по діаметру і товщині стінки.

Овальність таких труб не повинна виводити їх діаметр за граничні відхилення по зовнішньому діаметру. Кривизна труб на будь-якій ділянці довжиною 1 м не повинна перевищувати: 1 мм – для труб діаметром 5 мм і більше при товщині стінки 0,5 мм і більше; 2 мм – для труб діаметром більше 15 мм при товщині стінки менше 0,5 мм. Для труб діаметром менше 15 мм при товщині стінки менше 0,5 мм норми кривизни не регламентуються, ці труби не повинні мати різких перегинів.

Обмежується величиною 0,02% вміст сірки в сталі для труб, що підлягають зварюванню.

Труби повинні бути термічно обробленими.

Зовнішня та внутрішня поверхні труб повинні бути світлими, без пльон, рванин, тріщин. Допускається видалення дефектів місцевої зачисткою, суцільним або місцевим шліфуванням, розточенням і обточуванням за умови, що величина розточування, обточування, шліфування не виводить діаметр і товщину стінки за мінусові граничні відхилення.

За побажанням споживача може виконуватись і ряд інших вимог для певних марок сталі, наприклад, визначення величини σ_T ; випробування на розтягнення при температурі 350°С; забезпечення стійкості проти міжкристалітної корозії; відсутність термічної обробки та освітлення поверхні; випробування на сплющування та (або) гідравлічний тиск тощо. В останньому випадку труби повинні витримувати гідравлічний тиск у відповідності до вимог ДСТУ ГОСТ 3845 при напруженні, що дорівнює 80% межі текучості для даної марки сталі, а також – випробування на загин та сплющування. На вимогу споживача труби повинні бути піддані контролю якості металу неруйнівними методами за затвердженими методиками.

Зокрема, *сталеві холоднокатані труби для трубопроводів* згідно ДСТУ 3666 виготовляють із зовнішнім номінальним діаметром $D_н = 10…220$ мм, відповідною товщиною стінки $S = 1…22$ мм та масою 1 м труби.

За погодженням виробника зі споживачем допускається поставка труб «по внутрішньому діаметру і товщині стінки», а також «по зовнішньому і внутрішньому діаметрам і разностенності». Труби також можуть виготовлятися з проміжними до вказаних в ДСТУ 3666 значеннями зовнішнього діаметра та товщини стінки.

Довжина труб, граничні відхилення за розмірами, овальність, різностенність і кривизна повинні відповідати ДСТУ 8939, а для *прецизійних* труб – за погодженням виробника зі споживачем. Також труби можуть виготовлятися з комбінованими граничними відхиленнями, наприклад: по зовнішньому діаметру підвищеної точності, а по товщині стінки – звичайної точності.

Холоднодеформовані труби виготовляють зі сталей марок 10, 20; 10Г2, 30ХМА і 15ХМ; 09Г2С; 10Г2А та ін.

Труби поставляються термічно обробленими і такими, що мають визначені стандартом ДСТУ 3666 механічні властивості (σ_B, σ_T, δ_5 та – на вимогу споживача – ударна в'язкість).

На зовнішній та внутрішній поверхнях труб не допускаються тріщини, пльони сталеплавильного походження, ужими, рванини, продави, розшарування, перетрави, сторонні розкатані забруднення, розкатані металеві включення. Допускаються вм'ятини, риски, дрібні пльони трубопрокатного походження, окалина (сліди окалини, що відшарувалася); рябизна, відбитки, сліди правки і зачистки дефектів та інші дефекти механічного походження, якщо вони не виводять товщину стінки за мінімальне значення. На вимогу споживача поверхня труб повинна бути очищеною від окалини і (або) мастила. Кінці труб повинні бути обрізані під прямим кутом і зачищені від задирок, а на кінцях труб з товщиною стінки 5 мм і більше повинні бути зняті фаски під кутом 30…35° до торця труби.

Певні особливі вимоги до якості *труб з корозійностійкої сталі* містить ДСТУ 8937. Згідно з цим нормативним документом труби виготовляють із зовнішнім номінальним діаметром $D_н = 5…273$ мм і відповідною товщиною стінки $S = 0{,}2…22$ мм мірної довжини 5…7 м при граничному відхиленні по довжині +15 мм. За погодженням виробника зі споживачем допускається виготовлення труб мірної довжини більше тієї, що зазначена в стандарті, з довжиною, кратної мірній в межах мірної, з припуском на кожен різ по 5 мм.

У стандарті регламентуються марки сталі певного складу, з яких виготовляють такі труби, величини σ_B та δ_5.

Труби зі сталі марок 12Х17, 08Х17Т, 15Х25Т виготовляють із зовнішнім діаметром не менше 21 мм, а зі сплаву 06ХН28МДТ – із зовнішнім діаметром 14…250 мм і товщиною стінки 1…5 мм.

Вище було відмічено, що процесс подовжньої прокатки холодно– та теплодеформованих труб може здійснюватись *валками* на «*станах ХПТ*» та *роликами* – на «*станах ХПТР*». При цьому, обтиснення ведеться як по діаметру, так і по товщині стінки. При цьому виготовляються тонкостінні труби діаметром 16…450 мм і відповідною товщиною стінки 0,4…35 мм з високолегованих сталей, титану, інших кольорових металів та сплавів, деформація яких є утрудненою (див. Додаток А).

За кордоном на аналогічних станах отримують труби з мінімальним діаметром до 4 мм і товщиною стінки до 0,2…0,3 мм; на вітчизняних підприємствах останні виробляють волочінням (*див. далі*); відомі відповідні успішні спроби з використанням тільки станів ХПТР [44].

Технологія виготовлення холоднодеформованих труб прокаткою включає наступні підготовчі, основні (обробка тиском, термообробка) та оздоблювальні операції:

– контроль якості та розбракування вихідних гаряче– або холоднокатаних труб-заготовок, видалення дефектів абразивної зачисткою або токарна обробка всієї поверхні;

– розрізання труб-заготовок на потрібні довжини, зачистка торців перед прокаткою;

– попередня термообробка труб-заготовок (при необхідності) для відповідних марок сталей і кольорових металів;

– набір пакетів труб;

– видалення окалини з поверхні гарячедеформованих та термооброблених труб-заготовок шляхом їх травлення (в останні роки з метою інтенсифікації процесів хімічної обробки труб знаходять застосування установки з циркуляцією і зміною розчинів під тиском);

– промивання труб у ванні з гарячою водою та струменями холодної води, сушка в камері при 120…180 °С з метою видалення водню з поверхневих шарів металу, та запобігання тим самим прояву травильної крихкості;

– остаточний огляд заготовок, при необхідності – ремонт, шліфування і відбраковування;

– нанесення подмастильних твердих покриттів (обміднення, фосфатування або оксалатування у залежності від марки сталі або сплаву та способу подальшої деформації) з метою підвищення адгезії мастила до по поверхні труби;

– попереднє нанесення мастила на труби шляхом занурення пакетів у ванни з підігрітими до 40…80 °С емульсіями, рідкими маслами або сольовими розчинами,

– сушка труб (якщо нанесення мастила у ваннах не здійснюється, то воно подається безпосередньо на валки станів ХПТ у вигляді емульсії, що виконує функцію мастильно-охолоджуючої рідини); для змащення оправок всередину труб уводять консистентні масла або подають емульсію крізь порожнисту оправку;

– прокатка на стані ХПТ;

– розрізання труб на потрібні довжини, торцювання; продування труб повітрям для видалення стружки і металевого пилу;

– знежирення труб з високолегованих сталей і сплавів у лужних розчинах (розплавах) і освітлення в кислотних розчинах для запобігання навуглецюванню в процесі подальшої термообробки, яка може призвести до міжкристалітної корозії, і отримання чистої поверхні після термообробки;

– остаточна термообробка труб в камерних чи прохідних печах або апаратах електроконтактного нагріву для отримання необхідної структури та властивостей, переважно – в захисній атмосфері або в вакуумі;

– травлення і освітлення труб, головним чином – з високолегованих сталей і сплавів, що пройшли термообробку в печах без використання захисної атмосфери або вакууму;

– правка труб: попередня – на ексцентрикових пресах або станах подовжньої правки з паралельними роликами; заключна – в станах гвинтовий правки з косорозташованими роликами;

– шліфування або полірування поверхні труб з високолегованих сталей і сплавів шляхом обробки абразивними кругами, стрічками або електрохімічним способом;

– обрізка кінців труб, контроль розмірів, якості поверхні, наявності дефектів, металографічний контроль, механічні випробування, випробування внутрішнім гідравлічним тиском, корозійні випробування труб з нержавіючих сталей, розбракування, видалення дефектів, нанесення тимчасових антикорозійних покриттів. На вимогу споживача труби повинні проходити контроль ультразвуком.

Окремо здійснюють операції підготовки оправки до використання, введення оправки в трубу-заготовку перед прокаткою та вилучення її з труби після прокатки.

Труби приймають партіями. Партія повинна складатися з труб одного розміру по діаметру і товщині стінки, однієї марки сталі та одного виду термічної обробки, а на вимогу споживача – однієї плавки і бути оформлена одним документом про якість згідно з діючими НД з доповненням: хімічний склад – відповідно до документа про якість на трубну заготовку, а також відомостей про термічну обробку. Кількість труб в партії має бути не більше 300 шт. Партії мають бути марковані та упаковані. Їх транспортування і зберігання проводять згідно з вимогами НД.

При виготовленні надтонких труб деформація металу може здійснюватись за 6…10 проходів на станах ХПТ, ХПТР (*див. вище*), оправочним і (або) безоправочним волочінням (*див. нижче*), часто – в єдиному технологічному потоці. При цьому, загальна кількість операцій може сягати 200…250. Витратний коефіцієнт металу при цьому, враховуючи операції механічної обробки заготовки, може бути 1,5 і більше.

Заготовку для холодного перероблення з вуглецевих і низьколегованих сталей отримують прокаткою на трубопрокатних агрегатах усіх типів, крім агрегатів з пілігримовими станами, а також – на горизонтальних і вертикальних пресах. Заготовку з нержавіючих і жароміцних сталей, а також зі сплавів титану, як правило, виготовляють пресуванням, хоча у вітчизняній практиці для цього широко й успішно використовують агрегати з автоматичним станом. Останнім часом в якості заготовки для наступної холодної прокатки труб використовують електрозварні труби, а гільзи з малопластичних сталей і сплавів виготовляють відцентровим литтям. Необхідною умовою є відсутність на поверхні заготовок тріщин, глибоких подряпин, волосовин, рисок та інших дефектів, які виключають можливість виготовлення високоякісних труб.

Типовим вітчизняним представником підприємств з виготовлення безшовних труб з нержавіючої сталі є Холдінг ЗАТ «СЕНТРАВІС Продакш ЮКРЕЙН» (м. Нікополь), доля якого на світовому ринку безшовних нержавіючих труб становить до 5% при можливостях загального виробництва біля 350 тис. тонн на рік.

Це підприємство здійснює поставку труб у відповідності з 62 вітчизняними і зарубіжними нормативними документами ДСТУ, DIN, ASTM, NF та ін., з більше ніж 60 марок сталі (12Х18Н10Т, 10Х17Н13М2Т, 10Х23Н18, 15Х25Т, 06ХН28МДТ, 10Х17Н15М3Т, ДІ-59, 304L, 316L та ін.).

Основу технологічного устаткування підприємства складають 21 стан холодної прокатки (ХПТ), 15 роликових станів (ХПТР) і 4 стани безоправочного волочіння, на яких виробляють труби діаметром 4…114 мм з товщиною стінки 0,2…12 мм.

Прокатка залізничних коліс і бандажів

Суттєві відзнаки притаманні ***процесу виготовлення залізничних коліс з використанням технологій обробки тиском, зокрема, на основі прокатки***.

Залежно від призначення, колеса виготовляють діаметром від 650 до 1300 мм масою від 250 до 1050 кг. Більше 80% коліс випускається згідно з вимогами ДСТУ ГОСТ 10791 «Колеса суцільнокатані». У стандарті нормуються розміри коліс, допуски на діаметр, товщина, маса, наведено креслення і допуски на шаблони для перевірки коліс.

Особливістю залізничних суцільнокатаних коліс (рисунок 1.111) є те, що вони є не тільки опорою вагона, а й гальмівним барабаном, що істотно ускладнює умови їх експлуатації, додаючи до механічних навантажень тепловий вплив.

Характерними механічними навантаженнями *в процесі експлуатації* коліс є сили:

– *радіальні* статичні та динамічні, амплітуда і частота яких залежать від навантаження на ось, швидкості руху, стану колії, конструкції вагона та ін;

– *бічні і випадкового характеру*, які залежать від швидкості руху і дисбалансу колеса;

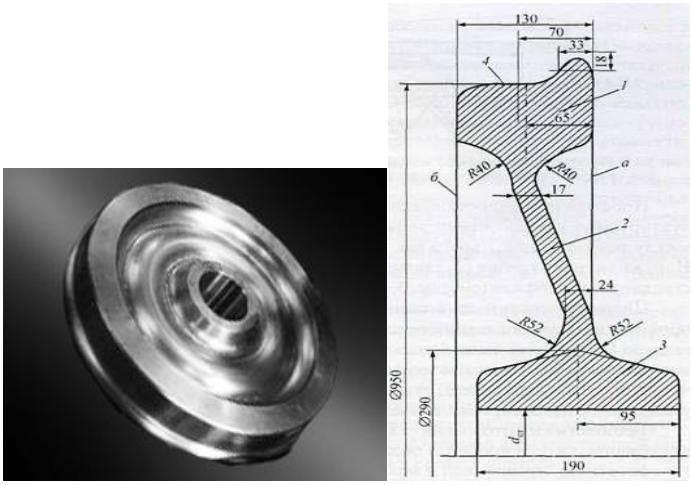
– *динамічні від ударів об стики рейок*;

– *відвідцентрові*, які залежать від маси колеса і швидкості його обертання;

– *тертя* при коченні колеса, при стримуванні гальмівними колодками, при русі юзом по рейках загальмованого колеса.

Колеса можуть працювати при знакозмінних температурних умовах.

При визначенні марки сталі для виробництва коліс керуються як загальноприйнятними міркуваннями (економічність, технологічність), так і умовами експлуатації коліс. Спеціально для них визначений наступний хімічний склад сталі, у мас. %: 0,52…0,60 *C* (для окремої групи коліс допускається 0,57…0,65 *C*); 0,5…0,9 *Mn*; 0,17…0,37 *Si*; 0,25 *Cr*, не більше по 0,04 *P* та *S*.



а *б*

Рисунок 1.111 – Загальний вигляд залізничного колеса з діаметром по колу катання 957 мм (*а*) та його креслення згідно з ДСТУ ГОСТ 10791 (*б*) [93]

Ці основні чинники обумовлюють певні особливості процесу деформації металу та технологічного процесу виробництва коліс (так саме – як і бандажів для коліс та кілець).

Такий процес прокатки на колесопрокатному (кільцепрокатному) стані заключається в обробці кільцевого металу в калібрі, утвореному похилими і натискними валками [93] (рисунок 1.112).

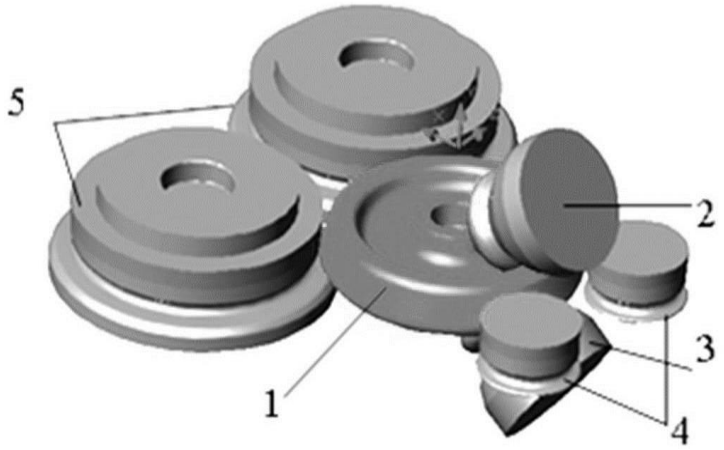


Рисунок 1.112 – Схема прокатки залізничного колеса [95] (*пояснення позицій – у тексті*)

Два вертикальні валки 5 (один з яких приводний) служать для формування робочої поверхні колеса 1. Похилий приводний валок 2 обробляє внутрішню поверхню виробу. Направляючі ролики 4 підтримують метал. Один з валків на спеціальній каретці 3 має можливість переміщуватись відносно валків 5 при збільшенні діаметра прокатуваного колеса.

В результаті, якщо в якості визначальної ознаки різновиду процесу прокатки прийняти взаємне розташування осей валків (деформуючих роликів) і заготовки, а також напрями руху поверхонь інструменту та металу, який деформується, то цей процес одержує риси подовжньої (навіть – безкінечної) та поперечної прокатки. Його особливість зумовлена використанням суцільної за кругом заготовки, що вимагає точного розрахунку її розмірів з урахуванням видовження за колом при реалізації багатьох циклів обертання з поточним деформуванням метала та геометрії колеса.

При прокатці колісних заготовок забезпечується формування поверхні катання і гребеня будь-якої заданої форми, а розкатка по діаметру дозволяє при порівняно малих потужностях електрогідравлічних приводів отримати вироби діаметром до 1500 мм.

Слід зазначити, що теорія цього процесу розроблена недостатньо, і більшість відомих залежностей отримана експериментально. Схеми напружень та деформацій різні в різних місцях заготовки, яка піддається формозміненню.

Типовим є ***процес виготовлення коліс (так саме, як і бандажів для коліс)*** в умовах ВАТ «ІНТЕРПАЙП НТЗ», який повністю задовольняє відповідні потреби України, а також забезпечує значну долю експорту.

Загалом, процес виробництва коліс здійснюється шляхом поєднання ковальсько-пресової обробки і прокатки.

Колесопрокатний цех включає в себе лінії:

−пресопрокатну – для виробництва коліс діаметром від 650 до 1269 мм;

−пресопрокатну – для виробництва кілець і бандажів;

−механічної обробки коліс;

−термічної обробки коліс і бандажів;

−дробоструйного зміцнення коліс;

−неруйнівного контролю коліс і бандажів (ультразвуковий, магнітно-порошковий і твердомірний контроль [1];

−остаточної обробки коліс і бандажів.

Основні технологічні операції виробництва коліс наступні:

– різання і ламання холодних злитків на заготовки зі зважуванням і розсортуванням останніх за ваговими групами;

– нагрівання заготовки до температури 1200…1250 °С у спеціальних печах секційного нагріву з обертовим подом;

– обтиснення (осаджування) на пресі заготовки до висоти приблизно 200 мм, що відповідає технологічним параметрам. При цьому, окалина, що залишилася, здувається за допомогою пари; потім ця заготовка вдруге піддається осаджуванню до висоти приблизно 105 мм з одночасним здійсненням прошивки отвору;

– штампування заготовки в чорнове колесо на другому пресі з формуванням маточини і обода колеса;

– розкатка заготовки на 7-валковому стані (*див. рис. 1.112*), де формуються обод, диск та ступиця колеса;

– калібрування коліс з допуском на механічну обробку і вигин диска на третьому пресі. Одночасно на цьому ж пресі прошивають у диску два отвори, і здійснюють нанесення клейма щодо марки сталі та дати виготовлення). Калібровані колеса після третього преса повинні мати температуру не нижче 800…850 °С;

– охолодження коліс до температури 550…600 °С на шлеперному холодильнику з регульованою швидкістю руху;

– термічна обробка коліс: нагрівання металу в кільцевих печах до гартівної температури та охолодження при обертанні колеса з частотою 30 об/хв. водою з температурою 25…30 °С, яка подається на поверхню кочення колеса, під тиском 4 атм протягом 60…80 с на спеціальних гартівних столах. Після цього колеса піддають відпусканню: нагрівання в колодязних відпускових печах і охолодження до температури 350…400 °С з наступним охолодженням на повітрі;

– детальні випробування. Перш за все, контролюють твердість кожного колеса: вона повинна бути в межах середнього значення 400 *НВ*. Від партії (125 коліс) відбирають одне колесо для копрових випробувань. Від групи коліс однієї плавки відбирають зразки для визначення механічних властивостей;

– колеса, що мають необхідні механічні характеристики, передають до відділення механічної обробки, де на спеціальних верстатах проводять механічну обробку коліс: обточування маточини, обода, отвору тощо.

Здійснення вказаних операцій повязане з певними особливостями.

Режим нагріву заготовок в одній кільцевій печі з двох наявних або послідовно в двох цих печах, які працюють на природному газі, визнається продуктивністю пресо-прокатної лінії, а також економічними показниками процесу. Нагрів заготовки до можливо більш високої температури забезпечує необхідну технологічну пластичність і мінімальний опір металу деформації. Однак, перегрів металу може призвести до втрати пластичності, що пов'язано з розвиненими явищами ліквацийного характеру у металі.

Надзвичайно важливою вимогою при нагріванні заготовок є мінімальний перепад температур як за перетином, так і по колу. Це істотно позначається на концентричності коліс, зменшенні кількості поверхневих дефектів, зниженні напружень у заготівці та ін.

Угар металу при нагріванні заготовок становить 2…3%. При нагріванні на поверхні заготовок утворюється окалина, яку видаляють в камері гідрозбиву окалини, встановленій після кільцевих печей. Тиск води в камері становить 18…22 МПа.

Незбиту окалину додатково видаляють бурою ($Na_2B_40_7 \cdot 10\ H_2O$) – технологічною підсипкою, яку наносять на верхню торцеву поверхню заготовки.

Пресово-прокатна лінія в колесопрокатному цеху складається з чотирьох пресів і колесопрокатного стану.

Перший прес гідравлічний із зусиллям 20 МН, розташований після камери гідрозбиву окалини, служить для попереднього осаджування заготовок (на 50…60% висоти) з метою видалення залишків окалини з їх бічних поверхонь.

Наступний прес із зусиллям 50 МН забезпечує осаджування заготовки в технологічному кільці і розгонку металу пуансоном, що забезпечує виконання розмірів маточини та отримання необхідної товщини диска у маточині.

Після обробки металу на цьому пресі можуть виникнути такі дефекти:

– запресовка окалини (внаслідок неякісного нагріву, незадовільної роботи гідрозбиву, відсутності підсипки);

– різнотовщинність (внаслідок незадовільної настройки та центровки преса);

– розгонка не по центру (внаслідок розцентровки пуансона або центрователя технологічного кільця);

– місцеві поглиблення на заготовці (внаслідок незадовільного охолодження плит або неякісного видалення окалини);

– рванини (внаслідок перепалу чи незадовільної якості металу або зносу плит).

На наступному формувальному пресі із зусиллям 100 МН здійснюється формовка заготовки з необхідними розмірами маточини та прилеглої до неї частини диска, підготовка ободу для подальшої прокатки на колесопрокатному стані.

Тут деформація заготовки здійснюється «за відміткою» до заданої товщини диска при чіткому оформленні торцевих поверхонь маточини, а також рівномірного відбитка формувального кільця за всім колом. Заготовка формується без центрального отвору в ступиці (залишається перемичка).

Після завершення деформації здійснюють витримку металу під навантаженням протягом 1…3 с.

Технологічний інструмент встановлюють у верхньому і нижньому штампоутримувачах.

На пресі передбачена система охолодження інструмента та нанесення на нього бездимного мастила. Для визначення ступеня деформації на пресі встановлений покажчик ходу траверси у вигляді дискового циферблата з обертовою стрілкою.

Після преса із зусиллям 100 МН можлива поява низки дефектів на заготовці:

– різноширинність та різнотовщинність ободу (внаслідок незадовільної центровки штампів, різнотовщинності заготовки, яка надійшла на прес, розцентровки центрователя);

– невиконання маточини (внаслідок незадовільної розгонки металу на попередньому пресі «50 МН», нерівномірного нагріву заготовки, недостатнього зусилля деформації, відхилення за вагою заготовок);

– складка маточини (внаслідок високої грибоподібної шийки на вихідній заготовці);

– відбитки від штампів (внаслідок зносу поверхні штампів, наявності на їх поверхні тріщин, окалини, недостатнього охолодження штампів);

– козирок на торцях маточини (внаслідок зносу опорних поверхонь штампоутримувача, появи завеликого зазору між напівоправкою і штампом);

– тріщина на диску з внутрішньої сторони (внаслідок забитих отворів для виходу води з нижнього штампа);

– «підріз» диска з внутрішньої сторони (внаслідок неправильної розгонки на пресі 50 МН).

Після преса «100 МН» заготовка рольгангом надходить до колесопрокатного стану, конструкція якого дозволяє отримувати колеса з різними розмірами.

Обтиснення обода колеса по ширині ведуть до зіткнення похилих валків з поверхнею відштампованої частини диска та виключення зазору між похилими валками та внутрішньою поверхнею ободу, далі – натискними валками в радіальному напрямку, а остаточне обтиснення по ширині здійснюється одночасно з розкаткою обода та диска за діаметром.

Після розкатки колеса до необхідної величини, робота стану переводиться до режиму «полірування». Поверхня розкатаної частини диска колеса повинна бути рівною, з плавною зміною товщини диска.

Після прокатки можлива поява низки дефектів:

– різкий перехід диска (внаслідок надто великої товщини диска попередньо продеформованої заготовки, некваліфікованої роботи вальцювальника, несправності обладнання);

– великий або малий розмір внутрішнього діаметра (внаслідок несправності механізма розкатки або незадовільного налаштування стану);

– широкий або вузький обод (внаслідок зносу похилих валків, незадовільного налаштування стану);

– товстий або тонкий гребінь (внаслідок зносу натискних валків, неправильної їх установки по висоті, вироблення струмка корінного валка);

– короткий гребінь (внаслідок зносу натискних та головного валків);

– товстий або тонкий диск обода (внаслідок незадовільного налаштування стану, зносу похилих валків);

– відбитки по диску та ободу колеса (внаслідок наявності сітки розпалу, раковин, напливів металу на робочій поверхні похилих валків);

– недокат ободу чи гребеня (внаслідок незадовільного нагріву заготівки, неповного формування заготовки на пресі «100 МН»);

– закат по гребеню (внаслідок незадовільного налаштування валків стану);

– пльони і рябизна по диску із зовнішнього боку (внаслідок зносу верхнього похилого валка та верхньої обтискний плити преса «50 МН»);

– пльони та рябизна по диску із внутрішньої сторони (внаслідок зносу нижнього похилого валка);

– закат по диску (внаслідок сітки розпалу, напливів і тріщин на поверхні формувальних штампів і осаджувальних плит);

– пльони по внутрішній стороні обода (внаслідок відбитків від нижніх виштовхувачів преса 100 МН).

Заготовка колеса з колесопрокатного стану подається до вертикального гідравлічного преса «35 МН», де на вигинальному штампі здійснюють вигин диска, калібрування обода по ширині та внутрішньому діаметру, прошивку отвору в маточині і нанесення маркування на ободі із зовнішнього боку колеса.

Після противофлокенної обробки (охолодження до 300...650 °С на конвеєрі довжиною 40 м зі швидкістю руху 1,1…1,75 м/хв. з подальшою ізотермічної витримкою на гаках у конвеєрних печах при температурі 600 ... 650 °С упродовж 3 год 15 хв. ± 15 хв.) колеса рольгангом передаються до конвеєрних печей (довжина тунельної конвеєрної печі 125 м, піч опалюється природним газом). При роботі однієї печі темп прокатки не повинен перевищувати 40 шт/год.; відповідно – 80 шт/год. і 120 шт/год. при роботі двох і трьох печей.

Колеса після ізотермічної витримки знімають з гаків, складають у стопи і виставляють на спеціально огороджену площадку для уповільненого охолодження. При необхідності колеса піддають нормалізації.

Після охолодження коліс до температури цеху строго поплавочно проводиться їх приймання із записом усіх розмірів у стелажну відомість. Візуальний огляд коліс не проводиться, оскільки вони надалі піддаються механічній обробці.

В умовах ПАТ «ІНТЕРПАЙП НТЗ» механічна обробка коліс проводиться в два етапи: попередня – до зміцнюючої термічної обробки, та остаточна – після проведення термічної обробки коліс і отримання задовільних результатів випробувань згідно з нормативною документацією.

До чистоти поверхні коліс пред’являються дуже високі вимоги, які задовольнити при використовуваних методах розливання сталі та деформуванні практично неможливо.

На ділянці попередньої механічної обробки обов'язково піддають обточуванню поверхню катання коліс, гребінь, торцеву поверхню обода з внутрішньої сторони і отвір у маточині. Крім того відповідно до вимог споживачів і можливостей наявного парку верстатів проводять механічну обробку інших поверхонь аж до обточування по всіх елементах поверхні колеса.

Після отримання позитивних результатів випробувань проводиться розточування отвору в маточині. На торці маточини придатних коліс клеймами наносять номери плавки і колеса.

Після проведення контролю, придатні колеса відправляють на механічну обробку на станках з числовим програмним управлінням. Контроль профілю кола катання і гребеня здійснюють шаблоном.

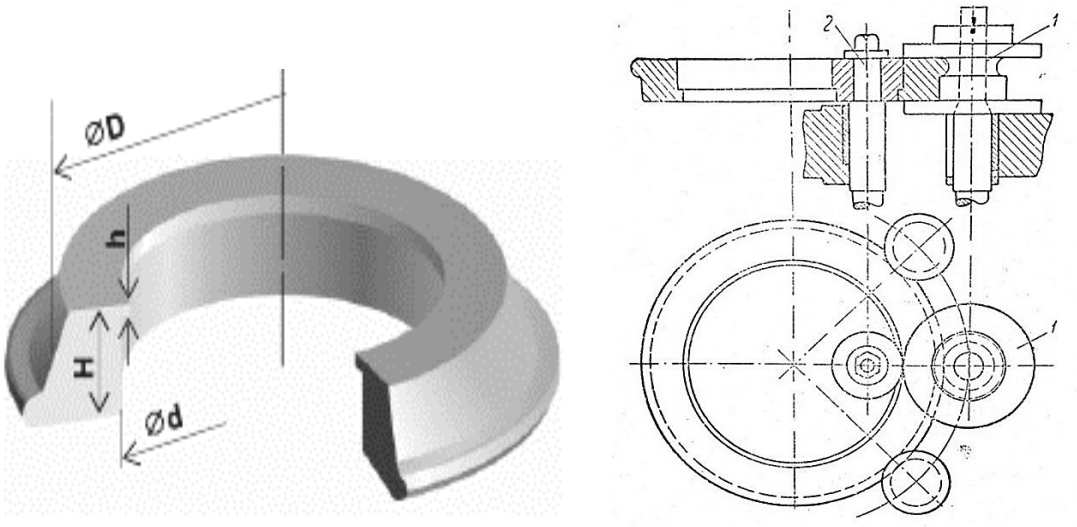
Колеса, що пройшли контроль, передають на ділянку сверлування масленочних і водільних отворів.

Всі колеса піддаються контролю на залишковий дисбаланс з його усуненням. Після цього здійснюється їх остаточне приймання (випробування механічних властивостей та якості металу), консервація натуральною оліфою, упаковка в касети та відвантаження.

Технологія ***виробництва бандажів (і кілець)*** аналогічна розглянутому процесу виготовлення залізничних коліс.

Бандаж (рисунок 1.113, *а*) має вгляд сталевого кільця фасонного профілю, що надягають у гарячому стані на колесо залізничного вагону, локомотиву, трамвая тощо. Він потрібний для зміцнення колісної пари при експлуатації [96, 97].

Бандажі виготовляють з діаметром кола кочення D=660…1260 мм; внутрішнім діаметром бандажа d=515…1090 мм, шириною ободу H=85…150 мм, шириною притискного бурту h= 15…50 мм і масою 100…490 кг за вимогами замовника до конструкції, хімічного складу та комплексом властивостей за нормами стандартів: ДСТУ 3717-98, UIC 810-1, 2; BS 5892, ч.4; TGLG-02-99 та ін., а також за рядом технічних умов. В цих документтах також регламентуються механічні властивості бандажів: $\sigma_B \geq 930…1110$ Н/мм^2; $\delta \geq 10\%$; $\Psi \geq 14\%$; твердість $HB \geq 269$; ударна в'язкість $A \geq 0{,}25$ Дж/см^2 при 20 °С.



а *б*

Рисунок 1.113 – Зовнішній вид бандажа (*а*) і схема його прокатки (*б*) [97]: 1 – зовнішній приводний валок; 2 – внутрішній натискний валок

Бандажі для рухомого складу залізниць виготовляють зі сталі, підданої позапічній обробці шляхом продування азотом, аргоном або вакуумуванню, певних марок, зокрема, за плавочним аналізом ковшової проби (у мас. %): 0,57…0,65 *C*; 0,22…0,45 *Si*; 0,60…0,90 *Mn*; до 0,15 *V*; $P \le 0{,}035$; $S \le 0{,}040$.

Бандажі піддають загартуванню окремим нагрівом з наступним відпущенням.

В бандажах не допускаються флокени, тріщини, розшарування і скоринки. Газові пухирі, рихлістисть, пористість і неметалеві включення допускаються в межах шкали макроструктур, встановленої за технічною документацією і затвердженої в установленому порядку. В бандажній сталі неметалеві включення мають бути із середнім балом не більше 4, а середній бал оксидних включень має бути не більше 2. На поверхні бандажів не допускаються прокатні пльони, закати, тріщини, забруднення, вкатана окалина.

Особливістю процесу виготовлення бандажів та кілець є те, що в якості початкової заготовки застосовують циліндричний злиток з великим отвором або змінюють форму штампів у пресах із забезпеченням внутрішнього отвору великого діаметра бандажа. Внаслідок цього, при прокатці деформація металу здійснюється за колом аналогічно прокатці колеса (*див. рис. 1.112*), одержуючи риси подовжньої та поперечної прокатки.

На ВАТ «ІНТЕРПАЙП НТЗ» виробляють більше 30 типорозмірів бандажів з гребенем і без нього для колісних пар локомотивів і вагонів, метро, трамваїв.

Пресово-прокатна ділянка кільцебандажної лінії включає:

– кільцеві нагрівальні печі, опалювальні природним газом, в яких метал нагрівається послідовно, або використовується одна піч;

– пресове обладнання для осаджування, формування й прошивки заготовок (гідравлічний осаджувальний прес зусиллям 20 МН з камерою гідрозбиву окалини; заготівельний прес зусиллям 40/20 МН з вагами, двома маніпуляторами і центрувачем заготовок; прошивний прес зусиллям 8 МН з кантувальником, підйомним столом, механізмами подачі та видачі заготовок);

– два кільцепрокатні стани, що можуть працювати послідовно як чорновий та чистовий або самостійно, та формувальний прес зусиллям 60 МН, на якому може здійснюватись виготовлення напівфабрикату методом гарячого штампування;

– пристрій для маркування продукції;

– прес гарячої правки.

Обладнання кільцебандажної лінії пов'язано між собою відповідними передавальними та транспортними пристроями і являє собою єдину технологічну лінію, що забезпечує потокове виробництво бандажів і кільцевих виробів.

Метал для виробництва бандажів поступає до заготівельного відділення кільцебандажної лінії у вигляді круглих злитків з прибутковими вставками, безперервнолитої заготовки або у вигляді індивідуальних заготовок з металу замовника.

Заготовки на злиткорозрізних верстатах піддають розкрою на індивідуальні заготовки та надрізці із залишенням «шийок» необхідного діаметру.

Після цього злитки ламають на злитколамачі. При цьому, донну і прибуткову частини видаляють, індивідуальні заготовки контролюють, піддаючи вибірковому контрольному зважуванню, при необхідності ремонтують, маркують і сортують по плавках і сортаменту.

Підготовлені заготовки поплавочно та за сортаментом нагрівають у печі до температури деформації в межах 1160…1280 °С.

На пресовій лінії заготовки поштучно осаджуються на гідравлічному вертикальному осаджувальному пресі зусиллям 20 МН, піддаються гідрозбиву окалини під тиском 20 МПа з верхнього і нижнього країв. Для попередження розігріву плит, зменшення їх зносу у період між осадженням заготовок з моменту вилучення останніх зі столу преса, осадкові плити охолоджують водою і змащують технологічним мастилом. Окалина з нижньої плити видаляється водою.

Потім заготовка підлягає зважуванню, штамповці, закритій та наскрізній прошивці.

На вертикальному заготівельному гідравлічному формувальному пресі зусиллям 40/20 МН отримують плоскі та фігурні штамповки круглого перетину з центральним поглибленням під прошивку. Осаджування заготовки проводиться до змикання штампів.

На прошивном пресі зусиллям 8 МН в заготовках прошивається центральний отвір.

Надалі, залежно від складності профілю і габаритних розмірів готового виробу, прошиті заготовки піддають прокатці на одному чи двох кільцепрокатних станах.

Устаткування ділянки забезпечує отримання бандажів з різним профілем поперечного перерізу методом гарячої прокатки на станах, а також методом штампування на пресі зусиллям 60 МН.

Кожний прокатний стан складається з вузла вертикальних валків, кліті похилих валків, центруючих роликів, столу розкатування і системи контролю параметрів (*див. рис. 1.113, б*). Вузол вертикальних валків включає зовнішній (приводний) і внутрішній (натискний) валки. *Внутрішній валок є інструментом деформації.* Розкатний стіл служить опорою для кільцевих виробів діаметром понад 1400 мм. Верхній і нижній похилі приводні валки, якщо вони встановлені в кліті (на рис. 1.113, *б* не показані), деформують прокатуваний кільцевий виріб в осьовому напрямі по торцях.

Температуру деформації підтримують у межах 900…1100 °С. Мінімально допустима температура закінчення прокатки на першому стані – 900 °С, а при послідовній прокатці – на другому стані – 870 °С. Деформація при прокатці кільцевих заготовок реалізується одночасно в осьовому напрямі (по товщині між торцевими валками) і радіально (між зовнішнім і внутрішнім валками).

Режим деформації кільцевих заготовок при прокатці в одну стадію включає чотири періоди:

– викатування різностінності при швидкості прокатки до 1 м/с, одиничних обтисненнях за оберт 3…5 мм упродовж 3…5 обертів заготовки;

– інтенсивний процес деформації при швидкості прокатки до 3 м/с, одиничних обтисненнях за оберт 10…15 мм. На долю цього періоду доводиться 95…98% деформації за перерізом виробу і зовнішнім діаметром;

– докатка при одиничних обтисненнях за оберт до 3 мм і швидкості прокатки до 3 м/с;

– усунення різностінності за периметром (овальності) виробу при постійно заданій установці радіальних і торцевих валків та швидкості прокатки до 1 м/с упродовж 2…4 обертів заготовки.

Послідовна прокатка кільцевих заготовок на двох кільцепрокатних станах передбачає:

– попереднє розкатування до заданих розмірів за зовнішнім діаметрои і висотою на першому стані в два етапи:

– викатування різностінності при швидкості прокатки до 1 м/с, одиничних обтисненнях за оберт 3…5 мм упродовж 3…5 обертів заготовки;

– інтенсивний процес деформації (до отримання заданих параметрів за зовнішнім діаметром і висотою) при швидкості прокатки до 3 м/с, одиничних обтисненнях за оберт 10…15 мм.

– остаточну прокатку до необхідних розмірів і форми поперечного перерізу – на другому стані за чотири основні етапи, які формально такі ж, як і при роботі одного стана.

Система вимірювань призначена для фіксації поточних значень зовнішнього діаметра виробу.

Формувальний прес зусиллям 60 МН розташований між кільцепрокатними станами і може бути використаний як агрегат для штампування різних виробів.

На прокатані (чи відштамповані) бандажі з їх зовнішньої торцевої поверхні наносять гаряче клеймо на гідравлічному вертикального типу пресі-клеймувальнику зусиллям 1 МН.

Маркування має обов'язково включати: умовне найменування заводу-виготівника, дату виготовлення, марку сталі, номер плавки, місце під клейма ВТК (інспекції), порядковий номер. Номер бандажа наноситься на обох торцях. За узгодженням із замовником допускається і додаткове маркування (наприклад, щодо порядку маркування, місця його розташування, глибини таврування). Набивання знаків маркування ручним способом, за винятком приймальних клейм ВТК (інспекції), не допускається. Бандажі з нечітко виштампованими знаками маркування мають бути забракованими.

Від преса-клеймувателя бандажі передаються рольгангом на ділянку вертикального гідравлічного преса гарячої правки, де при температурі не нижче 850 °С здійснюється виправлення овальності розтяжкою по внутрішньому діаметру, що перевищує 1,5% діаметра виробу у холодному стані.

Після преса гарячої правки бандажі транспортують до обробної частини цеху, де їх у спеціалізованих печах піддають противофлокенній обробці або ізотермічній витримці при температурі 650±10 °С тривалістю 6…8 годин; нагріву під закалювання або нормалізацію; термозміцненню; відпущенню).

Після термічної обробки проводять випробування зразків та візуальний контроль якості внутрішньої і зовнішньої поверхонь бандажів.

При механічній обробці бандажа обточуванню піддають його внутрішню поверхню.

Волочіння дроту, прутків і труб

Особливістю ***волочіння*** як виду ОМТ є те, що всі його різновиди представляють собою *протягування подовжньої заготовки зовнішньою силою* крізь отвір в інструменті, площа перерізу якого зменшується уздовж зони деформації. Відповідний інструмент називається «волокою» (рисунок 1.114) [44, 47, 48, 98].

Основна продукція волочіння – це суцільні (дріт, прутки) та порожнисті (труби) вироби круглого перетину. Волочінням також отримують різні профільні у перетині вироби (рисунок 1.115) великої довжини з характерним розміром від 2 мкм до 40 мм – у бунтах. і з більшими розмірами перерізу – у прутках. При цьому забезпечуються високі точність розмірів і якість поверхні. Крім того, волочіння – один з небагатьох видів ОМТ, кінцева продукція якого може бути використана без додаткової обробки.

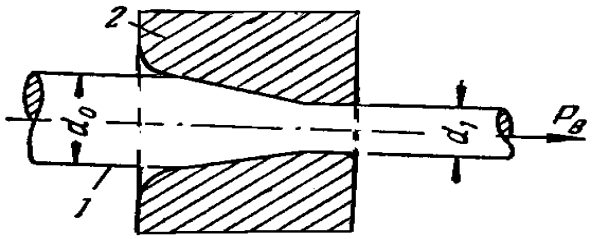


Рисунок 1.114 – Найпростіша схема процесу волочіння [48]: 1 – подовжня заготовка, що деформується; 2 – волока; d_0 – діаметр заготовки; d_1 – діаметр виробу після волочіння; P_B – сила волочіння

Цей процес також застосовують для підвищення точності та покращення якості поверхні крупних профілів (наприклад, у процесах *калібрування* холоднодеформованих труб діаметром до декількох сотен міліметрів). Краще за все піддаються волочінню круглі у перетині профілі, гірше – ті, що мають різкі виступи або западини у перерізі, наприклад, заготовки шестерен.

Поряд з широкими можливостями та перевагами, процес волочіння має і суттєві недоліки: значні питомі енерговитрати і знос інструменту (волок) на ~30% перевищують відповідні показники холодної прокатки. Крім того, процес потребує майже обов'язкового видалення окалини, а при традиційних хімічних методах реалізації цієї операції (травленні) мають місце забруднення навколишнього середовища, несприятливі умови праці і складність об'єднання всіх технологічних операцій процесу волочіння в єдину потокову лінію.

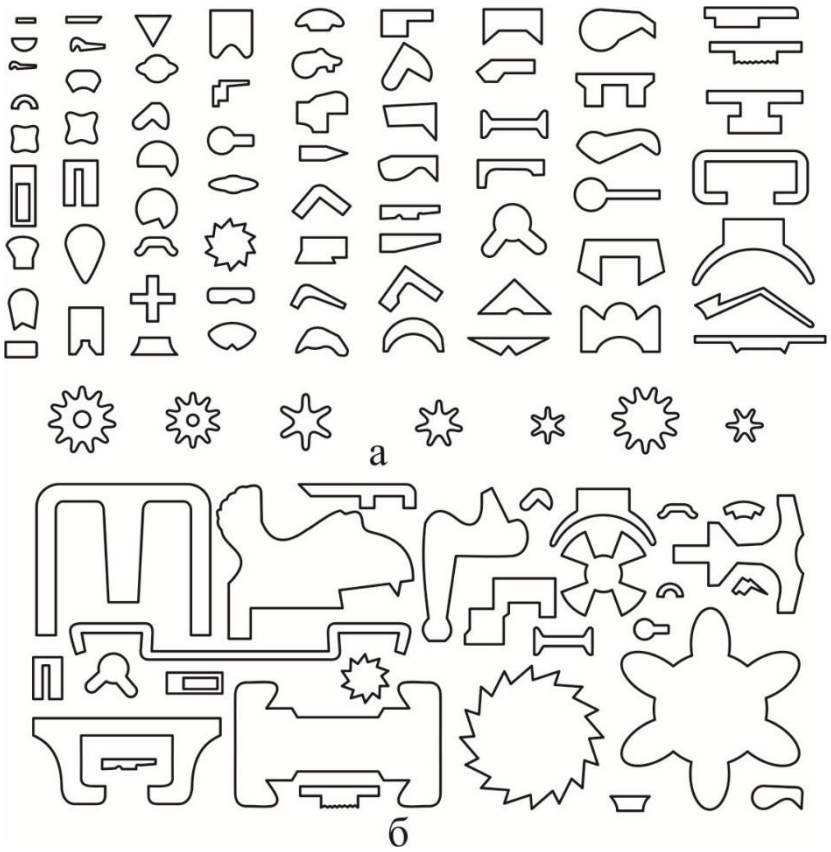


Рисунок 1.115 – Сортамент металовиробів, які виготовляються волочінням [48]: *а* – фасонний дріт; *б* – фасонні прутки

Найбільш розповсюдженим є волочіння круглих профілів крізь отвір («очко») в *монолітній* (суцільній) одинарній (*див. рис. 1.114*) або збірній волоці. Особливістю останньої є наявність нагнітального елемента (пристосування), що сприяє утворенню гідродинамічного підпору технологічного мастила на вході металевої заготовки до осередку деформації [47, 61, 48]. При цьому, деформуючий елемент (власне – волоку) виготовляють з твердого зносостійкого матеріалу: високоміцної легованої сталі, з вольфрам-кобальтового сплаву ВК6, ВК8, ВК15 (*число* – процент кобальту у сплаві) або штучного алмазу, – і запресовують в обойму для запобігання крихкого руйнування інструмента при волочінні [48].

Технологічно розрізняють волочіння суцільних (рисунок 1.116, *а1, г1, г2*) і порожнистих (рис. 1.116, *а2…а5, б1, в1, в2*) профілів: відповідно – дроту (прутків) і труб. Різновидом процесу волочіння труб можна вважати *процес профілювання* (рис. 1.116, *б1*), який характеризується зміною форми перетину і практичною відсутністю обтиснення виробу за периметром і стінкою.

Волочіння та профілювання труб реалізують на опраці (рис. 1.116, *а3…а5*) або без неї (рис. 1.116, *а2, б1*). Різновидом волочіння труб на оправці також вважають роздачу порожнистої заготовки (рис. 1.116, *в1, в2*).

Волочіння може здійснюватись крізь нерухомий інструмент (волоку) або в умовах застосування рухомого інструменту. В останньому випадку волоці може бути надано обертання навкруги осі волочіння (рис. 1.116, *а1…а5, г2*). Застосовують також процеси вібраційного волочіння з наданням волоці (або заготовці) подовжніх, поперечних або крутних коливань з різними частотами.

Волочильний інструмент може бути виконаним роз'ємним, зокрема, у вигляді деформуючих роликів подібно процесу прокатки (рис. 1.116, *г1*) або з використанням деформуючих кульок (рис. 1.116, *г2*).

Для того щоб здійснити процес волочіння, передній кінець заготовки *(«головка» на трубній заготовці*) повинна мати перетин, який вільно проходить крізь отвір у волоці. Зовнішню передню частину заготовки закріплюють у тягнучому пристрої, який має зовнішній привод і протягує заготовку крізь очко інструмента.

Дріт – основний вид виробів, що одержують волочінням.

Взагалі, дротом називають суцільний моно– або поліметалічний виріб необмеженої довжини з відносно малою і майже постійною по всій довжині формою поперечного перетину, практично однорідними механічними і фізичними властивостями, що виготовляється волочінням, пресуванням або прокаткою.

Дріт виготовляють багатьох видів: сталевий загального призначення, періодичного профілю для армування залізобетонних конструкцій, з кольорових металів та сплавів, з покриттями тощо.

Розрізняють такі різновиди волочіння дроту [48]:

– за розміром дроту:

– особливо товсте (більше 8 мм);

– товсте (6…<8 мм);

– середнє (1,6…<6 мм);

– тонке (0,40…<1,6 мм);

– надтонке (0,1…<0,4 мм);

– найтонкіше, або мікронне (<0,1 мм).

У виробничій практиці процес виготовлення дроту діаметром 1,6…6 мм називають «грубо-середнім» волочінням.

За видом технологічного мастила виділяють:

– сухе;

– мокре;

– за кількістю переходів в одній операції деформування:

– одноразове (однoперехідне, однократне);

– багаторазове (багатоперехідне, багатократне);

– за видом реалізації умови постійності секундних об’ємів на волочильному стані:

– прямоточне без ковзання;

– з ковзанням та накопиченням дроту на тяглових барабанах;

– за видом інструменту:

– з нерухомою контактною поверхнею волок;

– з рухомою контактною поверхнею інструменту (волоки, що обертаються, роликові та кулькові волоки, використання різного роду вібрацій);

– за наявністю протинатягу:

– з протинатягом;

– без протинатягу;

– за способом реалізації технологічного процесу:

– за одне перероблення (одноступінчасте волочіння);

– за декілька перероблень – багатоступінчасте волочіння (зокрема, з проміжною термічною обробкою напівпродукту).

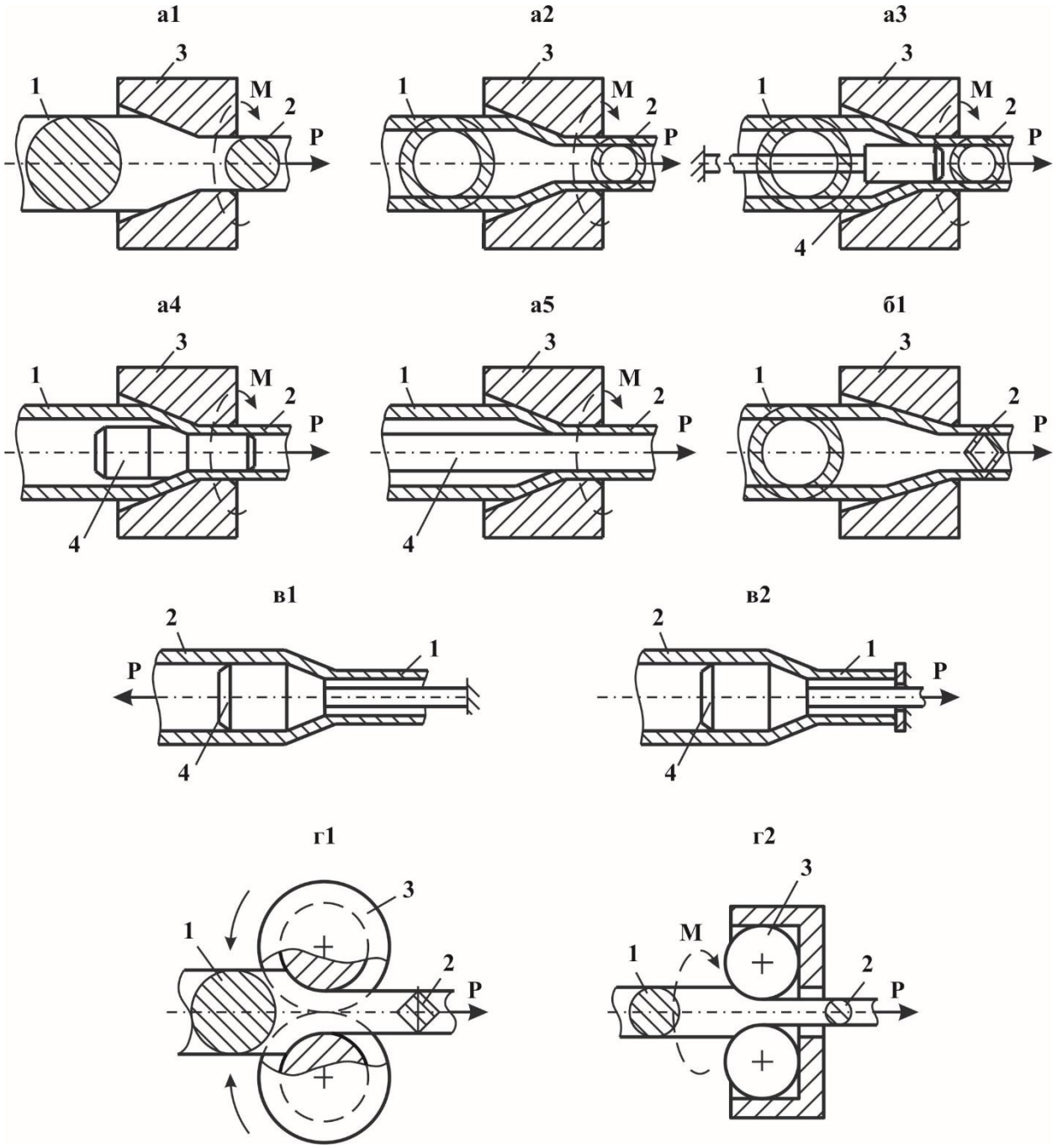


Рисунок 1.116 – Схеми основних видів процесу волочіння: крізь монолітну нерухому (або таку, що обертається) волоку суцільної (*а1*) або порожнистої заготовки без оправки (*а2*), на короткій нерухомій оправці (*а3*), на короткій самоусталеній оправці (*а4*), на довгій рухомій оправці (*а5*); профілювання (*б1*); роздача з розтягненням (*в1*) і стисканням (*в2*) металу; суцільної або порожнистої заготовки крізь роз'ємну волоку: роликову (*г1*) та кулькову (*г2*): 1 – заготовка; 2 – виріб; 3 – волока; 4 – оправка; *М* – момент, що обертає; *Р* – сила волочіння

Перелік нормативних документів, згідно з якими виготовляють дріт різного призначення та металовироби (метизи) з нього наведений у таблиці А1 Додатку А. Зокрема, дріт з *низьковуглецевих сталей*, об'єм виробництва яких сягає 70…90% загального випуску волоченого дроту, виготовляють наступних найменувань:

– дріт сталевий низьковуглецевий загального призначення діаметром від 0,10 до 10 мм з межею міцності 440…1370 Н/мм^2. Такий дріт поставляють підвищеної (П) точності

з відповідними діаметру граничними відхиленнями від (-0,02) до (-0,10) мм, та нормальної точності з відповідними діаметру граничними відхиленнями від (-0,02) до (-0,20) мм; термічно обробленим і необробленим; за видом поверхні – без покриття (світлим і чорним) та оцинкованим для діаметрів 0,20…6,0 мм;

– дріт поліграфічний (ДСТУ 3934 та ін. НД) для зшивання поліграфічної білової і картонажної продукції діаметром від 0,36 до 1,2 мм з межею міцності 690…880 Н/мм^2 без покриття та оцинкований;

– низьковуглецевий якісний дріт для застосування у вузлах машин так і струмопровідних жил в кабелях діаметром від 0,5 до 6 мм без покриття та оцинкований з межею міцності без покриття не менше 392 Н/мм^2, оцинкований – не менше 362 Н/мм^2;

– сталевий оцинкований дріт для бронювання електричних дротів і кабелів діаметром від 0,3 до 6 мм з межею міцності 340…540 Н/мм^2. Залежно від призначення і поверхневої щідьності цинку дріт виготовляють 2-х груп: С – для середніх умов роботи; ОЖ – для особливо жорстких умов роботи;

– дріт колючий оцинкований типу за відповідними Технічними умовами;

– дріт наплавний за ДСТУ 3671;

– дріт для холодного висаджування за відповідними Технічними умовами;

– дріт для армування залізобетонних конструкцій (Вр-1) за відповідними Технічними умовами тощо.

За об’ємами виробництва здійснюється найбільший випуск сталевого дроту. Крім вимог до нього, наведених вище, термічно необроблений дріт діаметром 0,50…6,00 мм повинен без руйнування витримувати не менше чотирьох перегинів; поверхня дроту без покриття не повинна мати тріщин, пльон, закатів і окалини (за винятком термічно обробленого «чорного» дроту); на поверхні дроту допускається місцева рябизна, вм'ятини, риски, подряпини, глибина яких не має бути більше чверті граничного відхилення дроту від нормальної точності.

На поверхні оцинкованого дроту не повинно бути місць, не покритих цинком, чорних плям. Допускаються окремі напливи цинку, величина яких не має бути більше половини граничного відхилення від фактичного діаметру дроту. Допускається неоднорідність дроту за кольором, білі плями і блиски, білий наліт, якщо дріт витримує випробування на якість покриття. Цинкове покриття має бути міцним і не повинно розтріскуватися та відшаровуватися при спіральній навивці 6 витків на циліндричний сердечник діаметром, рівним 6…10 діаметрів дроту.

Прикладом умовного позначення дроту діаметром 1,2 мм, термічно обробленого, підвищеної точності, світлого за ДСТУ … є наступний:

Дріт 1,2-П-О-С ДСТУ ….

Дріт повинен виготовлятися в мотках або на котушках масою від 1 кг для діаметру дроту 0,16…0,18 мм; до 40 кг для діаметру дроту 6,3…10 мм. Намотування дроту повинне проводитися правильними рядами без переплутування витків і забезпечувати вільне змотування дроту з котушок і мотків.

Особливостями деформування металу при волочінні дроту є наступні.

Формозміна металу відбувається у відносно короткому осередку деформації довжиною l_∂, який розміщується в робочій зоні волоки.

Форма твірної робочої зони монолітної волоки може бути опуклою (*див. нижче рис. 1.123, г*), увігнутою (*див. нижче рис. 1.123, д*), увігнуто-опуклою («сигмаподібною» — *див. нижче рис. 1.123, е*), але частіше за все її виконують прямолінійною, що робить робочу зону волоки конічною [48]. ЇЇ характеризують *напівкутом конусності* α нахилу твірної конуса до осі волочіння. У такому випадку довжина l_∂ зони деформації у волоці з геометричних міркувань визначається формулою:

$$l_{\partial} = \frac{d_0 - d_1}{2 \cdot tg\alpha} \quad . \tag{1.154}$$

Крім робочої зони деформації, у волоці виділяють початковий конус, вхідну та вихідну розпушки та калібруючий пасок довжиною

$$l_k = m \cdot d_1, \tag{1.155}$$

де d_1 – діаметр очка волоки (діаметр дроту); $m = 0{,}2 \ldots 2{,}0$ [48].

Оскільки сила волочіння P_B (*див. рис. 1.114*) передається до осередка деформації переднім кінцем дроту, нагрівати метал для зменшення рівня межі текучості та відповідного полегшення умов формозміни, частише за все, недоцільно. Це повязане з тим, що нагрів металу супроводжується одночасним зниженням рівня межі міцності метала та відповідним обмеженням сили волочіння та обтиснення у волоці. Інакше збільщується ймовірність обривності дроту. Тільки у деяких випадках для важкодеформівних металів (вольфрам, молібден) застосовують гаряче або тепле волочіння.

Але дослідження свідчать, що реальна температура металу при волочінні може сягати 200 °С і вище, а на його контакті з волокою доходити і до 500 °С [47]. Розігрів металу є наслідком тепловиделень при його деформуванні, а також – роботи тертя. Це, з одного боку, полегшує умови формозміни металу, але з іншого – збільшує знос волок, погіршує якість поверхні виробів та знижує ефективність виробництва.

Для забезпечення високої якості поверхні виробів, зниженн тертя, зносу та енерговитрат шліфуванням та поліруванням забезпечують гладку поверхню робочої зони волоки.

Рівномірності зносу та підвищення стійкості при волоченні круглих профілів досягають застосуванням волок, що обертаються навкруги осі виробу, який протягується, за допомогою спецального оснащення та привода (*див. рис. 1. 116, а1…а5, г2*).

При волочінні крізь монолітні волоки та такі, що обертаються, через повне ковзання метала на контакті з інструментом здійснення стабільного процесу вимагає використання або високов'язких технологічних мастил, або його реалізації у ванні з рідким мастилом.

При так званому «сухому волочінні» в якості мастила зазвичай застосовують висушене порошкоподібне мило (солі жирних кислот рослинного або штучного походження у чистому вигляді або з добавками талька, слюди, графіта, дисульфіда молибдену або ін.).

Сухе мастило наноситься на заготовку при її проходженні крізь його шар, плавиться в передосередковій зоні волоки та втягується до осередку деформації металом. При цьому формується режим змішаного або рідинного тертя (*див. вище*).

При «мокрому волочінні» тонкого, найтонкого та мікронного дроту в якості технологічного мастила використовують різні емульсії мінеральних або рослинних масел (рідше – масла у чистому вигляді), а при волочінні труб – зазвичай масла (наприклад, касторове, Циліндрове 52 або ін.) у чистому вигляді або з наповнювачами (тальк, крейда, графіт, дисульфід молибдену тощо), а іноді – графітні мастила на водяній основі [47, 61].

Для кращого утримання мастила на поверхню заготовки попередньо наносять підмастильне покриття (наприклад, шар міді, вапно, буру, скло або ін.), а перед цим метал очищують від окалини (травленням або механічними способами).

При необхідності, після досягнення в одному або декількох проходах граничного ступеня сумарної деформації 60…98% (який різний для різних металів, умов їх підготовки та деформації) продукцію (або напівфабрикат) зазвичай піддають термообробці. При необхідності, далі здійснюють повторне видалення окалини, нанесення підмастильного шару, мастила і подальшу формозміну.

Волочіння здійснюють також *протяжкою* крізь холості ролики, які мають рівчаки («калібри») на поверхні (*див. рис. 1.116, г1*). Для цього перед тягнучим пристроєм встановлюють касети («роликові волоки»), в яких монтують обойми з 2…4 неприводними роликами на підшипниках.

Незначне ковзання метала у такому осередку деформації суттєво зменшує знос та енерговитрати та дозволяє здійснювати волочіння без спеціальної подачи технологічного мастила. Але змащення все рівно потрібне для полегшення пересування волоченого виробу по елементах оснащення волочильного стана.

Слід зазначити, що точність виконання перетину дроту при використанні роликових волок гірше, ніж при волочінні заготовки крізь монолітну волоку і потребує наступного калібрування, наприклад, з використанням знов-таки монолітної волоки.

Доцільно використовувати пару роликових волок, а другу за ходом волочіння волоку орієнтувати таким чином, щоб частина перетину металу, яка була в зазорі між роликами першої волоки, потрапила до вершини калібра другої.

Можливим (а в ряді випадків – доцільним) є поєднання послідовного волочіння в монолітних і роликових волоках, наприклад, при виготовленні арматурного дроту періодичного профиля за ДСТУ 6727.

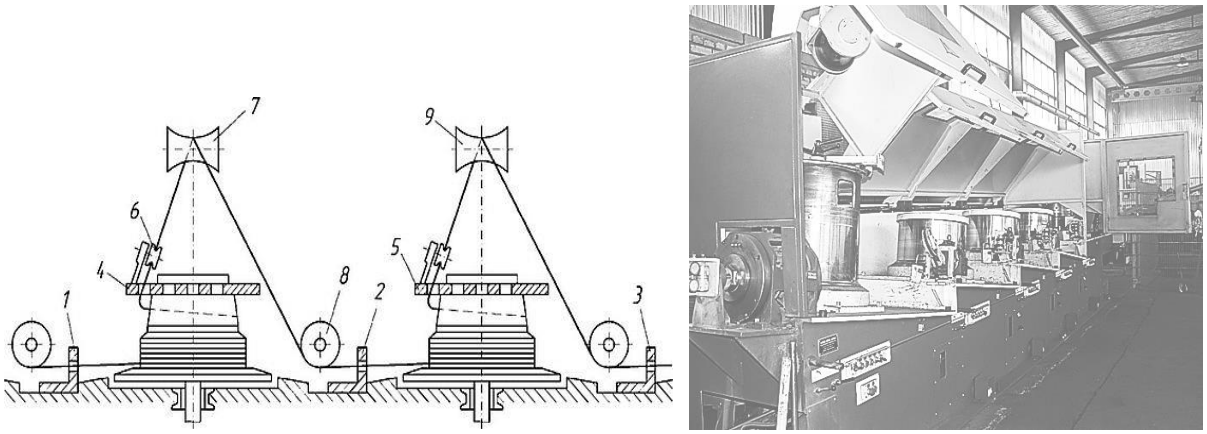
Послідовну зміну за певною програмою розмірів *напівфабрикату* в процесі виготовлення продукції на блоках волочильного стану або на різних станах називають *переходами* (*маршрутом волочіння*).

Волочіння за виглядом продукції здійснюють за двома варіантами:

- у бунтах (з їх формуванням на тяглових барабанах стана або котушках);
- пруткове.

При реалізації найбільш продуктивного *«барабанного» волочіння* тягнуча сила забезпечується приводними «барабанами», які обертаються і перед якими закріплюють волоки. Цей спосіб застосовують для отримання дроту діаметром від 6 мм до мікронних розмірів, а також – деяких сторозмірів труб (це так зване «*бухтове волочіння*»).

Волочильний стан може мати від одного до десятка (і більше) приблизно однакових тягнучих барабанів, оснащених передавальною арматурою (роликами) та фрикціонами (*рисунок 1.117*), а також розмотувальним та приймальним пристроями (котушками).



а *б*

Рисунок 1.117 – Барабанний волочильний стан: *а* – схема зв'язку двох блоків [99]: 1, 2 , 3 – волоки; 4, 5 – фпикціони; 6…9 – передавальні ролики; *б* – зовнішній вигляд [100]

При багаторазовому волочінні у цілому по стану слід дотримуватись умови постійності секундних витрат метала (1.85).

На станах барабанного типу здійснюється волочіння «з ковзанням»: на кожному барабані формується «запас» витків метала за рахунок деякого перевищення (на 2…4%) попереднім *(i-1)*-м добутком $v_{i-1} \cdot F_{i-1}$ наступного *i*-того: $v_i \cdot F_i$, – та ковзанням витків з їх підйомом по осі барабана. Такий запас дозволяє волочильщику шляхом ступінчастого регулювання швидкісного режима волочіння здійснювати безперервний процес.

Відповідні волочильні стани *магазинного типу* виготовляють двох видів: з верхнім зніманням дроту (див. рис. 1.117) та з подвійними барабанами [48]. Після останнього барабана зазвичай розміщують машину для змотування виробу в бунт.

Умова (1.85) має вельми чітко виконуватись при так званому волочінні «без ковзання» (рисунок 1.118) за рахунок плавного регулювання швидкості обертання барабанів (наприклад, із застосуванням відповідної системи керування приводом) або (при відсутності такої системи) підбором режима обтиснень у ряді послідовних волок.

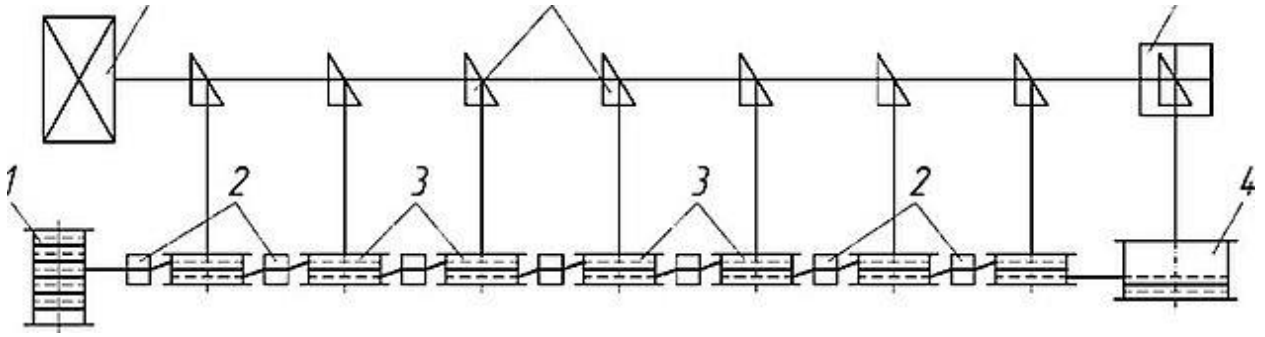
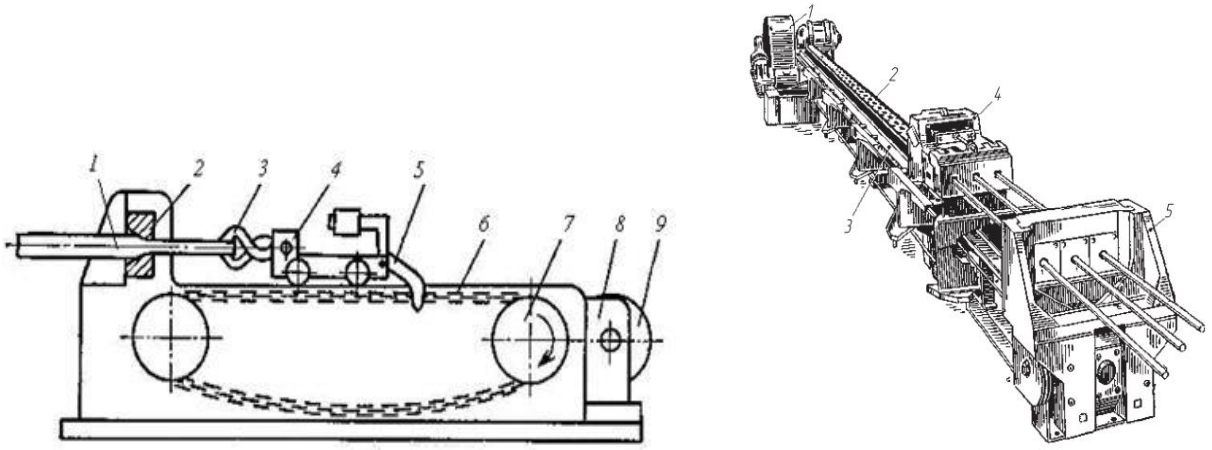


Рисунок 1.118 – Схема багаторазового волочіння без ковзання [101]:
1 – розмотуючий пристрій; 2 – волоки; 3 – тягнучі барабани (ролики, диски);
4 – приймальний (пакувальний) пристрій

Процеси розмотування та змотування заготовки часто супроводжуються знакозмінним крученням і вигином метала, що впливає на його механічні властивості і деформівність [103].

Такі особливості не притаманні *прутковому волочінню*, яке застосовують для волочіння профілів, які у готовому вигляді не можна смотати, в основному, при виробництві труб і товстих прутків.

Здійснюють таке волочіння на ланцюгових станах (рисунок 1.119).



а *б*

Рисунок 1.119 – Схема ланцюгового волочильного стана (*а*): 1 – заготовка; 2 – волока; 3 – захват; 4 – візок; 5 – гак; 6 – ланцюговий елеватор; 7 – приводний шків; 8 – станіна; 9 – привод; *б* – зовнішній вигляд трипруткового стану [106]: 1 – електричний привод; 2 – ланцюг; 3 – станіна; 4 – візок з гаком; 5 – люнет з волоками

Особливістю ланцюгових волочильних станів є наявність у них ланцюга, що безперервно рухається в одному напрямі з постійною швидкістю, з яким за допомогою гака зчіпляється волочільний візок. На візку монтують захват, який тягне заготовку за її головку. Після закінчення протягування чергової заготовки захват звільнює виріб, який скидається

у прийомний карман, а візок повертається у початкове положення, захоплюючи наступну заготовку.

Пруткове волочіння менш продуктивне у порівнянні з барабанним, оскільки великими є технологічні паузи між проходами. Для підвищення продуктивності одночасно протягують декілька заготовок.

Схеми напружень і деформацій при волочінні круглого суцільного профілю близьки до плоских і, здебільшого, характеризуються радіальною складовою стискання та подовжньою складовою розтягнення.

При волочінні труб без оправки, на короткій нерухомій (закріпленій на стрижні), довгій або короткій плаваючій оправці (*див. рис. 1.116*) з попередньо прокатаної або пресованої заготовки зменшуються зазвичай товщина стінки та (або) діаметр. У таких умовах, а також при застосуванні роликових волок, наявності обертання волоки, накладанні коливань на метал або інструмент, при профілюванні та калібруванні схеми напружень та деформацій у як всій робочій зоні волоки, так і локально можуть бути й іншими [7, 37, 44, 48, 51, 76, 92, 102, 103 та ін.].

Параметри деформації при волочінні круглих суцільних профілів визначають формулами (1.10)…(1.16), а при волочінні порожнистих профілів – формулами (1.86)…(1.88).

У разі волочіння суцільного некруглого профілю у першому наближенні при відповідних розрахунках можна використовувати *метод еквівалентного перерізу*, коли діаметр суцільного профілю (або діаметр та товщину стінки порожнистого виробу визначають для відповідного рівновеликого круглого перерізу.

Силу P_B волочіння, яка *безпосередньо* потрібна для деформації заготовки, розраховують за *загальною* для суцільних і порожнистих профілів формулою:

$$P_B = \sigma \cdot F_1, \qquad (1.156)$$

де F_1 – площа перерізу виробу (після волоки); σ – тяглове напруження у металі в осьовому напрямі.

Загальним підходом при визначенні тяглового напруження σ при волочінні крізь монолітну конусну волоку при наявності напружень розтягнення по всій довжині осередку деформації є урахування таких складових енергетичних витрат [104]:

– осаджування металу («лінійна» деформація);

– зсувні деформації при вході металу в конічну частину волоки та виході з неї;

– тертя в конічній частині осередку деформації;

– тертя в калібруючому паску волоки;

– «переборення» заднього натягу.

За умов використання одного з підходів: емпіричного, напівемпіричного, теоретичного з урахуванням напруженого стану металу або з урахуванням усіх особливостей його деформування, – у наявний час відомо декілька десятків формул для визначення величини σ.

Як проказали спеціальні дослідження, найбільш адекватною можна вважати формулу А.М. Должанського [104]:

$$\sigma = \sigma_{T.cep} \cdot \left[\ln \mu + 0{,}77 \cdot \alpha + \frac{f \cdot \ln \mu \cdot (1 - C_q \cdot (\mu + 1)/2}{\alpha + \alpha^2 + f \cdot \ln \mu} + \frac{4 \cdot m \cdot f \cdot \alpha \cdot \sigma_{T1} / \sigma_{T.cep})}{\alpha + f \cdot \ln \mu + 4 \cdot m \cdot f \cdot \alpha} + C_q \right], \qquad (1.157)$$

де відносна величина заднього (натягу) напруження σ_q дорівнює $C_q = \sigma_q / \sigma_{T.cep}$; відносна довжина l_k калібруючого паска волоки $m = l_k / d_1$; f – коефіцієнт тертя.

Аналіз формули (1.157) на екстремум дає мінімум значення σ і, відповідно – енергетичних витрат на реалізацію процесу волочіння при куті конусності $\alpha_{опт}$ волоки, який зветься оптимальним:

$$\alpha_{опт} = \sqrt{\frac{f \cdot \ln \mu \cdot (1 - \mu \cdot C_q) \cdot (1 + 2m \cdot f)}{0{,}77 - 2m \cdot f \cdot (1 - \mu \cdot C_q)}}, \qquad (1.158)$$

а при відсутності заднього натягу:

$$\alpha_{опт} = \sqrt{\frac{3f \cdot (\mu - 1) \cdot (2 - \mu)}{\mu^2 \cdot (3 - \mu)}}. \qquad (1.159)$$

Розрахунки та практика свідчать, що при волочінні сталевого дроту діаметром 2…6 мм крізь монолітні конусні волоки з використанням сухого мильного технологічного мастила $\alpha_{опт} = 8...12$ градусів при коефіцієнті тертя $f = 0{,}06…0{,}08$.

Тяглове напруження $\sigma_{обер}$ при волочінні крізь волоку, що обертається, як правило, менше, ніж аналогічне при використанні нерухомої волоки. Основною причиною цього є зміна напруженого стану металу внаслідок появи зсувних напружень, пов'язаних з обертанням волоки від зовнішнього джерела енергії [105]. Суттєвим фактором тут стає анізотропія тертя, яка зумовлена різною висотою шорсткості металу в осьовому та тангенціальному напрямах. Відповідна величина тяглової напруги:

$$\sigma_{обер} = \frac{\sigma_{T.сер} (\mu - 1) \cdot (1 + f_{повз} \cdot ctg\alpha)}{1 + tg\alpha + f_{повз}(1 - tg\alpha) + \dfrac{24 \cdot f_{попер}^2 \cdot \Phi^2}{\cos^2 \alpha \cdot (1 + tg\alpha + f_{повз} \cdot (1 - tg\alpha)}}, \qquad (1.160)$$

де $f_{повз}, f_{попер}$ – коефіцієнти тертя в подовжньому та поперечному (тангенціальному) напрямах відповідно. Якщо значення $f_{повз}$ відомо, то орієнтовно можна прийняти: $f_{попер} / f_{повз} \approx R_{а.попер} / R_{а.повз}$ ($R_{а.попер}, R_{а.повз}$ – значення висоти шорсткості металу у відповідних напрямках; фактор форми (відносна висота) осередка деформації:

$$\Phi = \frac{d_0 - d_1}{(d_0 + d_1) \cdot tg\alpha} = \frac{\sqrt{\mu} - 1}{(\sqrt{\mu} + 1) \cdot tg\alpha}. \qquad (1.161)$$

Виробничий процес виготовлення дроту, який практично однаково реалізується на декількох десятках метизних підприємств України, схематично представлений на рисунку 1.120 [48].

Початковою заготовкою для виготовлення сталевого дроту *сухим волочінням* є гарячекатана катанка з номінальним діаметром 5…6,5 мм в бунтах масою від 200 кг до 2 тонн. При прийманні катанки перевіряють її хімічний склад, якість поверхні, механічні властивості, наявність дефектів структури та неметалічних включень тощо у відповідності до вимог нормативних документів.

Потім катанка піддається операціям підготовки поверхні: видаленню окалини, нанесенню підмастильного покриття та технологічного мастила. Остання операція здійснюється зазвичай у потоці з волочінням.

За традиційною технологією, видалення окалини з поверхні гарячекатаної катанки здійснюють позапоточним травленням у ваннах, які містять 18…20% розчин сірчаної (температура до 80 °С упродовж 20…30 хв.) або соляної (температура не вище 50 °С упродовж 15 хв.) кислоти та до 1% інгібітора травлення. Ця операція характеризується низькою продуктивністю, значними технологічними та енергетичними витратами, додатковою витратою металу, який реагує з кислотою, великими капітальними витратами на будівництво, утриманням і ремонтом установок для регенерації і нейтралізації відпрацьованих травильних розчинів. Травлення також супроводжується підвищеним забрудненням навколишнього середовища та несприятливими санітарними умовами праці.

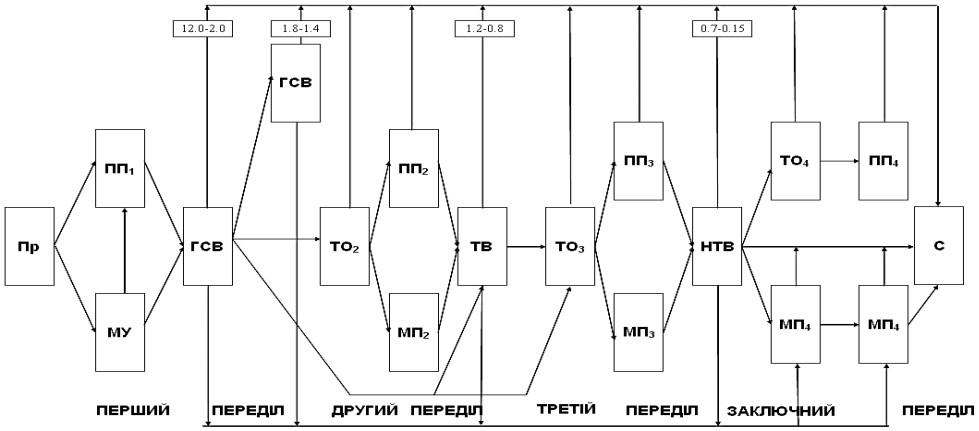
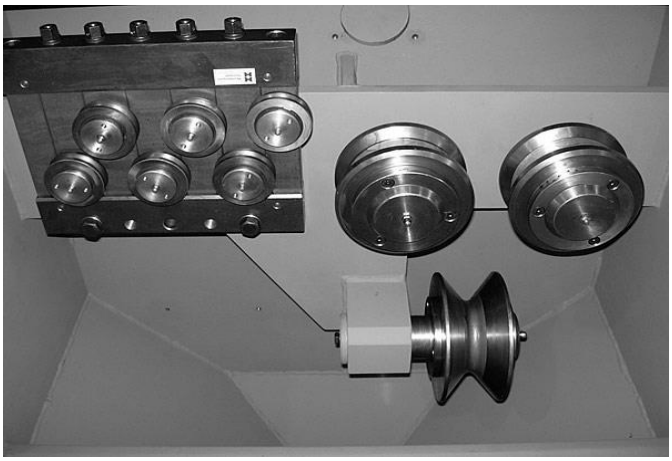


Рисунок 1.120 – Узагальнена схема виробничого процесу виготовлення низьковуглецевого дроту [48]

Після травлення катанку промивають холодною та гарячою водою, витримують декілька хвилин на повітрі для утворення першого прошарку підмастильного шару з $Fe(OH)_3$ та обробляють зануренням у ванни з киплячим 15…20% вапном для нейтралізації залишків кислоти та завершення формування підмастильного шару.

Приблизно аналогічним чином у разі волочіння високовуглецевих сталей метал піддають фосфатуванню або бурированню. Інколи першою стає операція поверхневого мідніння.

Альтернативою хімічному способу видалення окалини є поточне з волочінням оброблення заготовки знакозмінним вигином з розтягненням у роликових окалиноламачах. Їх робочі ролики розташовують в одній або двох площинах (рисунок 1.121).



а *б*

Рисунок 1.121 – Роликові окаліновідламувачі з орієнтуванням осей робочих роликів в одній (*а*) та двох (*б*) площинах

Роликові окалиноламачі з регульованим вигином між роликами, осі яких орієнтовані в одній площині (*див. рис. 1.121, а*), зазвичай застосовують при волочінні катанки з діаметром більше 7 мм.

Відповідну обробку заготовки діаметром 4,0…7,0 мм, в основному, здійснюють при фіксованому розташуванні роликів, осі яких орієнтовані у двох взаємно перпендикулярних площинах (*див. рис. 1.121*, *б*).

Сумісний вплив на метал заготовки знакозмінного вигину та розтягування на роликах зумовлює її пружнопластичну деформацію з видовженням до 9%. При цьому, окалина унаслідок своєї крихкості відокремлюється від основи. Більшість окалиноламачів розрахована на відносне видовження 6…8% [48]. Обробка катанки в роликовому окалиноламачі потребує поточного «тонкого» очищення її поверхні від залишків пилу окалини, наприклад, за допомогою войлочного обтиру.

Експериментально доведено, що при збільшенні кількості роликів до 7…9 можна досягти деформації 30…35% видовження волочильної заготовки, що є зіставним з деформацією в першому проході багаторазового волочіння і може його замінити [106].

Крім розглянутих схем можливо також застосування струминної і лезової обробки поверхні металу (*див. вище*), продуктивність яких суттєво менша.

Загальним недоліком механічного видалення окалини є збільшена шорсткість поверхні заготовки та утруднене нанесення мастильного шару на її свіжоочищену *(«світлу»*) поверхню, що не має підмастильного шару. Це збільшує тертя та тепловиділення при наступному волочінні та вимагає використання технологічних мастил з підвищеною адгезією до металу.

Вище вже згадувалось, що, здебільшого, основою сухих волочильних мастил служить порошок технічної мильної стружки, яка представляє собою суміш натрієвих, калієвих та (або) солей природних або синтетичних жирних кислот фракцій С10…С20 у вигляді пластинок розміром до 20…30 мм.

Стружку сушать, подрібнюють та змішують з функціональними добавками для підвищення адгезії, температури плавлення, зменшення гігроскопічності та ін. Мастило засипають в ємність («мильницю»), безпосередньо розташовану перед кожною волокою. Витрата мильного порошку близько 500 г/т готової продукції.

Все ж таки, навіть після використання найефективніших технологічних мастил швидкість сухого волочіння та сумарне обтиснення металу при застосуванні механічного видалення окалини з поверхні заготовки вимушено зменшують на 20…30%.

Після підготовки катанку у вигляді мотків укладають перед волочильним станом, де вона у потоці розмотується, проходить «мильницю» з технологічним мастилом, деформується в одній або декількох послідовних волоках і змотується на котушку або у бунт.

Далі, якщо це потрібно за замовленням, йдуть операції термообробки, нанесення металопокриттів, хімічної обробки, упаковки, маркування, здачі готової продукції (*див. вище*).

Основні види термічної обробки при виробництві дроту різного призначення – відпал, нормалізація, патентування та гартування з відпуском.

Відмінність *мокрого тонкого та надтонкого волочіння* полягає у розміщенні усіх волок, як правило – зі штучного алмазу *(«баласу»*) у ванні, яка заповнена рідким технологічним мастилом, наприклад, 1…2% розчином мила з функціональними добавками. Це, значною мірою, знімає проблеми, пов’язані з формуванням підмастильного шару на заготовці та охолодженням волок.

При здачі готової продукції кожен моток дроту має бути міцно перев'язаним відпаленим дротом не менше, ніж в трьох місцях, рівномірно розташованих по колу мотка. Кінці дроту в мотку мають бути акуратно укладені, та легко знаходитись.

На вимогу споживача за відповідними НД дріт може бути покритий тонким шаром консерваційного мастила. Мотки дроту діаметром не більше за 0,50 мм мають бути обернуті шаром парафінованого паперу і упаковані в дерев'яні ящики. Мотки дроту діаметром 0,50…1,00 мм мають бути обернуті шаром парафінованого паперу, потім шаром полімерної плівки або нетканих матеріалів, або тканини з хімічних волокон. Дріт діаметром більше 1,0 мм упаковують лише на вимогу споживача. Мотки дроту масою 15…500 кг не упаковують. Дріт, що відправляють до районів Крайньої Півночі і прирівнених до них, упаковують і транспортують за ДСТУ ГОСТ 15846.

До кожної котушки, мотку або бухти має бути міцно прикріплений ярлик, на якому указують: товарний знак або найменування продукції і товарний знак підприємства-виготівника; умовне позначення; клеймо технічного контролю.

Певні особливості має ***процес волочіння труб***.

При *деформації труб у монолітних волоках* розглядають окремо процеси волочіння без оправки (*див. рис. 1.116, а2*), на короткій нерухомій оправці (*див. рис. 1.116, а3*), на короткій самоусталеній оправці (*див. рис. 1.116, а4*) та на довгій рухомій оправці (*див. рис. 1.116, а5*).

Процес ***безоправочного волочіння*** характеризується наявністю напружень стискання в радіальному σ_r та тангенціальному σ_θ напрямах і напруженням розтягнення σ_l за осьовим напрямом. Деформований стан металу визначається деформаціями e_l та e_θ видовження та стискання відповідно. Знак і величина деформації e_r у радіальному напрямі (по товщині стінки труби) залежить від співвідношення між величинами σ_r, σ_θ та σ_l, що, у значній мірі, зумовлюється відношенням S / D_{cep}. Відповідну зміну товщини стінки труби ΔS можна оцінити за виразом Ю.Ф. Шевакіна [44]:

$$\frac{\Delta S}{S_0} = \frac{1}{6}\left[3 - 10(\frac{S_0}{D_0})^2 - 13(\frac{S_0}{D_0})\right] \cdot \frac{\Delta D}{D_0 - S_0}. \qquad (1.162)$$

При розгляді в такому осередку деформації зон осаджування (де проходить тільки зменшення діаметра заготовки) та калібрування (в калібруючому паску) напруження волочіння σ можна визначити за однією з відомих формул, наприклад, за Л.Є. Альшевським [44]:

$$\sigma = \beta\sigma_{B.cep}\left\{\frac{\exp\frac{2f \cdot l_k}{D_{1.cep}}}{\omega - 1}\left[1 - \omega \cdot (\frac{D_{1.cep}}{D_{0.cep}})^{\omega-1}\right] + 1\right\}, \qquad (1.163)$$

де $D_{0.cep}, D_{1.cep}$ – середні діаметри заготовки та труби відповідно; $\omega = \frac{tg\alpha + f}{(1 - f \cdot tg\alpha) \cdot tg\alpha}$.

При оправочному волочінні в осередку деформації виділяють три зони: I – осадження (без деформації по стінці); II – обтиснення стінки та діаметра; III – калібрування, здебільшого, за діаметром.

Схеми напружень і деформацій в зоні осадження аналогічні процесу безоправочного волочіння. В інших зонах мають місце напруження σ_r, σ_θ та деформації e_r, e_θ стискання і напруження σ_l та деформація e_l розтягнення.

Силу волочіння у такому разі розраховують за формулою:

$$P_\Sigma = P_B + Q_0 \qquad (1.164)$$

з урахуванням напруження волочіння σ безпосередньо труби за виразом (1.156) та сили Q_0 з боку оправки.

Так, при волочінні на нерухомій (короткій) оправці згідно з даними Л.Є. Альшевського [44]:

$$Q_0 = \frac{\sigma_{B.cep}}{\omega_1 - 1} \cdot b \cdot \frac{f}{tg\alpha}\left[1 - (\frac{F_0}{F_1})^{\omega_1 - 1}\right] \cdot F_1, \qquad (1.165)$$

де $b = d_1 / D_1$; d_1 – внутрішній діаметр труби; F_0, F_1 – площа перерізу заготовки та труби відповідно; $\omega_1 = \frac{tg\alpha + f}{(1 - f \cdot tg\alpha) \cdot tg\alpha} + b \cdot tg\alpha$.

При волочінні порожнистого профілю ***на рухомій оправці*** величина σ (*див. формулу (1.156)*) має враховувати вплив оправки на напружений стан металу.

Також знаходять використання і спрощені формули. Наприклад. за даними П.Т. Ємельяненко та Л.Є. Альшевського при волочінні на рухомій оправці загальна сила волочіння P_{Σ} дорівнює [44]:

$$P_{\Sigma} \approx 1{,}75 \cdot \sigma_{B.cep} \cdot \omega_1 \cdot \varepsilon \cdot F_1 . \qquad (1.166)$$

Аналогічно випадку волочіння дроту (*див. вище*) для цих процесів також можна знайти значення оптимального напівкута конусності волоки $\alpha_{опт}$=12…14 градусів при f = 0,1…0,15, при яких мінімізується сила волочіння [44].

У будь-якому процесі волочіння максимальне обтиснення обмежується міцністю переднього кінця металу, до якого прикладена тяглова сила. При цьому, стабільний процес протягування заготовки крізь волоку забезпечується при певних значеннях коефіцієнта запасу міцності $k_{зап}$ (*див. також формулу (1.59)*):

$$k_{зап} \geq \frac{\sigma_{T1} \cdot F_1}{P_{\Sigma}} . \qquad (1.167)$$

При волочінні дроту діаметром 1…6 мм та прутків діаметром більше 10 мм можна прийняти $k_{зап} \geq 1{,}2\ldots2{,}1$ [104] (більші значення відповідають меншому перерізу продукції); при волочінні труб – у залежності від відношення S_1 / D_1 – $k_{зап} \geq 1{,}1\ldots1{,}2$ [44].

При виготовленні тонкостінних та особливо тонкостінних труб метал може втратити поперечну стійкість, що також обмежує максимальну деформацію у волоці. Відповідна критична відносна ε_{kp} деформація може бути представлена виразом [44]:

$$\varepsilon_{kp} = 2{,}8 \cdot 10^4 \cdot \left(\frac{S_1}{D_1}\right)^2 , \qquad (1.168)$$

а для волочіння на оправці, що плаває, максимальний коефіцієнт видовження [44]:

$$\mu_{\max} = \frac{S_0 \cdot (D_1 + S_0 + 1)}{S_1 \cdot (D_1 - S_1)} . \qquad (1.169)$$

Технологія волочіння труб має певні особливості у порівнянні з волочінням дроту та прутків.

В якості прикладу, можна розглянути відповідний процес, який реалізується на ПАТ «ІНТЕРПАЙП НТЗ» при виготовленні холоднотянутих труб сталевих безшовних та електрозварних високої точності для корпусів заглибних електродвигунів і насосів діаметром 87…159 мм з товщиною стінки 3…8 мм і для гільз довгоходових гідравлічних і пневматичних циліндрів.

Для таких труб регламентують: зовнішній діаметр; внутрішній діаметр з допуском +0,05…+0,17 мм (для гільз довгоходових гідравлічних і пневматичних циліндрів – +0,3 мм); товщину стінки з допуском ±6,0 мм (для електрозварних – ±0,25 мм; для гільз довгоходових гідравлічних і пневматичних циліндрів – ±7,5 мм); масу 1 м труби з відповідним допуском. Відхилення від прямолінійності твірної внутрішньої поверхні (кривизна) по всій довжині на один метр довжини труби не повинна перевищувати 0,15 мм. Овальність і різностінність не повинні виводити розміри труб за граничні відхилення по внутрішньому діаметру і товщині стінки.

По довжині труби виготовляють кратної та мірної кратній довжини в межах від 4000 до 10000 мм з припуском на кожний різ не менше +5 мм; граничні відхилення по довжині труби мірної і кратної мірній не повинні бути більше +50 мм.

Безшовні труби виготовляють зі Сталі 35. Межа текучості металу повинна бути не менше 392 Н/мм^2. Електрозварні труби виготовляють зі Сталі 22ГЮ (тимчасовий опір $\sigma_B \geq 510$Н/мм^2, межа текучості $\sigma_T \geq 392$Н/мм^2, відносне видовження $\delta_5 \geq 8$ %).

Поверхня труб повинна бути без слідів окалини та за якістю відповідати ДСТУ 8939. Шорсткість внутрішньої поверхні труб повинна відповідати значенням R_a не більше 2,5…4,5 мкм (ДСТУ ISO 4287 та ДСТУ ГОСТ 25142).

Кінці труб повинні бути обрізані під кутом 90° і зачищені від задирок. Допускається утворення фаски при видаленні задирок.

Для волочіння безшовних труб використовують правлену обточену гарячекатану заготовку після ТПА-200 з тривалковим розкатним станом (*див. вище*), а для волочіння електрозварних труб – електрозварену переробну трубу-заготовку з низьколегованої рулонної сталі (*див. вище*).

Перед постачанням у виробництво трубна заготовка піддається контролю ВТК на відповідність вимогам НД.

Технологічний процес волочіння складається з наступних послідовних операцій:

– дефектоскопія труб-заготовок;
– хімічна обробка (травлення; промивання; нейтралізація);
– огляд і ремонт (при наявності дефектів), контроль якості поверхні, травлення, промивання, нейтралізація;
– хімічна обробка (фосфатування; промивання; нейтралізація; нанесення технологічного мастила);
– сушка, контроль якості нанесення мастила;
– формовка голівки на гідропроштовхувачі (довжина головки повинна забезпечити її вільне захоплення губками візка волочильного стану і перебувати в межах 430...450 мм; діаметр циліндричної частини головки повинен бути, як мінімум, на 2 мм менше внутрішнього діаметра волоки);
– волочіння (1-й прохід) на волочильному стані з тяговим зусиллям 2,45 МН (250 т), який працює в напівавтоматичному режимі;
– знежирення;
– термообробка;
– правка (у разі необхідності);
– порізка та торцювання;
– хімічна обробка (травлення; промивання; нейтралізація; фосфатування; нанесення технологічного мастила);
– сушка, контроль якості нанесення мастила;
– волочіння (2-й прохід);
– знежирення;
– термообробка;
– правка;
– порізка, відрізка головок і торцювання;
– хімічна обробка (травлення; промивання; нейтралізація; фосфатування; нанесення технологічного мастила);
– сушка, контроль якості нанесення мастила;
– волочіння (3-й прохід) на готовий розмір.

Після такого волочіння труби піддають наступним операціям:

– знежирення;
– правка;
– порізка, відрізка зайвих частин;
– знежирення;
– пасивація;
– контроль ВТК;
– пакування;
– консервація;

– відвантаження.

Короткооправочне волочіння труб проводиться з використанням інструмента лише з твердого сплаву марок ВК15 або ВК20. Для волочіння труб проміжних розмірів допускається застосування оправок з вуглецевих і легованих марок сталей з хромуванням їх робочої поверхні.

Волочінням на вітчизняних трубних заводах також виробляють значну частину ***профільних труб*** у залежності від потрібних форми, розмірів й інших певних вимог [107].

Як йшлося раніше, профільні труби виготовляють з квадратним, прямокутним, овальним або з іншим перетином (*див. рис. 1.109*). Товщина стінки профільних труб може бути від 1 до 10 мм, характерний розмір перерізу – від 20 до 300 мм, довжина – від 1,5 до 9 метрів.

Найбільша точність досягається при використанні монолітних волок, а найкраща чистота поверхні – в чотирьохроликовому калібрі.

Профільні труби, як правило, виготовляють зі сталі, хоча для їх виробництва допустимим є застосування будь-якого металу (сплаву).

Заготовкою для виготовлення профільних труб волочінням можуть служити як безшовні, так і електрозварні труби. У деяких випадках в якості заготовки при профілюванні використовують профільні труби. Наприклад, спіральну трубу з поточним овальним поперечним перерізом можна спрофілювати з вихідної труби, яка має постійний овальний переріз.

Вище вже було відмічено, що значна частина виробничих процесів зі створення металургійної продукції може включати декілька технологій, зокрема, з ОМТ.

Типовим прикладом цього є виготовлення *порошкового дроту для дугового електрозварювання* за ДСТУ EN ISO 14171 та ТУ У. Технологія виготовлення цього виду продукції є комбінацією наступних поточних переходів:

– формовка трубоподібного профілю з низьковуглецевої сталевої стрічки товщиною 0,3…0,5 мм в 5…12 холостих роликах, що мають відповідну рівчакову калібровку;

– засипка в проміжний жолобчастий профіль суміші порошків флюсу (польовий шпат, каолін, слюда тощо) та (або) наплавочних матеріалів;

– формування закритого профілю;

– волочіння трубчастого дроту в монолітних волоках на потрібний розмір 0,8…6,0 мм [48].

Аналогічний виріб за ДСТУ 7217 для позапічної обробки металургійних розплавів діаметром до 16 мм використовують для розкиснення та мікролегування сталі в ковшах шляхом його занурення в метал.

Варіантом порошкового дроту є так званий *активований дріт*, який також використовується для дугового електрозварювання. Він виготовляється шляхом плющення гребнями приводних чи неприводних валків катанки зі сварочних марок сталі (Св08, Св08А, Св08Г2С та ін.) з формуванням 1…3 глибоких подовжніх канавок, засипці в ці канавки вказаних вище порошкових матеріалів та волочінні у волоках, внаслідок чого формується круглий профіль з наповненням зварювальними матеріалами.

Пресування

Процес ***пресування*** зовнішньо схожий на волочіння крізь монолітну волоку [7, 44, 108]. Він полягає у видавлюванні прес-штемпелем (пуансоном) метала, який знаходиться у замкненому об'ємі (контейнері), крізь матрицю, або фільєру, що має отвір (отвори). При цьому, форма перерізу отвору повинна відповідати перетину профілю виробу.

Сортамент пресованих виробів є вельми широким: можна отримувати перетин виробів від самих простих (круглі прутки, труби тощо) до дуже складних: з великою асиметрією, з несимметрично розміщеними елементами і т.п.

Основні схеми цього процесу та деякі види пресованих виробів представлені на рисунку 1.122.

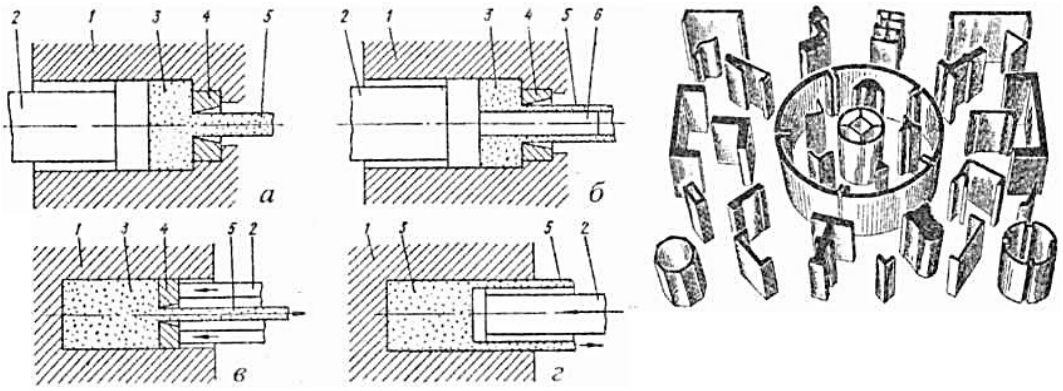


Рисунок 1.122 – Основні різновиди процесу пресування [44]: *а, б* – пряме для прутків і труб відповідно; *в, г* – зворотне для прутків і труб відповідно: 1 – контейнер; 2 – прес-штемпель; 3 – заготовка; 4 – матриця (фільєра); 5 – готовий прес-виріб; 6 – оправка; та деякі види профилів, отриманих пресуванням

Відомо декілька разновидів пресування [44] – *пряме* (*див. рис. 1.122, а, б*); *зворотнє*, коли контейнер має суцільне дно, а крізь матрицю, що встановлена на пуансоні із порожнистим стержнем, видавлюється виріб (*див. рис. 1.122, в, г*); *з боковим розміщенням матриці* на контейнері*; з вертикальним або горизонтальним положеннням контейнера*; *з рухомим контейнером, двостороннє* (*на рис. 1.122 не показані)* та ін.

Комплект пресового інструменту включає *основний інструмент:* контейнери, матрицеутримувачі, матриці (фільєри), прес-штемпелі, прес-шайби, голки, голкотримачі, – і *допоміжний:* перехідні патрони, контрольні прес-шайби і т.д.

В *контейнері* розміщують заготовку. В процесі деформування контейнер сприймає повний тиск з боку матеріалу, що пресується, в умовах інтенсивного тертя при високій температурі.

Матрицеутримувач замикає вихідну сторону контейнера та утримує матрицю.

Матриця має калібрований отвір, в якому формується перетин *прес-виробу* з необхідними точністю його геометрії і якістю поверхні. Вона є найбільш відповідальною деталлю пресового інструменту, що зношується найбільше.

Прес-штемпель передає зусилля до металу, що пресується, тобто в процесі витискування сприймає повну силу пресування. Прес-штемпель не вступає в безпосередній контакт з нагрітим металом.

Розрізняють прес-штемпелі суцільні та порожнисті в поперечному перерізі. Перші – для пресування суцільних профілів, а також труб на профільних пресах, коли пресування здійснюється на рухомій оправці, яка переміщується разом з ним. Інші – для пресування труб на трубних пресах з нерухомими оправками, а також при зворотньому пресуванні; при цьому, прес-штемпель є одночасно і матрицеутримувачем.

Основне призначення робочих змінних *прес-шайб*, які не скріплені з прес-штемпелем, а після кожного циклу пресування видаляються з контейнера разом з прес-залишком для розділення та використання в наступному циклі – виключення безпосереднього контакту прес-штемпеля з нагрітою заготовкою. Прес-шайби, сприймаючи в процесі деформації повний тиск пресування, піддаються циклічному температурному і силовому навантаженню, тому їх виготовляють з поковок теплостійких сталей.

Голкоутримувач служить для закріплення голки та передачі зусилля до неї від прошивного пристрою і працює в умовах невисоких температур і напружень.

Голка служить для прошивки злитків і формування внутрішнього каналу прес-виробів. Вона швидко зношується в результаті впливу знакозмінних навантажень і високих температур.

При пресуванні метал піддається всебічному нерівномірному стисканню і тому має велику технологічну пластичність. В результаті, пресуванням можна обробляти як пластичні, так і малопластичні сплави: мідні, алюмінієві, магнієві, титанові, вуглецеві та леговані сталі, – які через низьку пластичність (особливо, в литому стані) іншими видами обробки тиском деформувати неможливо або важко.

Пресування виробів складної форми дозволяє значно зменшити обсяг механічної обробки і втрати металу, а також підвищити працездатність деталей, особливо, з різкими переходами. Крім того, при пресуванні значно нижче вартість інструмента і простіше його заміна, а значить цей спосіб більше підходить для дрібносерійного виробництва, ніж сортова прокатка або штамповка.

До загальних недоліків цього процесу відносять підвищену витрату енергії на деформацію у порівнянні з волочінням аналогічних профілів, а також – наявність прес-залишка (*див. нижче*), оскільки заготовку не завжди можна повністю «видавити» з контейнера через різке зростання наприкінці процесу сили пресування.

При *прямому пресуванні* заготовку укладають в порожнину контейнера. Сила передається на заготовку прес-штемпелем через прес-шайбу. При цьому метал змушений текти крізь отвір в матриці, що закріплена в матрицеутримувачі. Зазвичай видавити повністю з контейнера весь метал заготовки не вдається. Частину метала, що залишилася в контейнері, називають *прес-залишком*.

Цей процес характеризується високою якістю поверхні виробу і простою реалізацією.

Недоліки: переміщення металу зустрічає опір внаслідок тертя об матрицю та стінки контейнера; значні втрати на відходи (маса прес-залишку може сягати 20…40% маси заготовки); нерівномірність механічних властивостей по довжині і перерізу виробу.

У зв'язку з цим все більше використовують так зване *напівбезперервне пресування*, яке здійснюється без відділення (та втрати) прес-залишка, шляхом зварювання початку наступної заготовки з кінцем попередньої.

При *зворотному методі пресування* контейнер закритий з одного кінця упорною шайбою, а сила від преса на заготовку передається через порожнистий пуансон із закріпленою на ньому матрицею: метал тече назустріч руху матриці з пуансоном.

Перевагою такого способу є наявність тертя тільки при переміщенні металу крізь матрицю. Тому сила пресування при зворотному методі на 25…30% менше, ніж при прямому пресуванні. Крім того, втрати металу на прес-залишок становлять усього 5…6%. Але при цьому ускладнюється конструкція оснащення.

Для пресування використовують чорні та кольорові метали і сплави у вигляді злитків, литих і попередньо деформованих, кованих або катаних заготовок діаметром до 500 мм і більше та довжиною до 1200 мм. Стан поверхні заготовки значно впливає на якість поверхні і точність пресованих профілів. Тому в багатьох випадках заготовку попередньо обточують, а після нагріву поверхню заготовки ретельно очищають від окалини.

Пресовані профілі виготовляють з площею поперечного перерізу від 0,2 до 1500 см^2, габаритні розміри вписуються в окружності діаметром 10…850 мм, довжина профілів до 15 м і вище. В цілому, нормується виготовлення декількох десятків тисяч таких профілів.

Ще одним ефективним різновидом цього виду ОМТ, що використовується, є *гідропресування*. Воно здійснюється за рахунок утворення в контейнері високого тиску рідини, що дає рівномірне всестороннє стискання металу. В якості «рідини» можуть використовуватись метали, які мають низьке значення напруження при зсуві. Недоліком такого процесу є необхідність гальмування виробу після його виходу (вильоту!) з контейнера. Частково цю проблему вирішує використання гідромеханічного пресування,

коли силовий вплив на заготовку здійснює як прес-штемпель по осі виробу, так і робоча рідина з інших боків [70].

При виробництві труб процес пресування використовують при:

– глибокій закритій прошивці «*голкою*» суцільних заготовок з отриманням отвору діаметром більше 100 мм для наступної гарячої прокатки на пілігримовому розкатному стані (*див. вище*);

– при розширенні («*експандуванні*») спеціальним конічним наконечником голки отвору в заготовці, попередньо засвердленій на діаметр 20…30 мм, до заданого розміру від 50 до 100 мм;

– при пресуванні труб на трубопрофільному пресі, зокрема, з нержавіючих легованих сталей та ін.

При *глибокій закритій* (без матриці) *прошивці*, яка представляє із себе різновид процесу зворотного пресування, розрізняють два види утворення порожнини [44]:

– *заповнююча прошивка* злитків та заготовок, коли їх поперечний переріз менше за переріз внутрішньої порожнини контейнера. При цьому, занурення наконечника в метал зумовлює його радіальний плин із заповненням вільного об'єма контейнера;

– *наростаюча прошивка*, при якій здійснюється рух металу попередньо осадженої заготовки уздовж осі контейнера назустріч пуансону.При цьому висота гільзи збільшується відповідно до об'єму метала, який витиснений пуансоном.

Для одержання в суцільній заготовці центрального отвору використовують *наскрізну прошивку з матрицею*, при якій розрізняють такі стадії:

– зворотний плин металу внаслідок малої глибини занурення пуансона в заготовку та значних сил тертя на контакті;

– витікання металу крізь матрицю та його зворотний плин;

– зріз непрошитої частини заготовки («пробки»).

При прошивці не весь метал піддається пластичній деформації. Частина металу, яка знаходиться безпосередньо під пуансоном, в процесах плину не приймає участі, формуя так звану *зону утрудненої деформації*.

Плин металу *при експандуванні* попередньо свердлених заготовок декілька відрізняється від прошивки. Тут під впливом наконечника голки метал спочатку тече у сторони, заповнюючи зазори між заготовкою та контейнером, а потім – назустріч голці. В момент, коли сили роздачі заготовки стають рівними силам супротиву зсуву, здійснюється відокремлення частини металу *(«випресовки»)* у матрицю.

При *пресуванні труб* (*див. рис. 1.122, б*) біля штемпельної головки пуансона утворюється зона утрудненої деформації, а осередок деформації розміщується в області матриці. У порожнині контейнера метал деформується лише незначною мірою.

На концентрічность прошиваного отвору впливає зазор між заготовкою та внутрішньої втулкою контейнера.

При заповнюючій прошивці цей чинник має менше значення. Залежно від діаметра заготовки для вуглецевих і легованих сталей допустимою вважається різниця в діаметрах від 6 до 15 мм (зазор – половина від цієї величини); для нержавіючих сталей зазор рекомендується зменшити на 2…3 мм. При цьому необхідно врахувати, що шар мастила товщиною до 1 мм, який наносять на стінки контейнера, не повинен обдиратися при введенні в нього заготовки.

При експандуванні зазор між інструментом і металом повинен визначатися та витримуватися більш ретельно і бути, по можливості, мінімальним, так як він має безпосередній негативний вплив на ексцентричність отвору.

Прошивні наконечники працюють у найбільш важких умовах і схильні до інтенсивного зносу. Для виготовлення прошивних наконечників використовують високоміцні і теплостійкі сталі. Їх стійкість, у середньому, зазвичай становить 30…40 прошивок. При застосуванні для їх виготовлення теплостійкої сталі стійкість може

збільшитись до 100…150 прошивок. На одному експандуючому наконечнику можна здійснюють 80…100 операцій експандування.

Для прошивки зазвичай використовують комплект наконечників з 10…15 шт., які встановлюються в голку по черзі. Контактну поверхню наконечників роблять увігнутою із заокругленими краями, що дозволяє забезпечити рівномірне надходження мастила протягом усього циклу прошивки.

Матриця, або *фільєра* (рисунок 1.123) є найбільш важливим технологічним інструментом, в якому здійснюється формозміна заготовки і формується форма перетину виробу.

Матриці виготовляють зі штампових сталей, жароміцних та твердих сплавів. Сталеві матриці виготовляють суцільними і розташовують безпосередньо в матрицеутримувачах, для чого їх бічну поверхню виконують з прямим або зворотним конусом відповідно конусу гнізда матрицеутримувача. Матриці з твердих і жароміцних сплавів застосовують у вигляді вставок в обойми.

Діаметр матриці залежить від розмірів контейнера і заготовки. Її товщину розраховують, виходячи з конструктивних і технологічних міркувань.

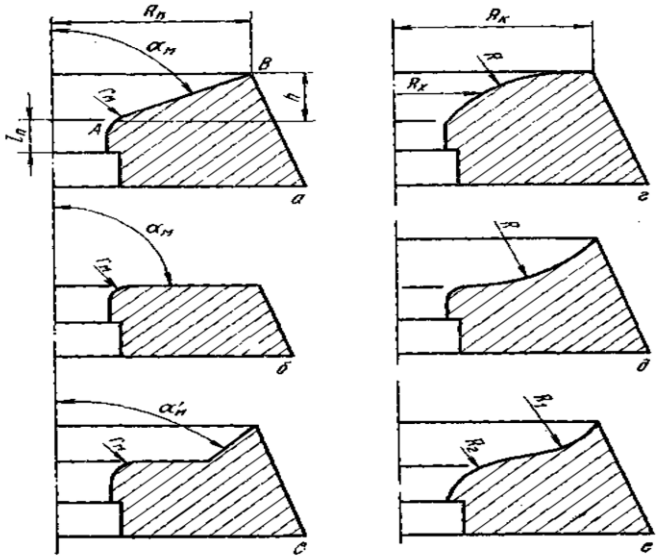


Рисунок 1.123 – Застосовні форми перерізів пресових матриць: *а* – конічна; *б* – плоска; *в* – плоско-конічна; з формою твірної: вигнутою (*г*); увігнутою (*д*), сигмаподібною (*е*)

Основні елементи матриці – *дзеркало*, або вхідна частина, яка контактує з переднім торцем заготовки, *робочий канал*, *пасок*, *вихідна частина*.

За формою вхідної частини матриці поділяють на плоскі (застосовують найчастіше) і конічні, що мають вхідну частину у вигляді конуса (*див. рис. 1.123, а*). Інші профілі вхідної частини матриць застосовують значно рідше.

В ході пресування на плоских матрицях утворюється велика «мертва зона», яка збільшує прес-залишок, але перешкоджає проникненню різних дефектів у прес-виріб. При пресуванні через конічні матриці, особливо – при пресуванні з технологічним мастилом обсяг «мертвої зони» значно зменшується, але вона не затримує просування крізь матрицю у прес-виріб різних забруднень з поверхні заготовки, що провокує появу на продукції поверхневих дефектів.

За кількістю каналів матриці поділяють на одно– і багатоканальні. Одноканальні матриці найчастіше застосовують для пресування профілів складної конфігурації і великих перерізів, багатоканальні – для пресування профілів простих перерізів і на пресах з меншими зусиллями.

У залежності від способу з'єднування з контейнером матриці поділяють на дві групи:

– ті, що встановлюються в контейнер;

– такі, що замикають контейнер.

Матриці, що встановлюються в контейнер, знайшли застосування на вертикальних механічних пресах. Для того, щоб такі матриці не руйнувалися від радіальних напружень розтягнення, зовнішній діаметр їх береться менше, ніж внутрішній діаметр контейнера, на величину пружної деформації. Під дією пресового навантаження матриця пружно деформується і затискається втулкою контейнера, яка і сприймає радіальне навантаження. Після закінчення пресування зовнішній діаметр матриці приймає попередні розміри, і матриця вільно вивільняється із втулки.

Матриці, які замикають контейнер, закріплюються на матрицеутримувачі. Вони знайшли найбільше застосування у практиці пресування.

В останні роки, зокрема, для пресування порожнистих (трубних) алюмінієвих профілів із суцільного злитка застосовують *комбіновані* (язичкові, мостикові тощо) матриці. Основна особливість їх використання – розділення металу заготовки в процесі деформування за допомогою розсікача (гребеня, «мостика») на окремі потоки з наступним зварюванням цих потоків у камері зварювання [70].

Пресування зазвичай ведуть із застосуванням технологічних мастил та часто – з нагрівом заготовки. Чорні метали та сплави пресують в гарячому стані, кольорові – як у гарячому, так і в холодному станах.

При обробці на пресових установках з прошивним та трубопрофільним пресами і редукційним станом заготовки нагрівають тричі: перед прошивкою, пресуванням і редукуванням.

До кожного з цих нагрівів пред'являють свої специфічні технологічні вимоги. Загальною вимогою для всіх нагрівів є відсутність окалини на поверхні металу. Цього досягають або застосуванням безокислювального нагріву, або видаленням окалини гідрозбивом.

При нагріванні заготовок з нержавіючих сталей плівка оксидів має велику щільність, міцність і важко видаляється на установках гідрозбиву, тому їх доцільно нагрівати в захисній атмосфері або вакуумі, переважно – прискорено з утворенням тонкої окисної плівки, яка не пошкоджує поверхню труби.

Нагрівання заготовок перед прошивкою повинне забезпечити мінімальний перепад температур по їх довжині та перерізу. Максимально прийнятною є різниця температур у будь-яких двох точках заготовки не більше 30°. Це забезпечується у спеціальних камерах з електрообігрівом.

До нагріву гільз перед пресуванням вимоги по розподілу температури по перетину істотно інші. Встановлено, що при пресуванні сталевих труб внутрішні шари металу, прилеглі до голки, випереджають зовнішні і створюють нерівномірність швидкостей течії в осередку деформації. Щоб це знівелювати, доцільно нагрівати внутрішні шари металу до декілька нижчої температури, але в межах інтервалу максимальної пластичності. Цього досягають короткочасним нагріванням гільз в індукційних печах.

Для вирівнювання температури в об'ємі труби перед редукуванням найчастіше застосовують піч з крокуючими балками, яка дозволяє регулювати температуру по зонах і відповідним чином впливати на трубу по її довжині.

Температуру пресування призначають у залежності від матеріалу, що деформується з певною швидкістю, виду та розмірів перерізу заготовки виробу та розмірів контейнера. Так, за даними джерел [120…122] при пресуванні мідних труб з товщиною стінки 2,5…4,5 мм в контейнері з внутрішнім діаметром 83…175 мм температура має дорівнювати 575…825 °С, для прутків та стрічок – 775…825 °С, для профілів та товстостінних труб – 800…875 °С. Для латуней і бронз температуру призначають на 2…10% нижче. Алюміній та його сплави пресують при температурі 340…520 °С; деякі алюмінієві сплави пресують

без нагріву та подачі технологічного мастила). Нікель та його сплави деформують при температурі 900…1200 °С; магній –при 280…410 °С; цинк – при 220…270 °С; титан і титанові сплави – при 850…1150 °С; олово та свинець – при «кімнатній» температурі; леговані сталі – при 1100…1200 °С.

При виборі температурного інтервалу деформації необхідно звертати увагу на те, щоб підвищення температури в процесі деформації не призвело до небажаних структурних змін в металі, а зниження температури – до небажаного збільшення навантаження на обладнання пресу. При цьому слід мати на увазі, що через інтенсивну деформацію металу та значні сили тертя в процесі пресування в контейнері та матриці мають місце великі тепловиділення, які можуть негативно вплинути на якість процесу та виробу.

При пресуванні чорних металів застосовують негорючі мастила на основі графіта, скла (силікатів природного або штучного походження), а також – шлаки металлургічних виробництв [61].

Основною фізичною властивістю скломастила є в'язкість, яка визначає товщину та міцність мастильного шару. Це зумовлено спроможністю аморфних речовин до поступового переходу при нагріванні з твердого у в'язкий та рідинний стан, а також зворотність зміни властивостей при різних температурах.

Характер зміни в'язкості залежно від температури визначає так звану «*довжину скла*». Скло називають «*короткими*», якщо його в'язкість різко змінюється зі зміною температури. При меншій інтенсивності зміни в'язкості в залежності від температури скло називають «*довгим*».

Теплоізоляційні властивості скломастил визначаються їх теплопровідністю, яка залежно від їх складу змінюється в межах від 0,07 до 0,013 Вт/(м*К).

Для мастил розробляють спеціальні склади скла в залежності від температури обробки і способу його нанесення на метал. Силікатне скло і ряд природних силікатів перед застосуванням в якості мастила піддають сушінню, подрібненню на спеціальному обладнанні та розсіву на фракції.

Гранульовані металургійні шлаки, а також цілий ряд силікатів, які є відходами різних виробництв, не вимають розмелювання. Їх сушать і розсіюють, а в разі необхідності піддають магнітній сепарації.

Мастила наносять як на нагрітий метал, так і на пресовий інструмент.

Процес нанесення скломастила є важливою технологічною операцією, і від того, як це здійснюється, залежить ефективність процесу пресування. У більшості випадків потрібно забезпечити рівномірність покриття мастилом контактуючих поверхонь або подати його дозовану кількість в осередок деформації. Іноді, навпаки, мастило в осередку деформації розподіляють нерівномірно для його більш ефективного використання. Для виконання таких операцій розроблені спеціальні способи та механізми.

Наприклад, при при здійсненні операцій прошивки є дві поверхні тертя: між контейнером і заготовкою та між голкою та металом. Мастило повинне наноситися на обидві ці поверхні, забезпечуючи при температурі деформації в'язкість 20…100 Па·с та товщину мастильного шару 1…3 мм.

Для покриття голок при пресуванні сталевих труб з температурою 1200 °С використовують також суспензійне змащення сумішшю скляної пудри та багатоатомних спиртів, наприклад, гліцерину. При контакті з нагрітим металом гліцерин вигорає без диму, а скло, що залишається, забезпечує отримання рівної і тонкої мастильної плівки.

Для змащення зовнішньої поверхні сталевих заготовок застосовують скло, яке має при температурі пресування в'язкість 5…30 Па·с. При пресуванні важкодеформівних матеріалів використовують скло з в'язкістю 70…100 Па·с. Технічно, для цього часто застосовують похилий стіл, встановлений на шляху руху заготовки від печі до контейнера преса. На цей стіл насипають рівним шаром склопорошок з розміром частинок 0,2…0,3 мм або укладають склотканину певної довжини. Нагріта заготовка скочується по мастилу, яке оплавляється і прилипає до металу.

На торець осадженої суцільної заготовки порошок скла вручну або за допомогою спеціального пристрою подають рівномірно в дозованій кількості. При контакті з металом склопорошок оплавляється і при проходжнні голки захоплюється всередину гільзи, утворюючи розділовий шар між наконечником голки та металом, що деформуються.

Формозміна заготовки, що відбувається в матриці при пресуванні, супроводжується безперервним виходом назовні нової неокисненої («*ювенільної*») поверхні, розмір якої пропорційний видовженню металу. Це супроводжується витратою мастильної речовини, яка виноситься виробом. Для створення поновлюваного змащувального шару між цією поверхнею і матрицею застосовують скломастило у вигляді скловати або мастильної шайби. Застосування мастильної шайби є найбільш ефективним способом змащення матриць.

Для виготовлення мастильних шайб у спеціальних формах на пресах невеликої потужності використовують скло з розміром частинок від 0,1 до 2 мм, які зв'язуються водним розчином силікату натрію (рідким склом), сульфітно-спиртовою бардою, бентонітовим клеєм або ін.

Конфігурація шайб визначається профілем робочого конуса матриці (*див. рис. 1.123*) і переднього торця деформованої заготовки.

При пресуванні прутків і суцільних профілів використовують мастильні шайби як суцільні, так і з отвором, а при пресуванні труб – тільки з отвором. Діаметр отвору в шайбі роблять більше діаметра труби на 10…15%. Це дозволяє виключити заклинювання кільцевого зазору між оправкою та очком матриці нерозплавленим склом.

При контакті з нагрітою заготовкою поверхневі шари мастильної шайби розігріваються до температури, близької до температури заготовки, в результаті чого вони оплавляються і стають пластичними та в'язкими. Під дією тиску пресування та внаслідок гідродинамічних явищ оплавлений шар скломастила постійно залучається металом в очко матриці, покриваючи при цьому виріб, який деформується, рівномірним шаром товщиною приблизно 25 мкм. Цей шар забезпечує зниження тертя на матриці та її теплову ізоляцію.

При високій антифрикційній ефективності представлених мастил їх загальним недоліком стає необхідність очищення виробів після пресування. Це трудомістка й дорога операція.

У даний час використовують два способи зняття скла з пресованих виробів: механічний (за допомогою дробоструминних установок різної конструкції) і хімічний.

Дробоструминні установки частіше використовують для обробки труб та профілів з вуглецевих і легованих сталей, оскільки така обробка вважається більш економічною. Для зняття скла з поверхні виробів, виготовлених з нержавіючих сталей і високолегованих сплавів, зазвичай застосовують хімічну обробку травленням в кислотному розчині або в лужному розплаві.

При ***проєктуванні процесів пресування*** враховують наступне.

Злитки для пресування *профілів* і *труб* мають зазвичай відношення довжини L_0 до діаметру d_0 (або характерного розміру) 2…3 та 1…2 відповідно. Використання більш довгих злитків призводить до спотворення геометрії виробів та зростання сили пресування.

Площу перерізу F_0 (та відповідний діаметр d_0) злитка, який потрібний для пресування, визначають за виразом:

$$F_0 = \mu_{доп} \cdot F_1, \qquad (1.170)$$

де F_1 – площа прерізу виробу після пресування; $\mu_{доп}$ – коефіцієнт допустимого видовження (витяжки), який має бути не менше 10 для якісної проробки структури металу, але є дані, що задовільні результати пресування забезпечуються і при $\mu_{доп}$=3…4 [70].

Пресове обладнання вибирають, виходячи з діаметру D_k контейнера, який має бути на 5…10 мм більше за діаметр злитка (заготовки), що забезпечує вільне розміщення металу в контейнені після нагріву, з урахуванням сили пресування.

Для розрахунку останнього параметра відомо декілька десятків формул. Найчастіше для визначення сили P пресування використовують формулу І.Л. Перліна [120…122]:

$$P/\sigma_T^* = 1{,}6D_k^2 \cdot \ln\mu + 1{,}5 \cdot D_k \cdot L_0, \qquad (1.171)$$

де σ_T^* – вимушена межа текучості при температурі та швидкості деформування металу (*див вище*).

Результати, що добре узгоджуються з практикою пресування сталей дає і формула Л.В. Прозорова [120…122]:

$$P/\sigma_T^* = F_0 \cdot c \cdot (1 + f \cdot L_0 / d_0) \cdot \ln\mu, \qquad (1.172)$$

де для пресування суцільних профілів та труб без ребер або з невисокими ребрами $c = 4$; при пресування складних профілів з утворенням напівзамкнених порожнин $c = 5$; при пресуванні труб з високими ребрами $c = 6$; коефіцієнт тертя $f = 0{,}08$.

При пресуванні сталевих труб з наявністю голки (оправки), окрім формули (1.172), рекомендується користуватися також формулою Ж. Сіжурне [120…122]:

$$P = \frac{\pi}{4}(D_k^2 - d_{гол}) \cdot \sigma_T^* \cdot \ln\mu \cdot \exp\left(\frac{4fL_0}{D_k - d_{гол}}\right), \qquad (1.173)$$

де коефіцієнт видовження $\mu = \dfrac{D_k^2 - d_{гол}^2}{D_1^2 - d_{гол}^2}$; коефіцієнт тертя приймають $f = 0{,}015…0{,}025$.

Для розрахунку сили при пресуванні профілів, переріз яких відрізняються від кола, Г.Я. Гуном та Б.А. Прудковським запропоновано формулу [120…122]:

$$P/\sigma_T^* = F_0 \cdot \left\{2{,}08(1-\lambda) + 1{,}15\ln\nu + \frac{2}{3}\sqrt{(1-\lambda)\left[\frac{2}{3}(1-\lambda)(2+\lambda) + \frac{\lambda}{\nu}\right](1+\frac{\nu}{\lambda})}\right\}, \qquad (1.174)$$

де $\lambda = F_1/F_0$; $\nu = П_1/П_k$; $П_1, П_k$ – периметр профілю та контейнера відповідно.

Для умов *заповнюючої прошивки* силу пресування можна визначити за формулою Ш. Гелеї [120…122]:

$$P = 3{,}3 \cdot \sigma_T^* \cdot d_{пр}, \qquad (1.175)$$

де $d_{пр}$ – діаметр прошивня; вимушена межа текучості:

– при деформуванні вуглецевих сталей з температурою T (°С):

$$\sigma_T^* = 0{,}15(1400 - T), \text{ Н/мм}^2;$$

– при деформуванні вуглецевих сталей, які містять певну кількість (у мас.%) вуглецю *C*, мангану *Mn* та хрому *Cr*:

$$\sigma_T^* = \frac{1{,}4 + C + Mn + 0{,}3Cr}{10}(1400 - T), \text{ Н/мм}^2.$$

За даними О.А. Пляцковського для умов *наростаючої прошивки* [120…122]:

$$P = \frac{\pi D_k}{4}\sigma_T^*\left[0{,}35(1+k^2) + 1{,}4\ln\mu + (\frac{0{,}85}{k} + 0{,}43k)\ln\frac{1+k}{1-k} + 3{,}6f_n \cdot \mu \cdot k^2 - 1{,}7\right], \qquad (1.176)$$

де $k = d_{пр}/D_k$, f_n =0,10…0,15 – коефіцієнт тертя на контакті метала з циліндричним паском прошивня (пуансона); μ – коефіцієнт витяжки.

При *наскрізній прошивці* максимальна сила $P_{\max}$, що діє на пуансон (на голку діаметром $d_{гол}$) [7, 44]:

$$P_{\max} = \frac{\pi d_{гол}^2}{4}\sigma_{\max.гол}, \qquad (1.177)$$

де за даними А.М. Рижикова та Ю.Ф. Шевакіна максимальне напруження в голці [70]:

$$\sigma_{\max.гол} = \frac{4\sigma_T^*}{d_{гол}}\left[0{,}5\frac{D_1}{d_{гол}}(L_{з.р} - a) + f \cdot a\right]; \qquad (1.178)$$

D_1 – зовнішній діаметр труби; $L_{з.р}$ – довжина заготовки після розпресовки; a – довжина прошитої заготовки, яка відповідає виникненню максимальних напружень в голці; f – коефіцієнт тертя метала по голці.

Як вже було частково показано вище, *технологію пресування* визначають наступні фактори: форма поперечного перерізу та довжина прес-виробу; кількість пресованих ниток; метод пресування; розміри та форма заготовки; температура заготовки і тип нагрівального пристрою; швидкість витікання металу; умови контактного тертя; силові параметри; конструкція пресового інструменту; тип і конструкція преса.

Вихідними даними для розробки технології є форма поперечного перерізу і довжина прес-виробу.

Типовий перелік операцій при виготовленні прес-виробів включає [120…122]:

– два паралельні потоки з підготовки (видалення зовнішніх дефектів обточуванням і розрізка на мірні довжини) та нагріву (при необхідності) заготовки (злитка), підготовку та нагрів (при необхідності) інструмента (матриці, втулки контейнера тощо);

– деформацію металу;

– відділення прес-залишку;

– термічну обробку виробу;

– правку, видалення дефектів;

– контроль;

– розрізанні на замовлені міри довжини;

– травлення, пасивацію, консервацію тощо;

– пакування та здачу продукції на склад або замовнику.

Прикладами застування технологій пресування в Україні стають дані щодо *виробництва пресованих профілів і панелей з алюмінієвих сплавів* [108], а також *виробництво пресованих сталевих безшовних труб* з аустенітних, феритних, аустенітно-феритних легованих і високолегованих нержавіючих марок сталі та нікелевих сплавів, що мають низьку пластичність, яке здійснюється на ПрАТ «Сентравіс Продакшн Юкрейн» (м. Нікополь, Дніпропетровська обл.).

Особливостями виготовлення пресованих профілів стають їх форма і розміри, площа перетину, діаметр описаного кола і теоретична маса 1 м довжини згідно з ДСТУ Б В.2.6-3-95 та урахуванням ряду інших нормативних документів та за кресленнями, погодженими виробником зі споживачем. Заготовка для отримання таких виробів повинна бути як можна більшого перерізу, а обтиснення може сягати 90%. При цьому враховують необхідність забезпечення високої якості прес-виробів, допустиме зусилля, яке обмежується максимальним тиском преса, а також допустиме навантаження на інструмент. Годинну продуктивність пресової установки (агрегата) визначають за найбільш напружено працюючою ділянкою, якою, як правило, є трубопрофільний прес. Всі інші агрегати установки вибирають так, щоб вони забезпечили теоретичну продуктивність трубопрофільного преса. Сучасні трубопрофільні преси проєктують з теоретичним циклом роботи від 30 до 48 с у залежності від їх потужності, що відповідає 120…75 пресувань на годину.

Основним обладнанням для пресування є гідравлічні горизонтальні (найчастіше) або вертикальні (з невеликою потужністю, переважно – для пресування труб) преси зусиллями до 50 МН. Значно рідше застосовують механічні преси.

Параметрами гідравлічних пресів, які наводяться в спеціальній літературі, визначають їх конструктивні особливості та технологічні можливості. Основними з них є: номінальне зусилля, робочий хід, швидкість руху пресуючої траверси і розміри контейнера.

Основними сферами застосування пресованих безшовних сталевих труб, що виготовляютья, зокрема, на ПрАТ «Сентравіс Продакшн Юкрейн» є зони підвищеної відповідальності, агресивні середовища, високі та надвисокі режими тиску і температури.

На цьому підприємстві гарячим пресуванням виготовляють труби:

– загального призначення (для використання в хімічній та нафтохімічній промисловості) діаметром 40…245 мм з товщиною стінки 3,5…38 мм згідно з чинними нормативними документами України, стандартами ASTM A312, DIN 17458 та ін.;

– для котельного устаткування, високотемпературних бойлерів, для енергетичної промисловості, включаючи атомну енергетику діаметром 30…80 мм за рядом вітчизняних Технічних умов та закордонних стандартів ASTM A213, A312, A376, NF A49214;

– для нафтопереробного та металургійного устаткування діаметром 13,5…168 мм згідно з чинними нормативними документами України та закордонними стандартами;

– для машинобудування немірної довжини з попередньою механічною обробкою діаметром 57…168 мм і товщиною стінки від 4…28 мм.

Технологія виробництва труб з використанням експандування на ПрАТ «Сентравіс Продакшн Юкрейн» включає наступний перелік операцій.

1. Розвантаження штанг трубної заготовки, зважування, облік і складування поплавочно, за діаметрами і марками сталей.

2. Порізка штанг на фрезерно-відрізних верстатах під труби мірної довжини.

3. Глибоке верстатне свердління на діаметр отвору 20…70 мм.

4. Токарне виконання заходного конуса і зняття фаски.

5. Зважування.

6. Струменеве знежирення заготовки.

7. Нагрівання заготовки в горизонтальній індукційній печі до температури під експандування 1050…1280 °С (з допустимими відхиленнями ± 10 °С). Подачу заготовок (гільз) у піч здійснюють за марками сталі і поплавково за наявності електронного ярлика (такого собі «Канбан» [68]). У ярлику вказуються: перелік операцій, номер плавки, номер контейнера, зміна, марка сталі заготовки, номер повідомлення, розмір заготовки, розмір труб, нормативний документ, параметри токарної обробки, кількість штук, вага посаду заготовки, прізвища виконавців технологічних операцій, бригадира і працівника ВТК після огляду, дата.

8. Нанесення скломастила: нагріті блоки змащують і подають у прес автоматично за допомогою маніпулятора. Мастило наносять на зовнішню (бічну) поверхню і верхній торець заготовки. Нанесення мастила на зовнішню поверхню перед прошивкою або пресуванням здійснюють шляхом кочення заготовки по столу із скломастилом. Вирівнювання шару скломастила проводиться після кожної прошивки спеціальним вирівнювачем. На торець заготовки мастило наноситься у вигляді тампону зі склополотном або конусних пробок, виготовлених зі склопорошка, висотою 25 мм за формою вхідного конуса заготовки.

9. Прошивку й експандування здійснюють на прошивному пресі зусиллям 12,5 МН при швидкості 50…300 мм/с. Різностінність гільз не повинна перевищувати 2 мм, і контролюється спеціальним пристосуванням. Прогрів внутрішньої втулки контейнера в пресі здійснюють нагрітими заготовками протягом 10…15 хв. Також в автоматичному режимі за допомогою транспортуючого пристрою на пресувальній установці витягується з касети та розміщується попередньо нагрітий деформуючий інструмент.

10. Нанесення скломастила та пресування труб на пресі зусиллям 1944 МН. При цьому, скломастило за допомогою спеціального механізму засипають всередину гільзи. Його кількість встановлюють у залежності від діаметра голки преса і коефіцієнта видовження (витяжки) при пресуванні. При використанні мастильної шайби її товщина залежить від довжини гільзи і повинна бути 10…30 мм для гільз довжиною 500…1000 мм відповідно.

Швидкість при такому пресуванні повинна бути постійною і складати 50…350 мм/с.

11. Видалення прес-залишку.

12. Порізка труб на задані довжини (при необхідності). Перед порізкою в лінії преса здійснюють попередні виміри довжини труби і визначення її зовнішнього діаметра ультразвуковим товщиноміром з виведенням даних на пульт управління преса.

13. Охолодження труб на повітрі або у воді, їх таврування номером плавки і зміни, формування пакетів. Маркування виконують на охолоджувальному столі. На виході труб з охолоджувального столу кожну одиницю оснащують технологічним ярликом.

Труби, охолоджені після пресування у ванні з водою, термообробці не піддаються.

14. Попередня правка на семивалковому прав***и***льному стані.

15. Остаточна правка на десятивалковому прав***и***льному стані.

16. Обрізка технологічної обрізі та порізка труб на задані довжини.

17. Травлення в кислотних розчинах.

18. Термообробка (при необхідності).

19. Травлення (тільки після термообробки).

20. Правка труб (тільки після термообробки).

21. Обрізка технологічної обрізі і порізка труб на задані довжини (тільки після термообробки).

22. Попередній огляд труб ВТК.

23. Огляд труб ВТК, відмітка місць для ремонту (при необхідності).

24. Видалення дефектів поверхні труб – ремонт (при необхідності).

25. Пасивація поверхні (при необхідності).

26. Остаточне приймання труб ВТК, огляд поверхні, таврування та маркування відповідно до вимог нормативних документів та конкретних замовлень.

27. Оформлення документів на готову продукцію.

28. Упаковка труб у пакети. В одному пакеті можуть бути труби тільки однієї марки сталі та плавки, одного розміру, однієї позиції щодо посаду метала у піч.

29. Зважування пакетів.

30. Передача пакетів труб на склад готової продукції або замовнику.

Виготовлення деяких видів металовиробів (сіток, цвяхів, гайок, болтів, гвинтів, шурупів)

Вище були представлені дані стосовно перероблень чорної металургії, що умовно визначаються таким чином:

– I – виготовлення рідкого чавуну;

– II – виготовлення сталі;

– III – обробка тиском.

Часто на додаток до цього переліку виділяють IV перероблення – виробництво труб (*про що мова йшла вище*) і *метизне виробництво*, або *виготовлення металовиробів*.

Метизами називають стандартизировані металеві вироби разноманітної номенклатури. Їх умовно поділяють на вироби [109]:

– *широкого призначення*, що використовуються у повсякденному житті та виготовляться, здебільшого, за Технічними умовами (ножиці, ножі, пилки, топори, лопати, підставки, вішалки, полиці, гаки та багато іншого);

–*промислового призначення*, які застосовують у машинобудуванні, при монтажі різних конструкцій, у побутовій техніці тощо. Їх розміри можуть бути від декількох до сотен міліметрів. Більшість з них – це *кріпильні вироби*.

Взагалі, кріпильні вироби виготовляють зі сталей різних марок, мідних і алюмінієвих сплавів, пластмас (наприклад, капрону, нейлону), а також гуми або картону (допоміжні деталі). Їх застосовують у з'єднаннях деталей нарізевих, заклепкових та з натягом.

Перелік метизів промислового призначення включає сталеву холоднокатану вузьку стрічку (штабу) за ДСТУ EN 10140, сталевий дріт і вироби з нього: дріт для армування залізобетонних конструкцій за ДСТУ Б В.2.6-167:2011 та ін.; канати дротяні за ДСТУ EN 12385-4, ДСТУ 7665, ДСТУ 7668 та ін.; різні цвяхи за ДСТУ ГОСТ 4028 та ін.; кріпильні вироби: болти, гвинти, шпильки і гайки за ДСТУ ISO 8992, ДСТУ ISO 3506-1, ДСТУ ISO 225, ДСТУ ISO 272 та ін.; різні шурупи і саморізи за ДСТУ ГОСТ 809, ДСТУБ В.2.6-9-2008 та ін.; шпильки за ДСТУ ISO 8839; коуші за ДСТУ EN 13411-1; сітки за ДСТУ Б В.2.6-173:2011, ДСТУ EN 62305-3 та ін.; дюбелі; заклепки за ДСТУ ГОСТ 14798 та ін., пружинні шайби, шплінти; залізничні кріпильні вироби: закладні болти за ДСТУ ГОСТ 16017; костилі за ДСТУ ГОСТ 5812; клеми за ДСТУ ГОСТ 33186; шайби різні та ін.; гаки телеграфні та телефонні й інші вироби (рисунок 1.124)

Рисунок 1.124 – Деякі види метизів промислового призначення [109]

Більш повний перелік відповідних нормативних документів наведено у табл. А1 Додатку А).

У рамках представленої класифікації виділяють *два види будівельних кріпильних виробів:*

– вироби, що мають конкретний стандартизований крок нарізі або метричне позначення, тобто *метричні вироби* (часто саме метричні вироби називають «*метизами*»);

– вироби, що мають різноманітну конфігурацію та бувають самих різних форм (наприклад, анкера, шурупи, саморізи тощо).

За видом поверхні розрізняють кріпильні вироби (деталі):

– *нарізні із зовнішньою наріззю* – гвинти, болти, шурупи, шпильки;

– *нарізні із внутрішньою наріззю* – гайки, вкладиші;

– *гладкі* – заклепки, шплінти, штифти, цвяхи тощо.

При виготовленні метизних виробів використовуються майже всі види деформування металу: волочіння (при виготовленні дроту-заготовки для багатьох видів метизів); гаряча та холодна штамповка (висаджування), наприклад, при виробництві болтів, гайок, заклепок тощо; поперечна прокатка (наприклад, при виконанні нарізі на заготовках виробів); листова штамповка (наприклад, при вирубці шайб); вигин (наприклад, при формуванні заготовок дроту для сіток) тощо.

Більшість видів метизів відноситься до масової продукції, що зумовлює вимоги до відповідних виробництв та заходів технічного контролю.

Найбільш розповсюдженими метизами та такими, що широко використовуються, є арматурний дріт і дротяна сітка, болти, шпильки, гайки, гвинти, шурупи та цвяхи.

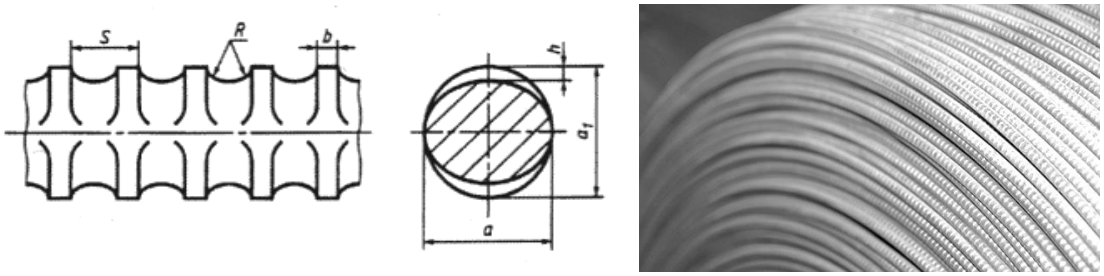
Нижче надано характеристику деяким типовим видам метизних виробів.

Основою виробництва багатьох видів метизної продукції є *сталевий дріт.* Його характеристику та технологію виробництва викладено вище.

Окрім дроту як товарної продукції застосовують ***арматурний холоднотягнутиий дріт для армування залізобетонних конструкцій*** за ДСТУ 6727, ДСТУ ISO 6934-2, ДСТУ Б В.2.6-167:2011 та деякими іншими НД. Цей дріт виробляють зі сталі Ст3сп діаметрами 3,0, 4,0 та 5,0 мм у прутках і бухтах (мотках) двох класів**:**

– круглий у перетині **–** В-1, що принципово не відрізняється від звичайного дроту з круглим перерізом;

– периодического профилю **–** Вр-1 з насічкою (рисунок 1.125).



а *б*

Рисунок 1.125 – Арматурний дріт Вр-1 за ДСТУ 6727: *а* – схема профілю; *б* – фрагмент бунта

Арматурний дріт класу Вр-1 виготовляють з катанки послідовною комбінацією холодного поточного волочіння крізь монолітні (до потрібного номінального діаметра) та роликову волоки, ролики якої мають рифлені рівчаки. Аналогом останнього технологічного переходу є періодична «прокатка» (*див. вище*). Недоліком цієї продукції є низьке нормоване значення відносного видовження: 2…3%, що обмежує можливості її застосування для конструкцій, які піддаються експлуатаційним деформаціям вигину та розтягнення.

Розмірний ряд рифленого арматурного дроту розширюють до 12…18 мм стандарти DIN 488, а також аналогічні стандарти інших країн. Така відповідна продукція може мати перетин та властивості, які відрізняються від вимог вітчизняних нормативних документів.

Зокрема, з 1991 р. всі еропейські країни перейшли на використання холоднодеформованого арматурного дроту діаметром 6…10 мм класу міцності А500С. Цей дріт виготовляють з тригранним рифленням зі сталей марок 3пс та 3Гпс. Він повинен мати межу текучості 500 Н/мм^2 та відносне видовження не менше 14%.

Гладкий (або рифлений) дріт діаметром від долей до 8 мм і вище слугує заготовкою при ***виробництві сіток*** [110]. Їх різновиди поділяють на групи *тканих (плетених), зварних* і *просічно-витяжних* сіток (рисунок 1.126).

Процес утворення тканих сіток (*див. рис. 1.126, а*) здійснюється на металоткацькому верстаті. Його робочі органи діють безпосередньо на дріт *основи* (у подовжньому напряму) і дріт *утка* (у поперечному напрямі), переміщують їх у певних послідовності та напрямах та формують сітку шляхом взаємного переплетення вказаних дротів.

Це реалізується наступним чином.

При подовжньому переміщенні вже готової частини сітки направляючими планками (*ремизками*) половину дротів *основи* почергово підіймають, а іншу опускають, формуючи

між ними *зев*. Коли зев повністю розкривається, в ньому ударом *берди* розміщується *човник* зі шпулею *утка* (рисунок 1.127).

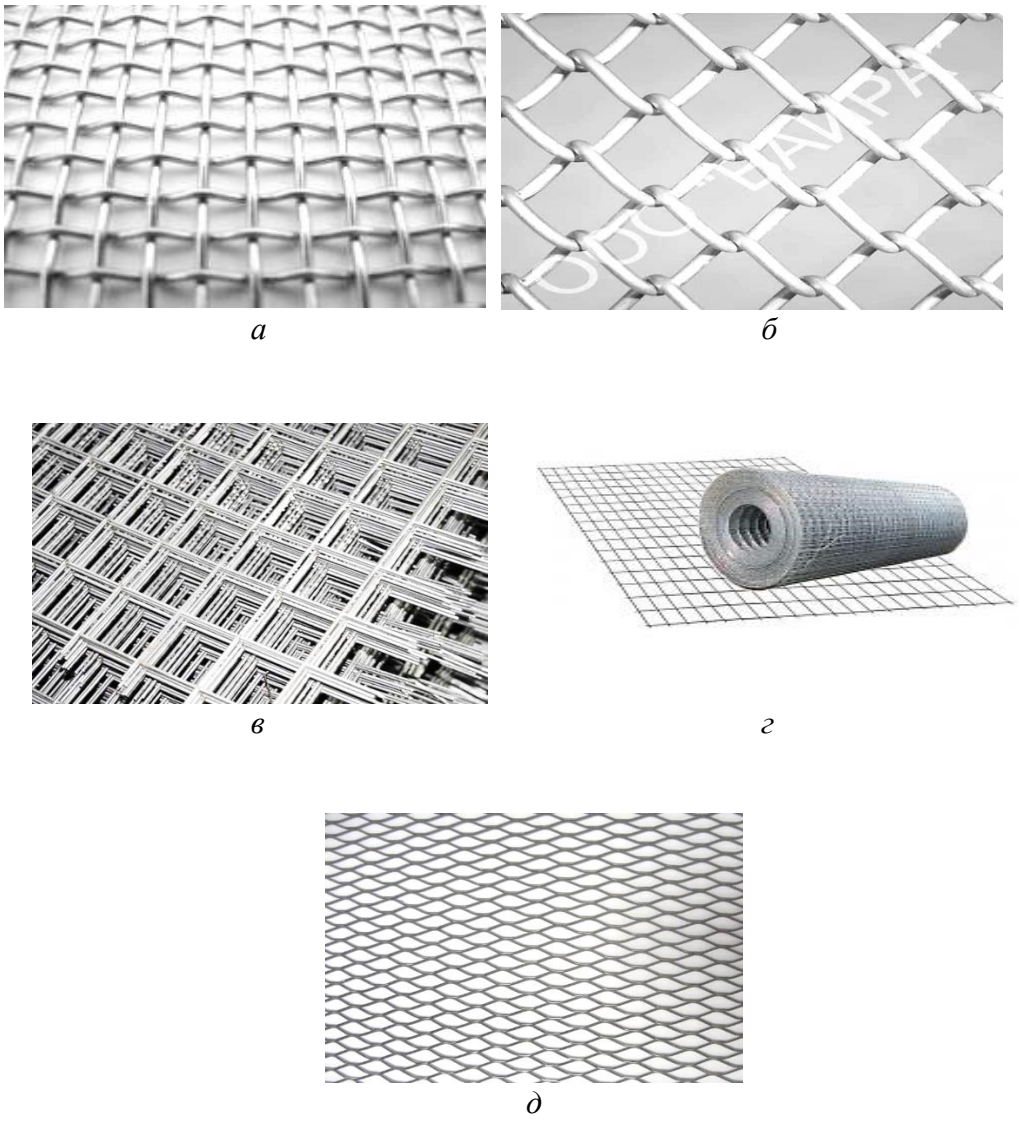


Рисунок 1.126 – Зовнішній вигляд сітки: ткана (плетена) (*а*); «рабиця» (*б*); зварна у картках (*в*) та рулоні (*г*); просічно-витяжна (*д*) [110]

Після цього ремизки змінюють своє положення, знову перехрещуючи дроти основи після дроту утка, утворюючи наступний зев для розміщення наступного дроту утка і т.д.

Готова сітка безперервно намотується на *приводний* товарний барабан, який подтримує необхідний натяг дротів основи. Рівномірна подача дротів основи з подаючого (*навойного*) барабана здійснюється за допомогою регулятора.

В результаті почергового утворення зева кожною половиною дротів основи їх метал піддається багаторазовому згину-розгину ремизками. Це враховують при налаштуванні висоти зева та пересування в нього дротів утка.

Дроти основи та утка, переплітаючись у сітці, вигинаються один відносно іншого та отримують у готовому виробі хвилеподібну форму. Це може зумовити *скорочення* проєкції на площину уточних дротів по ширині та дротів основи – по довжині сітки. При цьому, укорочення основи та утка взаємно пов’язані.

Величина такого укорочення залежить від характера переплетення, відношення діаметрів дротів основи та утка, щільності, механічних властивостей дроту та його натягнення на верстаті.

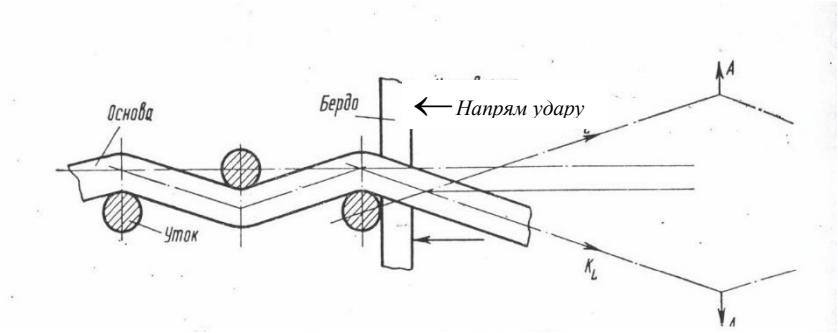


Рисунок 1.127 – Схема розміщення у сітці уточного дроту (заштрихований) при ударі берди [111]

Для отримання якісної сітки необхідно, щоб дроти основи та утка деформувалися рівномірно. Це гарантує добре з'єднання та однаковий знос дротів основи та утка у сітці.

Для виготовлення тканих сіток використовують термічно оброблений дріт з низьковуглецевої сталі світлий та із захисним покриттям цинком або оловом, з корозійностійких сталей 12Х18Н9, 12Х18Н9Т, 12Х18Н10Т та ін., а також дріт з кольорових металів і сплавів. Для виготовлення важких сіток використовують нагартований дріт з низько– та високовуглецевої сталей з межею міцності до 1600…1800 Н/мм^2 (160…180 кгс/мм^2).

За відомими залежностями [112] можна оцінити можливість виготовлення сітки із заданим відношенням розміру a гратки до діаметра d дроту на верстаті певного типу з відомою силою удара берди. На практиці рівномірна деформація дротів основи та утка досягається без утруднень при відношенні a/d не менше, ніж 4:1, якщо останній має межу міцності не більше 600 Н/мм^2 (60 кгс/мм^2).

Якщо розрахована сила, що необхідна для деформування дротів утка, більше, ніж сила удара, то для виготовлення такої сітки на відповідному обладнанні дріт утка необхідно піддати попередньому рифленню (*канілірування*).

При виготовленні сіток з нагартованого та/або високоміцного дроту, та/або великих діаметрів, канілірування піддають не тільки дріт утка, але й дріт основи.

Рифління дроту здійснюють на канілірувальних верстатах за допомогою пари дисків із зубами, які розміщені один відносно іншого таким чином, щоб зуб одного диска був точно посередині між двома зубами іншого диска (рисунок 1.128). Відстань між вершинами зубів дорівнює кроку сітки.

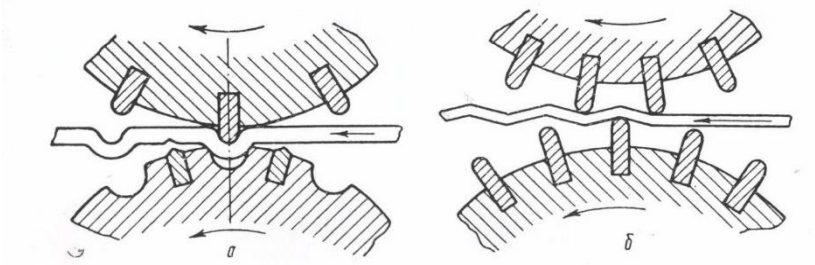


Рисунок 1.128 – Схеми канілірування дроту: *а* – штамповкою; *б* – рифлінням [111]

Дисками можна здійснювати не тільки рифління, але й штампування дроту діаметром до 5 мм з постійним або змінним кроком (див. на рис. 1.128, *а* – наявність виїмки на нижньому диску). Дріт з d>5 мм штампують на спеціальних пресах з його кроковою подачею.

Дріт, який використовують для виготовлення тканих сіток, попередньо перемотують на котушки для зручності проведення наступних операцій обробки на верстаті, навивці (*навою*) основи, *пробору* дротів основи у ремизки та в бердо.

Призначення *навивки основи* – намотка на задану кількість паралельно розташованих відрізків дроту заданої довжини. Це дуже відповідальна операція, оскільки від її виконання залежить якість сітки та продуктивність ткацького верстата. Тому для сіток відповідального призначення і високої щільності основу навивають, не допускаючи обривів і приєднання відрізків дроту один до одного. При цьому:

– натягнення усіх відрізків дроту повинне бути однаковим і постійним (інакше вони будуть обриватися);

– навивка не повинна погіршувати фізико-механічні властивості дроту (останній не повинен витягуватись і піддаватись різким стираючим впливам);

– розподіл відрізків дроту по ширині навойного барабана має бути рівномірним;

– усі відрізки дроту повинні бути однакової довжини.

Навивку основи здійснюють на спеціально обладнаних навойних станціях або безпосередньо – на ткацькому верстаті. При великій кількості відрізків дроту у сітці навивку основи ведуть частинами – поясами, починаючи від одного кінця навойного барабана і закінчуючи іншим.

При подготовці основи для сіток з рифленого дроту (*див. рис. 1.128*) діаметром до 6 мм після рифління його намотують на *ребристий* навойний барабан, а дріт більшого диаметра в процесі рифління розрізають на прутки довжиною 10…20 м. Операцію пробора основи здійснюють на верстаті.

Наступною підготовчою операцією є *проборка* – просування у певній послідовності дротів основи крізь спеціальні отвори ремизних рам берди. Кількість ремизних рам («ремизів», «ремизок»), які призначені для утворення зева на ткацькому верстаті, повинно бути не менше двох і залежить від характера переплетення дотів у сетці.

Берда рівномірно розподіляє дроти основи за шириною сітки, забезпечує необхідну його густину за основою і слугує для прибою дротів утка до полотна сітки в процесі ткацтва. Воно також є направною площиною при прокидці човника зі шпулею.

Порядок пробора дротів основи у ремизи залежить від характера переплетення сітки. Дроти основи, які однаково переплітаються з дротами утка, пробирают в одну ремизну раму. При іншому переплетенні дроти основи пробирають у дві або чотири ремизні рами.

Дріт утка подається до зеву основних дротів автоматично за допомогою човника. При виготовленні сіток з рифленого дроту уток подають вручну або за допомогою рифлених дисків, які встановлені на станині верстата.

По закінченні операції пробору, здійснюють заправку ткацького верстата та започатковують виготовлення сітки.

В якості прикладу, сітку з розміром комірок 15…50 мм і шириною полотна 800…2000 мм виготовляють на сучасних автоматах для плетіння марки *UDAFV (країна-виготівник – ФРН)*.

Після зняття з верстата готову сітку контролюють та пакують.

Декілька іншу технологію та оснащення застосовують при ***виготовленні сітки «рабиця»*** (*див. рис. 1.126, б*) [111]. Її поділяють за формою комірок на: сітку плетену ромбічну (гострий кут ромба 60°) і сітку плетену квадратну.

Сітку «рабиця» використовують для утворення загорож, просіювання матеріалів, кріплення гірничих виробіток на шахтах і копалинах, для теплоізоляційних робіт, з неї роблять клітки та вольєри для тварин тощо.

Сітку цього типу виготовляють як шляхом укручування (*вплетення*) однієї дротяної спіралі з плоским витком в іншу таку ж спіраль безпосередньо робочим органом відносно простого верстата, так і на високопродуктивних сіткоплетільних верстатах-напівавтоматах, переважно німецького походження (зокрема, типу *UDAFV*).

Сировиною для виготовлення сітки «рабиця» слугує низьковуглецевий сталевий дріт. Також використовують дріт з полімерним покриттям та оцинкований. Іноді сітку «рабиця» виробляють з нержавіючої сталі чи алюмінієвого дроту. Вона поставляється у рулонах шириною (висотою рулону) від 1 м і довжиною до 18 м. Торці рулонів пакують у щільний папір, мішковину, штучну тканину або поліетилен.

В останні роки замість тканої сітки в ряді випадків почали застосовувати ***зварну сітку*** *(див. рис. 1.126, в, г)*, зокрема, для армування залізобетонних конструкцій за ДСТУ Б В.2.6-173:2011 та ін. НД [112, 113] та скла, виготовлення кліткових батарей у птичниках і кліток для вирощування цінних хутрових звірей тощо. Її успішно застосовують замість сіток кручених, плетених, особливо, у випадках, коли потрібна сітка з великими розмірами комірки з тонкого дроту, наприклад, для теплоізоляційних робіт.

Використання зварних сіток дозволило суттєво підвищити техніко-економічні показники їх виробництва. Тому їх виробництво розширюється.

Для виготовлення зварних сіток використовують відпалений або зміцнений дріт з низьковуглецевої сталі. Для підвищення корозійної стійкості на зварну сітку наносять захисне цинкове або пластмасове покриття. Для досягнення такої ж мети випускають зварні сітки з корозійностійкої сталі.

За точністю розмірів такі сітки виготовляють:

– нормальної точності;

– підвищеної точності – з позначенням «*П*».

За розміщенням робочої арматури сітки поділяють на такі категорії:

– з робочою арматурою в одному з напрямів (подовжньому або поперечному) та розподіденою арматурою за іншим напрямом;

– з робочою арматурою в обох напрямах.

У залежності від діаметра стрижнів зварні сітки поділяють на*:*

– *легкі* – з подовжніми і поперечними стрижнями діаметром від 3 до 10 мм включно;

– *важкі*, що мають, як мінімум, в одному напрямі стрижні діаметром 12 мм і більше.

До *легких* можна віднести зварні сітки для армування залізобетонних конструкцій за ДСТУ Б В.2.6-173:2011, які виготовляють з дроту діаметром 3…10 мм з кроком подовжніх дротів 100…400 мм і поперечних – 100…300 мм. В одному напрямі дроти повинні мати стрижні однакового діаметра. Такі сітки виготовляють з квадратними або прямокутними комірками.

Легкі зварні сітки з шириною рулонів b =2350 мм можуть виготовлятися з відрізків арматурного дроту класу Вр-І з діаметром 3…5 мм, розташованих у площині та орієнтованих у двох взаємно перпендикулярних напрямках, з'єднаних у місцях перетину контактним точковим зварюванням, а також із стрижневої гарячекатаної арматурної сталі класів А-ІІІ та А-І з діаметром 6…10 мм.

В якості робочої арматури у *важких* сітках застосовують стрижневу гарячекатану арматурну сталь класу А-ІІІ з діаметром 12…40 мм і термомеханічно зміцнену арматурну сталь класу Ат-ІІІС з діаметром 12…18 мм.

Вказані сітки позначають маркуваннями наступної структури

$$xC\frac{d}{d_1}b\times l\,, \tag{1.179}$$

де x – позначення типу сітки; C – літерне позначення найменування *зварної* сітки (з додаванням для рулонних сіток індексу «*р*»); d, d_1 – діаметр відповідно подовжніх і поперечних стрижнів із зазначенням класу арматурної сталі; b, l – відповідно ширина і довжина сітки в сантиметрах.

Приклади умовного позначення [113]*:*

– важкої сітки типу 1 з подовжніми стержнями з арматурної сталі класу А-ІІІ діаметром 25 мм, з кроком 200 мм і з поперечними стержнями з арматурної сталі класу А-

III діаметром 10 мм, з кроком 600 мм, шириною 2050 мм і довжиною 6650 мм, з випусками подовжніх і поперечних стрижнів 25 мм:

$$1C\frac{25AIII}{10AIII}205\times665;$$

– пласкої легкої сітки типу 4 з подовжніми стержнями з арматурної сталі класу А-IIIС діаметром 10 мм і поперечними стрижнями з арматурного дроту класу Вр-I діаметром 5 мм, з кроком подовжніх і поперечних стрижнів 100 мм, шириною 2550 мм і довжиною 6050 мм, з випусками подовжніх і поперечних стрижнів 25 мм:

$$4C\frac{10AIIIC-100}{5BpI-100}255\times605;$$

– рулонної сітки типу 5 з подовжніми і поперечними стрижнями з арматурного дроту класу Вр-I діаметром 5 мм, з основним кроком подовжніх стрижнів 200 мм і добірним –100 мм, з кроком поперечних стрижнів 150 мм, шириною 2340 мм і довжиною 120 000 мм, з випусками подовжніх стрижнів 125 і 175 мм, з випусками поперечних стрижнів 20 мм:

$$5Cp\frac{5BpI-200(100)}{5BpI-150}234\times12000\frac{125+175}{20}.$$

Для армування скла використовують зварну сітку з дроту діаметром 0,5…0,6 мм та розміром комірки 12,5х12,5; 12,5х25 та 25х25 мм. Для попередження деформації сітки при її заливці розплавленим склом поперечні дроти вигинають на глибину до 2,5 мм на зварювальній машині в процесі зварювання. До такої сітки пред'являються особливі вимоги стосовно чистоти поверхні, оскільки будь-які забруднення поверхні (іржа, сліди мастила, кольори побіжалості тощо) зумовлюють забарвлення скла, що є недопустимим.

При *виготовленні зварних сіток* кожний поперечний дріт приєднують до подовжнього дроту в точці їх перехрещення за допомогою контактного зварювання, яке є різновидом контактного зварювання, на спеціальних зварювальних машинах.

У сітках з робочою арматурою з гладкої стрижневої арматурної сталі класу А-I повинні бути зварені все перетини стрижнів.

У сітках з робочою арматурою періодичного профілю допускається зварювання стрижнів, що перехрещуються через одне або через два перетини в шаховому порядку, якщо у робочих кресленнях відсутні спеціальні вказівки.

Робоча арматура на довжині стрижня 6 м не повинна мати більше двох стикових з'єднань, а на довжині стрижня 12 м – не більше трьох стикових з'єднань.

Сітка формується на зварювальній машині під час зварювання.

Машини контактного зварювання поділяють на два класи:

– загального призначення;

– спеціальні.

На *машинах загального призначення* зварюють деталі широкої номенклатури за конструкцією, маркою та товщиною метала. Вони класифікуються: *за видом одержуваних при зварюванні з'єднань* на точкові, шовні, рельєфні, стикові; *за конструктивним виконанням* – на стаціонарні радіального типу, стаціонарні пресового типу, підвісні з вбудованим трансформатором, підвісні з окремим трансформатором; *за типом джерела зварювального струму* – такі, що працюють на змінному струмі, низькочастотні, постійному струмі, конденсаторні; *за типом зусилля стиснення* – з постійним зусиллям, зі змінним зусиллям.

Спеціальні машини призначені, як правило, для зварювання певних вузлів, конкретних виробів.

Контактне зварювання засновано на тепловому впливі електричного струму з наступним стисканням місця контакту. Якість зварювального сполучення залежить від сили електричного струму на контакті, тривалості зварювання та сили притиску. Зокрема, для забезпечення якісного зварювання двох дротів, що перехрещуються, величина осаджування в місці контакта має бути не менше 0,2 від суми діаметрів дротів.

При зварюванні прагнуть до мінімізації об’єму, який нагрівається, для запобігання роззміцненню металу на великій довжині. Це особливо важливо для сіток, які виготовляють з термічно необробленого дроту.

У зв’язку з цим, зварювальне сполучення контролюють на міцність при випробуванні на зріз (для арматурної сітки) або відрив дротів сітки (для кліток та армованого скла). При цьому на певну кількість подовжніх дротів накладають один або декілька поперечних дротів.

Згідно до вимог ДСТУ Б В.2.6-169:2011 хрестоподібні та стикові місця зварювання стрижнів у сітках слід здійснювати *контактним точковим зварюванням*.

Розрізняють м'який і жорсткий режими точкового зварювання.

М'який режим характеризується часом 0,5…3 с та плавним нагріванням заготовок з густиною струму не більше 100 А/мм^2. Перевагами такого режиму є менші навантаження електричної мережі; менш потужні та більш дешеві зварювальні машини; зменшення теплового впливу на зону зварювання. М'який режим застосовують для сталей, схильних до загартування.

Жорсткий режим точкового зварювання характеризується часом 0,1…1,5 с, значеннями густини струму 120…300 А/мм^2 і необхідним тиском при наступному стисканні 30…80 Н/мм^2. Перевагою жорсткого режиму є зменшення часу зварювання і підвищення продуктивності обладнання. До недоліків відносяться підвищене навантаження електричної мережі; використання потужних і більш кошторисних зварювальних машин. Жорсткий режим застосовують при зварюванні алюмінієвих і мідних сплавів, які мають високу теплопровідність, деталей нерівної товщини і різнойменних деталей, а також високолегованих сталей з метою збереження їх корозійної стійкості [114].

Приблизно на 70% зварювальних машин здійснюється ***точкове зварювання*** наступним чином.

Подовжні дроти подають у зварювальну машину з мотків або котушок. Спосіб подачі поперечних відрізків дроту до зони зварювання залежить від їх діаметра.

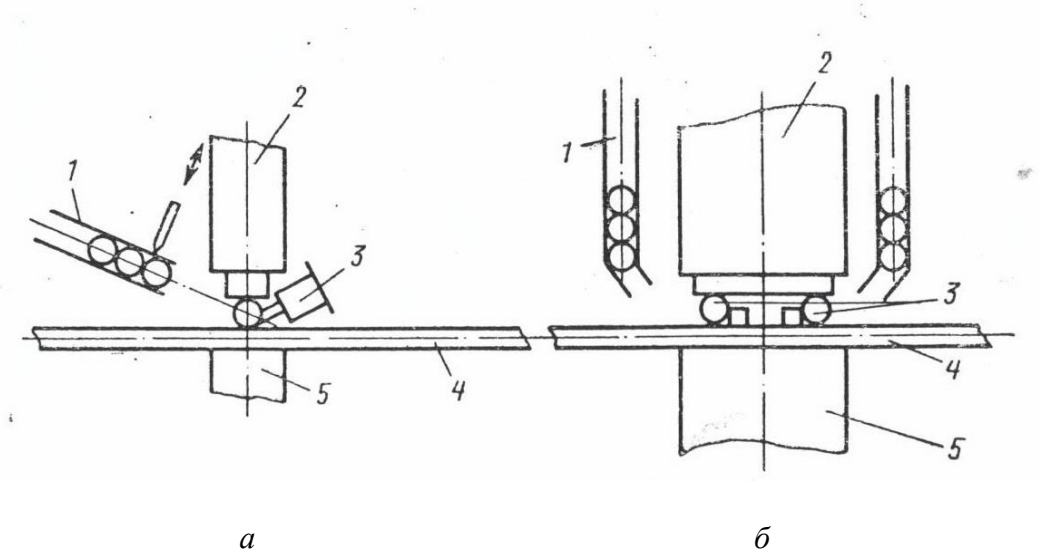
Дріт діаметром 2…10 мм спочатку рихтують і розрізають на прутки заданої довжини, а потім подають до бункера, а з нього – до зони зварювання. Одночасно можна подавати один або два прутки (рисунок 1.129).

Бункер можна встановлювати збоку машини. В цьому випадку поперечні прутки дроту подають роликовим штовхателем і фіксують у зоні зварювання притиском або магнітом.

Є зварювальні машини, у яких поперечний дріт діаметром 1,5…2,5 мм подається не з бункера, а зі шпулі або мотка, наприклад, при виготовленні зварної сітки (рисунок 1.130, *а*).

У цьому випадку дріт 1 з мотка 2 через правильний пристрій 3 подається у положення I і відрізається ножицями 4. Потім відрізаний пруток спеціальним пристроєм пересувається у положеннння II – до зони зварювання. Пристрій утримує пруток до момента зняття електродів. Захвати вивільняють його, і пристрій повертається у положення I для захоплення наступного частини дроту. Як видно, кінематично цей спосіб більш складний ніж подача з бункера.

Спосіб подачі поперечного дроту діаметром менше 1 мм при виготовленні зварної сітки показаний на рис. 1.130, *б*. У даному випадку по обидві сторони полотна сітки на відстані, що дорівнює кроку поперечного дроту, знаходяться штирі. Вони закріплені на стрічкових транспортерах, які рухаються у напрямі подачі. Поперечний дріт 1 у точці 2 за допомогою подаючого пристрою 3, який здійснює зворотно-поступальний рух, накладається на дроти 4 основи. Як тільки поперечний дріт сягає крайнього положення, транспортер із закріпленим на штирях дротом переміщується на один крок, і у положенні 5 здійснюється зварювання. Пристрій, що подає, у цей момент повертається назад, прокладуючи наступний поперечний дріт.



а *б*

Рисунок 1.129 – Схема подачи дроту до зони зварювання: *а* – по одному поперечному прутку; *б* – по два прутки; 1 – бункер з прутками; 2, 5 – нижній та верхній електроди; 3 – фіксатор положення верхнього прутка; 4 – подовжній дріт [111]

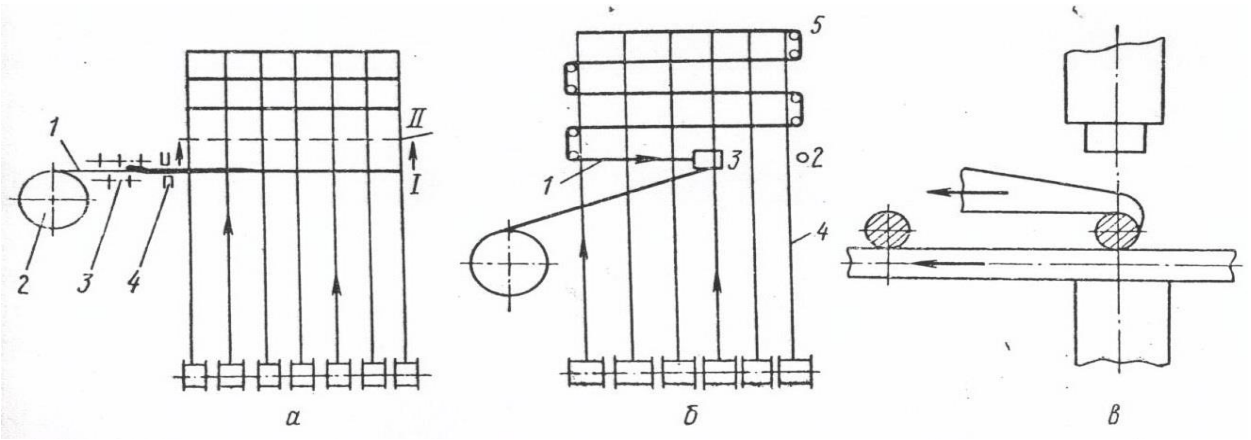


Рисунок 1.130 – Схеми подачі поперечного дроту при виготовленні сітки: *а* – з мотка або котушки; *б* – теж саме при діаметрі дроту менше за 1 мм; *в* – пересування полотна сітки за допомогою гачків [111] (пояснення позицій – у тексті)

Замість стрічкових транспортерів для пересування дроту може бути використаний вал, у торцових фланцях якого зроблені пази на відстані, що дорівнює кроку сітки.

У залежності від діаметра дроту у сітці застосовують різні способи подовжньої подачі її полотна. Найбільш постим є спосіб подачі за допомогою гачків **(**рис. 1.130, *в***)**.

Гачки захоплюють вже приварений поперечний дріт і пересувають сітку на відстань одного кроку. Цей спосіб застосовують тільки для дроту досить великого діаметра, щоб він не деформувався під дією гачків.

Можливим є застосування й інших способів примусової подачі дротів основи з використанням прав*и*льного та подаючого пристроїв. Останній може бути механічним, гідравлічним або пневматичним.

Застосовується також комбінова подача, коли з однієї сторони подається подовжній дріт, а з іншої – за допомогою гачків пересувається сама сітка.

Також для подачі сітки з тонкого дроту застосовують пристрій з двома валками, які затискують сітку, захоплюють її та передають на приймальний валик.

Готову сетку змотують у рулон (*див. рис. 1.126, г*) або розрізають ножицями на картки.

Сітки повинні зберігатися в закритому приміщенні. Пакети сіток слід зберігати в горизонтальному положенні окремо за марками у штабелях висотою не більше 2 м. Рулони сіток складують не більше ніж у три яруси. При зберіганні і транспортуванні кожен пакет повинен опиратися на дерев'яні підкладки товщиною не менше 30 мм.

При транспортуванні сіток у критих вагонах маса рулону повинна бути 400…500 кг.

При дрібних відправленнях у критих вагонах партіями не більше 10 т для оберігання транспортних засобів і вантажів від механічних пошкоджень рулони сіток і їх торці повинні бути обгорнуті папером за ДСТУ ГОСТ 6749 та пакувальною тканиною за ДСТУ ГОСТ 5530 або іншими пакувальними матеріалами, які не погіршують якості упаковки.

Просічно-витяжна сітка представляє із себе лист с ромбоподібними комірками-отворами, які розміщені у шахматному порядку (*див. рис. 1.126, д*). Таку продукцію зазвичай застосовують при нанесенні невеликого шару будівельної суміші.

Відповідна технологія виготовлення передбачає *пробивку* (як операцію листової штамповки – *див. вище*) у листовій металевій заготовці отворів з наступним розтягненням листа та надання йому потрібної форми.

Поставляють таку сітку у рулонах шириною 1 м, а трудовитрати з її виготовлення зіставні з виробництвом рулонної зварювальної сітки.

Одним з видів кріпильних виробів, потреба в яких становить біля одного відсотка від виплавки сталі є ***цвяхи*** (рисунок 1.131).

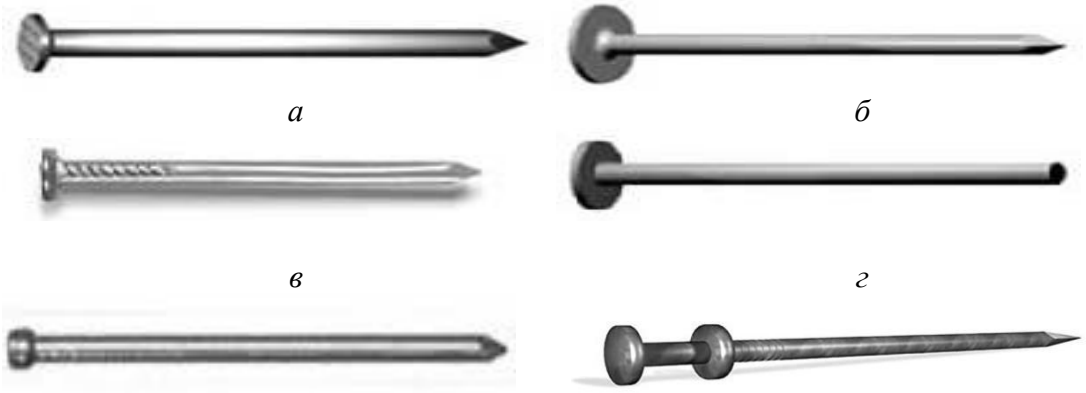


Рисунок 1.131 – Деякі види цвяхів: *а* – цвях будівельний; *б* – цвях толевий; *в* – цвях тарний; *г* – цвях формувальний; *д* – цвях столярний (ТУ У 25.9-02969248-005:2012); *е* – цвях з двома голоками («дуплет») [115]

Незважаючи на розвиток технологій кріплення, цвяхи залишаються найпопулярнішим і найвживанішим витратним матеріалом будь-якого будівництва.

За формою стрижень цвяха може бути циліндричним, паралелепіпедним, конусоподібним або пірамідальним. Відомі спроби виготовлення цвяхів з арматурного дроту періодичного профілю та зі скрученого паралелепіпедного дроту.

Цікавими є цвяхи зі спіральною насічкою, близькі за своїми експлуатаційними властивостями до шурупів, и «трефові» цвяхи з компенсаційною канавкою, яка запобігає поступовому розбовтуванню дерев’яних з’єднань при коливаннях вологості і температури.

В останній час для забивання цвяхів замість молотків все частіше застосовують цвяхозабивальні пневматичні пістолети, які забезпечують суттєве зростання продуктивності відповідних робіт. Такі пістолети, що використовують енергію повітря з тиском 4…7 атм, дозволяють за секунду забивати до дев’яти цвяхів діаметром 2,1…4 мм і довжиною 30…100 мм, зібрані в обойми до 360 шт.

Подібна технологія потребує точного (не гірше 0,01 мм) виготовлення головки («шляпки») цвяхів.

Дуже популярними у будівників стали цвяхи типу «дуплет», що мають другу головку, яка розташована на невеликій відстані та на одній осі з першою (див. рис. 1.131, *е*). При монтажу тимчасових будівельних конструкцій: дерев'яної опалубки, лісів, огорож тощо, – такі цвяхи забивають до першої (від дошки) головки, а друга слугує зручному і акуратному вилученню цвяха під час демонтажу.

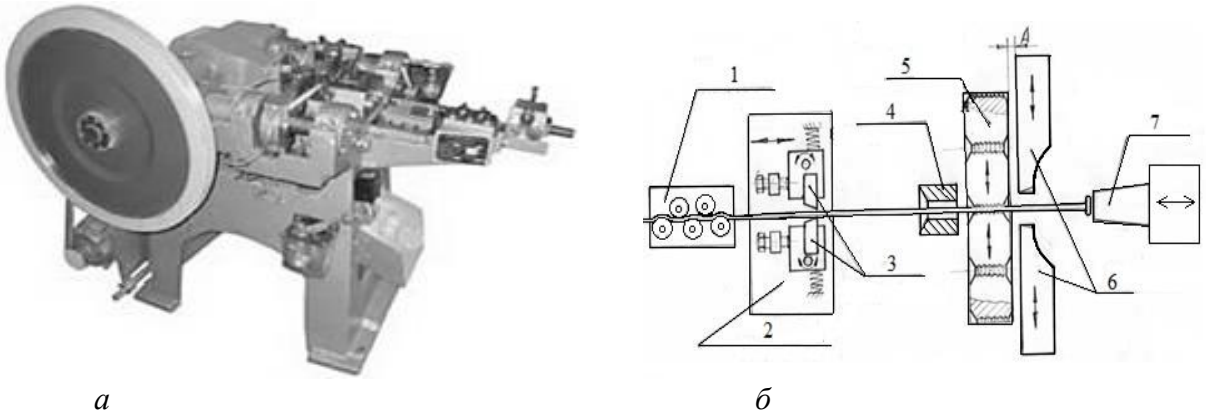
Властивості цвяхів регламентуються стандартами, технічними умовами або іншою нормативно-технічною документацією, зокрема, зразками-еталонами замовника.

Зазвичай, цвяхи виготовляють холодним висаджуванням з термічно необробленого дроту загального призначення. Цвяхи, призначені для спеціальних цілей, також можуть виготовлятися з металу підвищеної стійкості проти корозії, з кольорового металу (сплаву), мати захисне або інше покриття у залежності від вимог під час експлуатації.

Для виготовлення сталевих цвяхів використовують дріт діаметром 0,7…0,9 мм з допуском по діаметру 0,08 мм; діаметром 1,0…3,0 мм з допуском 0,12 мм; діаметром 3,5…6 мм з допуском 0,16 мм і діаметром 7 і 8 мм з допуском 0,2 мм.

На поверхні дроту не повинно бути тріщин, закатів, іржі та окалини. Допускаються невеликі риски глибиною не більше допуску по діаметру.

Найбільш поширеними при виготовленні цвяхів є автомати ударної дії з горизонтальним розташуванням інструмента (рисунок 1.132).



а *б*

Рисунок 1.132 – Зовнішній вигляд (*а*) і схема роботи автомата ударної дії з виробництва цвяхів (*б*): 1 – рихтувальні ролики правильного пристрою; 2 – механізм, що подає; 3 – зубильця; 4 – напрямна втулка; 5 – затискний механізм; 6 – обрубні ножі (кусачки); 7 – ударний пристрій [116]

Наприклад, на автоматі типу Z94-1C виготовляють цвяхи діаметром 0,9…1,6 мм і довжиною 9…25 мм при продуктивності 450 шт/хв. На автоматі Z94-6.5C виготовляють цвяхи діаметром 4,5…6,5 мм з довжиною 100…200 мм при продуктивності 160 шт/хв. На дротяно-цвяховому автоматі моделі К09.117.02 виготовляють будівельні цвяхи, а також тарні, покрівельні, оздоблювальні та ін., випуск яких забезпечується зміною інструмента. Цей верстат розрахований на виготовлення цвяхів діаметром 2…5 мм, характеризується безступеневим регулюванням їх довдини у діапазоні 13…150 мм.

Продуктивність обладнання визначається кількістю ходів ударного пристрою (*див. рис. 1.132, б*), яка може бути у межах 250…525 шт/хв. за рахунок заміни шкивів на приводном валу (*див. рис. 1.132, а*). Простота експлуатації дозволяє оператору обслуговувати одразу три таких автомати.

При масовому виробництві цвяхів застосовують наступний перелік технологічних переходів (*див. рис. 1.132, б*): заправка розмотувального пристрою → заправка дроту в автомат → випрямлення дроту в пристрої 1 → подача механізмом 2 дроту на розмір

довжини цвяха → затиск дроту плашками 5 з відокремленням відрізків дроту та одночасним формуванням загостреного кінця обрубними ножами (кусачками) 6 → скидання заготовок цвяхів відбоєм → висадка головки цвяха ударним пристроєм 7 → скидання цвяхів у бункер → транспортування цвяхів на полірування → полірування → упаковка і складування.

Процес формування цвяха у висадочних пресах-автоматах з кривошипним механізмом базується на міттєвих ковочних ударах, що супроводжується частим розлагодженням, сильним шумом та надзвичайно малою стійкістю ріжучого та ударного інструменту. При цьому тільки только 10…20% повного оберта вала використовується безпосередньо на роботу з утворення головки та вістря цвяха, а інший рух вала витрачається на холостий хід инструмента та зворотній рух молотка з пуансоном. Це формує резерв щодо підвищення продуктивності обладнання.

Всі вказані недоліки усуваються у верстатах для вироблення цвяхів ротаційного типу, в яких деформація металу здійснюється не за рахунок удара, а завдяки тиску.

У такому автоматі заготовка цвяха захоплюється матрицею затискного барабана, і потім під час обертання останнього поддається висаджуванню пуансоном, який гойдається [117].

Сучасне цвяхове виробництво обладнують, як правило, пресами-автоматами ротаційного типу, на яких виробляють цвяхи довжиною від 6 до 250 мм і діаметром від 0,8 до 8 мм різного призначення.

Цвяховий автомат виконує шість технологічних операцій, починаючи з випрямлення дроту рихтувальними роликами і закінчуючи висадкою головки цвяха пуансоном. За кожен оберт барабана на автоматах ротаційного типу повністю виробляються шість цвяхів.

Полірування цвяхів здійснюють за допомогою полірувальної машини, яка має привідний *галтувальний* барабан (рисунок 1.133). Тут можна також обробляти не тільки цвяхі, але й кнопки, заклепки тощо, звільнюючи їх від гострих країв обсічки і масляної плівки шляхом обкатки з тирсою протягом однієї години у галтувальному барабані. Очищення від тирси здійснюється вібраційним просіюванням. Після полірування вироби стають яскравішими, набувають антикорозійних властивостей та товарного вигляду.

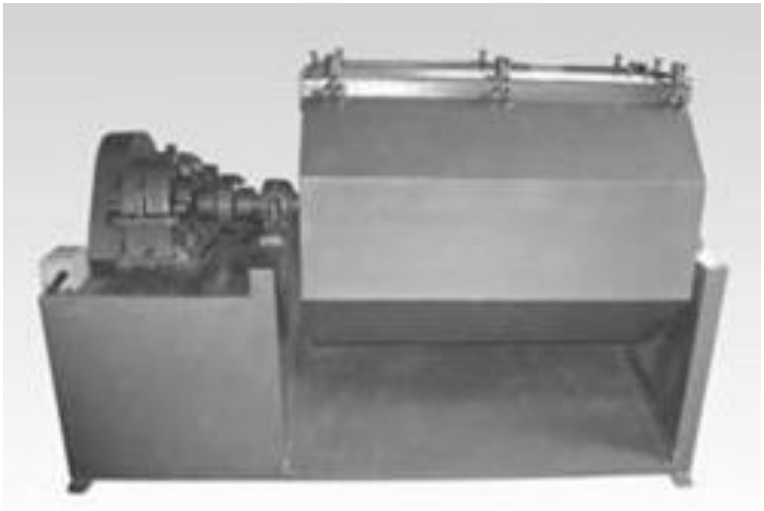


Рисунок 1.133 – Вигляд полірувальної (галтувальної) машини [117]

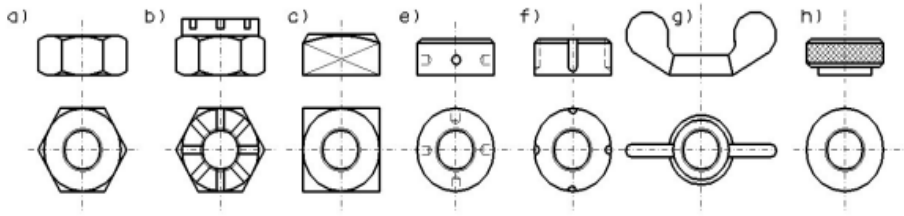
Після закінчення полірування великі цвяхи (розміром 4х100 мм і більше висипають у бункер, під яким встановлений магнітноукладаючий апарат. Тут за допомогою вібратора цвяхи надходять до зони дії електромагніту, і магнітним полем укладаються паралельно між полюсами. Внаслідок цього після вимикання магніту цвяхи розміщуються рівними рядами в дерев'яній тарі.

Дрібні цвяхи (діаметром 1,8 мм і менше) упаковують в ящики, викладені всередині промасленим папером.

Виробництво гайок, болтів, гвинтів і шурупів

Серед кріпильних виробів найбільший відсоток за номенклатурою становлять різьбові (до 60% номенклатури деталей машин) вироби, що зумовлене найпоширеністю застосування різьбових з'єднань типу «гвинт – гайка» [118, 119].

Гайка – деталь різьбового з'єднання або гвинтовой передачи, що має отвір з нарізю. Розрізняють шестигранні, круглі, корончаті, барашкові й інші гайки (рисунок 1.134).



i)

Рисунок 1.134 – Деякі основні види гайок: a) шестигранна; b) корончаста; c) квадратна; e) кругла з отворами на боковій поверхні; f) кругла зі шліцами; g) гайка-баранець; h) кругла з рифленістю; i) рим-гайка [118, 119]

Їх виготовляють за вимогами ДСТУ ISO 8673 та інших нормативних документів. Зокрема, в автомобілебудівництві використовують спеціальні *колісні гайки* (так звані, «*секретки*»), які призначені для запобігання несанкціонованому демонтажу колеса. Такі вироби роблять з міцних сплавів і монтують за допомогою спеціального ключа.

Здебільшого, гайки застосовують у механікоскладальному виробництві сумісно з болтами (рисунок 1.135) або гвинтами, причому болт від гвинта відрізняє *обов'язкова* наявність гайки (*див. нижче*).

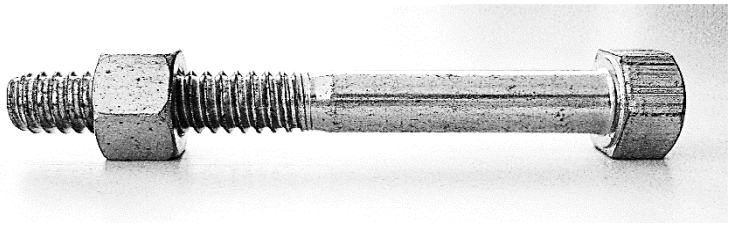


Рисунок 1.135 – Болт з гайкою [118]

Гайки з вуглецевих нелегованих і легованих сталей поділяють на *класи міцності.*

Клас міцності позначають числом, при множенні якого на 100 отримують значення напруження від випробувального навантаження у МПа, яке вказує на найбільший клас міцності болтів, з якими гайки можуть утворювати з'єднання. При такому сполученні відбувається розрив стрижня болта раніше, ніж нарізі, що дозволяє легко виявляти руйнування кріпильного виробу.

Для гайок з висотою, що дорівнює або більше 0,8d (d – діаметр описаного кола) мають місце класи міцності: 4; 5; 6; 8; 9; 10; 12; для гайок з висотою від 0,5d до 0,8d – класи міцності: 04; 05.

Гайки, як правило, виготовляють з автоматної сталі на станках-автоматах з використанням процесу гарячої об'ємної штамповки (*див. вище*). В якості заготовки використовують сталеві прутки, зокрема, ті, що мають шестигранний перетин. Їх ріжуть на заготовки за розміром майбутнього виробу, які нагрівають до температури гарячої деформації (1000…1200 °С). Далі, спеціальним інструментом (у закритих або відкритих

штампах) деформують заготовки з отриманням необхідної зовнішньої форми (*див. рис. 1.134*); далі пробивають отвір під нарізь.

На наступному переході нарізають різьбу за допомогою спеціального стрижня типу метчика, що обертається. Для полегшення умов нарізання різьби та запобігання перегріву инструмента процес ведуть з подачею мастильно-охолоджуючої рідини.

Подготовлені таким чином заготовки гайок піддають термічній обробці (загартуванню та відпусканню – *див. вище*) для забезпечення потрібного рівня властивостей (перш за все – міцності).

Після перевірки на спеціальному стенді з'єднання гайки з болтом на міцність їх пакують і відправляють замовнику або на склад.

Болт – крипільна деталь у вигляді стрижня із зовнішньою наріззю на одному кінці та головкою (зазвичай, шести– або четиригранною під гаєчний ключ) на іншому для роз'ємного поєднання за допомогою гайки (*див. рис. 1.135*) частин конструкцій, машин і споруд.

Цей вид продукції класифікують [118]:

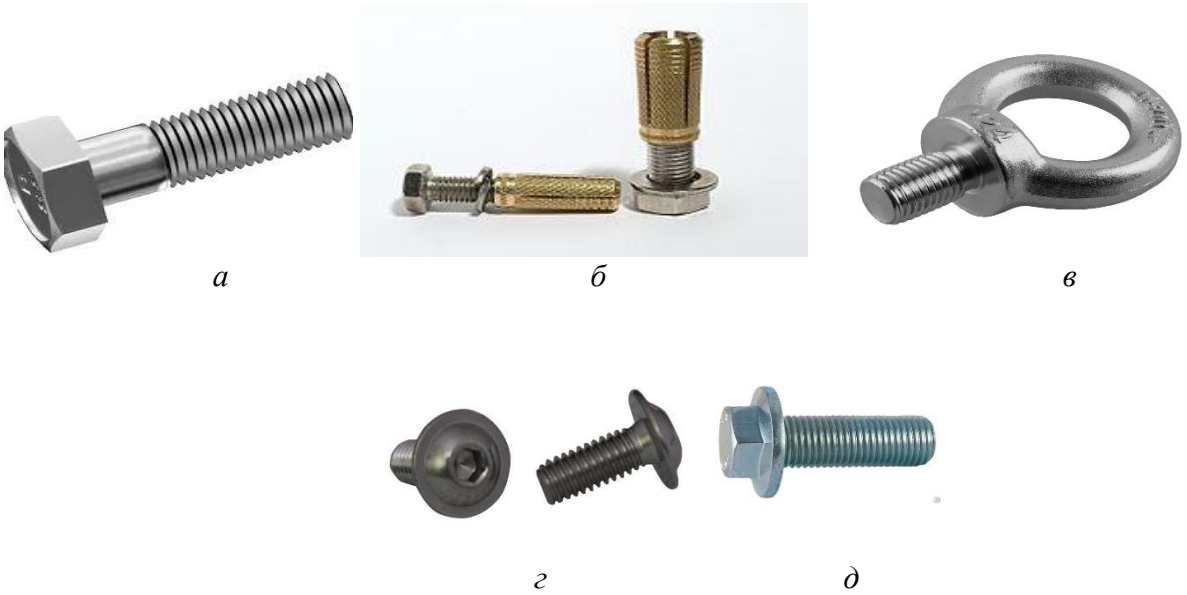
– за формою (на болти *із шестигранною головкою* за ДСТУ ISO 4016 та ін. НД; болти *відкідні* за чинними НД; болти *напівкруглою головкою за* ДСТУ 7802 та ін. НД.; болти *с потайною головкою* за ДСТУ ISO 7046-2, ДСТУ 7786 та ін. НД; болти *анкерні* та *фундаментні* за ДСТУ 24379 та ін. НД; *рим-болти* за ДСТУ EN ISO 3266 та ін. НД; болти *з фланцем* та інші. Деякі види болтів зображені на рисунку 1. 136;

– за призначенням (на *машинобудівні* класів міцності 3.6; 4.6; 4.8; 5.6; 5.8; 8.8; 10.9; 12.9 (*пояснення – див. нижче*); *меблеві* класів міцності 3.6; 4.6; 4.8; 5.6; 5.8; *дорожні* класів міцності 3.6; 4.6; 4.8; 5.6; 5.8; 8.8 та *лемешні* класів міцності: 3.6; 4.6; 4.8; 5.6; 5.8; 8.8);

– за матеріалом;

– за покриттям;

– за класом міцності.



а *б* *в*

г *д*

Рисунок 1.136 – Деякі види болтів [118, 119]: *а* – з шестигранною головкою; *б* – анкерний; *в* – рим-болт; *г* – з потайною напівкруглою головкою; *д* – з фланцем

Механічні властивості болтів (також як гвинтів і шпилек) з вуглецевих нелегованих і легованих сталей згідно з ДСТУ ISO 898-1 при кімнатній температурі характеризуються 11 класами міцності: 3.6; 4.6; 4.8; 5.6; 5.8; 6.6; 6.8; 8.8; 9.8; 10.9; 12.9.

Перше число при множенні на 100 визначає межу міцності в Н/мм², інше число (відділене крапкою від першого) при множенні на 10 дає відношення межі текучості до межі міцності у процентах. Добуток чисел при множенні на 10 визначає номінальну межу текучості в Н/мм². *Наприклад,* сполучення «5.8» означає для сталевого болта гарантію забезпечення межі міцності 500 МПа, межі плинності 400 МПа, і відношення межі плинності до межі міцності 80%.

Міцнісні характеристики болтів забезпечують вибором відповідної марки сталі та технологією їх виготовлення.

В якості вихідного напівпродукту використовують дріт круглого та сортову сталь шестигранного перетинів у бунтах, прутках або у вигляді штучних заготовок з низьковуглецевих та легованих сталей (із вмістом вуглецю не більше 0,40%) марок 20, 20кп, 35, 35Х 20Г2Р, 65Г, 40Х та ін.

Сучасна технологія виготовлення болтів базується на застосуванні методів обробки тиском.

При цьому, *об'ємною «формовкою» (об'ємною штамповкою)* отримують головку болта, *висаджуванням,* або *видавлюванням* – його стрижень, *накатуванням* на пресах або спеціальних автоматах – нарізь, а *карбуванням* – нанесення маркувань, зазвичай, на головку. Далі здійснюють термообробку виробів та нанесення (при необхідності) на них покриття.

Формування головки болта у холодному стані металу вимагає значних зусиль деформування через високе значення його межі текучості та зміцнення. Останнє супроводжується зниженням пластичності металу, що може зумовити його деформаційне розтріскування.

Для полегшення процесу деформування його, за допомогою спеціальних штампів, дроблять на переходи, між якими заготовку можуть піддавати рекристалізаційному відпалу. Між переходами обрізають облой для зменшення сили деформування та підвищення точності розмірів виробів.

Висаджування (об'ємна штамповка) протікає в умовах порівняно м'якої схеми напружено-деформованого стану металу та ефективно використовується для виготовлення осесиметричних деталей типу «стрижень з потовщенням» [121]. Обставиною, що знижує ефективність процесу та порушує його безперервність може стати необхідність формування потовщення (головки) великого об'єму, що вимагає збільшення кількості переходів деформування, щоб уникнути втрати заготовкою подовжньої стійкості (рисунок 1.137).

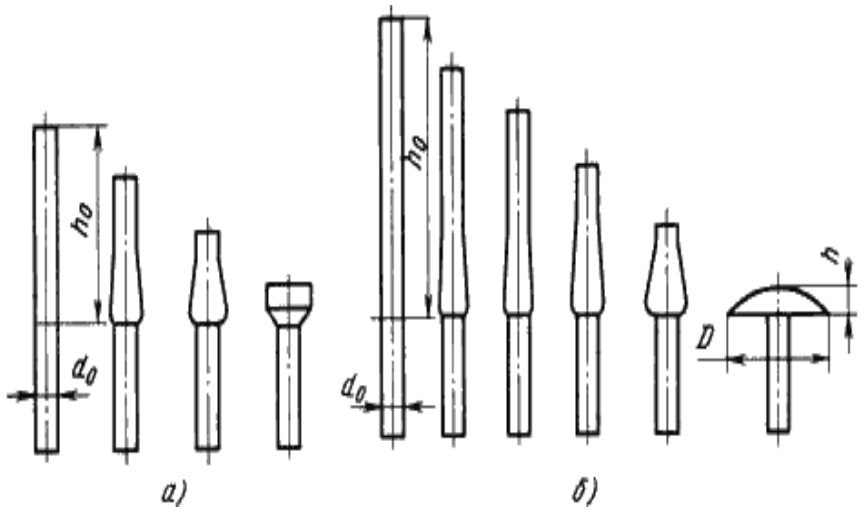


Рисунок 1.137 – Схема висаджування деталі типу «стрижень з головкою» [121]: *а* – за три переходи; *б* – за п'ять переходів

У подібному процесі холодне деформування забезпечує отримання точних заготовок, а іноді і готових деталей, що мають високу якість поверхні, завдяки чому загальна витрата металу на їх виготовлення і трудомісткість стають мінімальними. Крім того, за рахунок зміцнення під час холодної обробки тиском отримується можливість збільшення міцності деталей. Тому, не дивлячись на високі питомі зусилля та важкі умови роботи штампів, холодну висадку, широко застосовують при виготовленні болтів.

Процес ***виготовлення болта холодною об'ємною штамповкою*** починається з подачі подовжньої заготовки з бобини до роликів правильної машини та наступної фільєри, після якої метал розрізається частини, які відповідають майбутньому болту. Отримані заготовки подаються до висадочної машини, де за схемою на рис. 1.37 здійснюється їх попередня формовка, штамповка круглої головки, якій надається чотири– або шестигранна форма. Потім на торцевій частині заготовки болта робиться фаска, і наприкінці, за допомогою двох плашек за схемою на рис. 1.138 накатується різьба.

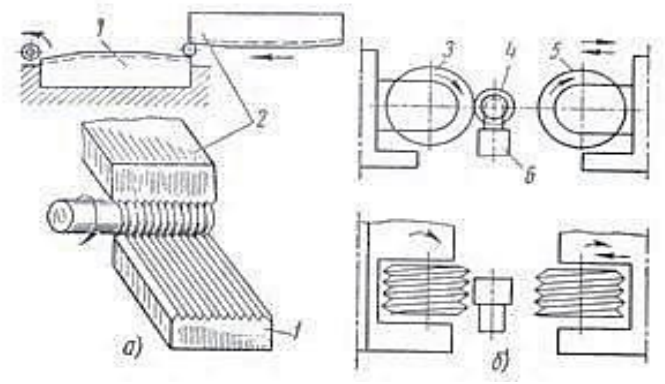


Рисунок 1.138 – Накатування різьби [120]: *а* – пласкими плашками; *б* – круглими плашками-роликами; 1 і 2 – пласкі плашки; 3 і 5 – ролики-плашки; 4 – деталь; 6 – опора

Аналогом ***карбування*** («чеканки») є однойменна операція листової штамповки (*див. рис. 1.74, к*), при якій чеканочним інструментом формується відповідне рельєфне зображення (позначення) на основному тілі виробу.

Для виробництва болтів використовуються різні холодно– и гарячевисаджувальні автомати, характеристика яких наведена нижче.

Гвинт – це кріпильний виріб у вигляді стрижня із зовнішнім різьбленням на одному кінці та конструктивним елементом для передачі крутного моменту на іншому, призначений для утворення нарізного сполучення або фіксації деталей. Елементом гвинта, що передає зусилля при його вкручуванні в деталь, можуть бути різного роду головки, шліци в торці стержня і т.п. [118].

Від болта гвинт відрізняється можливістю застосування без гайки (у сполученні із наріззю в деталі), а від шурупа (*див. нижче*) відсутністю конічного звуження на кінці і можливості створення різьблення у матеріалі при вкручуванні в нього.

Відповідним чином, з'єднання деталей за допомогою болта та гайки називаються *болтовими*, а за допомогою гвинтів – *гвинтовими.*

Трьома основними елементами гвинта є:

– *циліндричний стрижень* – частина гвинта, що безпосередньо входить в отвір або вкручується в деталь. Стрижень частково або повністю покривають різьбленням;

– *головка* – частина гвинта, що служить для передачі на нього крутного моменту. Вона має фаски під гайковий ключ або шліц для викрутки. Форми головки та шліца можуть бути різноманітними.

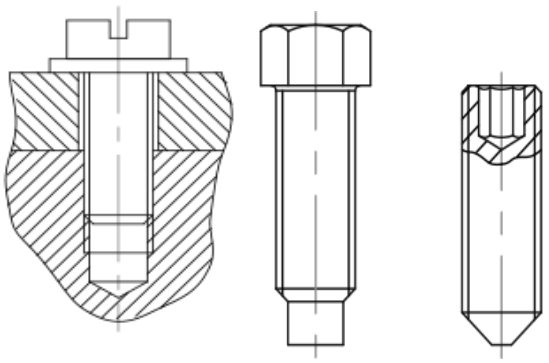
– підголівник – необов'язкова частина гвинта, що безпосередньо примикає до головки і служить для центрування гвинта або запобігання його провертанню. Він може мати циліндричний, овальний або квадратний перетин.

Залежно від призначення розрізняють гвинти (рисунок 1.139):

– кріпильні (для роз'ємного з'єднання деталей);

– установчі (для взаємної фіксації деталей).

Найбільш поширеним типом гвинта в техніці є *кріпильний гвинт*. Такий гвинт являє собою стрижень з різьбленням на одному кінці і головкою на іншому. Їх виготовляють за ДСТУ ISO 1207, ДСТУ ISO 4762, ДСТУ ISO 4014, ДСТУ EN ISO 7380-1, ДСТУ 17473 та ін. НД класів точності А і Б із наріззю від 1 до 20 мм і довжиною до 200 мм за ДСТУ ISO 965, ДСТУ ISO 724 та іншими нормативними документами.



а *б*

Рисунок 1.139 – Схеми з'єднання кріпильним гвинтом (*а*) та різновиди установчих гвинтів (*б*) [118]

Приклад позначення: Гвинт класу точності *А* (підвищеної точності), з діаметром нарізі *d* = 10 мм, з кроком нарізі *P* = 1,5 мм, довжиною *l* = 50 мм, с нормальною довжиною нарізі *b*: «*Гвинт А.М10×1,5×50 ... ДСТУ ISO…*».

Установчі гвинти (*див. рис. 1.139, б*) виготовляють за ДСТУ ISO 4029, ДСТУ ISO 4762, ГОСТ 11075 (ISO 4028) та ін НД з діаметром нарізі до 12 мм і довжиною до 80 мм.

Головка гвинта служить для притиснення деталей, що з'єднуються, і захоплення гвинта викруткою, гайковим ключем, імбусовим ключем (зазвичай, Г-подібної форми під заглиблення у торці гвинта) або іншим інструментом.

На кінцях гвинтів роблять різні виступи або заглиблення згідно з ДСТУ ISO 4753, а у випадку необхідності та можливості здійснення, забезпечують у деталях, що взаємно фіксуються, спеціальні отвори під кінці гвинтів. Можливі варіанти таких кінців: конічний, плоский, циліндричний, засвердленний, ступінчастий, зі сферою, з конусом, – а за іншими стандартами: рифлений, кульковий, а також зі шліцами з обох сторін симетричних установчих гвинтів, які застосовуються при автоматичному складанні).

Приклад позначення для гвинта з конічним кінцем класу точностіі *А*, з номінальним діаметром нарізі *d* = 12 мм, з кроком нарізі *P* = 1,75 мм, довжиною *l* = 40 мм: «*Гвинт А.М12×1,75×40…ДСТУ ISO …*».

Набули поширення кріпильні гвинти з круглою, шестигранною, квадратною і іншими видами головки.

Залежно від призначення розрізняють основні форми круглих головок, які відображені на рисунку 1.140. При цьому, шліци можуть виконуватись прямими, хрестоподібними, квадратними, шестигранними, зіркоподібними тощо [**118, 119**].

Механічні властивості кріпильних гвинтів з вуглецевих нелегованих і легованих сталей регламентуються таким же чином, як і болтів (*див. вище*). Найбільш поширені гвинти і болти з класом міцності 8.8 (*нормальної міцності*).

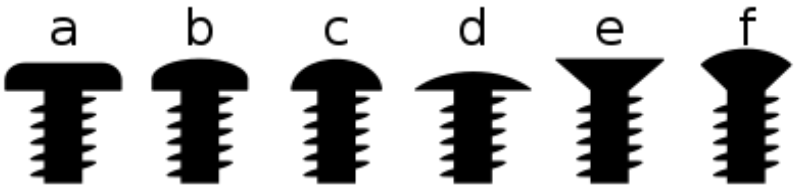


Рисунок 1.140 – Види форми головок гвинтів: (a) плоска, (b) опукла, (c) кругла, (d) грибоподібна, (e) таємна, (f) напівтаємна.

Шуруп – кріпильний виріб у вигляді стрижня з головкою і спеціальною зовнішньою наріззю, яка при вкручуванні в матеріал сама нарізає в ньому внутрішню нарізь [118]. Шуруп за функцією є аналогом гвинта (*див. вище*) і відрізняється від останнього наявністю конічного звуження на кінцівці та більшим кроком нарізі (рисунок 1.141, *а*).

а *б*

Рисунок 1.141 – Зовнішній вигляд одного з видів шурупів [118, 119] (*а*) і саморізу (*б*)

У побутовій практиці шурупи іноді називають «саморізами».

Більш коректним можна вважати, що для закручування у м'які (дерев'яні та пластмасові) вироби застосовують «шурупи», а для закручування у відносно тверді матеріали (дерев'яні, пластмасові або металічні вироби) використовують окремий вид виробів: *саморізи* – самонарізаючі гвинти (рисунок 1.141, *б*).

Відмінності шурупа від самонарізаючого гвинта («*саморіза*») містяться у наступному.

Стрижень шурупа має різьбову (ближче до кінця) частину та гладку (ближче до головки) частину, яку називають «тілом» з діаметром, що дорівнює діаметру нарізі біля нього. Верхню частину шурупа (біля головки) виконують з товщиною більше за товщину частини з наріззю, що підсилює супротив «тіла» навантаженням «на зріз» та «на злам».

«Класичний» шуруп має конусну нарізь. Через це матеріал, в який вкручують шуруп, повинен бути податливим, щоб компенсувати розширення канала при входженні у нього гладкої частини стрижня. «Тіло» дозволяє шурупу притискувати деталь товщиною, що дорівнює довжині «тіла», до іншої деталі.

На відміну від цього, саморіз виконують без гладкої частини (без «тіла»). Кінцівка саморіза, як правило, гостріше за кінцівку шурупа, а висота нарізі від кінцівки до основної частини змінюється у меншему ступені.

Висота та крок нарізі у шурупа зазвичай менше, ніж у саморіза «по дереву», але не «по металу».

Шурупи зазвичай виготовляють з відносно м'яких марок сталі або бронз, тоді як саморізи – з більш твердих або нагартованих сталей.

Перелічені відмінності зумовлюють різницю в технології застосування цих різновідів кріпильних виробів.

При використанні шурупа рекомендується попередньо робити свердлення отвору у матеріалі для утворення в ньому направляючого канала. Це дозволяє при закручуванні шурупа точно витримати напрям та знизити навантаження на нього.

При використанні саморіза попередньє свердлення, як правило, не потрібне завдяки наявності у нього гострої кінцівки та плавного наростання висоти нарізі. Саморіз надійно врізається в матеріал навіть при невеликому притиску і добре витримує заданий напрям. За зарухунок більшої висоти нарізі та відсутності гладкої частини, кількість матеріалу, що витискується з канала, менше, ніж у шурупа, що знижує ризик руйнування виробу. Але наявність різблення аж до головки знижує міцність кріплення у порівнянні з шурупом того ж діаметра, виготовленого з однакового металу.

Шурупи поділяють:

– *за видом головок:* шестигранна (*див. рис. 1.141, а*), квадратна, потайна, напівпотайна, напівкругла. Зокрема, шестигранні головки отримують шурупи та саморізи значних розмірів або ті, що застосовують при вкручуванні у металеву основу, коли необхідно забезпечити великі крутні моменти. Також є шурупи без головок, шліці в яких нарізають у торці стрижня;

– *за видом шліців* (*основні:* прямий, хрестоподібний, квадратний, зовнішній або внутрішній шестигранник, тип *Torx* – зіркоподібний тощо; *комбіновані:* з двох типів; *особливі,* які відрізняються великою різноманітністю). Додаткова класифікація шліців шурупів основного типу провадиться ще й за розміром. В результаті, всі шурупи представляють із себе стандартизований та пронумерований перелік, кожний виріб у якому має свою назву;

– *за наріззю стрижня* (діаметр і крок різьблення, число заходів, кут при вершині профилю);

– *за формою вістря* (шурупи класичного типу, що виготовляють за ДСТУ ГОСТ 1144 «Шурупи з напівкруглою головкою» та ін. НД, а також за ДСТУ ГОСТ 1145 «Шурупи з потайною головкою» та ін. НД, мають кут при вершині вістря, що дорівнює або менше 40°; у чорних саморізів для гіпсокартона він складає 26…28°, для універсальних виробів – 20…30°. Зі зменшенням кута, занурення стрижня шурупа в материал полегшується, а самонарізаючі властивості збільшуються. Для ще більшого посилення цих властивостей застосовують саморізи зі сведлом на кінцівці, яке утворює перед нарізанням різьблення в матеріалі отвір, який полегшує увинчування).

У наявний час для масового ***виготовлення кріпильних виробів застосовють високопродуктивні холодновисаджувальні автомати***, які забезпечують випуск до 400 штук деталей за хвилину.

Група кривошипних пресів-автоматів для об'ємного штампування за технологічним призначенням включає, перш за все, машини для виробництва стрижневих деталей з головкою (болти, гвинти тощо), кульок і гайок. Обробка металу на пресах-автоматах відбувається в умовах холодної або гарячої деформації в залежності від розмірів виробів, які штампуються.

За конструктивним оформленням кривошипні преси-автомати для об'ємного штампування відносяться до горизонтальних пресів закритого типу, що мають литі монолітні або складені станини. Їх привод здійснюється від індивідуального електродвигуна через клинопасову або зубчасту передачу. Для зручності використання великі машини обладнують стрічковими гальмами.

Основні параметри та розміри кривошипних пресів-автоматів регламентовані окремими для кожної технологічної групи стандартами.

Структура та кінематика холодновисаджувальних автоматів визначається двома основними факторами: довжиною стрижневий частини виробу та об’ємом і складністю форми головки, що висаджується.

Перший фактор обумовлює особливості перенесення мірної заготовки на лінію

висаджування та видалення відштампованих виробів з робочої порожнини інструменту. Зокрема, для коротких стрижнів можна застосувати жорсткий виштовхувач, а для довгих – виріб слід видаляти за допомогою роз'ємної матриці.

Другий чинник пов'язаний з тим, що для утворення головки може стати необхідною заготовка довжиною більше двох діаметрів, що супроводжується ризиком втрати подовжньої сталості. Крім того, при штампуванні виробів зі складною формою головки здійснити якісну висадку за один удар часто буває неможливим через виникнення затисків металу. Тому висадка має проводитись за два або три переходи (за два або три удари): в першому за допомогою пуансона з конічною робочою порожниною метал набирають і готують для подальшої висадки, під час другого і третього відбувається попереднє і остаточне оформлення головки виробу (*див. рис. 1.137*).

Принципова схема одноударного холодновисаджувального преса-автомата з роз'ємною матрицею, призначеного для висадки метизів з довжиною стрижня більше восьми діаметрів вихідної заготовки, показана на рисунку 1.142.

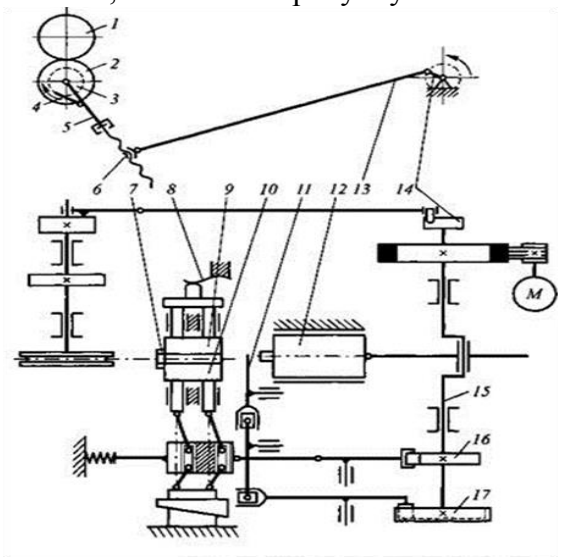


Рисунок 1.142 – Принципова схема одноударного холодновисаджувального преса-автомата з роз'ємною матрицею [122] (*пояснення позицій – у тексті*)

Автомат має наступні складові [122]: привод, що складається з електродвигуна і клинопасової передачі; головний виконавчий механізм висадки головок; робочий механізм відрізки і затиску заготовки; допоміжні механізми подачі заготовок і поворотного упору (обмежувач подачі).

На початку чергового циклу головний повзун 12 відходить в крайнє заднє положення. Зімкнуті півматріці 9 і 10 після деякого часу вистоювання на лінії висадки починають відхід на лінію подачі. При куті 270° повороту кривошипного валу 15 починається подача дроту або прутка за допомогою переривчасто обертових роликів 1 і 2. В ході подачі відбувається виштовхування штовхачем 12 виробу, відштампованого в попередньому циклі.

До кінця періоду подачі починає рух поворотний упор 11, який при куті 140° повороту валу 15 виходить в робоче положення на лінію подачі і вистоює протягом часу, необхідного для повороту цього кривошипного валу на кут 50°. Після цього дріт (пруток) подають через відрізну втулку 7 у розімкнуті півматріці до упору, що фіксує необхідну довжину заготовки на один виріб.

Після закінчення подачі при куті повороту валу 15 на 90° півматріці переміщуються на лінію висадки. Протягом цього періоду відбувається відрізка заготовки, перенесення її на лінію висадки та затиск напівматрицями. Цикл автомата побудований таким чином, що для уникнення браку затиск декілька випереджає початок висадочного ходу головного

повзуна. Упор протягом цього періоду здійснює відхід у вихідний неробочий стан, де залишається до наступного циклу.

При зміні кута поворота вала 15 від 20° до 0° відбувається висадка вільної (незатиснутої) частини заготовки в головку необхідної форми за допомогою пуансона, закріпленого на головному повзунові. Півматриці в цей період розташовуються на лінії висадки; ролики подачі нерухомі.

Механізм відрізки і затиску, що переміщає праву півматрицю, – колінно-важільний з приводом від кулачка 16. Повернення бокового повзуна і правої півматриці в початкове положення здійснюють пружини. Два циліндричних плунжери передбачені в механізмі для того, щоб забезпечити точний напрям руху півматриці.

Зворотнє зміщення лівої півматриці здійснює віджимна плоска пружина 8. Механізм поворотного упору для важеля – кулісний з приводом від кулачка 17 та внутрішнім зачепленням ролика і віджимної пружини.

Ведучою ланкою механізму подачі є ексцентрик 14, ведомою – коромисло 5.

На загальній осі з коромислом розміщене храпове колесо 3, а на стрижні коромисла – храповик 4. За допомогою храпового механізму досягається циклічність в дії роликів подачі.

На загальному валу з коромислом і храповим колесом розташований нижній ролик подачі 2. Підпружинений верхній ролик подачі 1 приводиться до руху через зубчасту пару.

Регулювання періоду обертання роликів подачі і, тим самим, довжини заготовки, що задається у штамп, здійснюється грубо за допомогою установки провідного ексцентрика 14, і точно – зміною положення повзунка 6, до якого шарнірно прикріплена тяга 13.

Преси-автомати подвійної дії з двома робочими ходами головного виконавчого механізму за один цикл застосовують для послідовного штампування метизних виробів зі складною формою головки за два переходи.

Ускладення їх структури зумовлене необхідністю мати спеціальний виконавчий механізм, який здійснює при нерухомих матрицях переміщення на лінію висадки і фіксацію пуансона першого переходу, видалення його та розміщення замість нього пуансона другого переходу.

Особливістю автомата подвійної дії є також узгодження робочих ходів головного та допоміжних механізмів. При штампуванні виробів за два переходи цикл роботи автомата розтягується на два повних обороти провідного кривошипного вала, а механізми подачі, затиску та відрізки заготовки, поворотного упору та подаючого механізму повинні повторювати свої рухи один раз за два повних обороти кривошипа. Це вимагає застосування спеціального розподільчого валу, який приводиться до руху від провідного кривошипного вала через зубчасту пару з передавальним числом 2.

Схема *ударного автомата потрійної дії* подібна представленим вище. Цикл його роботи побудований так, що розподільчий вал має в три рази меншу частоту обертання, ніж провідний кривошипний вал, і, отже, цільові механізми повторюють свої рухи один раз за три оберти головного валу.

Крім розглянутої, можливі й інші схеми автоматів, однак структура та принципи синхронізації рухів виконавчих механізмів залишаються тими ж.

З технологічних причин висаджена головка болта має зазвичай циліндричну форму. Точне оформлення головки за необхідним контуром (шестигранним або ін.) здійснюють на обрізних пресах-автоматах шляхом зрізання граней.

Завершальною операцією щодо оформлення метизного виробу є накатка нарізі на спеціальних автоматах.

Розміщені згідно з технологією (висадка, обрізка, накатка) та з'єднані між собою транспортуючими пристроями преси-автомати утворюють потокову лінію з повним циклом обробки.

В останні роки спостерігається тенденція до заміни поточних ліній

багатоопераційними автоматичними пресами.

В якості прикладу, можна привести дані щодо універсального холодноштампувального 5-позиційного автомату «Супер» моделі К09.146.00, який оснащений шумопоглинаючою огорожею, електростатичним фільтром, що мінімізує викид масляної пари, та системою діагностики, що дозволяє контролювати технологічні сили на кожній позиції штампування. Його номінальне зусилля штамповки 3200 кН; довжина механізма виштовхування заготовок з матриць складає 10…170 мм, а з пуансонів – 45 мм. Частота ходу повзуна при максимальній довжині у 240 мм регулюється у межах 50…100 переміщень за хвилину. Прутки, що використовуються як заготовка, можуть мати діаметр до 26 мм з довжиною частини, яка відрізається, не більше 200 мм. Автомат можна застосовувати для штампування виробів як стрижневого, так і гайкового типів, что забезпечується його відповідним переналагодженням.

Для холодного накатування різблень (кріпильних, трапецеїдальных та ін.), дрібномодульних черв'яків, рифлень, калібрування циліндричних і сферичних тіл, а також виконання різних профілів можна застосовувати профіленакатні двороликові напівавтоматы моделей А9518Б, АА9521.02, АА9521.03, А9524, А9526 и А9527. Вони забезпечують накатування різблення із зовнішнім розміром від 3 до 200 мм, кроком від 2,5 до 16 мм і довжиною від 58 до 250 мм [122].

Продукція порошкової металургії

В останні роки інтенсивно розвиваються методи виробництва деталей з металевих порошків. Ця галузь техніки відноситься до *порошкової металургії*, або *металокераміки*. Сюди включають сукупність методів виготовлення порошків металів і металоподібних сполучень, напівфабрикатів і виробів з них або їх сумішей з неметалевими порошками *без розплавлення основного компонента* [123…125].

Галузі застосування порошкових матеріалів зумовлені унікальним комплексом їх властивостей, які неможливо забезпечити тільки методами лиття та/або обробки тиском. Ці матеріали зазвичай поділяють на групи.

До групи ***пористих*** відносять антифрикційні, фрикційні, фільтрувальні, ерозійностійкі та так звані «потіючі» матеріали.

Так, *пористі матеріали*, що виготовлені на основі порошків заліза або міді з просоченням рідким мастилом (маслом) або с добавками твердого мастила (графіт, свинець, дисульфід молібдену, сірчаний цинк та ін.) володіють *антифрикційними* властивостями. Вони забезпечують низький коефіцієнт тертя, характеризуються доброю прироблюваністю, високою теплопровідністю та достатньою ударною в'язкістю.

Зворотню задачу – збільшення тертя – розв'язують *фрикційні* порошкові матеріали. Фрикційні вироби (наприклад, гальмівні колодки автомобілей) зазвичай складаються з металевої (часто – сталевої) основи та фрикційних накладок, які зварюються з основою під дією тиску. Накладки можуть бути виготовлені на основі міді або заліза з металевими та неметалевими фрикційними компонентами (чавун, сталь, металокераміка, кераміка тощо). Они повинні володіти високою тепло– та корозійною стійкістю.

Бронзові *фільтри* зазвичай виготовляють з порошків, що складаються з часток сферичної форми, які отримують шляхом розпилення рідкого метала. Фільтри з розміром часток вихідного порошка 50…130 мкм використовують для грубого очищення рідин, а з 2…30 мкм – для тонкого очищення палива у дизелях і реактивних двигунах, рідких мастильних матеріалів і стиснутих газів від твердих домішок розмірами 5…200 мкм, а також для очищення розбавлених кислот і лугів, розплавленого парафіну тощо.

Пористі матеріали, що виготовлені з порошків електролітичного та карбонільного никелю, призначені для роботи як у якості фільтрів, так і пористих електродів. Останні широко використовуються в електрохімії та при каталізі. Зокрема, лужні акумулятори з електродами, що виготовлені з високопористих нікелевих пластин, у порівнянні зі звичайними акумуляторами мають меншу масу і габарити.

Використання пористого титану у різних галузях техніки зумовлено рядом його цінних властивостей, головною з яких стає високі корозійна стійкість у багатьох агресивних середовищах (зокрема, в азотній кислоті та лужних розчинах) і питома міцність. При цьому, вироби з нього забезпечують очищення рідини від часток 5 мкм і менше.

Важливе застосування знаходять фільтри з нержавіючих сталей *Х17Н2, Х18Н9, Х30* та ін., які володіють високою корозійною стійкістю і значно дешевле за чистий никель. Вони показали хороші результати при очищенні рідкого литва, гарячого доменного і мартенівського газів. Як перешкода розповсюдженню полум'ю вони застосовуються в автогенній техніці, при виробництві ацетилена, при газополум'яній обробці металів, для виготовлення резервуарів низькокиплячих і вибухонебезпечних рідин.

Ерозійностійкі и «потіючі» композиційні матеріали володіють комплексом унікальних властивостей, які неможливо отримати іншим шляхом. Їх виготовляють на основі тугоплавких металів або вуглецю у вигляді композиций, наприклад, шляхом просочування вольфрамового або вуглецевого каркасу рідкою міддю або сріблом. Під час роботи мідь (срібло) випаровується, що зменшує тепловий потік і покращує умови роботи вольфрамового (або вуглецевого) каркаса. Деталі з такого матеріалу працюють у двигунах при температурі завбільш 2500 ^{0}С.

Деталі з пористого метала можуть бути використаними як для утворення умов локального охолодження, так і локального нагріву різних механізмів.

Вельми перспективним є використання в промисловості теплових труб, які забезпечують вирівнювання температурного поля в різних апаратах та ізотермічні умови обробки тих чи інших матеріалів. Зокрема, застосування низькотемпературних теплових труб в електричних машинах для охолодження роторів і статорів двигунів, генераторів, а також обмоток трансформаторів дозволяє збільшити їх потужність на 30…50%. Успішно використовуються теплові труби для охолодження високовольтних вимикачів великої потужності. Застосування пористих матеріалів для запобігання обмерзання літаків дозволяє знизити до 50% витрати антифріза.

Електротехнічні порошкові матеріали у залежності від їх призначення поділяють на *електроконтактні* (металеві, металографітові, металооксидні та металокарбідні), *магнітом'які* (залізонікелеві сплави, сплави заліза із силіцієм і алюмінієм або хромом і алюмінієм), *магнітотверді* (сплави на основі *Fe–Al–Ni(Co),* що називаються «*альні*», «*альніко*», «*магніко*»), *магнітодіелектрики* (карбонільне залізо, *пермалой*, *альсіфер*), *ферити* (*Fe_3O_4* з домішками *NiO, MgO, MnO, ZnO*).

Новим класом магнітних порошкових матеріалів, з яких виготовляють магнітні екрани, трансформатори та електронні прилади, є *аморфні матеріали*, які отримують надшвидким охолодженням (зі швидкістю 10^5…10^6 град/с) розплаву комплексу *$Fe_{40}N_{40}P_{10}B_8O$*.

Вимогам підвищення стійкості інструмента при обробці різних матеріалів (від твердих сплавів, мінералокерамічних матеріалів до штучних алмазів) відповідають ***спечені конструкційні*** порошкові матеріали. Їх виготовляють на основі конструкційної сталі (вуглецевої, міднистої, кремністої, молібденової, хромомолібденової), вольфраму, титанових і алюмінієвих сплавів. Наприклад, у машинобудуванні та приладобудуванні широко застосовують деталі, які армовані твердими сплавами; тверді сплави використовують у текстильній промисловості для напрямних кілець та інших деталей, що труться; при волочінні, штамповці та пресуванні – в якості матеріалу деформуючого інструменту (волок, матриць і пуансонів – *див. вище*), в порошковій металургії – для розмольних тіл і пресового інструменту.

Мінералокераміку («*кермет*») на основі α -модифікації *Al_2O_3* (*електрокорунда*) із зернистістю до 1 мкм використовують для напівчистової та чистової обробки різанням чавунів, загартованих та покращених сталей, кольорових і тугоплавких сплавів при високих (до 800 м/хв.) швидкостях різання. Твердість кермета складає 92…94 *HRA* при його щільності 4…4,6 г/см^3.

Наведені дані представляють собою далеко не вичерпний перелік порошкових матеріалів та сфер їх застосування.

Стартовою сировиною для виготовлення засобів, які безпосередньо використовуються у промисловості стають порошки матеріалів.

Виготовлення порошків

Методи порошкової металургії дозволяють отримати деталі необхідної форми з высокою економічністю. При цьому зазвичай використовується більш, ніж 97% початкової сировини.

Узагальнено, технологічний процес виробництва та обробки матеріалів і виробів методами порошкової металургії включає: отримання порошків, їх формовку, спікання (температурну обробку) і – при необхідності – завершальне оздоблення (доводку, калібровку, ущільнююче обтискання, термообработку тощо).

Натепер, у промисловому масштабі виготовляють порошки заліза та його сплавів, никелю, міді, кобальту, алюмінію, титану, олова, цинку, свинцю, магнію, вольфраму, молібдену, танталу, ніобію та ін.

Способи виробництва порошків поділяють на:

– фізико-механічні;

– фізико-хімічні (хіміко-металургійні);

– комбіновані.

При *фізико-механічному способі* перетворення вихідного материалу у твердому або рідкому стані на порошок здійснюється без зміни хімічного складу. Сюди відносять операції різанння, дроблення та розмелювання твердої сировини; распилювання та грануляцію рідкого напівфабрикату.

Механічне подрібнення доцільно застосовувати для крихких металів та їх сплавів (сицилій, сурма, хром, марганець, ферросплави, сплави алюмінію з магнієм і т.п.).

Розмелювання в’язких пластичних металів (мідь, алюміній та ін.) утруднено. У такому разі ефективним є використання в якості сировини відходів, що утворюються при токарній обробці металів (стружка, обрізь та ін.).

Для їх грубого подрібнення застосовують щокові, валкові та конусні дробарки. При цьому отримують частинки розміром 1…10 мм, які стають напівфабрикатом для наступного тонкого подрібнення. Завершальне розмелювання отриманого матеріалу здійснюють у кульових обертових, вибраційних або планетарних відцентрових, вихровых або молоткових подрібнювачах (млинах).

Для подрібнення пластичних матеріалів використовують процес, у якому руйнівні удари наносять самі їх частинки. Для цього застосовують вихрові млини.

Найбільш простим і дешевим способом виготовлення порошків металів з температурою плавлення нижче за 1600 ^{0}С (алюміній, залізо, сталі, мідь, цинк, свинець, никель та ін.) є їх розпилювання у рідкому стані та грануляція.

Сутність такого подрібнення міститься у подрібненні струменю розплаву високоенергонасиченим газом чи рідиною, або механічним розпилюванням, або зливанням потоку розплаву у рідинне середовище (наприклад, у воду або органічну рідину).

Основною частиною технічного засобу при розпилюванні газом є форсунка. Перед цим матеріал, що розпилюють, розплавляють в електропечах. У залежності від властивостей розплаву та вимог до якості порошка в якості газу застосовують повітря (найбільш економічний спосіб), азот, а для захисту від окиснення – інертний газ (аргон, гелій).

При *фізико-хімічному (хіміко-металургійному)* способі виготовлення порошків змінюється хімічний склад і агрегатний стан вихідного материалу.

Основними методами при такому виробництві порошків є: відновлення оксидів, електроліз металів, термічна дисоціація карбонільних сполучень.

В якості відновників оксидів використовують гази (водень, оксид вуглецю при температурах вище за 1000 °С, дисоційований аміак, природний конвертований, водяний, коксовий або доменний гази), а також твердий вуглець при 900…1000 °С (кокс, деревне вугілля, сажа) або больш активні метали (натрій чи магній).

Вибір відновника залежить не тільки від термодинамічних оцінок, але й від летючості, яка має бути мінімальною, оскільки інакше процес слід вести з підвищеним тиском у середовищі аргона або інших інертних газів.

Для отримання порошків з підвищеною чистотою реалізують так званий *карбонільний процес,* який складається з двох етапів:

– з вихідного сполучення отримують карбоніл металу (*Me – метал*) за реакцією:

$$Me_aX_b+cCO=bX+Me_a(CO)_c; \quad (1.179)$$

– розкладають карбоніл при невисокій температурі за реакцією:

$$Me_a(CO)_c= aMe+cCO. \quad (1.180)$$

При цьому газ *CO,* що виникає, може бути використаний для утворення нових порцій карбонілів.

Основною вимогою до таких сполучень є їх легколетючість, невеликі температури утворення та термічного розкладання (кипіння або сублімації).

Для синтезу карбонілів використовують металовмісну сировину: стружку, обрізь, металеву губку тощо.

Карбонільні порошки містять домішки вуглецю, азота, кисню (1...3%). Очищення порошка здійснюють шляхом його нагрівання у середовищі сухого водню або у вакуумі до температури 400...600 °С. Цим методом отримують порошки заліза, никелю, кобальту, хрому, молибдену і вольфраму (*див. також підрозділ 1.2.1.4*).

Основою *багатотоннажної порошкової металургії* є залізний порошок, що отримують відновленням окисненої руди або прокатної окалини, в яких залізо знаходиться у вигляді оксидів: Fe_2O_3, Fe_3O_4, FeO.

Також отримання корисного продукта досягають *дією водню* на $FeCl_2$. Такий матеріал має високу чистоту та прийнятну вартість.

Мідні, нікелеві та кобальтові порошки отримують відновленням оксидів Cu_2O, CuO, NiO, Co_2O_3, Co_3O_4 відповідно або окалини, що утворюється при прокатці цих металів (*див. також підрозділ 1.2.1.4*). Відновлення проводять у муфельних або трубчастих печах воднем, дисоційованим аміаком або конвертованим природним газом. Температура відновлення відносно низька: для міді – 400...500 °С, нікелю – 700...750 °С, кобальту – 520..570 °С. Тривалість процесу відновлення 1...3 години при товщині шару оксиду 20..25 мм. Після відновлення отримують губку, яка легко розтирається на порошок.

У комбінованому процесі відновлення металу здійснюють магнієм або натрієм, а після відмивання – кальцієм. Так отримують порошок титану та його гідрида – з хлориду титану (останній виробляють при хлоруванні концентрата руд, очищенні та фракційній дистиляції). Для цього сталевий герметичний апарат заповнюють злитками магнію, відкачують повітря, заповнюють ємність аргоном, плавлять магній і при 800…900 °С зверху подають лімітовану кількість хлориду титану (*див. також підрозділ 1.2.1.4*).

Відновлення газоподібних сполук воднем здійснюють у киплячому шарі з галогенидів вольфраму, рению, молібдену, ніобію або титану.

Порошок вольфраму також отримують з вольфрамового ангідриду, який є продуктом розкладання вольфрамової кислоти H_2WO_4 (при прокалюванні з температурою 700...800 °С) або паравольфрамату амонію $5(Na_4)_2O\cdot12WO_3\cdot11H_2O$ (розкладання при 300 °С та більше). Відновлення проводять воднем при температурі 850..900 ^{0}С або вуглецем при температурі 1350..1550 °С в електропечах. Таким шляхом отримують також порошки молібдену, титану, цирконію, танталу, ніобію, легованих сталей і сплавів (*див. також підрозділ 1.2.1.4*).

Перспективним шляхом для металів, карбідів, нітридів та ін. є отримання *високодисперсних порошків у плазмі.* В якості відновника при цьому застосовують водень або продукти плазменної конверсії з високою температурою та без окиснювачів. Так, оксид нікелю відновлюють у струмені $Ar - H_2$ або $Ar - CO$, причому вміст водню забезпечують до стехіометричного, а теплообмін та утворення плазми здійснюються за рахунок аргона. Реакція лімітується умовами дисоціації NiO, і його повне відновлення досягається при 700 °С.

Своєрідне відновлення металів відбувається *при електролізі* за рахунок енергії електричного струму. Цей спосіб є універсальним, він забезпечує високу чистоту порошків. Але електроліз є одним із самих складних та чутливим до умов проведення фізико-хімічним процесом з виготовлення порошків. Взагалі, розміри часток порошка, що осаджується при електролізі залежать від густини струму, наявності колоїдів і поверхнево-активних речовин. Дуже великий влив на характер осаду надають: чистота електроліта, матеріал електрода та характер його обробки.

Джерелом йонів метала слугує, як правило, анод, що складається з цього метала, та електроліт, який містить його розчинену сполуку. Метал осаджується на катоді, де його йони розряджаються. Порошок відділяють від електроліта випаровуванням при нагріванні або центрифугуванням і відмиванням.

Спосіб електролізу найбільш економічний для виробництва хімічно чистих порошків міді з регулюванням їх дисперсності при застовуванні розчину сірчанокислої міді як електроліта (*див. також підрозділ 1.2.1.4*).

Такі метали як нікель, кобальт, цинк виділяються з будь-яких їх розчинних сполук у вигляді однорідних щільних дрібнозернистих осадів. Нікелевий порошок отримують також електролізом аміачних розчинів хлорнокислого нікелю (*див. також підрозділ 1.2.1.4*).

Срібло і кадмій осаджуються з їх простих розчинів у формі розгалуджених кристалітів, а з розчинів відповідних ціанистих солей – у вигляді рівного шару щільного осаду (*див. також підрозділ 1.2.1.4*).

Особливості електролізного отримання залізного порошка повязані з тим, що за рядом напруг залізо розташовується лівіше водню [4], тому воно виділяється разом з воднем, погіршуючи «вихід за струмом» та якість порошка.

Формування порошків – це технологічна операція отримання виробу або заготовки із заданою формою, розмірами та щільністю шляхом обтиснення сипучих матеріалів (порошків) [124, 125].

Ущільнення порошка здійснюють пресуванням у металевих прес-формах або еластичних оболонках, прокаткою, шликерним литтям суспензії та іншими методами. Спосіб підготовки порошків до формування обирають, виходячи з технологічних характеристик порошка, методу формування та наступної термообки (спікання).

Для металевих порошків основними *підготовчими операціями* є відпал, просіювання за фракціями, дозування та змішування (усереднення складу).

Відпал для підвищення пластичності та здібності до пресування порошків проводять у захисному середовищі при температурі $(0{,}4\ldots0{,}6)\,T_{пл}$ метала ($T_{пл}$ – температура плавлення в градусах Цельсія). Наприклад, мідний порошок відпалюють у потоці відновлювального газа при 350…400 °С, а залізний – в окиснювальному середовищі при 650…750 °С.

Порошки *просіюванням* розділяють на фракції за величиною часток з використанням віброситів. Розділення також можна проводити за допомогою повітряних сепараторів і седиментації (розділення рідких сумішей).

Змішуванням у спеціальних змішувачах готовлять однорідні за об’ємом механічні суміші порошків.

Найчастіше застосовують змішування компонентів у кульових млинах (при відношенні 1:1 маси шихти і куль). Цей процес супроводжується додатковим подрібненням компонентів.

Змішування без подрібнення здійснюють у барабанних, шнекових, лопатних, відцентрових, планетарних, конусних змішувачах або установках безперервної дії. Рівномірний і швидкий розподіл часток порошків в об'ємі суміші досягається при близкій за величиною щільності компонентів, які змішуються.

При великій різниці щільностей настає розшарування компонентів. У такому разі корисно застосовувати роздільне завантаження компонентів: спочатку більш легкі з деяким більш важким елементом, а потім – інші компоненти. Змішування завжди краще відбувається у рідкому середовищі, що не завжди економічно доцільно через ускладнення технологічного процесу.

При підготовці шихти з деяких металевих порошків високої міцності (наприклад, з вольфраму, карбідів металів) для підвищення наступної здібності до формування до суміші додають *пластифікатори* – речовини, які змочують поверхні часток. Крім високої змочуючої властивості пластифікатор повинен вигорати при нагріві без залишку, легко розчинятися в органічних розчинниках. Розчин пластифікатора зазвичай заливають у порошок під час перемішування, потім суміш висушують для видалення розчинника. Висушену суміш просіюють крізь сито.

Дозування – це процес відокремлення певних об'ємів складових суміші порошка. Розрізняють об'ємне дозування та дозування за масою.

Об'ємне дозування застосовують при автоматизованому формуванні виробів. Дозування за масою – більш точний спосіб, який забезпечує однакову щільність зформованих заготовок.

У наявний час відомі основні закономірності так званого *пресування порошків у прес-формах*, особливості процесів вібраційного ущільнення, гідростатичного та ізостатичного, гарячого, динамічного та вибухового пресування, гарячої штамповки, формування порошків прокаткою тощо. Це дозволило оптимізувати ряд технологічних режимів та розробити нові процеси, наприклад, активоване спікання вольфраму, спікання металоалмазних композицій інструментального призначення, виготовлення електроконтактних, антифрикційних і конструкційних виробів із застосуванням просочування розплавленими металами та ін.

Основним інструментом виробництва при пресуванні являються сталеві прес-форми, які встановлюють на гідравлічних універсальних або механічних пресах.

За суттю, *пресування порошків у прес-формах* представляє собою *об'ємну штамповку* (*див. вище*), оскільки при цьому, як правило, не передбачається витікання матеріалу прес-виробу з матриці, а весь він залишається у прес-формі. Також можна розглядати першу «*заповнюючу*» стадію класичного пресування (*див. вище*). Обробка в металічній прес-формі під тиском призводить до зменшення об'єма порошка в результаті перерозподілу часок, заповнення порожнин і пластичної деформації. При цьому, тиск на заготовку залежить, здебільшого, від потрібної щільності виробів, виду порошка та методу його виготовлення і може складати 3...5 значень межі текучості основного метала порошка.

У пластичних матеріалів деформація часток виникає спочатку у приграничних контактних ділянках малої площини, а потім проникає в їх глибину. У крихких матеріалів деформація часток проявляється як руйнування їх виступів.

Пресування порошка не супроводжується повним усуненням пористості. Щільність отриманої деталі («*пресовки*») за її об'ємом нерівномірна, що зумовлено нерівномірністю тиску, різницею фізико-механічних властивостей часток (за формою, розмірами, твердістю, насипною щільністю), наявнітю зовнішнього тертя часток порошка між собою та на стінках прес-форми, внутрішнім тертям, наявнісю бокового підпору. На стінки прес-форми передається боковий тиск, який складає лише 25...40% від тиску за напрямом пресування. Це зумовлено тертям між частинками порошка, їх «заклинюванням» та утрудненим зміщенням перпендикулярно зовнішній силі пресування. Нерівномірність щільності за висотою особливо помітна у тих випадках, коли висота виробу більше мінімального поперечного лінійного розміру його перерізу.

Для підвищення рівня та рівномірності розподілу щільності за об'ємом виробу (*пресовки*) застосовують змащування стінок матриці прес-форми стеариновою кислотою та її солями, олеїнову кислоту, полівініловий спирт, парафін, гліцерін та ін. Матеріал мастила зазвичай уводять і до вихідної шихти, що забезпечує зниження тертя між частками порошка при пресуванні.

Іноді при виготовленні виробів складної форми попередньо пресують заготовку-напівфабрикат, а потім надають їй завершальну форму при повторному пресуванні та спіканні.

Також рівномірність щільності підвищується при двосторонньому пресуванні верхнім і нижним пуансонами [124, 125] (рисунок 1.143), при всебічному стисканні (при пресуванні в еластичній оболонці), а також – при підвищенні температури.

Після зняття тиску, а також при вилученні (*випресовці*) прес-виробу (*брикета*) з прес-форми розміри пресовки пружно збільшуються. За напрямом дії сили пресування зміна розмірів більше, ніж у поперечному напрямі.

Величина зміни розмірів залежить від величини зерен і матеріалу порошка, форми та стану поверхні часток, вмісту оксидів, механічних властивостей матеріалу, тиску пресування, використання технологічного мастила, матеріалу матриці та пуансона й інших параметрів.

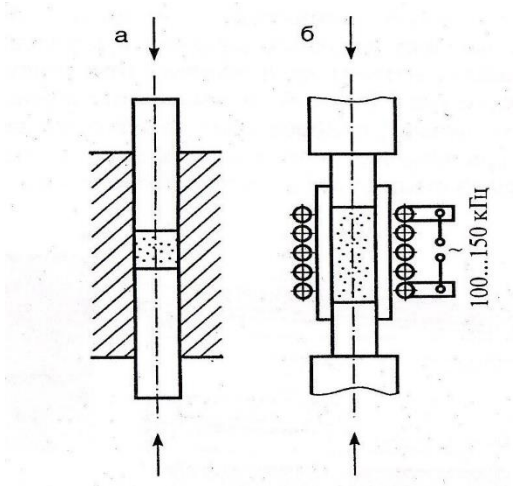


Рисунок 1.143 – Схема двостороннього пресування порошкових матеріалів [124, 125]: *а* – без нагріва, *б* – з нагрівом

Пресування виробів з неоднаковими розмірами за напрямом пресування (наприклад, з уступами по висоті) пов'язане з труднощами забезпечення рівномірної щільності прес-виробу у різних перетинах. Таку проблему вирішують, зокрема, шляхом застосування декількох пуансонів, які прикладають до заготовки різні зусилля у різних місцях контакту. Для цього застосовують спеціальні багатоплунжерні пресові установки.

Як було частково відмічено вище, формування порошку також здійснюють у гідро– та газостатах («*ізостатичне пресування*»); прокаткою; на гідродинамічних машинах і з використанням вибухових речовин («*імпульсне пресування*») – для порошків, пресування яких утруднено, або для отримання особливих властивостей материалу; на вібраційних установках («*вібраційне пресування*») – для підвищення щільності пресовки; продавлюванням матеріалу заготовки крізь отвір в інструменті («*екструзійне*», або «*мундштучне*» пресування); заливкою у форми («*шлікерне лиття*» – *див. нижче*) та іншими способами.

Ізостатичне формування здійснюють в умовах всебічного стискання, що забезпечує не тільки рівномірну щільність, але й усуває анізотропію властивостей матеріалу. Якщо

сила стискання утворюється рідиною, то таке пресування називають *гідростатичним* (рисунок 1.144).

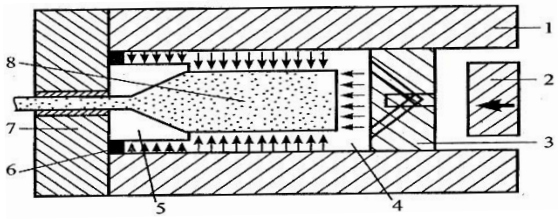


Рисунок 1.144 – Схема гідростатичного формування порошкових матеріалів [124, 125]: 1 – робочий циліндр; 2 – пуансон; 3 – прес-шайба; 4 – робоча рідина; 5 – матриця; 6 – ущільнювач; 7 – матрицеутримувач; 8 – контейнер з матеріалом

При гідростатичному пресуванні у спеціальних установках порошок засипають у резинову оболонку та після віброущільнення, вакуумування та герметизації поміщають у ємність, в якій підвищують тиск до необхідної величини. При цьому, тертя між оболонкою та порошком практично відсутнє, а тиск пресування менше, ніж при пресуванні у сталевих прес-формах.

Гідростатичним пресуванням отримують циліндри, труби, кулі, тиглі та інші вироби складної форми.

Недоліком гідростатичного пресування є неможливість отримання пресованих деталей з точно заданими розмірами та формою та необхідність відповідної наступної механічної обробки, а також мала продуктивність процесу.

Мундштучне пресування [124, 125] – це формування заготовок із суміші порошка та пластифікатора шляхом її продавлювання крізь отвір у матриці. Цей процес, значною мірою, є аналогічним класичному пресуванню (*див. вище*). В якості пластифікатора застосовують парафін, крохмаль, полівініловий спирт, бакеліт.

Мундштучне пресування також реалізують з підігрівом материалу без пластифікатора. Зокрема, порошки алюмінію та його сплавів пресують при 400...450 °С, міді – при 800...900 °С, нікелю – при 1000...1200 °С, сталі – при 1050...1250 °С. При цьому для запобігання окисненню застосовують захисні середовища (інертні гази, вакуум) або пресування в захисних оболонках (скляних, графітових, металевих: мідних, латунних, або у мідно-залізній фользі). Після пресування оболонку видаляють механичною обробкою або травленням у розчинах, які є інертними по відношенню до відпресованого материала.

Таким способом отримують труби, прутки, кутики та інші вироби великої довжини.

Прокатку порошків [124, 125] застосовують для виготовлення заготовок з конструкційних (біметалевий дріт та інші бі– та триметалеві матеріали), електротехнічних (струмознімальні пластини, електродні стрічки), фрикційних та антифрикційних, пористих (фильтрувальних) та інших матеріалів (рисунок 1.145).

Шлікерне формування [124, 125] представляє із себе процес заливання шлікера (однорорідної концентрованої суміші порошка металу з рідиною) у пористу форму з наступним висушуванням.

Шлікер готують з порошків при розмірі їх частинок І...2 мкм (рідше – до 5...10 мкм) та рідини: води, спирту, чотирихлористого водню. Такий конгломерат однорідний та досить стійкий.

Форму для шлікерного лиття виготовляють з гіпсу, нержавіючої сталі, спеченого скляного порошка. Формування виробів після заливки форми шлікером включає спрямоване осаджування твердих частинок на стінках форми під дією направленого плину вказаної суміші. Такі потоки виникають у результаті вбирання рідини у пори форми під дією вакуума або відцентрових сил, що утворює спрямований тиск у декілька мегапаскалей. Час нарощування оболонки визначається її потрібною товщиною та складає

1...60 хв. Після вилучення виробу з форми його висушують при 110...150 ^{0}С. Щільність матеріалу таких виробів сягає до 60% від пресованих, а зв'язок частинок зумовлений їх механічним зачепленням. Цим способом виготовляють труби, посудини та вироби складної форми.

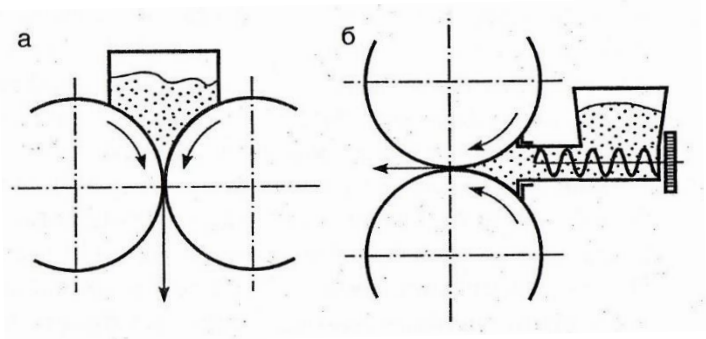


Рисунок 1.145 – Схема прокатки з вертикальною (*а*) і шнековою горизонтальною (*б*) подачею порошка [124, 125]

Динамичне формування [124, 125] – це процес пресування з використанням імпульсних навантажень. Відмінною рисою цього процесу є швидкість прикладення навантаження та значні теплові виділення на контактних ділянках частинок, що полегшує процес їх деформування та забезпечує більше ущільнення та меншу пружну деформацію виробів, ніж при статичному (звичайному) пресуванні.

Джерелом енергії можуть бути: вибух заряда вибухової речовини, електричний розряд у рідині, вплив імпульсного магнітного поля, викид стисненого газу, вібрація. Відповідно до джерела енергії пресування називають *вибуховим*, *електрогідравлічним*, *електромагнітним*, *пневмомеханічним* або *вібраційним*.

Вид *термічної обробки*, який дозволяє отримати кінцеві властивості матеріалу та виробу, называють *спіканням*. Воно заключається у нагріві та витримці сформованого виробу (заготовки) при температурі нижче точки плавлення основного компонента (зазвичай – це 0,7...0,9 від температури плавлення найбільш легкоплавкого матеріалу, що входить до складу шихти). Час витримки для різних матеріалів складає від 30...45 хвилин до 2...3 годин. Витримка при такій постійній температурі викликає спочатку різке зростання щільності, міцності та інших властивостей спеченого виробу, а потім їх зростання уповільнюється.

Обробка шихти, як правило, зазвичай супроводжується зменшенням початкового об'єму заготовки.

Розрізняють *лінійну* та *об'ємну* усадку. Як правило, усадка за напрямом пресування більше, ніж у поперечному напрямі.

Для багатокомпонентних систем розрізняють твердофазне та рідкофазне спікання.

Твердофазне спікання супроводжується виникненням та розвитком зв'язків між частинками, утворенням та зростанням контактів (*«шийок»*), закриттям наскрізної пористости, укрупненням і сферодіїзацією пор, ущільненням заготовки за рахунок *усадки* – зміни розмірів виробу. Ущільнення при нагріві відбувається, в основному, за рахунок об'ємної деформації частинок при об'ємній самодифузії атомів. При такому спіканні також має місце рекристалізація зерен. Ще відбувається масоперенесення речовини крізь газову фазу за рахунок поверхневої та об'ємної дифузії та можливого в'язкого плину, що викликаний зовнішнім навантаженням під час так званого «*спікання під тиском*».

Рекристалізація при спіканні призводить до зростання зерен та зменшення сумарної поверхні частинок. Але зростанню зерен заважає гальмівний вплив сторонніх включень (пор, плівок, домішок) на поверхнях зерен. Усадці також заважають плівки невідновлюваних оксидів, гальмуючи процеси дифузії.

При спіканні іноді спостерігається порушення процесу усадки. Це проявляється у неповній усадці або навіть у *збільшенні* об'єму виробу. Причинами цього можуть бути зняття пружних залишкових напружень після пресування, наявність невідновлюваних оксидів, фазові перетворення та виділення оксидів газів, що адсорбовані та утворилися при хімічних реакціях відновлення. Збільшення об'єму тіл, що піддаються спіканію, спостерігається і при утворенні закритої пористості з об'ємом пор більше 7% (що пов'язано з наявністю і розширенням газів у закритих порах).

Рідкофазне спікання відбувається у присутності рідкої фази легкоплавкого компонента, яка змачує тверду фазу, покращує зчеплення між частинками, збільшує швидкість дифузії компонентів, полегшує взаємне переміщення частинок.

Тверда фаза в зоні контакта може розчинюватись у рідкій, що інтенсифікує процеси масоперенесення. У той же час, погана змочуваність частинок може перешкоджати ущільненню. Тому розрізняють системи: з нерозчинними компонентами, з обмеженою розчинністю та зі значною взаємною розчинністю компонентів.

При рідкофазному спіканні можна отримувати вироби, які практично не містять пор.

На якість спечених тіл впливають властивості вихідних порошків: величина частинок, їх форма, стан поверхні, тип оксидів і ступінь досконалості кристалічної будови.

При однаковій щільності спечених виробів їх механічні та електричні властивості тим вище, чим менше були частинки порошка.

Шорсткість поверхні частинок і дефекти їх кристалічної будови сприяють посиленню дифузії, збільшенню щільності та міцності виробу.

Структура виробів, спечених з тонкоподрібнених порошків, відрізняється наявністю великої кількості крупних зерен, які утворилися в результаті рекристалізації при спіканні (подібно тому, як це має місце при рекристалізації сталі – *див. підрозділ 1.2.2.2*).

Збільшення тиску при *попередньому пресуванні* призводить до зменшення як об'ємної, так і лінійної усадки та збільшенню усіх показників міцності – твердості, межі міцності та межі текучості при розтягненні та стисканні.

З підвищенням температури щільність і міцність спечених виробів загалом збільшуються.

Атмосфера при спіканні також впливає на показники якості виробів. Їх щільність вище при спіканні у відновлюваному середовищі у порівнянні з нейтральним. Вельми повно та швидко відбувається спікання у вакуумі, яке у порівнянні зі спіканням у нейтральній атмосфері зазвичай починається при меншій температурі та дає підвищену щільність виробу.

Суміщення процесу пресування та спікання реалізується при *гарячому пресуванні*, яке здійснюють при температурі $(0{,}5\ldots0{,}8)T_{пл}$ основного компонента.

Цей різновид процесу пресування здійснюють у прес-формі та застосовують з метою отримання високих фізико-механічних властивостей виробів з використанням нагрітих порошків або заготовок, які важко пресуються.

Нагрів зазвичай здійснюють електричним струмом. Висока температура пресування дозволяє знизити у декілька десятків разі тиск пресування при максимально швидкому ущільненні матеріалів з отриманням мінімальної пористості виробів. Час витримки при цьому складає від 15…30 хв. до декількох годин.

Гарячепресовані вироби мають дрібнозернисту структуру. Механізм ущільнення порошку є ідентичним звичайному спіканню: утворення міжчастинкових контактів, зростання щільності з одночасним збільшенням розмірів частинок та подальше зростання частинок при незначному додатковому ущільненні.

Вироби після гарячого пресування володіють більш високими значеннями межі текучості, видовження і твердості, ліпшою електропровідністю та більш точними розмірами, ніж такі ж, що отримані шляхом послідовних операцій пресування та спікання. Вказані властивості тим вище, чим більше був тиск пресування.

Прес-форму, в якій здійчнюють гаряче пресування, виготовляють із жароміцних матеріалів, а при пресуванні тугоплавких сполук – з графіта, міцність якого з підвищенням температури збільшується.

У наявний час розширюється застосування прес-форм з тугоплавких оксидів, силікатів й інших хімічних сполук.

Для запобігання взаємодії материалу, що піддається пресуванню, з матеріалом прес-форми внутрішню поверхню останньої покривають якоюсь інертною речовиною (рідке скло, емаль, нітрид бора або ін.) або металевою фольгою. Крім того, для запобігання окиснення виробу, що пресується, застосовують захисні середовища (відновлювальні або інертні), а також вакуумування. Гаряче пресування здійснюють на спеціальних гідравлічних пресах, які оснащені пристроями для регулювання температури обробки.

Інтенсифікації процесу спікання досягають застосуванням відповідних хімічних і фізичних заходів.

Хімічне активування спікання міститься у зміні складу атмосфери при реалізації цього процесу. Так, наприклад, добавка до атмосфери при спіканні хлористих або фтористих сполук сприяє активному з'єднанню з ними виступів частинок, а сполуки, що утворюються, знов відновлюються до метала, атоми якого конденсуються в місцях з мінімальним запасом вільної енергії. Наприклад, оптимальною є 5...10% концентрація хлористого водню у водневому відновлювальному середовищі.

Інтенсивне ущільнення заготовки при спіканні має місце також при додаванні до вихідного порошка малої кількості метала з меншою температурою плавлення. Наприклад, до вольфраму додають нікель, до заліза – золото тощо.

Фізичні способи активування спікання включають циклічну зміну температури, вплив вібрацій або ультразвука, опромінення пресовок, накладення сильного магнітного поля тощо.

Іноді спечені вироби піддають *додатковим операціям*.

Додаткові технологічні операції застосовують для отримання певних фізичних і механічних властивостей шляхом хіміко-термічної обробки та/або використання різних просочувачів.

Прикладом цього при виготовленні електроконтактних і деяких конструкційних матеріалів стає просочування спресованого та потім спеченого пористого каркаса з більш тугоплавкого матеріалу рідкою *металевою складовою композиції*.

Відомі два варіанти *просочування*.

За першим варіантом на пористому каркасі розміщують шматочок матеріалу, яким просочують, з об’ємом, який дорівнює об’єму пор каркасу, і нагрівають до температури плавлення цього матеріалу. При цьому, розплав вбирається порами тугоплавкого каркасу.

За другим способом пористий каркас поміщають у розплав або порошок матеріалу, що просочує. Його поглинання відбувається під дією капилярных сил. Швидкість просочування складає десяті долі міліметра за секунду та збільшується з підвищенням температури. Зазвичай температура просочування повинна бути нижче за температуру плавлення металу каркаса та на 100...150° більше за температури плавлення металу, що просочує. Для покращення змочуваності останнього до нього додають різні присадки.

Просочування виробів маслом (машинним або веретенним) при температурі 110...120 °С відбувається протягом приблизно 1 години. Масло заповнює пори виробів і в процесі роботи поступає по капілярам до поверхонь тертя. Це у ряді випадків дозволяє позбавитися змащування контакта тіл тертя в механізмах.

Для досягнення необхідних чистоти поверхні та точності застосовують *механічну обробку,* або *калібрування*.

Механічна обробка спечених матеріалів має особливості, які зумовлені їх пористістю. Оскільки використовуваний ріжучий інструмент відчуває часті мікроудари, які призводять до його швидкого зносу, тому тут застосовують тверді сплави, а для отримання високої чистоти поверхні – алмазний інструмент. Зокрема, калібрування може бути

застосованим для отримання розмірів 6…11 квалітетів точності та шорсткості R_a =1,25…0,32 мкм. Часто вироби калібрують як за одним (за зовнішнім або внутрішнім діаметром), так за декількома параметрами.

Хіміко-термічна обробка дозволяє покращити механічні властивості виробів, розширити сферу їх використання. Наприклад, *нітроцементація* збільшує зносостійкість деталей до 30 разів, а *дифузійне хромування* – зносо– та корозійну стійкість у декілька разів.

Застосування гальванічних покриттів у цих умовах має особливості, що зумовлені наявністю пор. Для запобігання проникненню електроліта в пори необхідним стає їх попереднє заповнення. Цього досягають шляхом ретельного шліфування та полірування поверхні виробу, при яких утворюється ущільнений зовнішній шар з малою пористістю.

В якості демонстрації, коротко розглянемо ***особливості застосування методів порошкової металургії при виготовленні тугоплавких виробів*** з вольфраму і молибдену.

Така технологія включає наступні основні стадії:

1) пресування заготовок («*штабиків*») з металевого порошка;

2) низькотемпературне (попереднє) спікання заготовок;

3) високотемпературне спікання (зварювання) заготовок;

4) механічну обробку заготовок з отриманням виробів (дроту, стрічки).

Для *виготовлення ковкого вольфраму* застосовують вольфрамові порошки, відновлені тільки воднем із вмістом домішок не більше 0,05%. Для підвищення щільності таких пресованих виробів використовують порошки з різними розмірами зерен крупністю 0,5…6 мкм.

Пресування металевих порошків у штабики здійснюють у сталевих розбірних прес-формах [123, 124] (рисунок 1.146) із застосуванням механічних або гідравлічних пресів.

Для зменшення тертя між частинками порошку і стінками прес-форми, досягнення рівномірної щільності та усунення розшарування в штабиках до порошку додають змащувальні речовини – розчин гліцерину в спирті або парафіну в бензині.

Вольфрамові штабики одержують у вигляді правильної прямокутної призми перетином від 10х10 до 40х40 мм і довжиною 400…650 мм. Штабики малого перетину використовують, в основному, для виготовлення дроту, а великого – для пластин, стрічки і фасонних виробів.

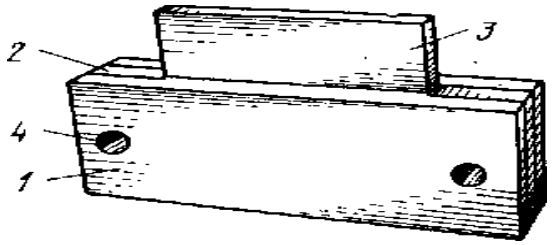


Рисунок 1.146 – Схема для отримання штабиків з порошку вольфраму у розбірній прес-формі [123, 124]: 1 – бокові пластини, 2 – торцеві вкладиші, 3 – пуансон; 4 – з’єднувальні шпильки

Попереднє спікання з метою зміцнення заготовки та підвищення електропровідності ведуть при 1150…1300 °С в атмосфері водню протягом 30…120 хв. Для цього застосовують трубчасті або муфельні печі.

Високотемпературне зварювання проводять при температурі близько 3000 °С шляхом нагрівання попередньо спеченого штабика пропусканням через нього електричного струму. Сила струму, який застосовують при зварюванні вольфрамових штабиків, становить 88…93% від рівня, що необхідний для розплавлення вольфраму. Тривалість зварювання залежить від розміру штабика і коливається від 15 до 60 хв. Після зварювання штабик скорочується в розмірах на 15…17%, а його щільність зростає від приблизно 12 до 17,5…18,5 г/см^3.

Спечені вольфрамові штабики міцні, але «тендітні» при кімнатній температурі. Пластичні властивості штабиків вольфраму підвищуються, якщо їх піддати куванню в нагрітому стані. Зокрема, ковку квадратного у перетині прутка зазвичай здійснюють на ротаційній кувальній машині [124, 125] (рисунок 1.157).

Принцип її дії полягає в тому, що попередньо нагрітий штабик просувають до центру валу, що обертається, в пазах якого здійснюють ударні рухи дві кувальні плашки (штампи). Плашки за допомогою периферійних роликів завдають по штабику 10…12 тисяч ударів на хвилину. В результаті кування штабик квадратного перетину стає круглим. Змінюючи плашки та діаметр центрального каналу, отримують прутки діаметром 2…3 мм.

Після кування прутки в нагрітому стані піддають волочінню з отриманням дроту діаметром до 0,3 мм і менше.

Для одержання з порошків великих вольфрамових заготовок масою до кількох сотень кілограмів з рівномірною щільністю використовують метод гідростатичного пресування (*див. вище*). Спікання великих заготовок проводять в індукційних печах у водневому середовищі, інертному газі або у вакуумі протягом тривалого часу (до 20 годин) при 2400…2500 °С.

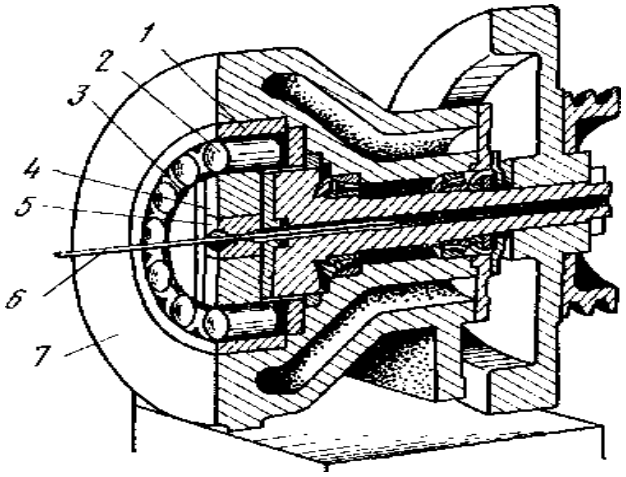


Рисунок 1.147 – Схема ротаційної кувальної машини [124, 125]: 1 – обойма, 2 – ролики, 3 – шпиндель з каналом для прутка, *4* – повзуни, 5 – штампи, 6 – пруток, 7 – станина

При *виробництві молібдену* методом порошкової металургії порошки також спочатку пресують на гідростатичних пресах у штабики перетином 2…16 мм^2 завдовжки 450…600 мм. Інколи для поліпшення фізіко-механічніх властивостей виробів до молібденового порошку додають порошки легуючих металів (*Ti, Zr, V* та ін.). Перед пресуванням легованих заготовок суміш порошків ретельно перемішують.

Спресовані молібденові штабики міцніші за вольфрамові унаслідок меншої величини зерна порошку та більшої вихідної пластичності молібдену.

Для попереднього і високотемпературного спікання молібденових штабиків застосовують таку ж апаратуру, як і у виробництві вольфраму. Перше спікання в атмосфері водню ведуть при 1110…1200 °С, а зварювання – при 2200…2400 °С.

Заготовки молібдену великої маси (до 300 кг) формують методом гідравлічного пресування.

Для спікання великих заготовок переважно застосовують печі з *непрямим нагрівом*.

Пресовані заготовки перед завантаженням у піч розміщують у графітових контейнерах, які обмазують сумішшю молібденового порошку з бакелітом, щоб запобігти навуглецюванню молібдену. Контейнери завантажують і вивантажують крізь шлюзи. Переміщення заготовок по всіх робочих зонах печі (попереднього спікання, спікання і охолоджування) у бік розвантажувального торця здійснюють періодично за допомогою

механічного штовхальника на довжину одного контейнера. Спікання ведуть при температурі в зоні спікання 1900…1950 °С протягом 6…8 годин.

Необхідна якість продукції у відповідності до вимог нормативно-технічної документації забезпечується якістю та стабільністю процесів її виготовлення і системою якості [1]. Але будь-які процеси, навіть максимально контрольовані, супроводжуються флуктуаціями (некерованими відхиленнями), які зумовлюють появу невідповідностей. Крім того, можливі грубі помилки, які зумовлені поломками обладнання, порушеннями технології з боку персоналу, прихованими вадами матеріалів тощо. Все це може супроводжуватись дефектами продукції, яку не слід допускати до надання споживачеві.

Свідома боротьба з такими невідповідностями в рамках системи якості засобами технічного контролю вимагає наявності інформації про основні види браку та причини їх виникнення. Відповідні матеріали викладені в наступному розділі.

Запитання для самоконтролю до підрозділу 1.2.2

1. Які фізичні основи отримання виробів методами обробки тиском?
2. Які параметри характеризують міцнісні та пластичні властивості матеріалів?
3. Яка різниця між схемами деформованого та напруженого станів метала?
4. Яка різниця між силою та напруженням?
5. Що характеризує «рівняння пластичності» металу?
6. У якому стані за рівнем температури деформують метали? Надайте цим станам загальну характеристику.
7. Опишіть поведінку та параметри процесів розтягнення та стискання до руйнування зразків металу.
8. Що характеризують термомеханічні коефіцієнти при визначенні межі текучості металів?
9. Назвіть види ОМТ та надайте їм загальну характеристику.
10. Опишіть види тертя, які можуть мати місце при обробці металів тиском (ОМТ).
11. Назвіть види термічної обробки метала та надайте їм загальну характеристику.
12. Що демонструє Діаграма стану «залізо – вуглець»? Надайте загальну характеристику складовим структури залізо-вуглецевих сплавів. Як вони відображуються на цій «Діаграмі»?
13. Для чого застосовують захисні атмосфери при термічній обробці?
14. Чим відрізняються: «термічна обробка», «хіміко-термічна обробка» та «термомеханічна обробка» металів?
15. Назвіть основні операції оздоблення та надайте їм загальну характеристику.
16. Навіщо й як видаляють окалину з поверхні заготовки перед деформацією металів? Чи завжди ця операція є необхідною?
17. Надайте характеристику операціям нанесення покриттів на метали.
18. У чому полягає різниця дій з «ідентифікації» та «простежуваності»?
19. Якими основними параметрами характеризуються процеси ОМТ?
20. Надайте загальну характеристику основним операціям та обладнанню ковки та штамповки.
21. Назвіть особливості штамповки у відкритих та закритих штампах.
22. Назвіть основні операції холодної листової штамповки.
23. За якими ознаками та як класифікується продукція прокатного виробництва?

24. Надайте захальну характеристику процесам подовжньої, поперечної та гвинтової прокатки. Як вони поділяються за температурою ведення деформування металу? У чому особливості періодичної прокатки?

25. Як класифікують прокатні агрегати?

26. Назвіть та опишіть призначення складових прокатного інструменту.

27. Навіщо прокатні стани листової прокатки роблять багатовалковими?

28. Які обмеження є при реалізації процесу прокатки?

29. Опишіть умовну послідовність перероблень злитку на дріт і фольгу.

30. Опишіть технологічні операції гарячої та холодної деформації металів.

31. У чому полягають переваги охолодження катанки за способом «Стелмор»?

32. Чим відрізняється виробництво гнутих профілів від аналогічних процесів прокатки?

33. Надайте загальну характеристику способам та обладнанню з виготовлення безшовних і зварних труб.

34. Надайте характеристику видам зварювання при виготовленні зварних труб.

35. Надайте загальну характеристику способам та обладнанню з виготовлення залізничних коліс, бандажів та кілець.

36. У чому полягають основні особливості та обмеження реалізації процесів волочіння труб і дроту?

37. Надайте загальну характеристику способам та обладнанню пресування. Чим відрізняється процес подовжнього пресування від волочіння?

38. Які види продукції становлять групу металовиробів? Які з них відносяться до метизів?

39. Опишіть технологію виготовлення болтів. Чим відрізняються «болти» від «гвинтів»?

40. Чим відрізняються «шурупи» від «саморізів»? Як здійснюється накатування різьблення на них?

41. Надайте загальну характеристику способам та обладнанню порошкової металургії.

42. Опишіть основи технологій виготовлення та пресування порошків.

2 ДЕФЕКТИ МЕТАЛУРГІЙНОЇ ПРОДУКЦІЇ

2.1 Загальні аспекти виявлення та запобігання прояву дефектів металургійної продукції

Виготовлення продукції, зокрема – металургійної потребує контролю якості на всіх етапах її життєвого циклу [1, 42, 68]. При цьому, слід враховувати, що сам контроль – це витратна діяльність, *яка не додає вартості продукції*, але є необхідною не тільки для відокремлення якісних поточних напівфабрикатів та кінцевої продукції від неякісних, але надає первісну інформацію для зворотного зв'язку між *результатами* праці з обставинами, що їх зумовили. Останнє дозволяє скоригувати, при необхідності, технологічний процес та налаштування обладнання.

Конкретними діями з реалізації контролю продукції, процесів та системи, в цілому, на підприємстві переймається служба технічного контролю.

Призначенням технічного контролю є своєчасне отримання повної та достовірної інформації про якість продукції (послуги), стан устаткування і технологічного процесу. Його *метою* є недопущення невідповідностей до споживачів, попередження несправностей та відхилень, які можуть призвести до порушень вимог стандартів, технічних і договірних умов, зміцнення виробничої дисципліни і підвищення відповідальності всіх ланок виробництва за якість продукції [1].

При цьому під категорією «*дефект*» розуміється відхилення якості готового виробу або напівфабрикату від вимог, передбачених технічними умовами, часткове або повне порушення властивостей виробу даного виду (хімічний склад, структура, суцільність, зовнішній вигляд тощо), якими визначається його споживча цінність. Отже, «дефектом» називається *кожна окрема невідповідність* продукції вимогам, що встановлені нормативною документацією.

З'ясування причин появи дефектів та їх систематизація відбуваються в результаті аналізу умов їх утворення, оскільки походження невідповідностей зазвичай пов'язане з багатьма факторами.

Виявлення дефектів здійснюється візуально та з допомогою інструментальних засобів та приладів [1]. Їх поява, як правило, є наслідком відхилень від регламентованих вимог до певних процесів та технологічних операцій, а виявлення – стимулом до визначення та усунення певних відповідних причин в рамках системи якості [1, 6, 48, 62, 66, 126…136 та ін.]

При класифікації дефектів враховують характер, розміри, місце розташування дефекту на виробі, особливості виробів, їх призначення, умови використання (експлуатації) тощо.

У залежності від можливого впливу на службові властивості виробу дефекти можуть бути: явними або прихованими; критичними, значними або малозначними; поправними або непоправними (остаточними).

Явні поверхневі дефекти виявляють візуально, а внутрішні *приховані* – спеціальними засобами. Наприклад, при огляді поверхні виробу можуть бути встановлені наступні дефекти: хвилястість, рябизна, поздовжні риски, тріщини, раковини, волосовини, іржа, залишки технологічних покриттів, напливи захисних покриттів або навпаки його місцева відсутність та ін. *(див. нижче)*.

Критичним називають дефект, при наявності якого використання продукції за призначенням неможливо через невідповідність вимогам безпеки або надійності.

Значний дефект – це такий, що суттєво впливає на використання продукції за призначенням та (або) на її довговічність, але не є критичним.

Критичним називають дефект, при наявності якого використання продукції за призначенням неможливо через невідповідність вимогам безпеки або надійності.

Категорія «дефекти» тісно пов’язана з поняттям «*брак*», або «*виробничий брак*» – це результат праці, передавання якого споживачу не допускається через наявність дефектів.

Брак вважається *поправним*, якщо вироби, напівфабрикати, деталі та вузли після виправлення можуть бути використані за прямим призначенням, і їх виправлення є економічно доцільним. Якщо ж ці об'єкти після виправлення не можуть бути використані за прямим призначенням, або їх виправлення економічно недоцільно, брак признається *непоправним*.

Віднесення того чи іншого дефекту, а також їх сукупності до бракувальної ознаки продукції здійснюється окремо в кожному випадку залежно від вимог до неї нормативно-технічної документації (НТД). Наприклад, окремі місцеві дефекти на поверхні виробу у вигляді незначних вм'ятин, забоїн, подряпин, рисок можуть не вважатися значними, якщо їх глибина не перевищує певної частини граничного відхилення цього розміру за вимогами НТД.

У практиці щодо застосування засобів неруйнівного контролю [1] немає повної відповідності поняття «*дефект*» визначенням стандартів. Зв'язок цього поняття з його визначенням встановлюється шляхом поділу дефектів на *допустимі* і *неприпустимі*. Допустимі дефекти, у свою чергу, на практиці поділяють на ті, що фіксуються або реєструються (відповідно до вимог НТД), і ті, що не можуть бути зафіксовані засобами технічного контролю.

Формування якості металургійної продукції відбувається на всіх етапах її перероблення, що включають виплавку сталі, розливання її у виливниці або на машинах безперервної розливки та кристалізацію, нагрівання та деформацію, термічну обробку й ін. (*див. розділ 1*). При цьому, основними джерелами утворення різних *дефектів поверхні* виробу після деформації є сталеплавильне виробництво, а також останнє деформаційне перероблення. Тому, зокрема, в ДСТУ 2658 «Прокат чорних металів. Терміни та визначення дефектів поверхні» та ін. документах стандартизовано декілька десятків дефектів поверхні прокату, що поділяють на три групи з урахуванням джерела їхнього утворення та ступеня виявлення на стадіях металургійного виробництва.

Правильне налаштування виробництва повинне не допустити надходження дефектних напівфабрикатів з попередніх технологічних операцій до наступних або, принаймні, ідентифікувати їх для можливого виправлення [1].

Певною мірою, виявлені невідповідності чавуну після доменного виробництва можна виправити сталеплавильними технологіями. Дефекти виготовлення кольорових металів та сплавів компенсуються відповідними процесами їх рафінування *(див. підрозділ 1.2.1.4)*. Це стосується і *товарної* продукції, яка безпосередньо передається споживачеві.

Найбільшу різноманітність представляють із себе «заключні» процеси виготовлення металургійної продукції – різні види обробки тиском та оздоблення напівфабрикатів і виробів. Природно, тут проявляється найбільша *кількість видів* дефектів.

Слід зазначити, що *однакові дефекти* (або невідповідності з однаковими чи подібними назвами) можуть бути наслідком *різних причин* в ході різних процесів та технологічних операцій. Більш того, під однаковими назвами дефектів у різних видах обробки металу іноді мають на увазі різні за природою (походженням) невідповідності. Це утворює певне непорозуміння при їх ідентифікації та стандартизації. Тому відомі спроби стандартизувати дефекти, хоча б точки зору їх ідентифікації (визначення) мають до наявного часу характер, обмежений певними видами обробки.

Поряд із загальними видами дефектів, що є притаманними групам процесів та видам продукції, можна виділити і специфічні невідповідності, які, здебільшого, відображають технологічні особливості певних видів обробки виробів, а іноді – історичні особливості розвитку останніх.

У сфері, що розглядається, зазвичай ***за походженням*** розрізняють дефекти:

– металургійні виробничо-технічні та технологічні;

– неметалургійні;

– експлуатаційні.

До *металургійних* відносять дефекти:

– які утворюються при плавленні металу (чавун, сталь, кольорові метали та сплави тощо);

– ливарного походження;

– деформаційного походження;

– термічної та хіміко-термічної обробки;

– оздоблення (нанесення покриттів, механічна обробка, процеси з'єднання тощо).

Неметалургійні дефекти утворюються при *виготовленні* виробів (деталей) з фасонних відливок і деформованих напівфабрикатів.

Експлуатаційні дефекти виникають (проявляються) в процесах зберігання та транспортуванні, а також – після деякого використання виробу, наприклад, внаслідок втоми металу, зношування, низької корозійної стійкості, крихкості під дією радіації тощо, а також – неправильного обслуговування при експлуатації.

За особливостями виявлення виділяють наступні дефекти напівфабрикатів і продукції:

– невідповідність технічним умовам середнього та локального хімічного складу за основними легуючими елементами та домішками, включаючи ліквацийну неоднорідність;

– наявність складових структури недопустимого виду та вмісту, а також – включення небажаних фаз.

Внаслідок цього погіршуються фізико-механічні властивості продукції (наприклад, міцність, щільність, пластичність, електропровідність, магнітна проникність тощо) аж до невідповідності вимогам НТД.

У залежності від лінійних розмірів і форми виробів дефекти умовно поділяють на три види:

– *макродефекти* (більше 50 мкм), які виявляються візуально (за формою, геометричними параметрами, характеристиками поверхні виробів або напівфабрикатів, на макрошліфах, при хімічній обробці поверхні та на поверхні зламів);

– *мікродефекти* (10…50 мкм) виявляються при дослідженні мікрошліфів за допомогою світлових мікроскопів;

– *субмікродефекти* (менше10 мкм) можуть бути виявлені тільки при електронно-мікроскопічному аналізі.

В останні роки також почали виділяти групу *нанодефектів* (<100 нм), які ідентифікують методами електронно-мікроскопічного та рентгенівського аналізу.

Різновидом дефектів розмірів і форми є невідповідна якість поверхні за кількісними характеристиками мікрорельєфу.

Далі, більш детально розглянемо основні дефекти металургійного походження в узгодженні з відповідними технологічними етапами виробництва.

2.2 Ідентифікація основних видів дефектів металургійного походження та їх запобігання

2.2.1 Дефекти первісного металу

Значна частина дефектів металовиробів пов’язана з порушеннями технології виплавки металу.

Невідповідність хімічного складу металу виявляється у процесі виготовлення (виплавляння) металу при аналізі відібраних проб рідкого сплаву (після затвердіння, наприклад, «за іскрою» для оцінки кількості вуглецю в сталі, на спектроскопах або стилоскопах тощо), на спеціально підготовлених зразках при механічних випробуваннях

на міцність, пластичність, твердість [1], а також за розтріскуванням виробів після термічної обробки, при поломці деталей під час правки або в експлуатації, при наступній обробці тиском, оздобленні напівфабрикатів, при зберіганні на складі або при передачі споживачеві.

Чутливими до появи такого дефекту є технології виготовлення деяких кольорових металів із застосуванням електролітичних методів їх отримання (*див. підрозділ 1.2.1.4*). Наприклад, у процесі електролітичного отримання магнію можливе зворотнє хлорування магнію, яке при плавці одночасно з осадженням і розчиненням інших неметалевих домішок має бути усунене флюсами із суміші хлоридів і фторидів магнію, калію і натрію.

Для *запобігання браку* з цієї причини рекомендується дотримуватись технології виготовлення металу (сплаву), ретельно ідентифікувати та простежувати первинні матеріали, уніфікувати вироби в цеху таким чином, щоб на одній ділянці не зустрічалось однакових профілів, що виготовляються з різних за властивостями, але подібних за виглядом металів (марок сталі).

Дефект є невиправним браком для виробів відповідального призначення. В інших випадках за узгодженням із замовником та визнанні дефекту *малозначним* можливо використання продукції за призначенням.

2.2.2 Дефекти литої заготовки

Вище (*див. підрозділ 1.2.1.3*) було відмічено, що дефекти перед заключною обробкою металу (наприклад, тиском), спочатку проявляються у злитках. Причому процес лиття додає свої специфічні дефекти до напівфабрикатів та виробів. Тут найбільш розповсюдженими дефектами є: ліквація, недолив, перекіс та різностінність, коробуватість, нарост, раковини (рисунок 2.1).

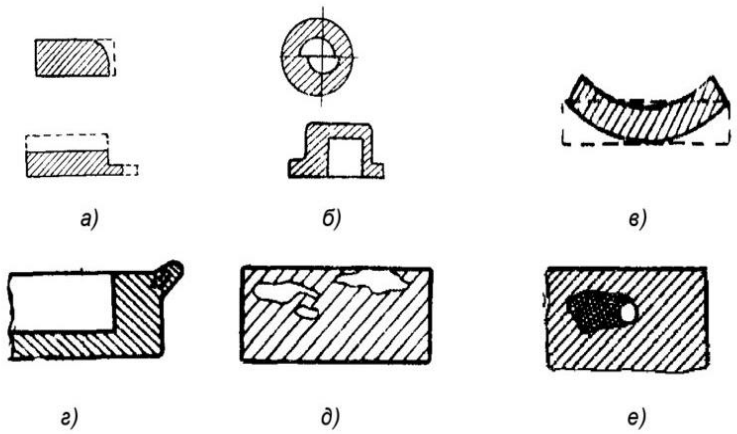


Рисунок 2.1 – Види дефектів виливків [137]: *а* – недолив; *б* – перекіс та різностінність; *в* – коробуватість; *г* – нарост; *д* – газова раковина; *е* – шлакова раковина

Загальними причинами цих дефектів можуть бути нетехнологічність конструкції виливниць, недосконаліть технологічного процесу, порушення технології та вимог до якості технологічних матеріалів. Це, наприклад, чистота металу, недотримання температури та швидкості його розливки, невірний напрямок струменю рідкого металу, незадовільний стан ковшового хазяйства та сифонного припасу, якість виливниць та прибуткових надставок, недостатня якість змащування виливниць і ін. Ці дефекти зазвичай слабо помітні на тілі злитку, але при подальшій обробці тиском можуть утворювати грубі дефекти форми з рваними краями.

Поверхневі дефекти злитків можуть частково вигорати при термічні обробці та видалятися з окалиною, проте основна їх кількість зберігається, і в тому чи іншому

вигляді переходить на поверхню напівфабрикатів і виробів. Дефекти розливки, як правило, носять локальний характер.

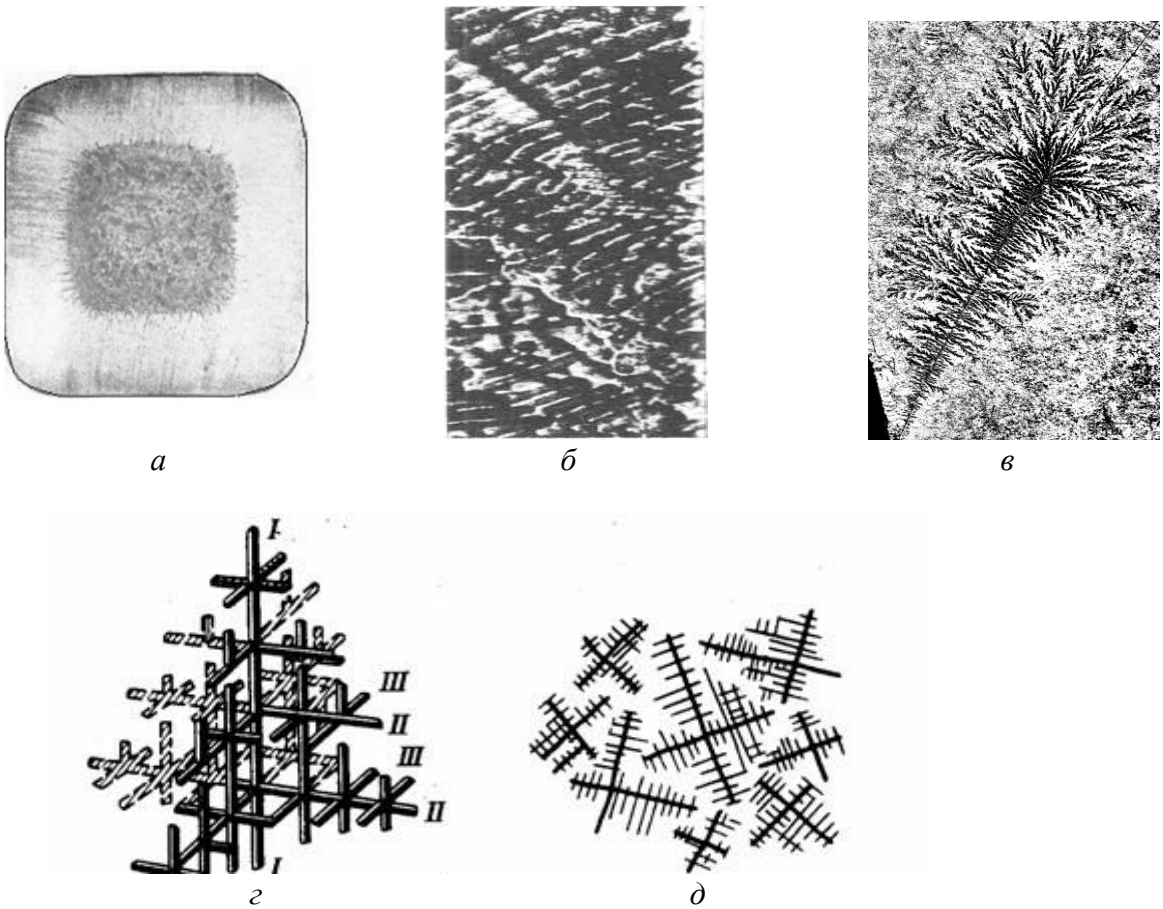
При контролі зовнішнього вигляду злитки розсортовують на групи.

До *першої групи* входять виливки без будь-яких видимих дефектів. До *другої групи* відносять виливки з невеликими дефектами, які легко можна виправити. *Третя група* – виливки з невеликими дефектами. Придатність останніх визначає технолог ливарного цеху, іноді – спільно з технологом наступного перероблення (прокатка, механічна обробка тощо). *Четверта група* – виливки, що вимагають виправлення *значного* браку: заварки тріщин, наварювання площини для оформлення необхідного розміру і т. д. До *п'ятої групи* відносять непоправний брак.

Основним дефектом литої заготовки є ***порушення однорідності металу або суцільності*** виливка – об'ємні, підповерхневі або поверхневі.

Ліквація – це *локальна неоднорідність* хімічного складу металовиробу в його об'ємі, яка пов'язана з нерівномірністю охолодження при затвердінні металу. Ліквація обумовлена фізико-хімічними факторами, а ступінь її розвитку визначається різницею між температурами ліквідус і солідус сплаву (*див. підрозділ 1.2.2.2*).

Розрізняють *зональну* ліквацію («макроліквацію», або «грубу ліквацію») і *дендритну,* або «*мікроліквацію*» (рисунок 2.2). Різновидом зональної ліквації є гравітаційна ліквація.



а *б* *в* *г* *д*

Рисунок 2.2 – Вигляд ліквації [58, 132]: *а* – зональна, або «груба ліквація» на макрошліфі зразка сталі; *б* – дендритна, або «мікроліквація» на шліфі зразка титану (х500); в – кристал дендрита; *г* – схема дендритного кристала (I, II, III – осі кристала); *д* – схема росту дендритів

Причинами виникнення ліквації можуть стати: первинна ізоляція (місцеве відокремлення специфічних об'ємів матеріалу під час затвердіння сплаву після

розливання, наприклад, зональна і дендритна ізоляція у злитку); сегрегація (відокремлення) газових міхурів під час затвердіння сталі після розливання.

Зазвичай в процесі кристалізації сплаву утворюються кристали твердого розчину дендритного типу. При цьому, осі першого порядку, які виникають у початковий момент кристалізації, мають у своєму складі, переважно, більш тугоплавкий компонент сплаву. Периферійні шари кристалів і міжосьові проміжки кристалізуються в останню чергу і збагачуються менш тугоплавкими компонентами сплаву. В результаті, утворюються кристали, неоднорідні за хімічним складом. Зокрема, у сталі особливо сильно ліквують фосфор, сірка та вуглець.

При затвердінні виливків проявляється гравітаційна ліквація через нерівномірність щільності та температури плавлення складових сплаву. Вона максимально проявляється в утворенні усадкової раковини (*див. підрозділ 1.2.1.3*). Ліквація зростає зі збільшенням розмірів злитків, а її вплив на якість – зі зменшенням перерізу виробу.

Ліквацію *ідентифікують* засобами металографічного аналізу [58].

При *наступній обробці тиском* сильна ліквація може привести до появи нерівномірності деформацій та напружень з появою внутрішніх і поверхневих макродефектів металовиробів.

Розташована у середині *литої* заготовки ліквацийна зона називається *осьовою*. У поперечному перерізі *гарячекатаного* металу сегрегації можуть зміщуватися до країв, наприклад, через нерівномірне охолодження при попередній кристалізації рідкої сталі або несприятливий режим деформації. Іноді концентрація ліквацій та їх зміщення можуть бути настільки сильними, що ліквацийні зони виходять на поверхню виробу та виглядають як дефект, допустимість або неприпустимість якого визначається призначенням заготовки та зумовлюється відповідними технічними умовами.

Запобігання утворенню цього дефекту включає проведення відповідних технічних заходів на стадії розливання сталі (регулювання температури і швидкості розливання, режиму охолодження, застосування вакуумування); при прокатці – достатня обрізка частини злитка або заготовки, що відноситься до головної частини вихідного злитка.

Найважливішою умовою отримання придатного виливка є рівномірне заповнення розплавленим металом всієї порожнини ливарної форми. Здатність сплаву заповнювати форму залежить від властивостей розплаву, матеріалу форми та конфігурації її порожнин.

Усувається дендритна ліквація гомогенізаційним (дифузійним) відпалом (*див. підрозділ 1.2.2.2*).

Значна макроліквація у більшості випадків є непоправним браком.

Недолив (*див. рис. 2.1, а*) – дефект, що зустрічається досить часто, зумовлений неповним заповненням форми (виливниці) рідким металом через порушення технології лиття та неврахування усадки металу.

Виявлення дефекту пов’язане з невиконанням розмірів злитка, що фіксується після його твердіння.

Запобігання утворенню цього дефекту передбачає ретельне виконання вимог технологічних документів щодо регламенту лиття.

Усунення дефекту проблематичне; використання такого злитка може вимагати зміни його призначення та зниження сортності.

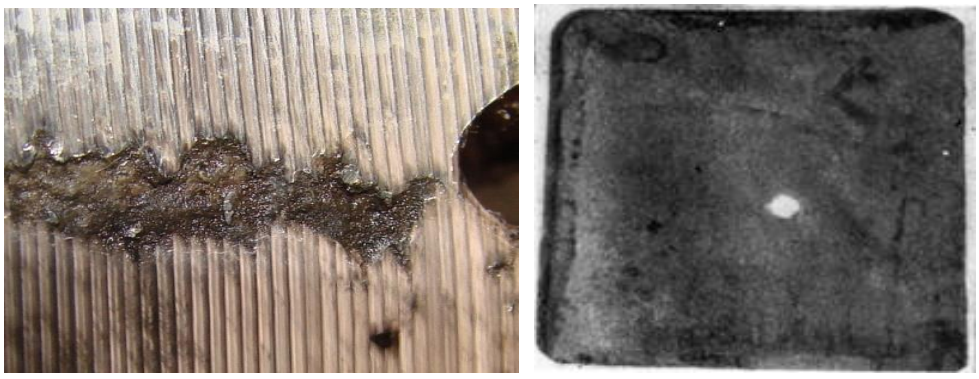
Вище було відмічено, що у зв’язку з використанням традиційної термінології у різних видах металургійних технологій та різноманітністю прояву аналогічних дефектів їх назви можуть різнитися для подібних випадків, і навпаки – схожі (навіть, однакові) назви можуть застосовуватися для різних за суттю та походженням дефектів. Тому нижче зроблено спробу узагальнити відповідні назви та терміни.

Раковини – є найбільш частим видом ливарного браку. Вони представляють собою порожнини різного розміру та локалізації у виливку.

Раковини ливарного походження бувають: шлакові, пісочні, газові (*див. рис. 2.1, д, е*) та усадочні (включаючи рихлість і пористість). Вони зумовлюють появу дефектів на металопродукції після обробки заготовки різанням (шліфуванням) на токарних верстатах або деформацією.

Шлакова раковина як дефект включається в загальну групу невідповідностей під назвою *«неметалеві включення»* і представляє собою порушення суцільності металу у вигляді часток оксидів, сульфідів, силікатів, нітридів тощо, нерівномірно розподілених по об'єму виливка з можливим виходом при обробці тиском на поверхню виробів. Неметалеві включення в сталі, вольфрамі, молібдені тощо, будучи в більшості своїй вельми крихкими та неміцними, можуть знизити механічні властивості металу. Великі включення іноді слугують початком утворення тріщин, особливо при роботі деталей в умовах циклічних навантажень або у випадку великих залишкових і структурних напружень. Неметалеві включення в сталі сприяють також нерівномірному відокремленню структурних складових з утворенням розшарувань (*див. нижче*).

Типовим представником цього дефекту є *шлакові включення (раковини)* – крихти шамоту, піщинки та ін., що потрапляють у рідкий метал і мають вигляд і склад шлаку. У більшій чи меншій кількості, залежно від застосованих методів виплавки та розливання, вони завжди містяться в сталі і виявляються після затвердіння злитків при різанні заготовок, якщо включення потрапляє на лінію зрізу, а також при аналізі макро- і мікрошліфів зразків металу (рисунки 2.3 та 2.4), а також – на виробах після обробки тиском чи оздоблення.



а *б*

Рисунок 2.3 – Вигляд шлакового включення на лінії зрізу (*а*) та макрошліфі (*б*) заготовки [132]

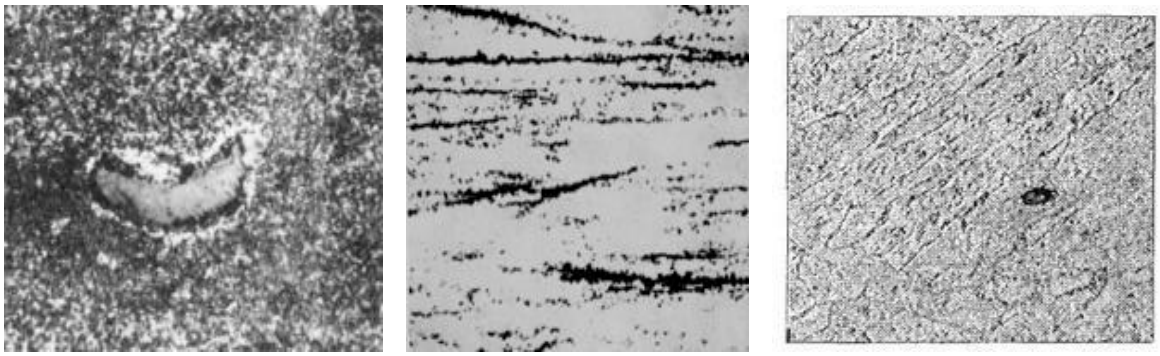


Рисунок 2.4 – Вигляд неметалевих включень на макрошліфах зразків металу [132]

Причинами виникнення неметалевих включень стають потрапляння до рідкого металу частинок чужорідних продуктів: вогнетривкого матеріалу обладнання та оснащення через їх розмивання і викришування у процесі виплавки або розливання (*екзогенні включення),* а також внаслідок неповного видалення з металу продуктів рафінування (для сталі – розкислення) – *ендогенні включення* через занадто ранній злив шлаку, низьку температуру розливання (наприклад, для титану).

Основна причина утворення шлакових включень – проникнення шлаку разом з розплавом до робочої порожнини ливарної форми. Шлак може потрапити в розплав внаслідок механічного перемішування його з розплавом в процесі плавки та при випуску з плавильного агрегату. Інтенсивність такого проникнення визначається кількістю і природою шлакових включень у розплаві, а також надійністю технологічних прийомів, які запобігають їх потраплянню у виливок.

На безперервно литій заготовці неметалеві включення представляють собою забруднення у вигляді скупчень плівок розмірами до 1,0 мм з глибиною розташування 2…3 мм і більше або шлакових включень (*див. рис. 2.4*).

При литті чушок магнію іноді спостерігаються *флюсові включення* – сольові включення округлої форми, що заповнюють порожнечу у тілі чушки або ділянку у формі плівки на поверхні. При вилежуванні у цьому місці утворюється рихлий наріст сірого або чорного кольору.

Внаслідок схильності деяких кольорових металів (мідь, алюміній та ін.) до окиснення на їх поверхні утворюється оксидна плівка, яка суттєво впливає на властивості розплавів і робить їх в'язкішими. Небажаним наслідком цього можуть бути включення у виливок відповідних оксидних плівок.

Основні *напрямами запобігання* появі шлакових включень у виливках наступні:

– найбільш повне відокремлення шлаку в процесі плавки та підготовки розплаву до заливки до виливниць;

– дотримання необхідних температури та технології розливання, оскільки підвищення текучості сталі сприяє зменшенню цього дефекту;

– запобігання попаданню шлаку до виливниці, наприклад, затримкою шлаку в ливниковій системі за рахунок застосування спеціальних елементів і пристроїв, а також вибору відповідних перетинів її складових частин;

– використання якісного вогнетривкого матеріалу; належний догляд за випускним отвором і розливочними пристроями; ретельна підготовка розливного обладнання.

Усунення дефекту. Видалення неметалевих включень з об’єму виливка неможливо. У залежності від величини, форми, характеру розподілу (скупчень) і природи неметалевих включень вони можуть обмежувати або повністю виключати можливість застосування злитку. Ці дефекти розглядаються як критичні або значні в тих випадках, коли вони перешкоджають подальшій переробці (наприклад, зумовлюючи розриви при глибокій витяжці чи волочінні або утруднення при нанесенні гальванічних покриттів). Перевірка вихідних заготовок у деяких випадках може визначити можливість ремонту заготовок шляхом їх шліфування чи вирубки дефектних місць. Наявність неметалевих включень може зумовити необхідність обрізки головної частини злитка перед деформацією.

Мінімізації вмісту неметалевих включень сприяє переплав металу.

Усадкова раковина *(*або ***«рихлість», або «порожнина від усадкової раковини»)*** має вигляд відкритої або закритої порожнечі в об’ємі виливка, орієнтованої, здебільшого, поздовжньо до осі виливка поблизу його центральної зони (рисунок 2.5), яка може містити неметалеві включення і мати шорстку кристалічну поверхню зі слідами дендритів.

Поверхня відкритих усадкових раковин зазвичай буває окисненою. Такі відносно великі порожнечі іноді звуться «*рихлістю*» злитку.

Усадкові раковини *утворюються в процесі* затвердіння злитка (переважно, зі спокійної сталі, вольфраму, молібдену, міді, алюмінію тощо) внаслідок нерівномірного

охолодження та недостатньої кількості рідкого метала у верхній частині виливка при його затвердінні та усадці.

а *б*

Рисунок 2.5 – Вигляд усадкової раковини на макрошліфі виливка: *а* – у поздовжньому перетині поблизу осі; б – у поперечному перетині [132]

Утворенню усадкових раковин сприяють: підвищений вміст газів у рідкому металі; несприятлива форма виливка; широкий температурний інтервал кристалізації металу; неефективність теплової ізоляції верхньої частини виливка; порушення режиму кристалізації металу.

Усадочна раковина може залишитися усередині блюма або сляба через недостатнє видалення головної частини злитка (заготовки). Зі зменшенням перерізу виробу внаслідок обробки тиском виявлення усадкової раковини утруднюється, а шкода від неї для адекватного використання виробу збільшується: наявність у прокатаній заготовці усадкової раковини може проявитися як *розриви* на кінцях продеформованого металу (*див. далі)*.

Попередження дефекту пов’язане з ретельним дотриманням технології лиття та контролю заготовки, оскільки при його наявності на злитку запобігти його прояву при подальшому виробництві виробів вже майже неможливо. Для попередження прояву дефекту *при прокатці*, наприклад, у прокатному цеху з обтискним станом допускається ремонт злитка (заготовки) шляхом додаткового видалення його дефектної частини. Слід тільки з'ясувати, де саме знаходиться ця дефектна частина.

Наявність у злитку значних раковин, як правило є невиправним браком і потребує його бракування або, як мінімум, збільшеного вилучення дефектної частини виливка.

Усадочна (центральна) пористість являє собою дрібні (у порівнянні з *рихлістю*) порожнини, розташовані між дендритами металу по всьому об'єму злитку або в його центральних частинах (рисунок 2.6).

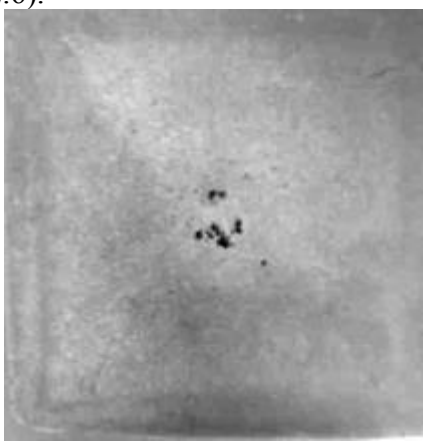


Рисунок 2.6 – Вигляд центральної пористості на макрошліфі злитка [132]

Цей *дефект виявляється* за допомогою дефектоскопа або візуально на поперечному зрізі зразка металу.

Попередження дефекту таке ж, як і у минулому випадку.

Усунення дефекту – обрізкою або вирубкою дефектних місць виробу.

Газові раковини (газова пористість) має вигляд сферичних або заокруглених порожнеч усередині або ззовні злитку, які мають гладку блискучу (у закритих) або окиснену (у відкритих) об'ємах поверхню (рисунок 2.7).

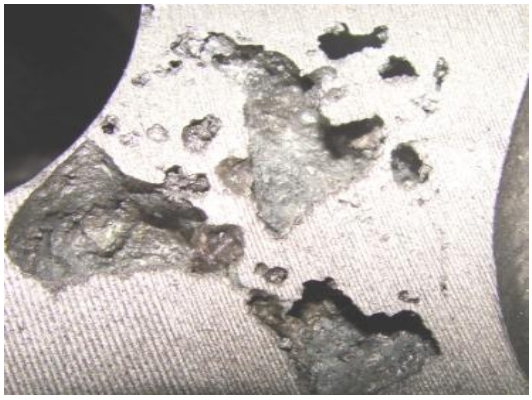


Рисунок 2.7 – Вигляд газової раковини на зрізі поверхні литої деталі [132]

Газові раковини утворюються у металі внаслідок зменшення розчинності та виділення у ньому газів при кристалізації, коли пухирі газів прагнуть піднятися на поверхню металу, але не встигають вийти за межі виливка.

Газові раковини, що утворилися за рахунок поганої якості металу, найчастіше мають малі розміри та розподілені по всій масі виливка. Газові раковини, що утворилися за рахунок дефектів форм і неправильної технології заливки, концентруються найчастіше на окремих певних ділянках виливка і знаходяться на невеликій глибині від поверхні або стрижня (якщо він є). Утворення *газової пористості* залежить від кількості розчинених газів, інтенсивності кавітації розплаву та режиму проведення плавки, який може впливати на насиченість розплаву газами.

Цей дефект проявляється як у злитку, так і у виробах після обробки деяких металів (зокрема, нікелю та його сплавів, вольфраму, молібдену та ін.) через їх підвищену схильність до взаємодії з газами пічної атмосфери. При розливанні свинцю – це маленькі, видимі поглиблення (відкриті ямки) на поверхні злитка, що утворюються внаслідок виділення газів біля стінок виливниці.

При наступній після лиття обробці тиском пори зосереджуються всередині металу та деформуються разом з ним. При цьому, довжина одиночної пори може сягати в дроті при волочінні декількох міліметрів.

Газові раковини *виявляють* на зрізі, шліфі або на зламі металовиробу у вигляді відносно дрібних порожнеч, заповнених неметалевими включеннями або без них.

Сформовані порожнечі (раковини) є відправними факторами для можливої появи мікротріщин, які можуть призводити до руйнування виробів під час подальшої деформації. Зокрема, при волочінні свідком наявності вихідної макроскопічної пористості є вид руйнування у вигляді характерної лійкоподібної западини. При поєднанні обірваних кінців зразка металу щільного прилягання не відбувається. Внутрішні стінки такої западини гладкі та вільні від забруднень, оскільки ця зона не сприймала навантаження та не відчувала напружень розтягнення під час процесу деформування.

Пори можуть закритися при гарячій прокатці в залежності від того, наскільки вони великі. Заварка пор, сформованих газовими включеннями, що містять оксиди, менш

ймовірна. При зміні напрямку деформації металу закриті пори можуть відкритися повторно.

Запобігання утворенню цього дефекту передбачає ретельне виконання регламенту лиття. Наприклад, для попередження газової пористості під час процесу плавки нікелю намагаються очистити нікелеві сплави від розчинених газів, що здійснюється наведенням окиснювального шлаку або продуванням розплаву інертним газом (аргоном або гелієм).

При литті вольфраму та молібдену макроскопічній пористості можна запобігти їх розливанням без надмірного вмісту газу та адекватним охолодженням протягом ранньої стадії затвердіння.

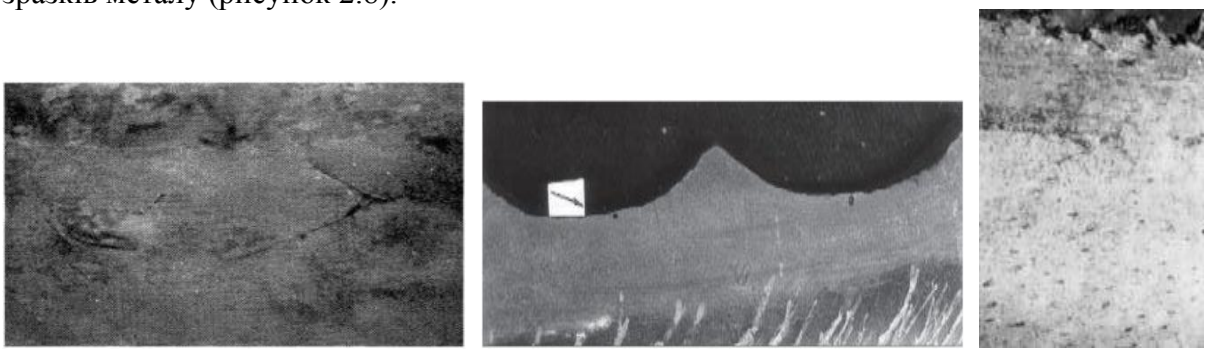
При виготовленні свинцю необхідна ретельна зачистка та обмазка виливниць, дотримання встановленої технології розливання, своєчасна заміна пошкоджених виливниць, добре кипіння плавки з дотриманням заданого ступеня очищення.

Усунення незначної газової пористості можливо гарячою обробкою тиском (куванням, прокаткою тощо). У разі поверхневого прояву дефекту для його усунення використовують шліфування, стругання та вогневу зачистку.

Наявність значної газової пористості в об’ємі металу є невиправним браком.

Підкоркові (газові) пузирі (пухирі, бульбашки) на злитках – цей дефект може розглядатися як варіант прояву *газових раковин* (*див. вище*) під поверхнею, здебільшого, впоперек осі металевого злитка.

Ззовні дефект має вигляд локального, чітко обмеженого підвищеного видовження (гладкого горбка) з порожниною усередині. Останнє виявляється на макро- і мікрошліфах зразків металу (рисунок 2.8).



а *б* *в*

Рисунок 2.8 – Вигляд підкоркових пузирів виливку: ззовні (*а*), на макрошліфі (*б*) – показаний стрілкою та мікрошліфі (*в*) [133]

Цей дефект може *утворюватися в результаті* розширення газу (наприклад, водню) в підповерхневій зоні злитка через незадовільну структуру його кіркової зони, коли товщина «здорової» кірочки замала, під час різних перероблennях заготовки (розливка, термічна обробка, травлення, деформація).

Пузирі можуть заваритися при деформації (переважно – гарячій), зокрема, при прокатці цинку або розірватися (розкритися) на поверхні виробу, зокрема, при холодній прокатці сталі. Тоді вони отримують вигляд відшарувань (*див. нижче*).

Для попередження дефекту на етапі виготовлення злитка необхідно забезпечити нормальне розкислення металу, дотримуватись технологічних температур і швидкості розливки рідкої сталі та стабільного рівня металу в проміжному ковші при безперервній розливці. При обробці злитків тиском слід застосовувати вихідні заготовки без газових пузирів і неметалевих включень; при травленні дотримуватись регламентованого часу обробки металу, використовувати інгібітори травлення. Необхідно також запобігати при термічній обробці різких нагрівів і охолоджень, забезпечити оптимальний розподіл обтиснень (напружень) при деформації.

Усунення дефекту – здебільшого, шляхом видалення дефектної ділянки обрізанням, обточуванням, шліфуванням, фрезеруванням, вогневим зачищенням або зниженням сортності продукції з урахуванням властивостей металу, розмірів виробів, їх призначення та кількості дефектів. У деяких випадках (наприклад, при розташуванні пузирів у цинковій заготовці далеко від поверхні) вибором режиму гарячої деформації вдається забезпечити їх заварювання.

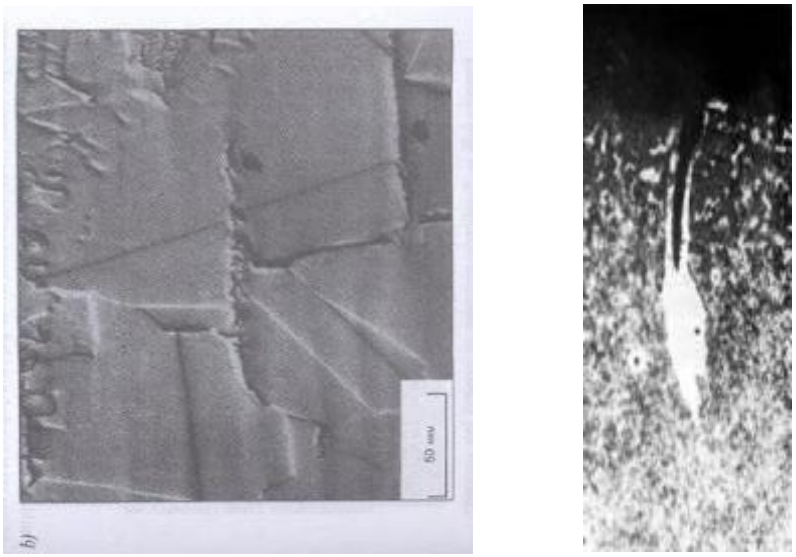
Тріщини – це велика група дефектів різного походження та вигляду, які представляють із себе, здебільшого, *площинні* порушення суцільності виробу різної спрямованості, *що проходять вглиб металу*. Якщо вироби з тріщинами піддають нагріву на повітрі, то її поверхня зазвичай покривається окалиною.

Тріщини у тому чи іншому вигляді зустрічаються як невідповідність майже на усіх перероблennях металургійного циклу (*про що мова буде також йти нижче*).

Загальною причиною їх появи є виникнення в зонах ліквацій (*див. вище*), на межах і всередині кристалів, а також у місцях розташування неметалевих включень у металі (рисунок 2.9) внутрішніх напружень, які дорівнюють його місцевій міцності, Тому утворення з такою назвою (та у деяких випадках – з додатковим визначенням) мають місце у декількох наступних переліках невідповідностей.

Наприклад, ***ліквацiйні тріщини*** (*див. рис. 2.9, а*) за зовнішнім виглядом аналогічні флокенам (*див. далі*), проте їх відмінною ознакою є відсутність видовження за напрямком *наступної* деформації. Вони при несприятливих умовах можуть спровокувати руйнування злитку (заготовки) по первинних границях зерен або по раковинах.

Типовими *технологічними причинами* появи цього дефекту можуть бути порушення температурного режиму лиття та охолодження металу.



а *б*

Рисунок 2.9 – Вигляд на мікрошліфах ліквацiйної тріщини в аустенітній нержавіючій сталі (а) та тріщини, що має в основі неметалеве включення (б) [133]

Заходи із запобігання цього дефекту та з його *усунення* такі ж, як і при боротьбі з флокенами (*див. нижче*).

Розривини («розриви») – це дефект лиття у вигляді *тріщин*, що проходять перпендикулярно до первісної осі злитку (рисунок 2.10).

Причиною їх виникнення може бути переривчасте розливання, що призводить до так званих ***«тріщин зависання»***. Останні можуть бути пов’язані також з «***незлитинами***», або ***«неспаями»*** (*див. нижче*). Затримка нормальної усадки може бути

викликана нерівностями на поверхні виливниці, а також затіканням металу до зазору між виливницею та прибутковою надставкою.

Заходи попередження. Дотримання технології лиття; ретельна збірка виливниць; забезпечення рівномірності остигання злитків у період їх кристалізації.

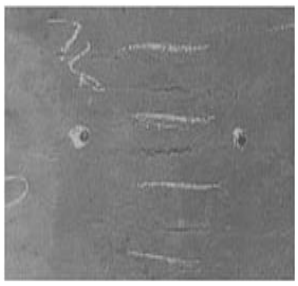


Рисунок 2.10 – Вигляд розривин (*поперечних* тріщин) на поверхні злитка [133]

Спосіб усунення дефекту. Відрізка дефектних ділянок; при великій глибині та довжині розривини – це непоправний брак.

Шпаківня. Тріщини ливарного походження можуть вийти на поверхню заготовки при нагріві у колодязі або під час прокатки (рисунок 2.11). Такі *наскрізні* тріщини отримали назву ***«шпаківень».***

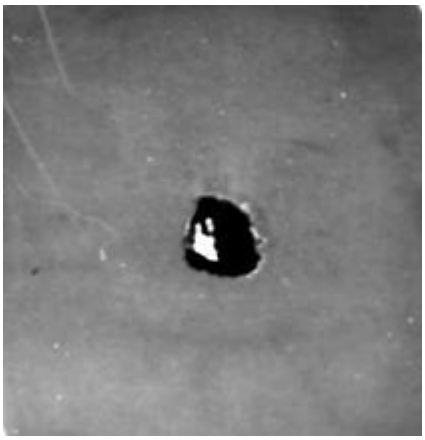


Рисунок 2.11 – Вигляд дефекту «шпаківня» [133]

Дефекти подібного вигляду можуть також проявлятися на стадії термічної обробки та (або) прокатного виробництва *(див. нижче)* як наслідок недостатнього прогріву або занадто швидкого нагрівання литого або частково обтисненого литого сляба.

Попередження – дотримання технології розливання (нагріву) металу.

Усунення дефекту – додатковою обрізкою дефектних частин злитку.

Незлитина (неспай) – це дефект злитка у вигляді западини або щілини (***свища***) довільної форми з негострими (заоваленими) краями на боці виливка (рисунок 2.12),

Основними причинами виникнення незлитин – відсутність взаємного проникнення, перемішування та зварювання занадто охолоджених зустрічних потоків металу зі зниженою рідкотекучістю при заливці внаслідок неузгодженості їх температури та швидкості заливки форми металом. Зокрема, при виробництві складних і тонкостінних виливків з розвиненою поверхнею може статися передчасне затвердіння окремих їх частин з порушенням суцільності металу та утворенням несуцільностей (незлитин).

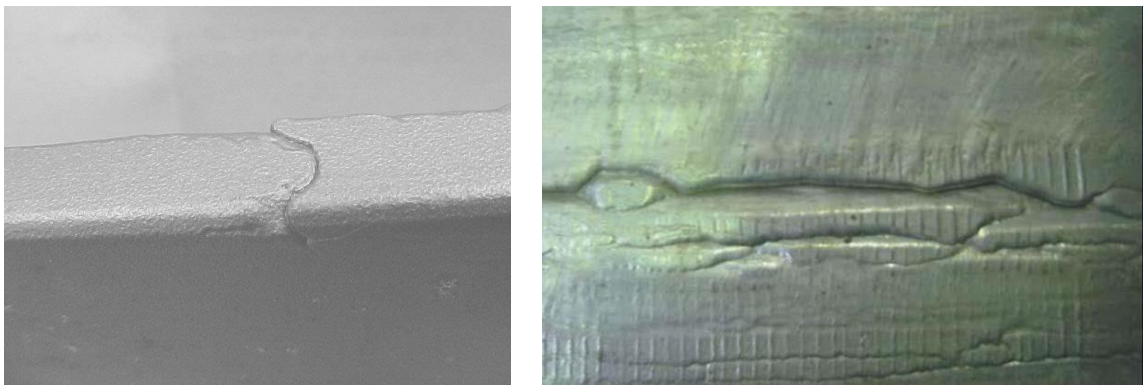
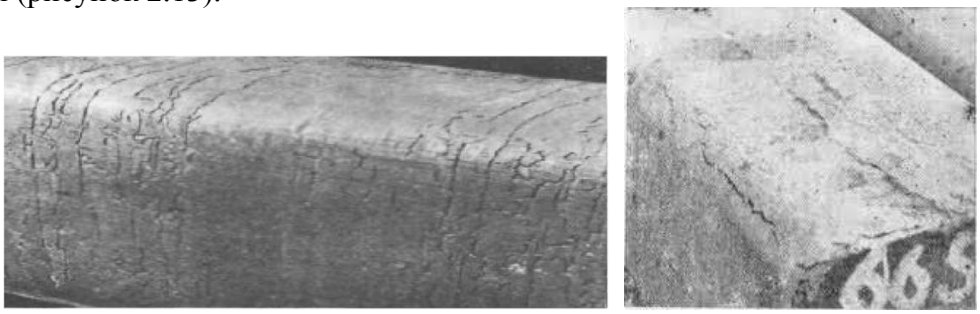


Рисунок 2.12 – Вигляд незлитини на поверхні виливка [133]

Для запобігання утворення незлитин необхідний ретельний вибір тривалості заливки виливків, що залежить від температури розплаву, його хімічного складу, конфігурації виливка, теплофізичних властивостей матеріалу та форми. Ці фактори не є постійними, а змінюються в процесі заливки.

Усунення дефекту: наявність незлитини глибиною більше 3 мм при її великій площі на злитку визначає його непоправний брак. Незлитини глибиною менше 3 мм не є бракувальною ознакою незалежно від їх площі на злитку, а метал є придатним для подальшої обробки при умові відповідності якості поверхні злитків НТД.

Кутові тріщини на злитках, як і на литих заготовках, зокрема – на металі після машини безперервної розливки (МБРМ) утворюються у гарячому стані при температурі, близькій до температурі кристалізації. На мікрошліфі в зоні кутових тріщин можуть спостерігатися скупчення лікватів: сірки, фосфору та ін. Стінки тріщин сильно окиснені, що супроводжується наявністю дифузійних оксидів і неметалевих включень (*див. рис. 2.9, б*). На злитку кутова тріщина виглядає як розрив металу значної глибини (до 20 мм) і протяжності (рисунок 2.13).



а *б*

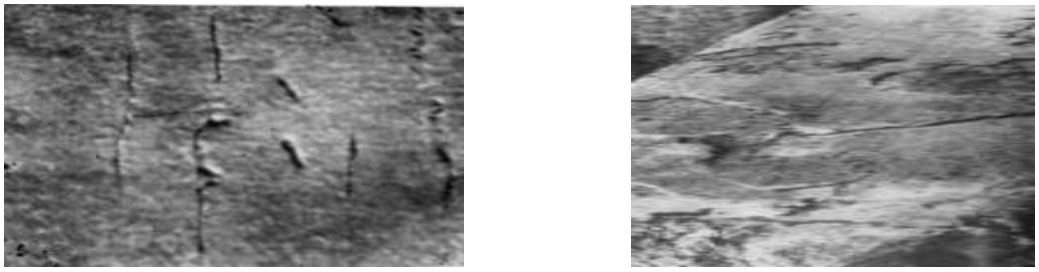
Рисунок 2.13 – Вигляд поперечних (*а*) та поздовжніх (*б*) кутових тріщин на злитках [133]

Основними причинами появи дефекту стають: нерівномірне охолодження металу під час кристалізації; напруження в кірці злитка, що є наслідком нерівномірності її товщини; напруження, які створює у затверділій кірці злитку феростатичний тиск рідкого металу; порушення режимів розкислення і розливання металу та ін.

Попередження – оптимальне розкислення сталі, вибір сприятливої форми виливниці; підбір оптимального режиму розливання та температури металу, розливання сталі під шлаком, забезпечення більш рівномірного остигання злитків під час кристалізації.

Усунення дефекту пов’язано з обрізкою та вилученням (шліфуванням, вогневим зачищенням тощо) дефектних частин злитка.

Плівки на злитку – це локальні або у всьому об'ємі порушення його суцільності, викликані наявністю пластів (плівок) окисненого металу. Внаслідок переважно поздовжнього або поперечного орієнтованого розташування, оксидні плівки на поверхні злитка мають вигляд паралельних подовжених виступів та більшої чи меншої хвилястості (рисунок 2.14, *а*). Збільшену схильність до плівкоутворення проявляють нікель, алюміній, титан, хром, цинк, свинець та їх сплави.



а *б*

Рисунок 2.14 – Типовий вигляд плівки (*а*) та напливу (*б*) на поверхні злитка [134]

Механізм *утворення плівки* узагальнено може бути представлений наступним чином. Окисна плівка, що сформувалася на поверхні розплаву, після досягнення певної товщини починає чинити значний опір просуванню металу при заливці в порожнину форми. При недостатньому тиску розплав не руйнує плівку, і подальше заповнення форми припиняється. У такому разі злитки виходять з недоливами (*див. рис. 2.1, а*), неспаями (*див. рис. 2.12*), з нечіткими контурами і поверхневими пльонами (плівками). При руйнуванні окисної плівки вони можуть залишитися на поверхні або бути втягнуті усередину злитка, ливарна форма заповнюється, але процес заливки йде імпульсами. При застиганні метала злитки виходять з локальними дефектами – *плівками*.

Це характерно для сифонного розливання з наявністю переохолодженого металу, занадто тривалій або короткочасно переривчастій розливці.

Для запобігання цьому дефекту одним з найбільш ефективних способів являється підвищення температури та швидкості заливки розплаву у форму. Ефективними також стають заходи щодо використання добре підготовлених виливниць, відбракування виливниць з тріщинами, які затримують пересування рідкого металу, застосування спеціальних порошків і обмазок для виливниць, підтримка в рідкому стані поверхні розплаву при сифонному розливанні і захист поверхні рідкої сталі шляхом застосування присипок.

Усувають плівки з поверхні злитку шліфуванням, строжкою, вогневою зачисткою.

Напливи на злитках – це локальні або тотальні поверхневі порушення суцільності злитку, які представляють із себе окиснений шар затверділих бризок металу, що легко відшаровуються при наступній деформації. Дефект проявляється у вигляді більшої чи меншої хвилястості поверхні злитка (рис. 2.14, *б*) і може розглядатися як *поверхнева плівка*.

Причиною виникнення дефекту стає занадто холодне або тривале, або короткочасно переривчасте розливання при недостатньо спокійній заливці (зокрема, при заливці зверху), внаслідок чого на поверхні виливниці виникають шари оксидів металу, які захоплюються рідким металом і не зварюються з ним при застиганні. Наслідком описаних дефектів після відшарування плівок та напливів стають поглиблення на поверхні злитків, а також раковини, пори та тріщини на заготовках.

Попередження дефекту пов'язане з уникненням розливання зверху; підтримкою в рідкому стані поверхні злитка при сифонному розливанні (запобігання утворення «покриття» або крайової кірки) дотриманням технологічно необхідних температур випуску рідкого металу і параметрів розливання, зокрема, шляхом захисту поверхні рідкої

сталі присипками і застосування спеціальних порошків і обмазок для виливниць; використанням добре підготовлених виливниць, відбраковування виливниць з гарячими тріщинами.

Спосіб усунення дефекту – видалення дефектних ділянок злитку. Напливи, що легко відшаровуються від злитка, відокремлюють зубилом. Напливи висотою до 3 мм, що зварені з металом, прибирають шабруванням. Іноді усунення напливів неможливо. Це зумовлює зниження сортності злитка або переведення його у брак.

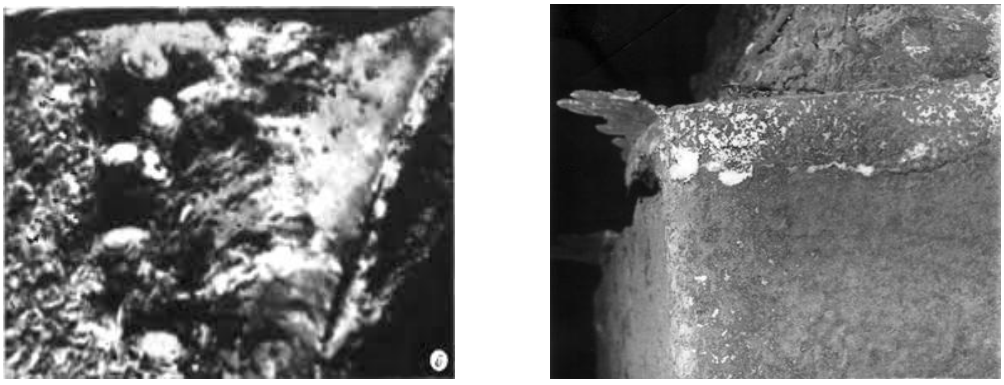
Від *напливів* слід відрізняти **нарости** – локальне підвищення рівня твердого металу на поверхні виливка (рисунок 2.15, *а*).

Причиною виникнення цього дефекту є роз'їдання стінок виливниці, що може мати місце, наприклад, при литті свинцю та його сплавів.

Попередження утворення дефекту: застосування якісних виливниць.

Усунення: обрубка, вогнева зачистка або шліфування дефектних місць злитка.

Заворот скоринки (кірочки). Цей поверхневий дефект виникає від вигину аж до стінки виливниці поверхневого шару металу (*кірки*), що затвердів, який утворюється на поверхні злитка при заповненні виливниці (рисунок 2.15, *б*).



а *б*

Рисунок 2.15 – Вигляд наросту (*а*) та заворота кірки (*б*) на злитку [134]

Взагалі, кірка на злитку складається із затверділого металу, оксидів і нітридів, що формуються при його контакті та забруднень у рідкому стані з атмосферою. Завороти кірочки можуть розташовуватися в будь-якому місці по висоті злитка як наслідок нерівномірного змащення виливниць, зміни швидкості розливки, формуванні товстої кірки, особливо з самого низу злитка та ін.

Дефект часто пов'язаний з розливанням холодного металу або металу із завеликою в'язкістю.

Попередження утворення дефекту – підвищення рідкотекучості металу шляхом його регламентованого нагріву, розкислення та ретельного змащування виливниць. Досить ефективним засобом попередження дефекту є розливання під рідким синтетичним шлаком, а також – з використанням шлакоутворюючих сумішей і брикетів.

Усунення: шліфування, строжка, обрубка, вогнева зачистка дефектних місць.

Як було показано в *підрозділі 1.2.1.3,* сучасна технологія безперервного розливання металу забезпечує одержання заготовок, якість яких, здебільшого, відповідає вимогам наступних перероблень. Але цей процес, природно, не є вільним від дефектів, частина з яких є специфічними.

За характером цих дефектів можна визначити джерело їх утворення.

Найбільш поширені дефекти безперервнолитого металу зазвичай поділяють на три групи:

– дефекти металургійного походження типу шлакових включень (*див. рис. 2.4*), які з'являються після затвердіння сталі безпосередньо під поверхнею і можуть стати причиною утворення газових пузирів (*див. рис. 2.8*);

– дефекти, зумовлені методом розливання, а також порушенням режиму лиття, які можуть приводити до появи тріщин або інших дефектів (*див. рис. 2.9 … 2.13*);

– дефекти технологічного походження, які можуть з'являтися на початку або по закінченні процесу розливання, а також як наслідок заміни розливного ковшу або проміжного розливного пристрою.

На рисунку 2.16 наведено графічне зображення дефектів безперервнолитого металу, що найчастіше зустрічаються [134]: *а – поздовжні тріщини,* які розташовуються на середині широкої грані по ужиминам (*див. нижче*); *б – поперечні тріщини*, що утворюються на гранях і проходять по ужиминам, на ребрах, по ослаблених місцях, пов'язаних із заворотом кірки; глибина їх проникнення 0,3…2,0 мм; *в – сітчасті тріщини,* які взаємно перетинаються і проникають на глибину 18…20 мм; вони можуть бути у вигляді локальних округлих ділянок та у вигляді сітки, утворюючи ряди або смуги, поширюються по довжині або ширині у залежності від рельєфу поверхні і виявляються після видалення окалини; *г* – «*ужимини*», які є наслідком порушення технології розливання, а саме – коливання рівня металу в кристалізаторі, порушення тепловідведення; *д – забруднення*, які є неметалевими включеннями у вигляді скупчень плівок або одиничних шлакових включень глибиною 2…3 мм і більше; *е* – «*пасок*», який є грубим дефектом, що охоплює практично весь периметр злитка; він утворюється через перерви в подачі металу в кристалізатор; *ж – заворот кірки*, який виникає при розливанні холодного металу, при низьких швидкостях розливання, а також при незадовільному змащенні стінок кристалізатора); *з* – «*заливини*», що виникають як результат усадки кірки по периферії злитка після припинення подачі металу в кристалізатор з поновленням розливки, при якій в зазор між кіркою злитку та стінкою виливниці потрапляє рідкий метал; *и – підкіркові пузирі (бульбашки)*, що мають вигляд поодиноких або групових пір і невеликих порожнин округлої форми, заповнених газом.

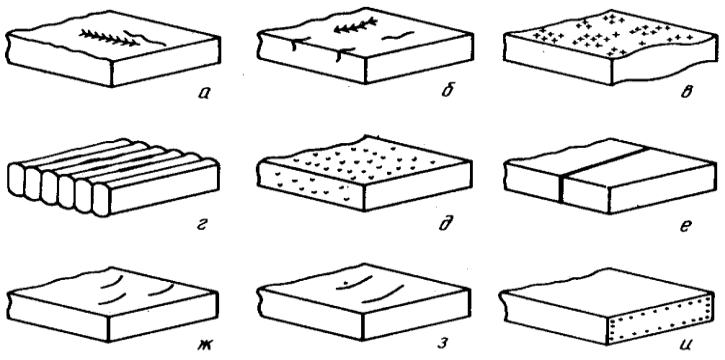


Рисунок 2.16 – Схематичне зображення основних дефектів безперервнолитого металу [134] (*пояснення позицій – у тексті*)

Після затвердіння литу заготовку, крім випадків виготовлення литих товарних виробів (чавунні чушки, чавунний посуд, вироби з литих кольорових металів тощо) зазвичай піддають обробці тиском у холодному (теплому) або гарячому стані (*див. підрозділ 1.2.2.3*).

У процесі такої обробки або без неї розміри та/або властивості матеріалу заготовки змінюються, що часто потребує здійснення додаткових оздоблювальних операцій (*див. підрозділ 1.2.2.2*). Їх проведення за регламентованими режимами дозволяє досягти

необхідні властивості виробів, але одночасно служить джерелами додаткових специфічних дефектів.

2.2.3 Дефекти металу, які зумовлені термічною обробкою

При проведенні *термічної обробки* дефекти можуть виникнути у зв'язку з порушенням заданого режиму нагрівання або охолоджування металу, підвищеними або зниженими (по відношенню до заданих значень) температурою та часу витримки, неправильним завантаженням заготовок у нагрівальні пристрої, невірним вибором атмосфери печі тощо.

Як було відмічено вище (*див. підрозділ 1.2.2.2*) термічна обробка може передувати наступній обробці тиском, бути проміжною між переробленнями деформації або виконуватись як самостійна операція.

При цьому, сприятлива структура металу запобігає проявам невідповідностей, пов’язаних з його нагрівом та охолодженням, а вади структури, навпаки, часто ініціюють появу браку.

У такій ситуації поділ дефектів з причин порушень складу чи структури металу, режимів термічної обробки та/або деформації, значною мірою, є умовним, що спонукає визначати основну причину.

Тут, як і взагалі, брак може бути поправним і непоправним.

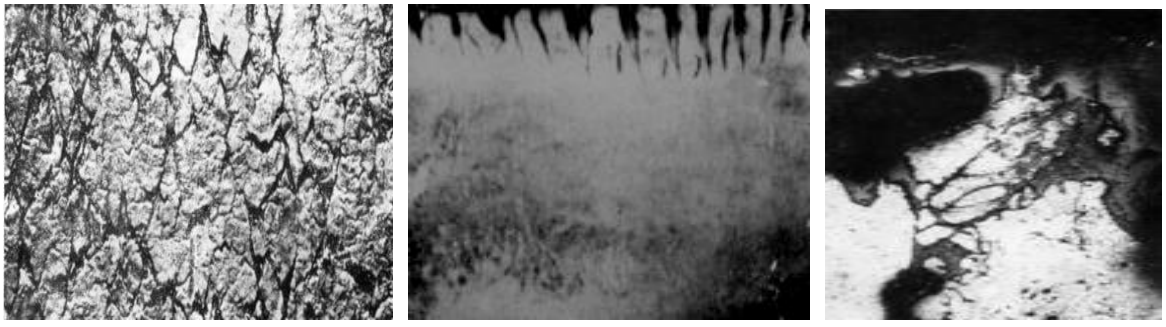
Нижче розглянуті основні дефекти, пов’язані з термічною обробкою, які умовно можна поділити на види, що зумовлені:

– сумісним негативним впливом температури та змін структури металу на його властивості; часто фактором, який зумовлює або підсилює прояв дефекту виступає наступна обробка металу тиском (ОМТ);

– впливом умов нагріву (швидкість і рівномірність нагріву; атмосфера в печі, забруднення поверхні заготовки перед термічною обробкою тощо) на форму і стан поверхні виробу.

Дефекти, що зумовлені порушеннями режимів термічної та/або термомеханічної обробки металу

Перепал («лускатість») проявляється на виробах у вигляді сильно розгалужених порожнин, які глибоко проникають у метал, часто – розташованих на поверхні у вигляді сітки (рисунок 2.17). Візуально поверхня виробу здається лускатою, шорсткою (*див. рис. 2.17, а*).



а *б* *в*

Рисунок 2.17 – Вигляд металу при перепалі: *а* – на поверхні виробу; *б* – на макрошліфі; *в* – на мікрошліфі [136]

Перепал виникає в результаті тривалого перебування металу в печі при високій температурі (для сталі – 1300…1350 °С), близькій до температури плавлення при несприятливому співвідношенні «газ – повітря», а також – при поганому режимі горіння газу: наявності місцевих язиків полум'я, що контактують з металом.

Фізична суть перепалу полягає в тому, що кисень з навколишньої атмосфери при високій температурі проникає вглиб металу, що нагрівається, і окислює кордони зерен. Це супроводжується також розплавленням міжзеренних оболонок. В результаті, зв'язок між зернами слабшає, метал втрачає пластичність і стає крихким.

Стадія оплавлення, або *поверхневого перепалу* на глибину до 1 мм (*див. рис. 2.17, б*) характеризується розтріскуванням на ребрах і фланцях виробу, наприклад, при куванні, а на гранях тріщини можуть не проявитись. Але при травленні поверхні металу спостерігається характерна сітка, що відображає контури кордонів крупних зерен (*див. рис. 2.17, в*).

Перепал може спостерігатися в місцях зварювання, зокрема, при виготовленні сіток чи зварних труб.

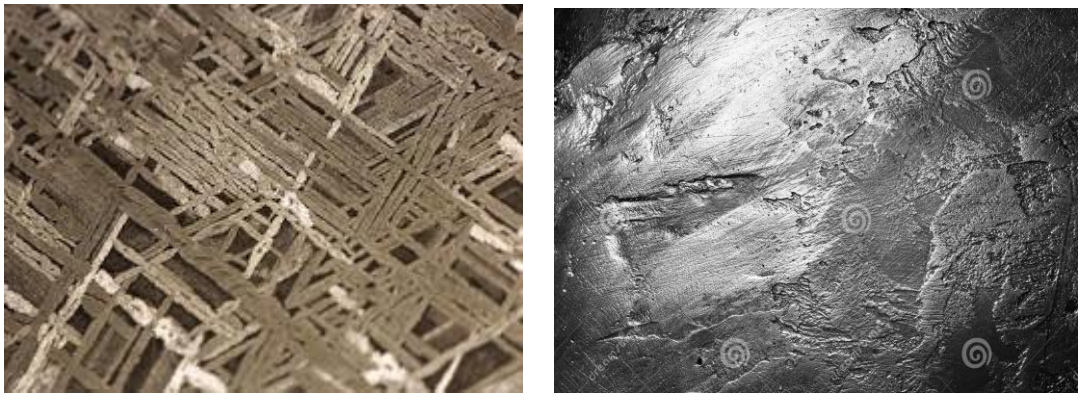
Виявляють дефект візуально або шляхом дефектоскопії. Індикаторами ймовірної наявності перепалу стають: рясне виділення з нагрітого металу іскор, що розсипаються; при гарячій осадці заготовка розвалюється після перших ударів з оголенням характерного грубозернистого зламу; при гарячому розтягуванні метал в перепаленому місці отримує поперечні надриви з рваними звивистими контурами; при травленні місця перепалу витравлюються кислотою у вигляді широких тріщин з розтравленими звивистими границями.

Для запобігання цього дефекту слід дотримувати температури нагріву заготовки і складу атмосфери печі, які регламентовані технологією, стежити за режимом горіння газу у печі, запобігаючи місцевим язикам полум'я. При зварюванні правильно налаштовувати блок зварювання на машині та контролювати матеріал заготовки.

Усунення дефекту. Залежно від глибини та величини пошкодження та призначення виробів, *поверхневий* перепал можна видалити механічною обробкою.

Перепалений метал в об’ємі *не підлягає виправленню, є невиправним браком* і може бути використаний тільки як лом.

Перегрів (**перегрів поверхні**) характеризується крупнозернистою структурою з голчастою (*відманштеттовою*) будовою фериту (рисунок 2.18, *а*) і загальною низькою ударною в'язкістю металу. Ззовні дефект проявляється в шорсткості поверхні виробу з набуттям пухкої та крихкої окалини та сіткою тріщин на межах великих кристалів (рис. 2.18, *б*). Це супроводжується зниженням пластичності та утворенням тріщин при наступних деформації або гартуванні. Якщо ділянки перегріву локалізовані, то це може бути пов'язано із впливом на виріб язиків відкритого полум'я при нагріванні.

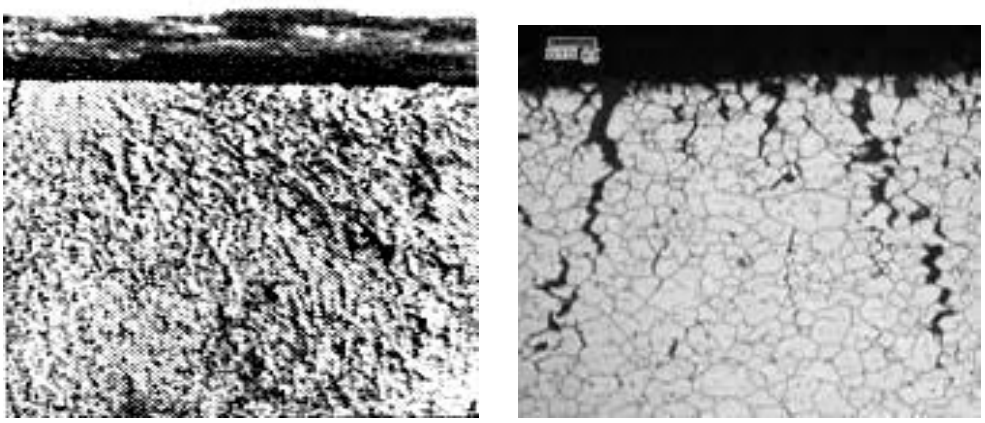


а *б*

Рисунок 2.18 – Вигляд перегрітого металу: *а* – відманштеттова структура; *б* – поверхня перегрітого виробу [136]

Перегрів металу може супроводжуватись певними специфічними дефектами виробів.

Міжкристалітне руйнування виявляється на грубокристалічній поверхні зламу корозійностійких (аустенітних) сталей (наприклад, зразків із синьоламкістю) по межах колишніх аустенітних зерен, іноді – навіть з кавернами, язвинами, порами (рисунок 2.19, *а*). На шліфі видні тонкі оксидні або сульфідні включення і тонкі тріщини вздовж кордонів зерен (рис. 2.19, *б*)



а *б*

Рисунок 2.19 – Вигляд поверхні грубокристалічного зламу (*а*) та шліфу сталі з міжкристалітним руйнуванням (*б*) [136]

Низька твердість. Поява цього дефекту в *доевтектоїдній сталі* може бути результатом перегріву (*див. вище*). Утворення при цьому крупноголчастої структури мартенситу, окрім зниженої твердості, викликає зниження ударної в'язкості.

У *заевтектоїдних сталях* недостатня твердість загартованого виробу може також бути результатом перегріву та утворення крупноголчастого мартенситу. Крім того, дефект може проявитися при недостатній витримці при нагріванні під гартування, недостатньо швидкому охолодженні в гартувальному середовищі, при низькій температурі гартування. Завищена температура відпущення також може супроводжуватись зниженням твердості металу.

М'які плями – є різновидом попереднього дефекту. М'які плями являють собою ділянки із зернами фериту або продуктами високотемпературного розпаду аустеніту в структурі мартенситу, що утворюються в результаті уповільненого охолодження сталі при гартуванні, а також підвищеної кількості залишкового аустеніту в результаті зависокої швидкості охолодження. Появі таких дефектів сприяє наявність на поверхні виробу окалини, слідів забруднень і ділянок із зневуглецьованою поверхнею (*див. далі*), а також недостатньо швидкий рух виробу в гартувальному середовищі або утворення на його поверхні «парової сорочки».

Причина появи. Перегрів пов'язаний з нагріванням виробу, наприклад, виливку перед куванням або під гартування з перевищенням регламентованого часу до температури, яка значно перевищує допустиму температуру нагрівання для даного металу (марки сталі). Дефект також може проявитися в процесі гарячого кування та штампування внаслідок виділення тепла деформації з отриманням температури 1250…1100 °С, що перевищує оптимальні умови обробки.

Прояву дефекту сприяють неметалічні включення (оксиди, сульфіди), які вже є в сталі та розташовані по границям зерен, а також ліквація у великих злитках (*див. вище*). При цьому, оксиди, розташовуючись уздовж границь зерен від поверхні всередину матеріалу, порушують у ньому металевий зв'язок. Високовуглецеві сталі зі зниженою точкою плавлення більш схильні до пошкодження кордонів зерен через перегрів. Ослаблені таким чином границі колишніх аустенітних зерен є осередками руйнування при навантаженні, що може призвести до передчасного руйнування при напруженнях нижче за межу текучості основного металу.

У сталях, що містять нікель і молібден, може відбуватися насичення поверхні сіркою (при її наявності) з атмосфери печі. Це також сприяє підвищенню схильності сплаву до міжкристалітного руйнування.

Попередження дефекту – ретельне виконання регламенту нагріву та контроль за температурою в печі; регулювання режиму горіння в печі із запобіганням безпосереднього контакту язиків полум'я з поверхнею виробу; використання сталей з малою кількістю неметалевих включень, наприклад, сталей, підданих вакуумуванню при розливанні або отриманих спеціальними методами плавки. Корисним може стати очищення виробу від окалини, забруднень і зневуглецьованої поверхні.

Усунення дефекту. Якщо руйнування виробу ще не настало, то незначні пошкодження границь зерен можуть бути частково усунуті шляхом нормалізації, відпалу, високому відпусканню або поліпшенню. Така обробка може бути підставою для зниження сортності продукції.

У поковках, отриманих вільним куванням, вдається практично повністю усунути схильність до міжкристалітного руйнування шляхом інтенсивного додаткового кування (зі зміною призначення виробу).

На протилежність попередній групі дефектів, ***недостатній нагрів заготовки при термічні обробці також спотворює якість металу.***

Недогрів заготовки (виливка чи напівфабрикату перед обробкою тиском) є наслідком недостатньої температури в нагрівальній печі або надмірної швидкості нагрівання металу, що супроводжується ліквацією (*див. вище*), зниженням пластичності металу з утворенням внутрішніх тріщин як до, так і у процесі наступної обробки його тиском. Дефект виявляється на шліфах при контролі якості продукції. Недогрів також має місце у випадках, коли температура гартування була нижча за критичну точку Ac_3 (для доевтектоїдних сталей) і Ac_1 (для заевтектоїдних сталей).

Недостатній нагрів металу у сукупності з малими обтисненнями у перших циклах наступної деформації може супроводжуватись незварюванням внутрішніх бульбашок у злитках киплячого металу.

Недогрів металу може супроводжуватись певними специфічними дефектами виробів.

Неповна перекристалізація представляє собою залишкові відповідні явища в мікроструктурі металу, наприклад, різнозернистість, що може супроводжуватись появою залишкових напружень та зниженням технологічної пластичності при наступній ОМТ.

Причини: недостатня витримка виробів при заданій температурі нагріву (внаслідок, наприклад, завеликої швидкості пересування заготовок у печі); нагрів заготовок у міжкритичному інтервалі температур (між Ac_1 та Ac_3) або при верхніх критичних температурах підстуження напівфабрикату при нормалізації з прокатного нагріву перед термообробкою в прохідних нагрівальних печах.

Неповне відпущення є наслідком недостатньої витримки металу при заданій температурі або регламентованої витримки при температурі нижче за необхідну. Наслідком цього, наприклад, стає одержання загальної структури мартенситу з продуктами високовідпущеного мартенситу, які зумовлюють твердість вище за необхідну.

Підвищена твердість металу може виникнути внаслідок його недостатньої витримки при нагріванні в нормалізаційній або відпускній печі, занадто швидкого охолодження після нормалізації, заниженої температури відпускання (*що відповідає попередньому дефекту*), а також через невідповідність хімічного складу сталі (наявності підвищеного відсотку вуглецю і легуючих складових).

Строкатість твердості – надмірна різниця в твердості на одній заготовці, що фіксується за вимірами твердості в декількох точках її поверхні. Основними причинами виникнення цієї невідповідності можуть бути недостатній прогрів при термообробці

(надмірне завантаження, недостатня витримка у печі); швидке охолодження після нормалізації; місцеве зневуглецювання (*див. нижче*); близьке розташування ліквацийної зони металу до поверхні виробу, наприклад, в зоні зрізу задирку.

Спосіб запобігання мають відповідати встановленим причинам виникнення дефекту, зокрема, дотримання технології термічної обробки.

Спосіб усунення. Цей дефект виправляють шляхом відпалу металу, після чого здійснюють його регламентовану термічну обробку. У випадках *невідповідності хімічного складу матеріалу* – використання заготовки за іншим призначенням або її бракування.

Ряд дефектів термічної обробки напряму пов'язаний з вадами одержуваної структури металу (сплаву).

«В'язкість», *яка ідентифікується як погана оброблюваність ріжучими інструментами або при механічній обробці виробу при нормальній твердості,* і виявляється за мікроструктурою металу. *Основою причиною дефекту* вважають отримання занадто дрібнозернистої структури сталі; наявність в перлітній сталі зернистого або сорбітоподібного перліту замість пластинчастого; наявність у високовуглецевій сталі цементиту та пластинчастого перліту замість зернистого перліту.

Способи запобігання мають відповідати встановленим причинам виникнення дефекту.

Спосіб усунення: високе відпущення і повторна регламентована термічна обробка.

Відпускна крихкість сталі проявляється у зменшенні ударної в'язкості та збільшенні крихкості для деяких конструкційних сталей при підвищенні температури відпускання (на відміну від загальної закономірності, яка виступає як *зменшення крихкості* та її незалежність від швидкості охолоджування).

Розрізняють відпускну крихкість I і II роду [69, 70].

Відпускна крихкість I роду спостерігається при відпусканні в області 300 °С легованих, а також – вуглецевих сталей. Вона не залежить від швидкості наступного охолодження металу. Це явище пов'язують з нерівномірністю перетворень відпущеного мартенситу. Процес протікає швидше поблизу границь зерен у порівнянні з їх об'ємами. Завдяки цьому поблизу границь утворюються місця концентрації напружень, а границі стають крихкими. Відпускна крихкість I роду при повторних нагріваннях тих же деталей не спостерігається.

Відпускна крихкість II роду спостерігається в легованих сталях при повільному охолоджуванні після відпускання в області 450…650 °С. Найбільш поширене пояснення природи цього дефекту пов'язує високе відпускання з утворенням і виділенням дисперсних включень карбідів по границях зерен. При цьому, прикордонна зона збіднюється легуючими елементами. При подальшому повільному охолодженні відбувається висхідна дифузія фосфору з внутрішніх об'ємів зерна до його границь. Прикордонні зони зерна збагачуються фосфором, міцність кордонів знижується, ударна в'язкість падає. Прояву цього дефекту сприяють наявність у сталі хрому, мангану і фосфору (останній більше за 0,001%). Зменшують схильність до відпускної крихкості II роду молібден і вольфрам (у кількості до 0,5%) і швидке охолодження після відпускання. Відпускна крихкість II роду при повторних нагрівах і повільному охолодженні тих же сталей у «небезпечному» інтервалі температур може повторитися.

Спосіб запобігання. Усунення крихкості I роду забезпечується нагрівом сталі вище за 400 °С, що знижує її твердість і збільшує пластичність. Сталі, схильні до відпускної крихкості II роду, не можна термічно обробляти з нагрівом до 650 °С без подальшого швидкого охолодження.

Вище було відмічено, що поява тріщин пов'язана з проявом сумарних напружень у металі, що є характерним для всіх перероблень заготовки у твердому стані.

При термічній обробці металу ця підгрупа дефектів також, певною мірою, пов'язана зі станом його структури, але первісний негативний вплив тут проявляється у дії термічних напружень, які часто підсумовуються з напруженнями ОМТ.

Руйнування по серцевині – це численні тонкі тріщини, розташовані по границям первинних зерен в центральній області злитка (рисунок 2.20), які виникають внаслідок неякісного прогріву злитка перед обробкою тиском (куванням) та виявляються візуально на зрізі або за допомогою дефектоскопу.

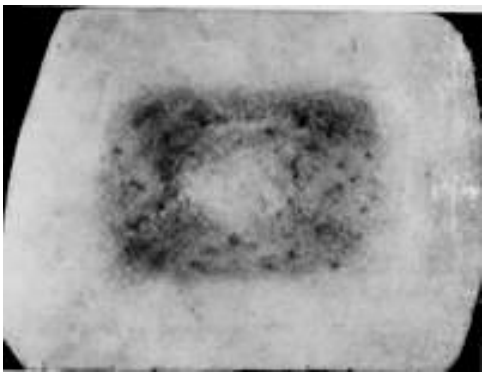


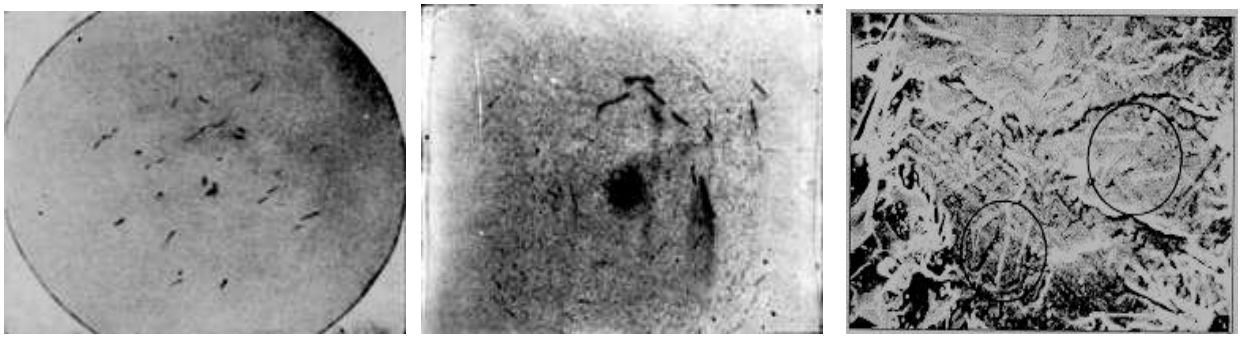
Рисунок 2.20 – Вигляд руйнування по серцевині на макрошліфі злитка [136]

Причиною дефекту є недостатній гомогенізаційний відпал, коли зони локальної ліквації в центральній області злитку (*див. рис. 2.2, а*) розсмоктуються не повністю. Факторами, які сприяють виникненню дефекту є сильна карбідна ліквація в евтектоїдних і заевтектоїдних сталях та підвищена температура наступної ОМТ.

Попередження. Достатній прогрів злитка (гомогенізаційний відпал) перед куванням або прокаткою; обмеження температури деформації.

У*сунення.* Дефект є непоправним браком.

Флокени – це скупчення найдрібніших тріщин, що проявляються на *поверхні руйнування* гарячекатаного металу у вигляді матово-глянцевих, металевого виду ділянок майже круглої або еліптичної форми, що відрізняються від основного металу; на зрізах заготовок вони мають вигляд білих пластівців або плям (рисунок 2.21).



а *б* *в*

Рисунок 2.21 – Флокени: *а* – загальний вигляд на темплеті; *б* – вигляд як пляма «в анфас» і *в* – як тріщини в «профіль» при збільшенні х1300 [136]

У залежності від температури кінця і ступеня гарячої деформації поверхня руйнування з причини наявності флокенів може мати тонко- або грубокристалічну будову.

На поперечному перерізі, наприклад, на травлених темплетах, флокени виглядають як прямі міжкристалітні тріщини, що не мають певної орієнтації (*див. рис. 2.21, в*).

Флокени частіше зустрічаються після деформації заготовок великого перерізу. До флокеноутворення схильні, насамперед, леговані сталі, а також сталі з вмістом більше 0,2% *С*, окрім тих, що містять спеціальні карбіди. Схильність до флокеноутворення знижується зі зменшенням ступеня легування сталі.

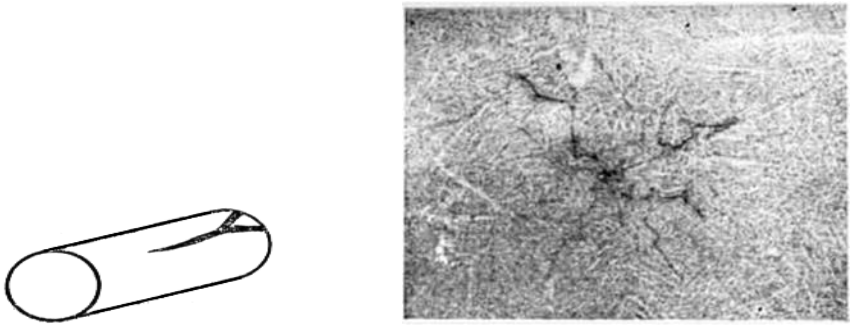
Поковки, відштамповані з металу, ураженого флокенами, розтріскуються, інколи навіть з відділенням шматків. Це може мати місце при гартуванні, після зняття припуску під час механічної обробки або в процесі експлуатації з навантаженнями.

Причинами виникнення флокенів стає водень, що знаходиться в рідкому металі при високих температурах, який потім утворює твердий розчин впровадження в аустеніт, а надалі виділяється в газоподібному стані під час γ-α-перетворення з твердого розчину. Якщо охолодження відбувається занадто швидко, а перетин виробу занадто великий, то для видалення водню зі сталі шляхом дифузії недостає часу. Накладення термічних напружень, що виникають при охолодженні, структурних напружень в результаті перетворення аустеніту, залишкових напружень через нерівномірність деформації і адсорбції водню в місцях дефектів решітки призводить до того, що в області температур 100…200 °С створюються високі сумарні напруги, які зумовлюють відповідне тріщиноутворення.

Попередження дефекту – підбір відповідних вихідних шихтових матеріалів; прожарювання присадок та забезпечення повноцінного кипіння розплаву; сприятливі результати дає вакуумування рідкої сталі, особливо якщо вона схильна до флокеноутворення; рекомендується застосування для нагрівальних печей палива з незначним вмістом водню; повільне охолодження після закінчення гарячої деформації; застосування відпалу для запобігання флокеноутворенню (температура і тривалість залежать від розмірів заготовки та марки сталі) безпосередньо після гарячої деформації з метою зменшення вмісту водню.

Усунення дефекту: проведення протифлокенної повторної термічної обробки.

Термічна тріщина напруження представляє собою вузький розрив металу поздовжньої орієнтації (рисунок 2.22), що йде майже під прямим кутом від поверхні вглиб виробу.



а *б*

Рисунок 2.22 – Вигляд термічної тріщини напруження на виробі [136]: *а* – схема розташування; *б* – вид на макрошліфі

Слід зауважити, що наведена традиційна назва цього дефекту з додатком «*...напруження*» уявляється малоінформативною і навіть – неточною, оскільки *поява будь-якої тріщини зумовлена напруженнями у металі*. Інша річ – основна причина появи відповідних напружень: нерівномірність нагріву та відповідного розширення металу, структурні перетворення в металі внаслідок нагріву, нерівномірність деформації при обробці тиском тощо.

Тому дефект, що розглядається, точніше було б назвати «**тріщиною термічного напруження**», оскільки він утворюється внаслідок сумарних напружень, які зумовлені первісними структурними перетвореннями при термічній обробці металу, а наявність залишкових напружень у напівфабрикаті внаслідок несприятливих умов деформування при *попередній* або *наступній* обробці тиском є тільки фактором, який спонукає до прояву дефекту.

На відміну від цього дефекту можна розглядати тріщини, основною причиною яких є поява занадто великих напружень внаслідок несприятливого напружено-деформованого стану металу при обробці тиском. У таких умовах нагрів також може бути фактором, але лише супутнім, що *додатково* впливає на ймовірність появи тріщин. Такі тріщини доцільно називати «*тріщинами деформаційного напруження*» або «*тріщинами деформаційно-термічного напруження*» і розглядати разом зі специфічними дефектами обробки тиском (*див. нижче*).

На мікрошліфі *тріщина термічного напруження*, що розглядається тут (*див. рис. 2.22*), має особливість: розгалужений кінець; вона проходить по межах зерен. Окиснення і зневуглецювання металу в зоні дефекту відбувається лише при подальшому нагріванні. На відміну від цього, при неправильному або недостатньому відпалі заготовки так звані тріщини від залишкових напружень (тобто тріщини *деформаційного* напруження) зазвичай розташовуються на зовнішній поверхні прокатаного профілю, на обмежених ділянках або по всій його довжині в поздовжньому або поперечному напрямку (*див. далі*).

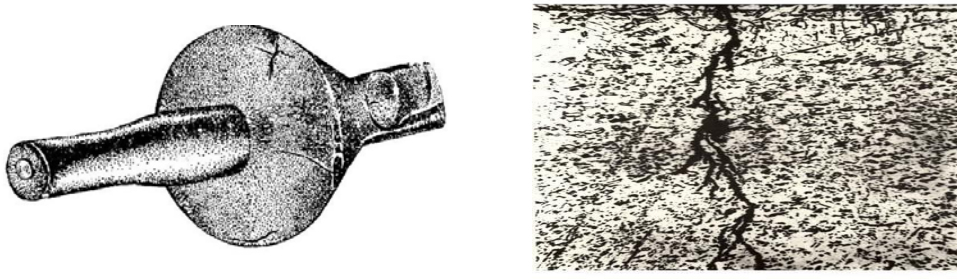
Причинами виникнення дефекту є напруження, пов'язані зі структурними перетвореннями при нерівномірному нагріві і охолоджуванні заготовок, випадінням нітридів або карбідів на кордонах зерен, місцевим утворенням структури пластинчастого перліту, яка обумовлює більший опір деформації, ніж структура зернистого цементиту.

Для запобігання виникнення дефекту слід суворо дотримуватись регламенту виплавки металу та його розливання, термічної обробки (і режиму деформації – *див. далі*), використовувати бездефектні заготовки, а також – обережно поводитись із заготовкою при її транспортуванні.

Усунення дефекту. Дефект є непоправним браком.

Ряд аналогічних дефектів, що пов'язані, здебільшого, з термічними напруженнями у металі, представлені нижче.

Гартувальні тріщини є різновидом тріщин термічних напружень**.** Вони зазвичай виникають у умовах жорсткого гартування виробів з різкими переходами від тонких перерізів до товстих або на тонких ребрах і кромках та розташовуються в кутах деталей або інструменту, мають дугоподібний або звивистий вигляд, глибоко проникаючи вглиб деталі (рисунок 2.23).



а *б*

Рисунок 2.23 – Вигляд гартувальних тріщин на поковці (*а*) і макрошліфі (*б*) [136]

Причинами виникнення дефекту стають надмірна швидкість охолоджування, різка відмінність у вмісті вуглецю в місцях тонкого перерізу і складної форми виробу,

невідповідність хімічного складу сталі призначеному режиму термічної обробки, різка ліквація забруднень металу.

Для *запобігання* розтріскуванню деталей при термічній обробці, зокрема, при гартуванні необхідно забезпечити рівномірне і повільне нагрівання виробу (наприклад, з використанням його попереднього підігрівання); використовувати гартування з помірним охолодженням у двох послідовних середовищах або ступінчасте; термічно відпускати вироби безпосередньо після гартування; при конструюванні виробів, за можливості, уникати різких виступів, загострених кутів, різких переходів від товстих перетинів до тонких тощо.

Спосіб усунення. Дефект є непоправним браком.

Розривини («розтріскування», «рванини») *на додаток до попередніх матеріалів* можуть розглядатися як різновид термічних тріщин, які проявляються при нагріванні злитка (заготовки), у вигляді нерегулярно розташованих надривів різної глибини, сконцентрованих, переважно, у ребер (*див. рис. 2.23*, *а*); однак вони можуть зустрічатися також по всій поверхні напівфабрикату (рисунок 2.24).

Рванини, як правило, орієнтовані на межі окиснених кристалів, що утворюються при деформації перепаленого металу. Тут прояв зниженої пластичності зумовлюється технологією виплавки та розливки металу, а також порушеннями режимів нагрівання і деформації заготовки (*див. нижче*).

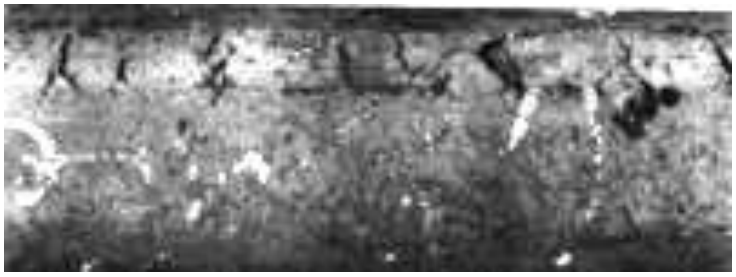


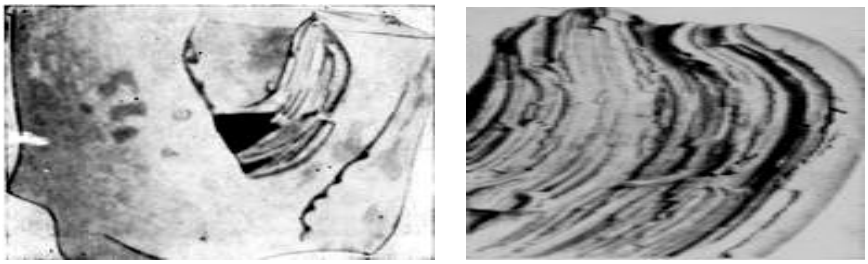
Рисунок 2.24 – Вигляд розривин на макрошліфі металу [140]

Загальне *розтріскування* часто починається з появи сітки тонких тріщин.

Причинами виникнення розривини є гарячоламкість («червоноламкість») сталі, зумовлена високим вмістом кисню, сірки або міді і низьким вмістом мангану, а також – дефектна поверхня злитків через неправильну технологію розливання та наявність грубих включень поблизу поверхні. При несприятливих параметрах термічної обробки в сталі утворюється легкоплавка евтектика з розплавлених сульфідів заліза, розташованих на межах зерен, яка в нижній області температур гарячої деформації (800…1000 °С) може призводити до *розтріскування* виробу. Напруження наступної обробки тиском ініціюють прояв цього дефекту (*мова про це йдеться і далі*).

Під дією сумарних напружень характер поверхні руйнування може бути кристалічним, волокнистим або «шиферним».

Шиферний злам (рисунок 2.25) іноді ідентифікують як «самостійний» дефект термічної обробки металу. Він виглядає як хвилеподібна, звивиста або шифероподібна (хвиляста) поверхня, подібна до місця руйнування грубоволокнистого дерева в поздовжньому напрямку. Появу цього дефекту пов’язують з підвищеним вмістом неметалевих включень, які після прокатки розташовуються у вигляді рядків. Такий зовнішній вид зламу може іноді проявитися у виробах і при інших видах ОМТ, наприклад, при ковці.



а *б*

Рисунок 2.25 – Вигляд деревоподібного, або шиферного зламу на зразку сталі (*а*) і збільшено – в місці руйнування (*б*) [136]

Наявність шиферного зламу не слід плутати з волокнистою структурою, яку при виробництві ресорних смуг або пружин свідомо прагнуть отримати у сталі, додатково легуючи її манганом і силіцієм.

Попередження появи розривин (рванин, розтріскування) пов’язано з визначенням та запобіганням потенційних причин їх виникнення, зокрема, з усуненням вихідних дефектів, що виникли в сталеплавильному виробництві, при литті та (або) при попередній термічній обробці. Слід не допускати високого вмісту сірки у сталі (щоб уникнути гарячо- і червоноламкості) та мати на увазі, що підвищений вміст мангану (у допустимих межах марочного складу) з утворенням сульфідів або оксидів мангану запобігає прояву дефекту. Доцільно при нагріванні заготовок застосувати в якості палива газ зі зниженим вмістом сірки, а також регулювати атмосферу печі з метою усунення надлишку кисню з повітря. Треба уникати язиків полум'я, які можуть торкатися заготовки. Сталі, які за своїм хімічним складом схильні до розтріскування, наприклад, високолеговані нікелеві, автоматні тощо слід деформувати за м’якими режимами.

Усунення дефекту. Рванини, як правило, стають невиправним браком. У деяких випадках (в разі локального розташування дефекту) можливим його видалення вирубкою, шліфуванням, струганням або вогневої зачисткою з урахуванням глибини та кількості дефектів, розмірів напівфабрикату, складу сталі, а також форми поперечного перерізу і призначення виробу. Допускається в місцях можливого утворення тріщин залишати збільшений припуск виробу на обробку.

Представлені вище дефекти, значною мірою, пов’язані із сумісним впливом умов термічної обробки та *локальних* неоднорідностей структури металу, які, у свою чергу, *локально* проявляються на виробах.

Між тим, присутність ліквацій в об’ємі виробу може проявитися не тільки у вигляді місцевих дефектів, але й у спотворенні форми і розмірів усього тіла.

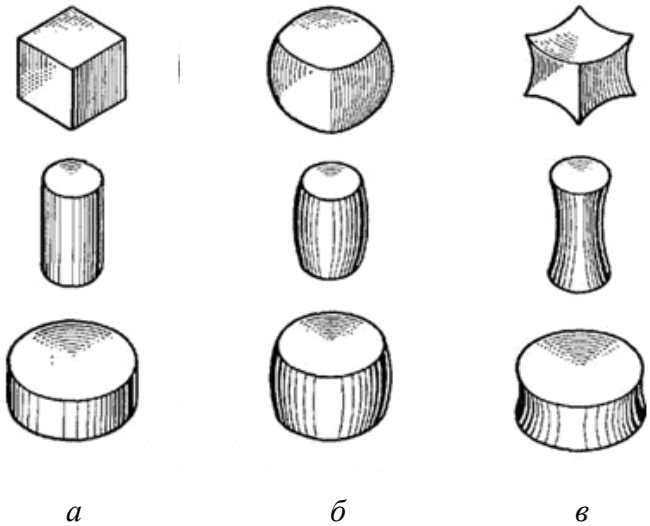
Дефекти, що зумовлені впливом умов нагріву на форму і стан поверхні виробів

Часто після (внаслідок) термічної обробки у деталей змінюються форма і об’єм. Це дефект, званий **«деформація викривлення»** (рисунок 2.26).

Причиною появи дефекту є нерівномірні структурні і пов'язані з ними об'ємні перетворення, що обумовлюють виникнення внутрішнього напруження в об’ємі металу при нагріванні та охолодженні. Такі структурні зміни можуть викликати зміну об'єму, а нерівномірність охолодження – спотворення зовнішньої форми (викривлення): бочкоподібність або бічну увігнутість.

При гартуванні сталі викривлення деталей може відбуватися і без значних об'ємних змін в результаті нерівномірного нагрівання і охолодження, здебільшого, довгомірних виробів (сортових профілів, труб та ін.).

Спосіб запобігання – забезпечення повільного та рівномірного нагріву та охолодження виробів, особливо – в області температур мартенситного перетворення.



а *б* *в*

Рисунок 2.26 – Схематичне представлення різновидів деформації викривлення: *а* – вихідна форма; *б* – «бочкоподібність»; *в* – «бічна увігнутість») [136]

При зануренні деталей в гартувальне середовище треба враховувати їх форму і розміри. Деталі, що мають як товсті, так і тонкі частини, слід занурювати в гартувальне середовище спочатку товстою частиною; довгі деталі (типу штоків, свердл тощо) опускають строго вертикально, а тонкі плоскі вироби (типу дисків, пластинок та ін.) – ребром. Оскільки розміри виробу після гартування (навіть за відсутності викривлення) не збігаються з вихідним значенням, деформацію, що викликається при цьому, можна зменшити підбором відповідного складу сталі та умов термічної обробки (зокрема, вживанням ступінчастого та ізотермічного гартування).

Спосіб усунення – правка довгомірних виробів. Можливою може стати токарна обробка з виходом на вироби менших дозволених розмірів Якщо деформація масивних виробів перевищує вимоги НТД на продукцію, то це є непоправний брак.

Наявність залишкових напружень та тріщин на металевій поверхні зумовлює збільшення її реакційної здатності, що може супроводжуватись посиленням процесів хімічної взаємодії металу з атмосферою, зокрема – з газами печі при нагріві. Така взаємодія виражається в окисненні, появі кольорів мінливості («побіжалості») та зневуглецюванні поверхневого шару виробів, що у деяких випадках може стати ознакою дефектності.

Окалина після термічної обробки – шар окисненого металу у вигляді окремих ділянок з відшарованою або пухкою речовиною, що утворився та зберігся на поверхні нагрітої в печі заготовки (рисунок 2.27).

Рисунок 2.27 – Вигляд відшарованої окалини на заготовці після її нагріву в окиснювальній атмосфері печі [136]

Причиною виникнення цього дефекту є тривалий нагрів металу в окиснювальній атмосфері печі при нормальній температурі термічної обробки (для сталі – 900…1250 °С). На наступних етапах при обробці напівфабрикату тиском окалина, не видалена з поверхні заготовки, вдавлюється у метал, утворюючи після відлущення так звані «***чорновини***», або глибокі вм'ятини на виробах, що також є дефектом (*див. нижче*).

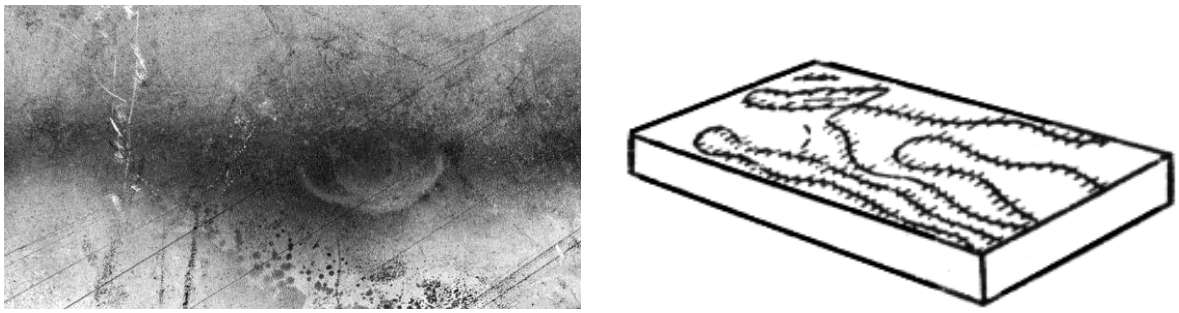
При нагріві деяких активних металів поверхня виробу може покриватися продуктами їх горіння. Так, наприклад, внаслідок окиснення магнію поверхневі раковини заповнюються *порошком* його оксидів від білого до чорного кольору або утворюються нарости сірого або темного кольору.

Різновидом цього дефекту, пов'язаного з нагрівом і охолодженням, є «***збільшена окалина***», яка може з'явитися на металі після його *гарячого деформування* та охолодження водою.

Запобігання виникненню дефекту – дотримання режиму нагрівання з необхідними параметрами атмосфери у печі, а також – охолодження після нагріву.

Спосіб усунення – механічне поверхневе видалення окалини, зокрема, шліфуванням та (або) травлення в розчинах хімічних реагентів. Ймовірним є зниження сортності продукції.

**Кольори мінливості («кольори побіжалості»*)* – це поява на поверхні виробів після їх *світлого* відпалу різних за величиною та формою ділянок з гладкою поверхнею та різноколірним забарвленням (від жовтого до синього, від сірого до чорного) на різних ділянках виробу (на рисунку 2.28, *а* кольори не показані).



а *б*

Рисунок 2.28 – Вигляд кольорів мінливості (*а*) та забруднення поверхні (*б*) [136]

Якщо відпал при виробництві листів або смуги здійснюють у колпакових або прохідних печах, то кольори мінливості зустрічаються в більшості випадків лише по їх кромці (тільки на зовнішніх і внутрішніх витках рулону вони поширюються по всій поверхні). Якщо смугу відпалюють у печах з перемотуванням рулону або при наявності в колпакових або прохідних печах занадто слабо намотаних рулонів, то можлива поява кольорів мінливості на великій поверхні або по всій ширині смуги.

На нікелевих виробах цей дефект проявляється у вигляді різноколірної поверхневої оксидної плівки, присутньої на однотонній поверхні металу; на магнії та свинцю – це забарвлення ділянок поверхні, що відрізняється поступовим переходом від одного кольору і тональності з металічним блиском до іншого.

Кольори мінливості та окалина від нагрівання на значній площі поверхні відпаленого металу призводять або до зниження його якості та вартості виробів, або до додаткових витрат на усунення дефектів. Напівфабрикати з наявністю кольорів мінливості та окалини, наприклад, зварні труби без додаткової обробки непридатні для гальванічного покриття поверхні або лакування.

Причинами виникнення дефекту можуть бути доступ повітря у піч під час світлого відпалу, несприятливий склад захисної атмосфери в печі, охолодження на повітрі від

занадто високих температур (при ранній видачі з печі), а також – вигорання залишків технологічного мастила.

Запобігання дефекту пов'язано з ліквідацією ймовірних причин його виникнення. Охолодження металу після термічної обробки приблизно до 150 °С бажано проводити без вільного доступу повітря. Для усунення залишків технологічного мастила з поверхні виробів перед відпалом вони можуть бути піддані відповідній обробці хімічними реагентами та наступній ретельній сушці.

Усунення дефекту. Кольори мінливості, як і окалину можна усунути механічною обробкою поверхні (шліфуванням) або короткочасним додатковим травленням перед подальшою обробкою; чорні краї видаляють обрізанням кромки смуги. Усунення кольорів мінливості (та окалини) з усієї поверхні листів або смуги не завжди можливе, але сам цей дефект зазвичай не заважає застосуванню виробів за прямим призначенням у споживача. При цьому за необхідності ймовірним стає зниження сортності продукції.

Плями забруднення (рис. 2.28, *б*) утворюються внаслідок наявності на поверхні виробу, що піддається термічній обробці, залишків мастильної рідини (мазут, технологічне мастило тощо) та подальшого нерівномірного її окиснення під час нагрівання й травлення металу. Зокрема, осадження сажі («чорний колір») відбувається при надлишку вуглеводнів у неправильно обраній атмосфері печі світлого відпалу, що часто зумовлює небажане локальне навуглецювання сталі.

Частково цей дефект є спорідненим кольорам мінливості. Наявність дефекту може утруднити процеси нанесення захисного покриття на виріб, але не заважає у більшості випадків його використанню за прямим побутовим призначенням.

Для запобігання виникнення плям забруднення слід не допускати наявність мастильних речовин на виробах, які піддаються термічній обробці, наприклад, спеціальним очищенням поверхні, використанням відбійників емульсії за чистовою кліттю прокатного стану, обробкою у лужних розчинах тощо.

Спосіб усунення. Видаляти плями забруднення можна будь-яким способом поверхневого зачищення або травленням.

Ще одним частим наслідком окиснення при термічній обробці є вигорання вуглецю (або інших важливих елементів у поверхневих шарах напівфабрикату), яке по глибині нерідко перевищує допуски. Цей дефект носить назву: ***поверхневе зневуглецювання.***

На сталевих виробах ця невідповідність проявляється у зменшенні вуглецю у сплаві внаслідок його взаємодії, головним чином, з киснем (і воднем) навколишньої атмосфери, що починається з поверхні виробу. В результаті, зовнішній шар сталі може повністю втратити вуглець (це, так зване, «*повне зневуглецювання*»). Глибше у виріб з цим шаром контактує зона з пониженим вмістом вуглецю («*часткове зневуглецювання*»).

Повністю зневуглецьована структура сталі являє собою чистий ферит; структура *перехідного* шару характеризується часткою фериту, яка поступово зменшується вглиб виробу. До зневуглецювання поверхні схильні практично всі сталі, що містять більше 0,2% *С*. Реакційна здатність в системі «метал – газ», так само як і дифузія кисню та водню, збільшуються зі зростанням температури та часу нагрівання.

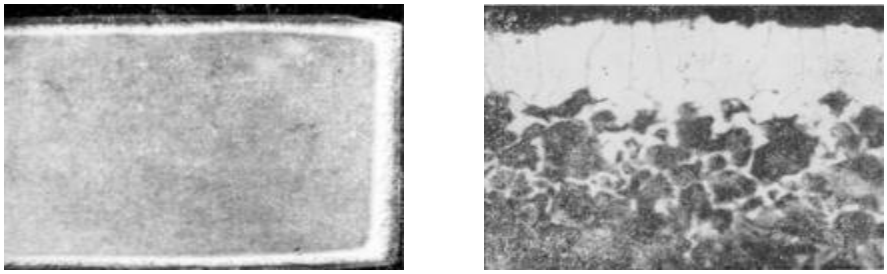
Зневуглецювання поверхневої зони зменшує її міцність, твердість і, відповідно, опір деформації і зношуванню. Тому зневуглецювання поверхні особливо небажано для інструментальних, підшипникових і зносостійких сталей. Шкідливим воно є при виготовленні арматурної сталі, тягнутого сталевого дроту, гарячекатаного сталевого прутка, призначеного для волочіння тощо.

На виробах з титанових сплавів дефект проявляється у вигляді так званого *альфованого шару.*

Слід мати на увазі, що у деяких випадках, наприклад, при виробництві електротехнічних сталей (трансформаторної, динамної) для зменшення експлуатаційних

втрат електричної потужності проводять спеціальний зневуглецювальний відпал, у більшості випадків – із застосуванням атмосфери водню.

Зневуглецювання біля краю поперечного перерізу зразка металу (на поперечному темплеті-шліфі) виявляють за макро- та мікроструктурою (рисунок 2.29) і локальним хімічним аналізом.



а *б*

Рисунок 2.29 – Вигляд шліфів сталі з поверхневим зневуглецюванням: *а* – на макроструктурі; *б* – на мікроструктурі [140]

Попередження дефекту: створення при нагріві заготовок належної контрольованої (захисної) атмосфери, що є нейтральною по відношенню до металу; застосування прискореного нагрівання; забезпечення герметичності нагрівальних пристроїв, що запобігає підсмоктуванню повітря при відпалі в захисній атмосфері; використання очищених від окалини напівфабрикатів при їх відпалі у печах із захисною атмосферою; в спеціальних випадках можливе застосування атмосфери, насиченої вуглецем.

Усунення дефекту. Зазвичай, цей вид браку термічною обробкою непоправний. Якщо дозволяє припуск на механічну обробку, то зневуглецьований шар видаляють шліфуванням або травленням. У рідкісних випадках застосовують відпал в атмосфері, яка зумовлює насичення поверхні сталі вуглецем. Однак з економічних та технічних міркувань це важливо лише для обмеженого кола спеціальних виробів (наприклад, сталей, до яких пред'являються вимоги забезпечення підвищеної міцності або якості обробки поверхні). Тому поверхневе зневуглецювання розглядається як дефект тільки в тому разі, якщо воно перевищує допустиму величину.

2.2.4 Дефекти виробів, зумовлені процесами обробки металів тиском

При ідентифікації та розробці заходів із запобігання цієї групи дефектів слід мати на увазі, що, строго кажучи, причинами їх значної кількості є *сумісний вплив* як недоліків попередніх етапів виробництва (виплавлення металу, лиття, термічної обробки тощо), так і самого процесу обробки тиском з урахуванням його особливостей *(див. розділ 1)*. Умовно при цьому можна ідентифікувати дефекти, які пов’язані з історією виготовлення виробу (напівфабрикату), і ті, що викликані особливостями (порушеннями) регламентованих технології та режимів роботи обладнання в процесах деформаційного перероблення.

Тому віднесення дефекту до певної групи є достатньо умовним. Критерієм тут може бути експертна оцінка значущості впливу того чи іншого етапу виробництва при формуванні причин появи невідповідності.

Суттєву допомогу при ідентифікації дефектів, що виникають при ОМТ, може надати ДСТУ 2658 «Прокат чорних металів. Терміни і визначення дефектів поверхні», а також стандарти бувшого СРСР, які вже *не діють* в Україні: ГОСТ 21014-88 «Прокат черных металлов. Термины и определения дефектов поверхности» та ГОСТ 20847-75 «Прутки, полосы и профили горячекатаные и кованые. Дефекты поверхности (*російською мовою*).

Дефекти, що зумовлені деформацією заготовки і суттєво пов'язані з історією виготовлення виробу

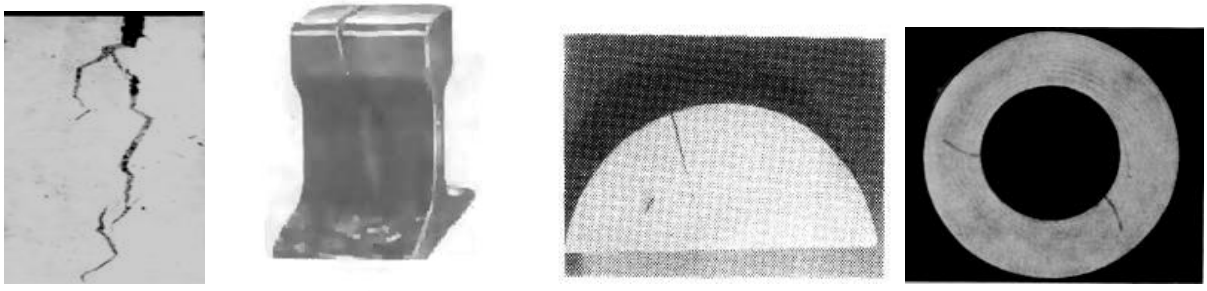
Ряд невідповідностей заготовки (злитків, напівфабрикатів) зумовлює підвищення дефектності продукції при обробці тиском. Частину таких дефектів розглянуто вище.

Найбільш «болючими» дефектами виробів є ті, що зумовлюють непридатність виробів до їх використання за призначенням. Суттєве місце серед них займають порушення суцільності металу. Найчастіше – це тріщини, які є всередині та (або) на поверхні заготовки. При обробці тиском вони, як правило, переходять на готовий виріб у збільшених розмірах по довжині пропорційно витяжці, а іноді розвиваються вглибину. Значно рідше і тільки для внутрішніх вад металу можливі випадки «*заварювання*» таких дефектів (*див вище*).

Вже було відмічено, що на відміну від так званих «*тріщин напруження*» при термічній обробці (точніше – *«тріщин термічного напруження»*) можна розглядати тріщини, причиною яких стає занадто велика *сума* напружень при несприятливому напружено-деформованому стані металу при обробці тиском та впливі наслідків попередніх перероблень (дефекти складу металу, лиття, термічної обробки тощо). У таких умовах вади попередніх перероблень, зокрема, нагрів можуть бути суттєвими чинниками, але лише попутними, що додатково впливають на ймовірність появи та розвитку тріщин.

Традиційно такі утворення, як і при термічній обробці заготовки, називають «тріщинами напруження», хоча в силу викладеного їх доцільно ідентифікувати як «*тріщини деформаційно-термічного напруження*» або «*тріщини деформаційного напруження*». Останні практично формуються внаслідок тільки несприятливих умов в осередку деформації, зокрема, внаслідок наявності схеми напруженого стану з надвеликими напруженнями (одним, двома чи навіть – трьома) розтягнення.

Тріщини («*тріщини деформаційно-термічного напруження*» – на доповнення попередніх аналогічних матеріалів) – це порушення суцільності, що можуть виявитися при будь-яких видах ОМТ на поверхні гаряче- та холоднодеформованих виробів з усіх металів та сплавів: сталі, міді, алюмінію, вольфраму, молібдену тощо. Як і у напівфабрикатів з підрозділів 2.2.2 та 2.2.3, вони проходять перпендикулярно або похило в глиб матеріалу (рисунок 2.30). Їх розміри оцінюють на мікрошліфах, фіксуючи *«радіальну глибину»* та *«дійсну довжину»* [1].



а *б* *в* *г*

Рисунок 2.30 – Приклади вигляду зразків металу з розвиненою тріщиною: *а* – шліф зразка металу зі стоковою тріщиною; *б* – тріщина в головці рейки; перерізи з тріщиною: *в* – круглого прутка; *г* – трубної заготовки [44, 128, 131, 135]

Взагалі, виникненню тріщин, їх розміщенню на виробі та напряму розвитку в силу різних причин сприяють:

– обробка тиском злитків з вихідними гарячими тріщинами; наявність у заготовці підкіркових бульбашок та пор, що не заварилися. Такі тріщини зазвичай нерівномірно розподілені по поверхні виробу в поздовжньому напрямку;

– нерівномірне та швидке охолодження країв (ребер) виробів при гарячій деформації фасонних профілів. Крайові (що йдуть від ребер) тріщини на профілях або на прутках, що мають перетин, який відрізняється від круглого, проходять перпендикулярно або під кутом до напрямку прокатки і мають переважно звивисту форму;

– *залишкові* (внутрішні) напруження, що виникають в матеріалі після обробки через занадто швидке нагрівання чи охолодження, а також у процесі деформації або при травленні (*див. нижче*). Лише в рідкісних випадках такі тріщини прямолінійні і розташовані паралельно поздовжній осі виробу. Найчастіше вони сильно викривлені і можуть доходити до його серцевини.

Заходи попередження дефекту залежать від причини його виникнення і включають відповідні дії.

Усунення дефекту: у разі наявності поверхневих тріщин при технічній і економічній доцільності їх вилучення – механічна обробка виробу. Глибокі та внутрішні тріщини є невиправним браком.

При аналізі причин появи тріщин на напівфабрикатах та виробах, що пов'язані з комплексним впливом обробки тиском та інших металургійних перероблень, можна розглядати декілька їх різновидів.

Поздовжні тріщини – проявляються в поздовжньому за напрямом основної деформації виробів на їх поверхні і можуть досягати центральної зони (рисунок 2.31).

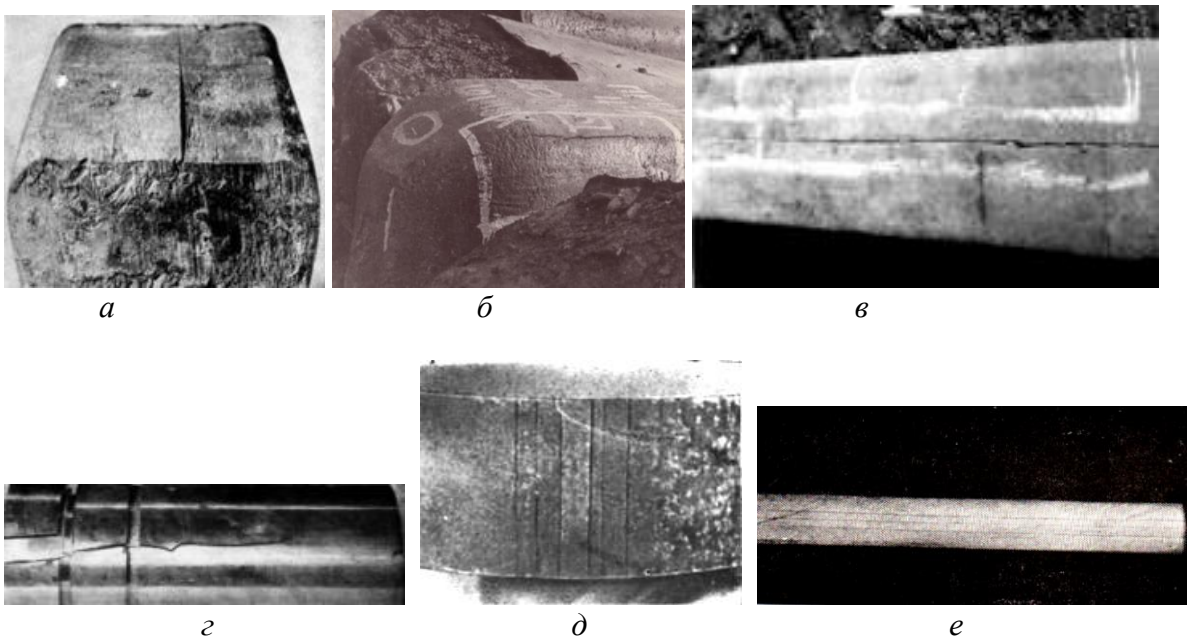


Рисунок 2.31 – Вигляд поздовжньої тріщини на поверхні продеформованого виробу: *а* – на грані блюма; *б* – на куті прямокутного профілю (обведено крейдою); *в* – на гарячекатаній трубі; *г* – на титановій холоднокатаній трубі; *д* – на гарячепресованому (кованому) профілі; *е* – на катанці [129, 131]

Поздовжні тріщини, що виникли від великих залишкових (внутрішніх) напружень, зазвичай поширюються в глибину виробу і майже завжди призводять до браку. Такі тріщини на поверхні прутків і дроту істотно знижують якість останніх, оскільки це може значно ускладнити їх подальшу обробку та працездатність виробів.

Загальними причинами утворення поздовжніх тріщин (на додачу до матеріалів, представлених вище) є використання заготовки (злитка) з поздовжніми тріщинами, незавареними підкорковими пузирями, ліквацією тощо; великі залишкові (внутрішні)

напруження в металі, що виникають через занадто швидке нагрівання або охолодження, в процесі деформації (наприклад, внаслідок скручування) або при травленні; несприятлива сукупність напружень стискання та розтягування в осередку деформації; використання інструменту з дефектною поверхнею; помилки при профілюванні інструменту тощо.

Більш детально походження тріщин можна визначити за наступними ознаками.

Тріщини на продеформованому металі, які пов'язані з підкірковими пузирями, зазвичай короткі, нерівномірно розподілені по поверхні виробу за поздовжнім напрямком.

Тріщини, що зумовлені підкірковими порами, короткі і, переважно, дуже тонкі; вони розподілені по поверхні виробу нерівномірно і витягнуті за поздовжнім напрямком.

Тріщини, що виникли як наслідок залишкових напружень, лише в рідкісних випадках прямолінійні; вони найчастіше криволінійні, гіллясті, не розташовані строго паралельно поздовжній осі виробу, можуть спостерігатися з одного або з двох сторін виробу та іноді доходять до його серцевини виробу.

Тріщини, що утворилися при гарячій прокатці через неправильне калібрування інструмента, мають вигляд ліній, паралельних поздовжній осі виробу на різній відстані одна від одної. Вони тонше, ніж тріщини, пов'язані із закатами (*див. нижче*).

Тонкі тріщини, що пов'язані зі зносом (викрошуванням) калібрів при гарячій прокатці, розміщуються на рівних відстанях одна від одної і можуть бути розподілені по всьому периметру поверхні виробу.

Тонкі короткі або довгі тріщини на катаному дроті, які зумовлені вихідними тріщинами через прослизання заготовки в калібрі при гарячій прокатці, розподіляються нерегулярно на поверхні по колу.

Частота появи тих чи інших різновидів поздовжніх тріщин пов'язана з видом продукції, що виробляється, а точніше – з особливостями відповідних технологій та обладнання.

На заготовці (блюмі або слябі), а також – на вихідному злитку *кутова* тріщина, яка є різновидом поздовжньої тріщини (див. рис. 2.31, *б*), виглядає як розрив металу значної глибини (до 20 мм) і протяжності за напрямом прокатки. Зазвичай на блюмах кутові тріщини розташовуються на кутах заготовки, а на слябах – по широких гранях, але ближче до ребер. Макроструктура металу з кутовими тріщинами характеризується спрямуванням дефектів у кути ліквацийного квадрату (*див. рис. 2.2, а*).

На поверхні холоднотягнутого прутка чи дроту лінійні порушення суцільності спрямовуються, здебільшого, поздовжньо (*див. рис. 2.31, е*). Їх утворення, форма, розташування і розподіл залежать від ряду причин, з вищеназваними включно, та найчастіше пов'язане з попередніми етапами металургійного перероблення (у більшості випадків зумовлена дефектами сталеплавильного і прокатного виробництва).

Поздовжні тріщини на прокатаній трубній заготовці або трубі (див. рис. 2.31, *в, г*) розташовуються найчастіше на зовнішній та внутрішній поверхнях виробу уздовж його осі або по спіралі; іноді утворюється скупчення тріщин, що призводять до *розривів* (*див. нижче*). У деяких випадках скупчення тріщин зумовлює появу більш-менш значних закатів або раковин на зовнішній поверхні виробу (*див. нижче*).

При виготовленні труб заготовка почергово обробляється на різному устаткуванні: прошивний стан гарячої поперечно-гвинтової прокатки або прошивний прес, розкатний стан, обкатний стан, редукційний стан, калібрувальний стан, правильне оснащення та ін. (*див. підрозділ 2.2.2.3*). Через велику кількість параметрів, які впливають на деформування металу при прокатці на такій послідовності станів, однозначне визначення причини появи тріщин потребує суттєвих професійних знань.

При пресуванні коліс **тріщині напруження** (рисунок 2.32), які у даному разі можна вважати різновидом *поздовжніх* тріщин, часто зумовлюються підкірковими пузирями, які є наслідком процесів плавки та розливання металу і зустрічаються, зазвичай, у великій кількості у вигляді скупчень. Залежно від ступеня видовження ці дефекти мають різну форму, протяжність і глибину; вони розташовуються вздовж напрямку деформації і не

завжди легко помітні. При великих обтисненнях спостерігається розширення цих дефектів.

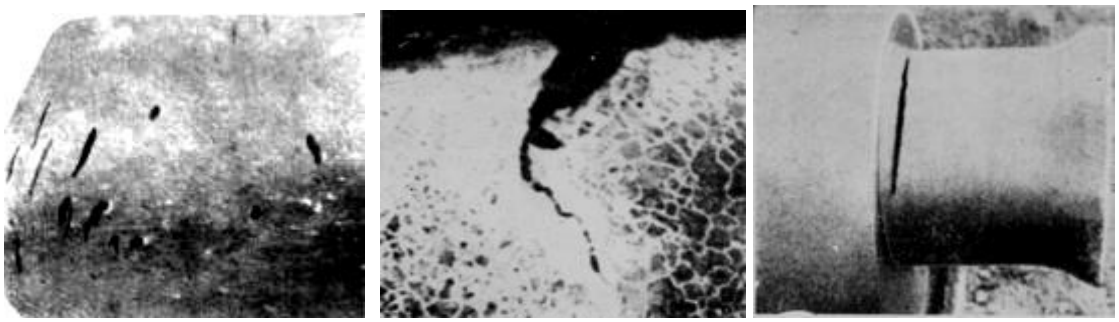


Рисунок 2.32 – Тріщини при пресуванні коліс, обумовлені стільниковими (підкірковими) бульбашками [129, 131]

Схожий зовнішній вигляд мають *закати* (*див. нижче*), але спрямованість останніх у глибину матеріалу виражена менше. Їх ідентифікація можлива лише при використанні металографічних методів дослідження.

Попередження дефекту. Ступінь викликаного поздовжніми тріщинами зниження якості заготовок і виробів залежить від виду тріщин, їх глибини і характеру розташування (частоти), а також від цілі використання виробів. Оскільки причини виникнення тріщин дуже різноманітні, а можливості контролю їх появи обмежені, отримання заготовок без тріщин можливо тільки при надзвичайно високих витратах.

Загальною рекомендацією стає: забезпечення регламентованих умов нагрівання і охолодження перед обробкою тиском конкретних матеріалу і форми заготовки, що має завадити утворенню занадто великих сумарних напружень; правильне калібрування і дотримання технології процесу гарячої деформації; ведення деформації у «м'яких» режимах, при яких мінімізується вплив на метал напружень, які розтягують; запобігання появі на інструменті (валках, штампах, пуансонах тощо) насічок, що мають гострі краї.

У залежності від виду і величини дефектів *заготовки* з дефектами краще відбраковувати вже на попередніх етапах виробництва.

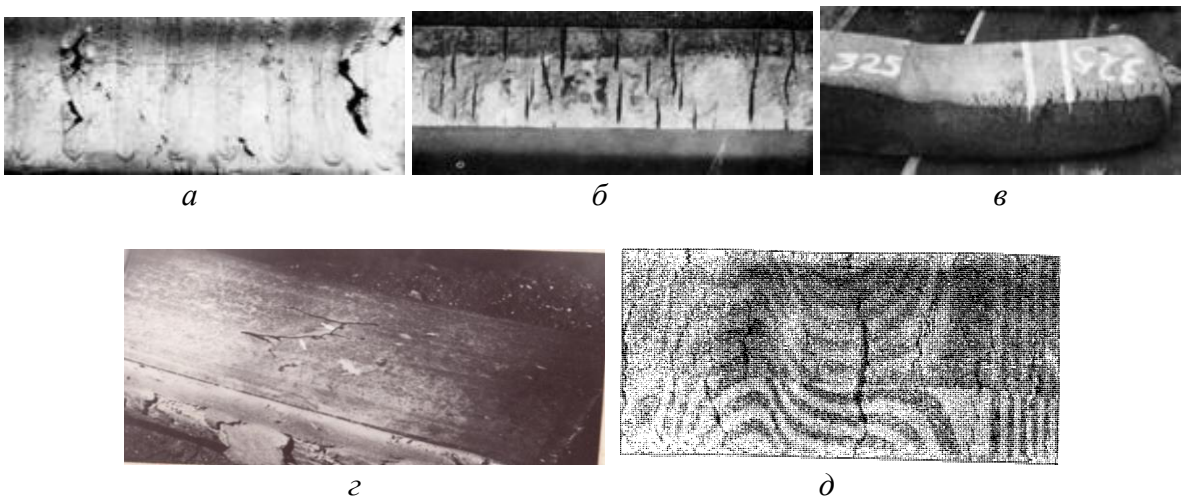
Усунення дефекту на виробах. Можливість усунення дефекту визначається глибиною тріщин і характером їх розподілу (частотою), а також матеріалом і розмірами профілів. Грубі тріщини, наприклад, у деяких випадках можна усунути обточуванням, вирубкою, вогневої зачисткою; тонкі тріщини, наприклад, тріщини, пов'язані з прослизанням металу в калібрі при прокатці або волочінні, усуваються шліфуванням.

Якщо напівфабрикат піддається механічній обробці по всій поверхні, як у випадку автоматних сталей, поверхневі тріщини не є бракувальною ознакою, якщо глибина їх залягання менше товщини шару, що видаляється.

У разі виготовлення з волочених прутків та дроту пружин, які зазнають великі динамічні навантаження, поздовжні тріщини неприпустимі.

Тріщини, що виникли від залишкових напружень та проявилися на фінальній стадії виготовлення продукції, є непоправним браком.

Поперечні тріщини (*на додаток до матеріалів, які стосуються цього дефекту на злитках*) – проходять, переважно, в напрямку, перпендикулярному до напряму найбільшого витягування (поздовжньої осі деформації), але можливим є й їх діагональна спрямованість; вони можуть бути прямолінійними, гіллястими або зубчастими (рисунок 2.33). Тріщини на краях виробів часто розвиваються криволінійно.



а *б* *в*

г *д*

Рисунок 2.33 – Вигляд поперечної тріщини на поверхні виробу [129, 131]:
а – гарячекатана трубна заготовка (пруток); *б* – прямокутний профіль; *в* – поковка з кутовими тріщинами; *г* – осаджена плита із закатаними тріщинами та відшаруваннями; *д* – макрошліф поверхні з тріщиною

Причини виникнення дефекту. Фізичною основою виникнення поперечної тріщини є надмірні поздовжні напруження в металі при деформації.

При прокатці заготовок (блюмів та слябів) основними причинами появи дефекту стають наявність поперечних тріщин у вихідному злитку, занадто швидке нагрівання металу перед деформацією, занадто високі разові обтиснення при вільному розширенні металу, що провокує появу крайових тріщин (*див. нижче*). Поперечні тріщини можуть поширюватися на всю товщину розкату (рисунок 2.34), що майже завжди викликає руйнування виробу.

Підвищену схильність до виникнення внутрішніх поперечних тріщин *при деформації* через вади прискореного нагріву та завеликий перепад температур між холодними внутрішніми та гарячими зовнішніми шарами металу мають багато легованих та високовуглецевих сталей у процесі їх нагріву при вихідних низьких температурах.

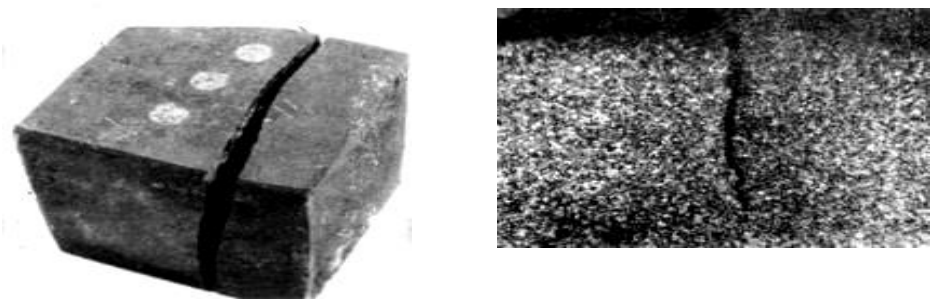


Рисунок 2.34 – Поперечні тріщини при руйнуванні виробу: *а* – відрізана частина прямокутного блюму; б – шліф поперечної тріщини [131]

При гарячій прокатці труб тріщини можуть розташовуватись в поперечному, так само, як і у поздовжньому напрямку або по спіралі; іноді утворюються скупчення тріщин, що призводить до *розривів* (*див. нижче*).

При багатоперехідній прокатці у деяких випадках більш-менш значні *раковини* або *закати* (*див. нижче*) на зовнішній поверхні труби з *попередніх операцій* деформування можуть провокувати появу скупчення тріщин при подальших деформаційних переробленнях.

Подібне розтріскування має місце, і при *куванні заготовки* (див. рис. 2.33, *в*). Викликати його появу можуть перепал металу (*див. вище*), наявність дефектів сталеплавильного виробництва та підвищений вміст шкідливих домішок у сплаві, таких як миш'як і олово. Такі тріщини можуть бути відкритими, якщо напрям тріщини різко відрізняється від напряму видовження металу, або закритими («замкненими»), якщо їх краї стиснулися при куванні.

Чинником, що посилює прояв поперечних тріщин, є *залишкові напруження* після холодної деформації металу, які не усунуті термічною обробкою. Так, структура пластинчастого перліту в сталі зумовлює більший опір деформації, ніж структура зернистого цементиту, що при формозміненні металу супроводжується появою та «консервацією» додаткових напружень. Негативно може впливати занадто швидка, занадто гаряча або холодна заливка металу до виливниці, виконана не строго за центром злитків.

На мікрошліфі такі **тріщини залишкового напруження** зазвичай мають розгалуджений кінець і проходять по межах зерен. Окиснення та зневуглецювання металу в зоні дефекту відбувається лише при подальшому нагріванні.

Одним з характерних прикладів прояву тріщини напруження є гаряче руйнування сплаву золота з нікелем – раптова подія після холодної обробки тиском та відпалу при швидкому охолодженні («загартуванні») у воді (така обробка є вимушеною, оскільки повільне охолодження вказаного сплаву на повітрі може викликати розділення металів і зміну кольору. При цьому, незначні забруднення, наприклад, свинцем або кремнієм можуть збиратися по краях зерен і утворювати фази з низькою температурою плавлення. Часто цього можна уникнути, витримавши помірну швидкість охолодження, помістивши деталь на пластину із заліза або охолоджуючи її потоком повітря.

Механічні удари по напівфабрикату при його передаванні від одного агрегату до іншого також часто супроводжуються проявом тріщин напруження.

Попередження дефекту: застосування вихідної литої заготовки без поперечних тріщин; регламентоване нагрівання при обробці тиском, що відповідає певному матеріалу та розмірам напівфабрикатів; оптимальна ступінь разових обтиснень з відповідним розподілом частинних обтиснень за переходами обробки, а також – запобігання ударним навантаженням на заготовку при транспортуванні.

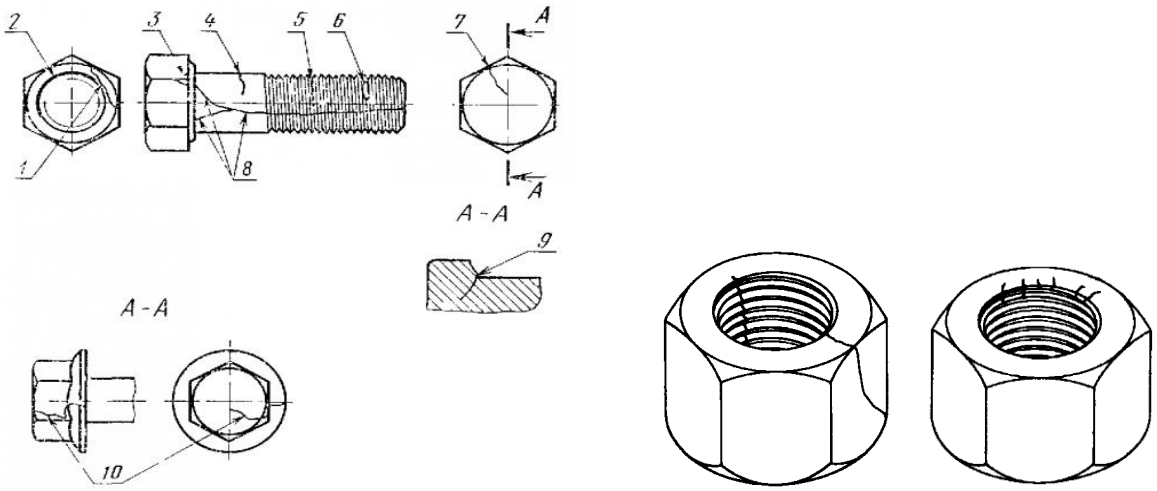
Усунення дефекту. Оскільки поперечні тріщини, як правило, поширюються глибоко всередину металу, їх наявність є бракувальною ознакою. Усунення їх можливе (механічною обробкою або обрізанням дефектних місць) лише в рідкісних випадках. Профілі з тріщинами від залишкових напруг бракують.

Тріщини при об’ємній штамповці, зокрема, при виготовленні кріпильних виробів типу болтів і гайок фіксуються як у поздовжньому, так і в поперечному (тангенціальному) напрямках, іноді навіть перетинаючись (рисунок 2.35).

Часто на крайках круглих головок з розташуванням під кутом 45° до осі виробу проявляються **тріщини зсуву** (*див. рис. 2.35, а, поз. 1*).

Причини виникнення вказаних дефектів. Всі такі тріщини найчастіше виникають через перенапруження металу на кордонах або всередині кристалів, а також в місці розташування неметалевих включень; в процесі обробки в місцях відрізки заготовки або у межах головки або кінця стрижня при подальшому штампуванні виробу; через невідповідність заготовки технічним умовам за фізико-механічними властивостями та розмірами; через неправильний вибір обладнання і т. д.

Запобігання прояву дефектів: виконання вимог НТД щодо вибору заготовки, її підготовки до деформування та регламенту штамповки. Пом’якшувальна термічна обробка заготовки та виробів. Заміна процесу холодної деформації теплою або гарячою штамповкою, особливо, у випадках великих ступенів обтиснення та швидкості деформації.



а *б*

Рисунок 2.35 – Дефекти при штамповці (висаджуванні) [137]: *а* – болт (1 – тріщина зсуву; 2 – тріщина, розташована тангеціально (за колом головки); 3 – поздовжня тріщина головки; 4 – поперечна тріщина стрижня; 5, 6 дефекти нарізі; 7 – поперечна (радіальна) тріщина головки; 8 – поздовжні тріщини стрижня; 9 – тріщина на галтелі; 10 – наскрізна тріщина головки; *б* – гайки з поздовжніми тріщинами (зліва) та поперечними (радіальними) тріщинами (справа)

Усунення дефектів. Вимогами НТД регламентуються граничні допустимі розміри вказаних дефектів, а також – порушення форми виробів. Їх перевершення стає, як правило, бракувальною ознакою.

Тріщини внаслідок розкатки газових пузирів *(або бульбашок, або міхурів)* – можуть розглядатися як різновид поверхневих поперечних тріщин. Вони представляють із себе порушення суцільності поверхні, що утворилася при розкатці зовнішнього або підповерхневого міхура, що був на злитку (рисунок 2.36, *а*). На поверхні прокатаного металу ці тріщини, як правило, розташовуються переривчасто на всій довжині розкату в кілька рядів (рис. 2.36, *б*).

а *б*

Рисунок 2.36 – Вигляд тріщин внаслідок розкатки газових бульбашок [131]: а – вигляд на поверхні прокату; б – схема розташування

Дефект також проявляється при гвинтовій прошивці відповідним чином.

У мікроструктурі поперечного перерізу заготовки, який узгоджується з місцем дефекту, завжди є бульбашки, що не вийшли на поверхню розкату. Газові міхури можуть

супроводжуватися скупченнями неметалевих включень. Мікроструктура сталі в більшості випадків характеризується наявністю зневуглецювання і великої кількості дрібних глобулярних оксидів, розташованих переважно в кінці тріщин у вигляді «хвоста» (*див. рис. 2.9, б*). Але бувають тріщини, навколо яких дрібні оксиди практично відсутні, що залежить від ступеня окиснення бульбашок в процесі нагрівання злитків перед прокаткою.

До цього призводять також погане просушування ковша, центрових та сифонних проводок, попадання вологи в метал, сильний перегрів металу в печі й ін.

Для *попередження дефекту* необхідно усувати вищеназвані причини його появи.

Усунення дефекту. При неглибоких тріщинах, якщо їх глибина не перевищує допуску або припуску на механічну обробку, можлива механічна або вогнева зачистка пошкодженої металевої поверхні; у залежності від глибини дефекту слід знизити сортність продукції, аж до її відбракування.

Розкатана тріщина – це поздовжня або поперечна поверхнева чи об'ємна тріщина, зазвичай заповнена оксидами металу основи, яка виникає ще на злитку (*див. вище*), зберігається на проміжній заготовці, деформується під час обробки тиском та зберігається аж до отримання кінцевого виробу.

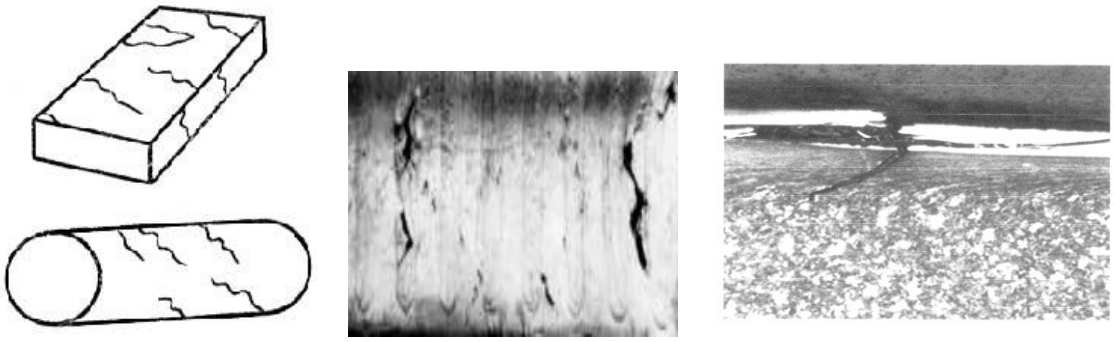
Заходи попередження. Правильний вибір заготовки для наступної деформації.

Усунення дефекту – видалення шліфуванням дефектної поверхневої ділянки; при глибоких пошкодженнях – це невиправний брак.

Вище було відмічено, що розвиток тріщин внаслідок накопичення сумарної деформації при несприятливій схемі напружено-деформованого стану металу може призвести до порушення *суцільності* металу.

Умовно такі порушення можна поділити на приповерхневі (рванини, «шпаківня», волосовини та ін.) та об'ємні (розриви, розшарування та ін.).

Рванина («розрив», «розривина», «надрив») – *на додаток до матеріалів, які стосуються цього дефекту на злитках та при термічній обробці металу* – це дефект поверхні у вигляді розкритого порушення суцільності металу, розташованого впоперек або під кутом до напрямку найбільшого видовження при деформації. Він має вигляд поглиблення, іноді – значної глибини, зі згладженими краями (рисунок 2.37). Зокрема, рванини фіксуються як на внутрішній, так і на зовнішній поверхнях стаканів при прошивці трубної заготовки.



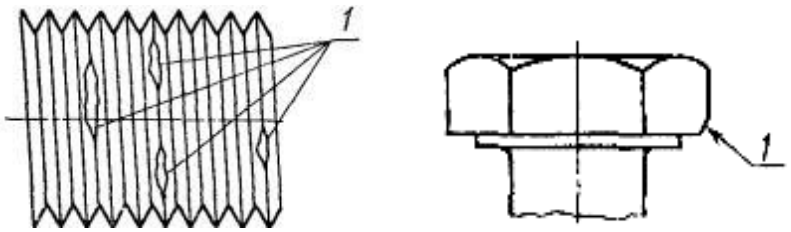
а *б* *в*

Рисунок 2.37 – Вигляд деформаційної розривини: *а* – схема розташування розривини ливарного походження; *б* – вигляд на поверхні прокату; *в* – ділянка поздовжнього макрошліфа прокатаного прутка з поверхневими розривинами (х118) [131]

Розривини ідентифікуються візуально (рисунок 2.37, *а, б*) та на шліфах поздовжніх зразків металу (рис. 2.37, *в*).

Найбільш схильними до прояву поверхневих рванин і тріщин є малопластичні інструментальна, швидкоріжуча, деякі марки легованої сталі тощо при куванні. Фактором, який додатково підвищує ймовірність прояву цього дефекту є *перепал (див. вище)*, який провокує руйнування розкату в результаті *гарячоламкості* («червоноламкості»). Це обумовлено оплавленням евтектики *Fe – FeO – FeS*, розташованої на кордонах зерен, при зниженому вмісті мангану та підвищеній кількості сірки і кисню (наприклад, в автоматних сталях). У зоні розташування дефекту часто виявляється ліквація фосфору, що має місце при деформуванні низьковуглецевих сталей, схильних до гарячеламкості. Однак дефект може з'явитися і на таких марках, як Сталь 40, Сталь 45, а також на розкаті високохромистих і хромомарганцевих марок сталі.

Низька пластичність металу на гострих кутах виробу (наприклад на різбленні) часто проявляється як *викришування* (*рисунок 2.38, а, 1*) або *відколи* (*рис. 2.38, б, 1*) .



а *б*

Рисунок 2.38 – Прояв рванини у вигляді *викришування* «1» на різьбленні при його накатці (*а*) або відколів «1» на головці болта (*б*) [137]

Причини дефекту такі ж, як і при появі поперечних тріщин (*див. вище*).

Заходи попередження дефекту залежать від причини його виникнення і включають відповідні дії. Зокрема, слід забезпечити необхідну пом'якшуючу термічну обробку, не допускати до деформування заготовки з перепалом; витримувати в сталі оптимальне співвідношення між вмістом мангану та сірки, а для запобігання червоноламкості слід *деформування* сталі проводити поза областю температур 900…950 °С. Режимом деформації необхідно зменшувати напруження розтягування.

Усунення дефекту: метал з рванинами є непоправним браком.

Шпаківня – це внутрішня порожнина, яка виходить на поверхню виробу, має згладжені й окиснені стінки та представлена на рисунку 2.39 (*також див. рис. 2.11*).

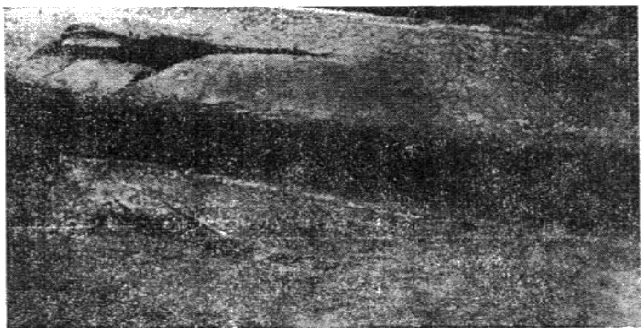


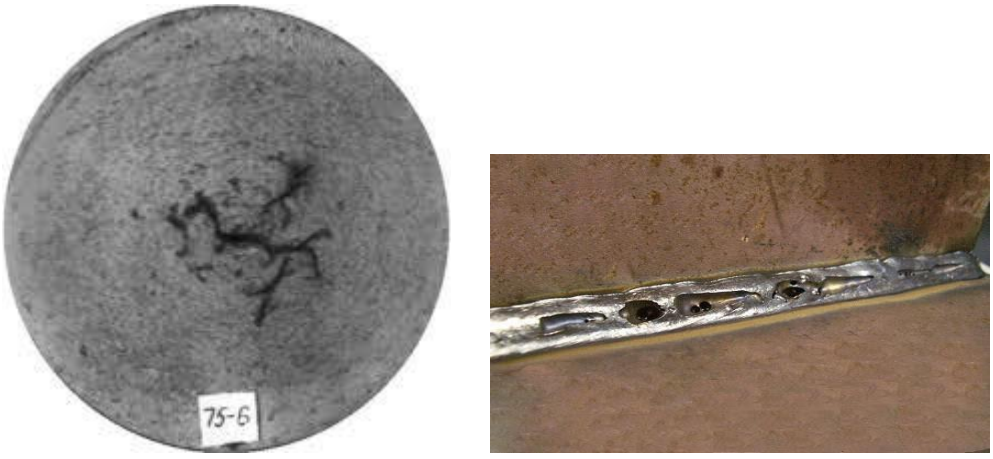
Рисунок 2.39 – Вигляд шпаківні на поверхні металу внаслідок його деформації [127…129, 131]

Причина появи. Дефект утворюється при куванні чи прокатуванні внаслідок розкриття внутрішньої тріщини, яка попередньо виникла під дією термічних напружень під час нагрівання холодного злитку (заготовки).

Для запобігання виникненню дефекту необхідно використовувати заготовки без внутрішніх порожнин, забезпечувати уповільнене охолодження злитків після розливки металу та відпал заготовки для зняття внутрішніх напружень, дотримуватись уповільненого нагріву холодних злитків та заготовки до 500…700 ºС та збережливих режимів їх деформації.

Спосіб усунення. Шпаківня є непоправним браком.

Свищі – це група дефектів, що мають однакову назву, але різний вигляд і опис в рамках різних об'єктів. Зокрема, при ковці дефект ідентифікують в центральній зоні поперечного перерізу поковки при його деформуванні з великими разовими обтисненнями (подачами) як локальні приповерхневі порушення суцільності, що зазвичай мають хрестоподібну форму через *розриви* у напрямку діагоналей ліквацийного квадрату. Свищі нехрестоподібної форми можуть з'являтися при ковці з обкаткою круглої заготовки в плоских бойках, а також при порушенні режиму прошивки заготовки при гвинтовій прокатці. Згідно з ДСТУ 2658-94 [126] «свищем» іноді називають розкатаний (розкований) газовий пузир або «шпаківню» (*див. рис. 2.11 та 2.39*). При зварюванні, зокрема, при виготовленні зварних труб «свищем» позначають порушення суцільності зварного шва (рисунок 2.40).



а *б*

Рисунок 2.40 – Вигляд «свища» на торці поковки (*а*) та зварному шві (*б*) [139]

Причиною виникнення дефекту зазвичай стають невідповідності первісного злитка чи заготовки (неметалеві включення, газові міхури, усадочна раковина, рихлість тощо) у сукупності з несприятливою схемою напружено-деформованого стану металу при його формозміненні. При зварюванні негативний вплив зумовлюють невірно обраний його режим реалізації (сила та частота електричного струму, температура прогріву, зачистка кромок тощо).

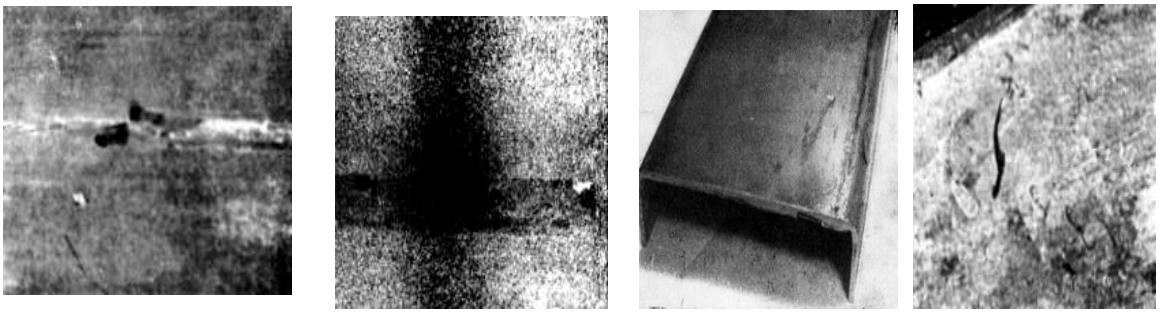
Попередження дефекту – використання якісних первісних матеріалів; ведення деформації при застосовному температурно-деформаційному режимі.

Усунення дефекту: можливе частково шляхом вирізки дефектних місць заготовки; частіше – це непоправний брак.

Раковини (їх слід відрізняти від «*усадкових раковин на злитках»! – див. вище*) – це безладно розташовані на поверхні продеформованих сталевих, мідних, алюмінієвих, нікелевих та ін. виробів (профілі, лист, труби, дріт, поковки тощо), помітні неозброєним оком місцеві невеликі об'ємні несуцільності (западини, «вищербини (рисунок 2.41). Величина і форма раковин може бути самою різною. Часто вони витягнуті за напрямом найбільшої деформації при обробці тиском.

Раковини можуть розташовуватися рядами паралельно основному напряму витягування; тоді говорять про «*ряди раковин*». Через скручування матеріалу при поперечно-гвинтовій прокатці раковини зазвичай розташовуються по спіралі на зовнішній і внутрішній поверхнях труби.

Між раковинами і *післядеформаційними бульбашками* (*див. нижче*) є сильна подібність як за їх зовнішнім виглядом, так і за впливом на можливість подальшої переробки металу.



а *б* *в* *г*

Рисунок 2.41 – Раковини на поверхні виробів: *а* – типовий загальний вигляд; *б* – на гарячекатаному листі; *в* – на прямокутній звареній трубі; *г* – на прокатаному бандажі [32, 44, 130, 131, 137, 138 та ін.]

Причиною виникнення дефекту стають порушення при розливанні металу (напливи, бризки, поперечні і поздовжні тріщини, неметалеві включення), неусунуті раковини у вихідному (зокрема, литому) матеріалі, глибокі і недостатньо вигладжені місця вогневої зачистки чи стругання на поверхні первісної (зокрема, литої) заготовки; недостатній або занадто високий нагрів заготовок, що зумовлює нерівномірний розподіл температури за їх поперечним перерізом; занадто висока нерівномірність деформації при обробці тиском внаслідок вад ведення процесу або настройки обладнання; заглибокі насічки на обтискних валках, що мають до того ж гострі краї, знос прокатного інструменту (калібрів валків чорнових клітей при прокатці, валків та оправок при прокатці труб). Це призводить до появи на поверхні виробу шматочків металу та окалини. Під час обробки тиском вони вдавлюються в метал основи, залишаючи на її поверхні відбитки, а потім відокремлюються. Шматочки металу можуть потрапити на заготовку і при неповному видаленні задирок (*див. нижче*).

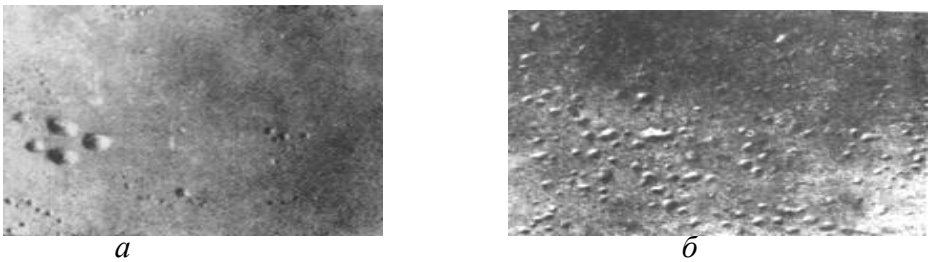
Раковини у більшій або меншій мірі, але завжди знижують придатність профілів, смуг і листів до зварювання.

Запобігання дефекту. Використання добре зачищених бездефектних вихідних заготовок. Застосування незношеного інструменту та валків без надвеликих насічок на їх поверхні. Ведення процесу деформації у збережливому режимі. При обрізці кінців заготовки – повне усунення задирок.

Усунення дефекту. Можливість використання напівфабрикатів з раковинами (як і з волосовинами – *див. вище*) залежить від цілей застосування виробу. Ці дефекти неприпустимі і є невиправним браком на заготовках, призначених для подальшого волочіння, та на гнутих тонкостінних профілях. При застосуванні обробки різанням такі напівфабрикати можна використовувати лише у випадку, якщо глибина дефекту менше товщини шару, який видаляється при механічній обробці. Окремі раковини можуть бути видалені зачисткою (шліфуванням); при виготовленні виробів круглого перерізу (труб і прутків великого перерізу) видалення раковин можливе обточуванням або шліфуванням. В разі прокатки смугової чи листової сталі такі дефекти в залежності від їх кількості, величини і розташування можуть бути усунені шляхом вирізки дефектних ділянок з можливим зниженням сортності продукції. Смуги або листи із сильно розвиненими

дефектами, як правило, бракуються. На внутрішній поверхні труб усунення дефектів можливо тільки в невеликому обсязі (шліфуванням кінців труби) або на окремих ділянках виробів. Видалення таких дефектів зазвичай є доцільним тільки для виробів з дорогих високолегованих сталей.

Бульбашки поодинокі або групові (рисунок 2.42) проявляються на поверхні прокатаних сталевих профілів, гарячекатаного або холоднокатаного *сталевого* листа, *алюмінієвого* дроту, листа та профілів, *мідного* прутку, листа та волоченого дроту, *нікелевих* труб тощо внаслідок присутності у відповідній заготовці підкіркових пухирів, що не заварилися, неметалевих включень, занадто тривалого часу травлення без інгібіторів (останні – так звані, *пухирі травлення,* або *бульбашки травлення – див. далі*). При тривалому травленні без застосування інгібіторів бульбашки (пузирі) можуть утворитися в місцях розшарувань, що лежать близько до поверхні.



а *б*

Рисунок 2.42 – Вигляд бульбашок на металевій поверхні: поодиноких (*а*) та групових (*б*) [32, 44, 130, 131, 137, 138 та ін.]

Для попередження дефекту на етапі виготовлення злитка необхідне забезпечення нормального розкислення металу, дотримання технологічних температур, швидкості розливки, а при безперервній розливці – стабільний рівень металу в проміжному ковші. При обробці злитків тиском слід застосовувати вихідні заготовки без газових пухирів і неметалевих включень; при травленні необхідно дотримуватись регламентованого часу обробки заготовки, використовувати інгібітори травлення. Необхідно також запобігати при термічній обробці різких нагрівів і охолоджень, забезпечити оптимальний розподіл обтиснень (напружень) при деформації.

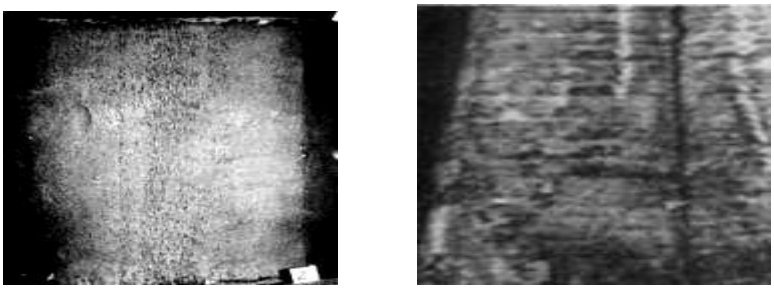
Усунення дефекту – здебільшого, шляхом видалення дефектної ділянки обрізанням, обточуванням, шліфуванням, фрезеруванням, шліфуванням, вогневим зачищенням зі зниженням сортності продукції при урахуванні кількості дефектів, властивостей металу, розмірів та призначення виробів. У деяких випадках, наприклад, при розташуванні бульбашок у сталевій або цинковій заготовці глибоко від поверхні достатнім попереднім нагрівом та інтенсивним режимом гарячої деформації вдається забезпечити їх заварювання.

Ряд дефектів, зумовлених «комплексним» впливом попередніх перероблень також погіршує *якість поверхні виробів при обробці металів тиском***.**

Волосовини – це ниткоподібні тонкі, майже не видимі неозброєним оком тріщини на поверхні металу глибиною 0,5…1,5 мм, які виникають при поздовжній деформації (зокрема, при прокатці) злитка чи заготовки з неметалевими включеннями (зокрема – підкірковими газовими пузирями).

Зниження технологічної пластичності поверхневого шару виробів при ОМТ та прояв волосовин зумовлені наявністю неметалевих включень, що вийшли при деформації на поверхню виробу, якщо вони попередньо не видалені шліфуванням. Їх негативний вплив зростає при зменшенні перерізу виробу. Дефект є результатом окиснення

структурних складових поверхневого шару металу та виявляється на травленій шліфованій поверхні виробу (рисунок 2.43).



а *б*

Рисунок 2.43 – Вигляд волосовин на поверхні нетравленого (*а*) і травленого (*б*) металу [66]

Наприклад, технологічні і механічні характеристики прокатаних пласких нікелевих анодів і катодів псуються включеннями хімічних сполук сірки, сурми, цинку, свинцю і вісмуту (сульфіди провокують гарячеламкість, оксиди сприяють крихкому руйнуванню при холодній обробці тиском).

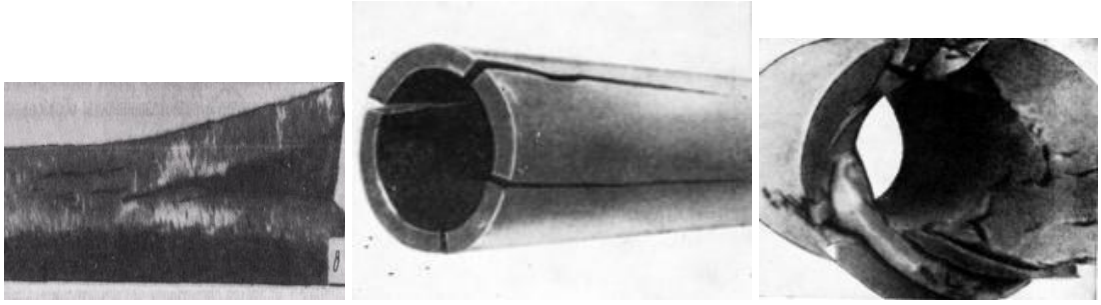
Наявність на виробі волосовин викликає труднощі при нанесенні гальванічних покриттів.

Заходи попередження. Правильний вибір температури та швидкості лиття заготовки для наступної деформації (прокатки, ковки, гарячої штамповки). При виготовленні виробів з нікелю – ретельне проведення окиснювального випалення файнштейна для видалення з металу сірки до вмісту не вище 0,02 % (*див. підрозділ 1.2.1.4*). Необхідно зменшувати напруження розтягнення при деформації.

Усунення дефекту: видалення дефектної ділянки шліфуванням (при глибоких ураженнях – це брак, який не підлягає виправленню).

Несприятлива схема напружено-деформованого стану металу при обробці тиском у сукупності з наявністю в заготовці дефектів внаслідок попередніх перероблень часто зумовлює *об'ємні* порушення суцільності виробу.

Поздовжні розриви – фіксуються часто на кінцях гарячекатаних профілів і труб внаслідок розвитку надглибоких тріщин (рисунок 2.44). Коли стикаються між собою безладно розташовані великі *розриви* стінок в різних місцях труби, частина металу може «загорнутися» на її зовнішню поверхню (див. рис. 2.44, *в*).



а *б* *в*

Рисунок 2.44 – Гарячекатаний прокат з поздовжнім розривом на кінцевій ділянці: *а* – прямокутний профіль; *б* – труба; *в* – вигляд «загорнутої» на поверхню труби частини металу [44, 131]

Причини та заходи з попередження дефекту такі ж, як і при запобіганні прояву поздовжніх тріщин (див. вище).

Усунення. Як правило, усунення таких дефектів на трубних заготовках і готових трубах неможливо, і вони стають непоправним браком. Допускається обрізка частини труби з поздовжніми розривами (і тріщинами) лише в тому випадку, якщо вони розташовані на кінцях виробу (напівфабрикату).

Наскрізні розриви (рисунок 2.45) утворюються *при ОМТ* в місцях, де метал (сталь, вольфрам, молібден та ін.) має різко знижену пластичність. Такими місцями є скупчення неметалічних включень, залишки усадочної пухкості, окиснені внутрішні пузирі та ін. Виникнення цього дефекту напряму пов'язане з порушенням технології виплавки, розкислення і розливки металу, а також його термічної обробки перед ОМТ (*див. також рис. 2.10 та 2.24*).

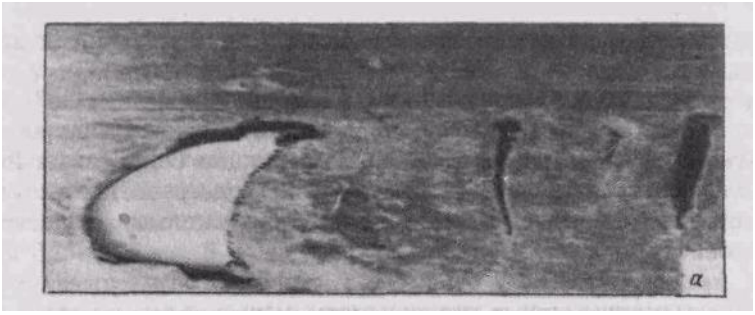


Рисунок 2.45 – Наскрізний розрив на гарячекатаному листі [66]

Іноді на виробах, зокрема – ювелірних, які внаслідок попередньої обробки отримали значні залишкові напруження, в атмосфері парів кислот або хлору через певний час після виготовлення може спостерігатися їх несподіване руйнування. Це так звані «***розриви внаслідок корозійних напружень***».

Причини дефекту такі ж, як і при появі поперечних тріщин. З тих же причин виникає *рвана кромка (див. нижче)*.

Заходи попередження дефекту залежать від причини його виникнення і включають відповідні дії. Зокрема, слід не допускати до деформування заготовки з перепалом; режимом деформації необхідно зменшувати напруження розтягування.

Усунення дефекту: метал з розривами є непоправним браком.

Розшарування – витягнуті, площинні порушення суцільності матеріалу (сталь, алюміній, свинець тощо) різної величини, розташовані всередині продеформованих заготовок уздовж напрямку переважної деформації (рисунок 2.46).

Дефект проявляється при значних разових деформаціях великих поковок, які осаджують в плоских бойках або бойках з неглибокими рівчаками (див. рис. 2.46, *а, б*).

У гарячекатаних сталевих смугах та листах у більшості випадків розшарування можуть бути виявлені тільки при подальшій обробці, наприклад при холодній прокатці або обрізці кромок. У поперечному перерізі листа розшарування можуть виглядати як внутрішні тріщини і супроводжуватися здуттям поверхні (див. рис. 2.46, *в*).

Розшарування у процесі деформації можуть збільшуватись і виходити на поверхню виробу у вигляді тріщин на кромках і торцях (див. рис. 2.46, *г*) або навіть – розщеплення виробу (див. рис. 2.46, *д, е*).

При прокатці сталевих, титанових, свинцевих та ін. труб розшарування, що мають різну протяжність, можуть розташовуватись усередині їх стінки і поширюватись за перерізом і довжиною виробу, не виходячи на її поверхню (див. рис. 2.46, *ж*).

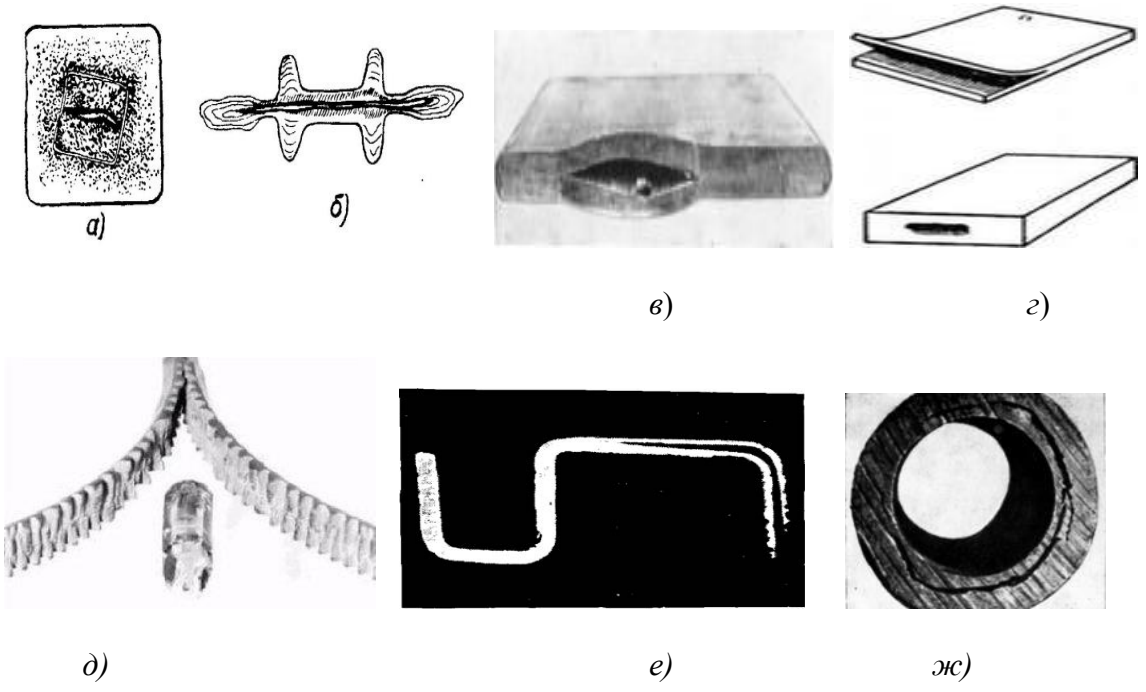


Рисунок 2.46 – Розшарування заготовки: з дефектом перед штампуванням (*а*) та поперечний шліф поковки з розшаруванням і сформованим задирком після штампування (*б*); усередині прокатаної плити (*в)*; вихід розшарування на кромку листа (*г*); розщеплення під час деформації плоского прокату із золотого злитка (*д*); поперечний переріз *s* - подібного профілю з розшаруванням (*е*); розшарування в стінці прокатаної труби (*ж*) [32, 44, 130, 131, 137, 138 та ін.]

При прошивці трубних заготовок з підшипникової сталі на стані поперечно-гвинтової прокатки при надмірно високій температурі можуть виникнути настільки значні розшарування, що це потребує відсортування дефектних заготовок вже на цій стадії. Однак у випадках деформування сталей інших марок дефект може бути виявлений лише у готовій трубі, зокрема, розкритися при подальшому калібруванні, скручуванні, вигині тощо.

Причини виникнення дефекту: зазвичай, це наявність у вихідному злитку усадочної раковини, газових пузирів, рихлості, неметалевих включень у сукупності з несприятливою схемою напружено-деформованого стану металу та температурним режимом його формозмінення. Причиною розшарування труб, крім забруднень металу неметалевими включеннями, може бути локальне скупчення лікватів з таким вмістом легкоплавких домішок, що в цьому місці утворюється перепал, незважаючи на нагрів трубної заготовки під прокатку без явних порушень технології.

Попередження дефекту: використання якісної заготовки з її можливим ремонтом шляхом видалення дефектних місць. Ведення деформації при прийнятному температурно-деформаційному режимі. В деяких випадках при пресуванні масивних виробів розшарування, які раніш утворилися внаслідок напружень, що розтягують, можуть «заліковуватися» к виходу з осередку деформації під дією сил, що стискають.

Усунення дефекту зумовлено можливістю та економічною доцільністю видалення дефектних ділянок виробів. Розшарування розглядаються як дефект у тих випадках, коли вони ускладнюють подальшу переробку і зберігаються в готовому виробі. Найчастіше – це непоправнй брак.

Про негаразди процесів підготовки заготовки до деформації та у зв’язку з нею можуть свідчити дефекти, що проявляються на поверхні продеформованого металу.

Наприклад, наявність порожнин та рихлості у вихідному злитку, що піддається деформації в обтискному стані, може спровокувати ***поперечну хвилястість («гармошку»)*** поверхні блюму або слябу – це періодичні виступи, поперечні до напрямку прокатки. Доцільність наступного (після обтискного стана) деформування таких заготовок потребує аналізу через ймовірність залишкової несуцільності металу (тріщин, розшарувань, свищів тощо) у напівфабрикаті та *нестабільність режиму* обтиснень при наступних операціях прокатки.

Заходи попередження: якісне розкислення металу; повільне нагрівання заготовки.

Спосіб усунення дефекту: вирізка дефектних ділянок заготовки, якщо це технічно та економічно є доцільним.

Специфічним поверхневим дефектом холодноштампованого листового прокату є так звана **«апельсинова кірка»** – наявність невисоких горбів («*хвилястості*»), форма яких нагадує корку апельсина (рисунок 2.47).

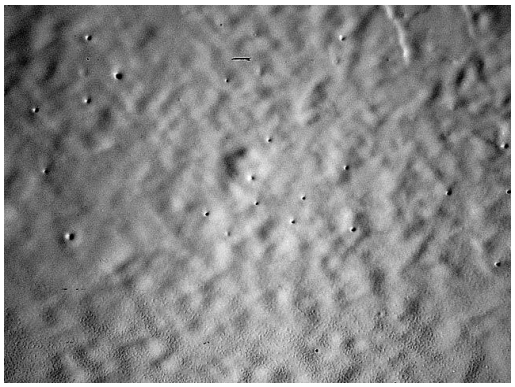


Рисунок 2.47 – Вигляд дефекту «апельсинова кірка» [127, 130]

Цей дефект суттєво утруднює нанесення покриттів на вироби. Його причинами є занадто велика зернистість металу (сталь, золото та ін.), зокрема, внаслідок відпалу металу, який попередньо продеформований з малими обтисненнями. Прояву дефекту сприяє наявність у сталі невеликих включень, наприклад, кремнію та/або напружень розтягнення при листовій штамповці.

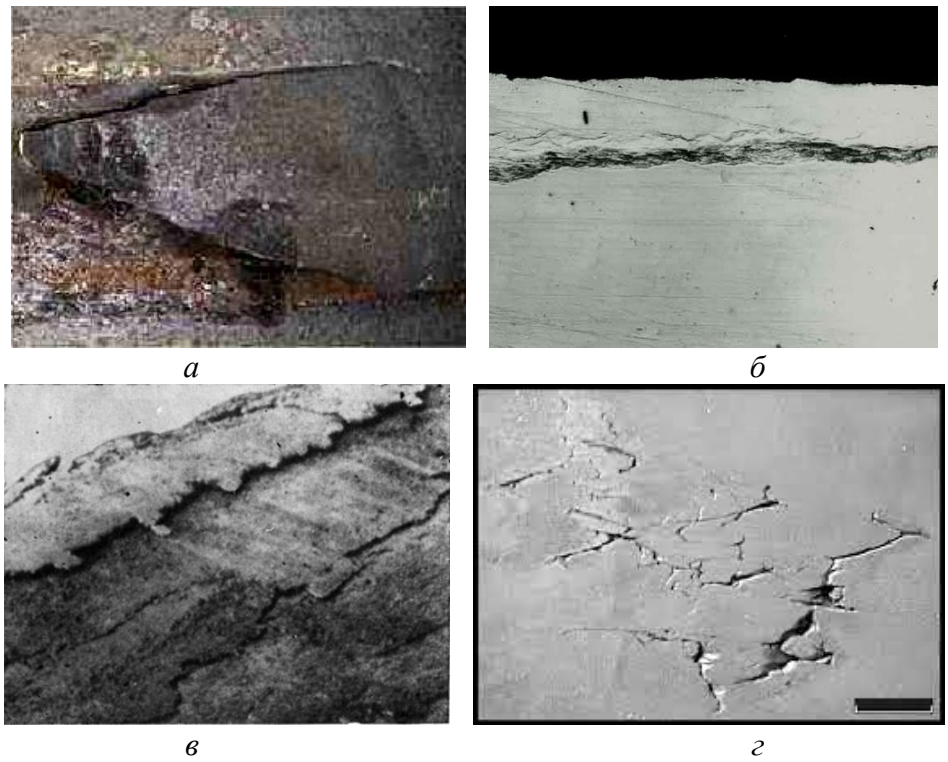
Попередження. Раціональне комбінування процесів термічної обробки та обробки тиском листової заготовки (зокрема – застосування дресируванням з невеликим ступенем деформації перед штамповкою) у добре шліфованих валках.

Усунення. Зазвичай цей дефект є невиправним браком.

Ряд дефектів металу пов'язаний з одночасним з ним деформуванням поверхневих несуцільностей, які утворилися на попередніх операціях обробки.

Розкатана пльона («плівка») – це дефект поверхні, який представляє собою нашарування неправильної язикоподібної форми з нерівними краями, що утворилося внаслідок *розкатування поверхневих дефектів злитку* у вигляді окиснених заливин або бризок металу (рисунок 2.48, *а*). Дефект витягується за напрямком основної деформації (див. рис. 2.48, *а*) згідно зі збільшенням обтиснень. Це плоске поверхневе утворення, вдавлене (вкатане, впресоване) в основний метал та з'єднане з ним лише одним боком.

На поверхні листа зі сталі, вольфраму, молібдену тощо пльона може мати вигляд тріщини (рис. 2.48, *б*). На поверхні труб після гвинтової прокатки при розкатці сторонніх металевих включень (часток) можуть утворюватися поодинокі пльони порівняно невеликої протяжності до (200…300 мм), розташовані за гвинтовою лінією з великим кроком і рівними або розірваними краями.



а *б* *в* *г*

Рисунок 2.48 – Розкатана пльона та напливи [140] (*пояснення позицій – у тексті*)

Часто наявність пльони зумовлена та супроводжується наявністю ***напливин*** ливарного походження (рис. 2.48, *в*) або виступів, які втратили вертикальну стійкість на поверхні заготовки під час їх деформування. Такі місця після деформації можуть нагадувати пльони (рис. 2.48, *г*).

Причини утворення дефекту. У багатьох випадках пльони зароджуються ще в процесі виплавки, розкислення та розливки металу (*див. рис. 2.14*) як скупчення неметалевих включень у приповерхневих шарах металу, через розрив газових пузирів, потрапляння у розлитий метал об’ємів іншої марки сталі і проявляються при наступному деформуванні заготовки. Однак, їх походження може бути зумовлене й тільки операціями технології деформування металу, зокрема, внаслідок неправильної зачистки з формуванням на поверхні заготовки глибоких канавок та ін. Плівки також можуть утворюватися через *недогрів* або нерівномірний нагрів заготовки (*див. вище*). У таких випадках на заготовці можуть утворитися поперечні рванини, а на трубній заготовці – рванини поздовжньої орієнтації з язикоподібними поперечними *відшаруваннями* (*див. нижче*), які при розкатуванні перетворюються на пльони. На зливках або блюмах (слябах) дефект також може утворюватися в результаті *перепалу (див. вище)* через їх тривалий нагрів при підвищеній температурі (вище 1320 °С).

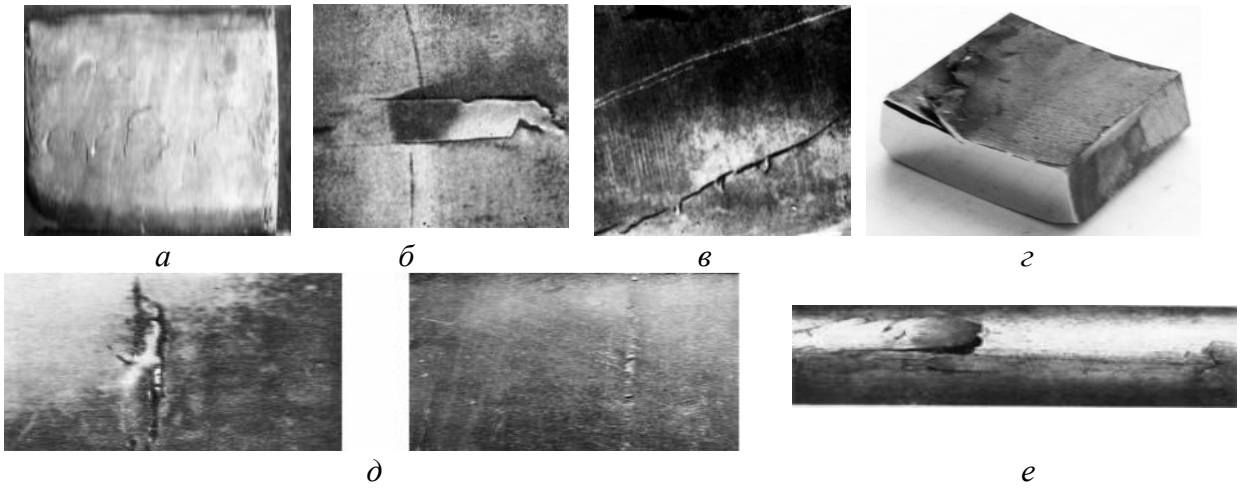
При прокатці трубних заготовок, які мали перепал поверхні, можуть утворюватися грубі пльони групового розташування, переривчасті по довжині та орієнтовані за гвинтовою лінією з великим кроком. В результаті, формується поверхневий дефект, званий ***лускатість через перепал заготовки, або «розкатаний пригар».*** Він представляється дрібними короткими множинними пльонами, які нагадують риб'ячу луску, переважно, з поперечною орієнтацією, розташованими по всій поверхні виробу або на її частині. Краї лускатих пльон хвилясті. Дефект може мати вигляд поодинокої темної плями, яка виникла на поверхні металу при розкатці його перегрітої ділянки.

Заходи попередження: запобігання утворенню пльон на злитках і заготовці; заповнення виливниць рівномірним струменем металу без розбризкування; правильний вибір заготовки та режиму її нагрівання для наступної деформації з недопущенням

перегріву чи перепалу металу; недопущення різких виступів на поверхні заготовки перед прокаткою.

Усунення дефекту – видалення дефекту шліфуванням поверхневої ділянки; при глибоких пошкодженнях – це невиправний брак.

Відшарування ***(«нашарування»*** *– не плутати з «розшаруваннями»!)* – це несуцільності, розташовані на поверхні виробу після його деформації, лише *частково пов'язані* з основним металом та *частково відокремлені* від нього; зазвичай вони витягнуті за напрямом основної деформації (прокаткою, волочінням, пресуванням тощо) та помітні неозброєним оком (рисунок 2.49).



а *б* *в* *г* *д* *е*

Рисунок 2.49 – Вигляд відшарування на поверхнях: блюма (*а*); листа (*б*); ззовні (*в*) та усередині (*г*) круглої труби; сортової сталі (*д*); волоченого прутка (*е*) [127…129, 131, 140]

Під відшаруваннями нерідко розташовуються неметалеві включення, частково – разом з окалиною, або тільки залишки окалини.

Слід мати на увазі, що при холодній (листовій) штамповці поверхневі великі несуцільності («*неспайності*»), безладно розташовані на поверхні металу і лише частково пов'язані з основним матеріалом, у виробничій практиці називають ще «*раковинами*» («*лусочкам*»), а дрібніші – «*відшаруваннями*».

Причини виникнення дефекту. Хоча відшарування проявляються під час остаточної деформації (наприклад, холодною прокаткою), причини їх появи визначаються, насамперед, наявністю дефектів поверхні на заготовках, попередньо одержаних литтям та гарячою деформацією. Суттєвими тут стають металеві бризки на злитку; підкіркові пори та пузирі, раковини, відшарування, неметалеві включення у вихідному сталевому злитку, розташовані поблизу поверхні; пльони на литій заготовці (*див. вище*); закати, утворені при чорнових проходах при прокатці (*див. далі*); занадто глибокі насічки валків у перших калібрах обтискного стану тощо.

При багатоступеневій прокатці на прояв дефекту суттєво впливають невідповідності *на поверхні заготовки:* для холоднодеформованих труб – це гарячекатані або гарячепресовані труби; для холоднокатаного листа – гарячекатані смуги та листи, які мають на поверхні раковини, закати або розриви, підповерхневі або поверхневі неметалеві включення; для дроту – пузирі травлення, які розриваються (розкриваються) при наступній деформації. Тріщини, глибокі риски (*див. далі*) та інші поверхневі пошкодження, що проявляються на заготовках в процесі багатоперехідної холодної деформації, зокрема, титанових труб також можуть призводити до виникнення відшарувань на їх зовнішній або внутрішній поверхні. Тут поява раковин може проявлятися в *нашаруванні* матеріалу в формі помітних виступів, які частково зв’язані з основним металом. Відшарування (та раковини) більшою чи меншою мірою, але завжди

знижують придатність прокату до зварювання. Ці дефекти є серйозними пороками і при волочінні металу. Вони сильно погіршують зовнішній вигляд, знижують надійність і довговічність виготовлених з такого металу виробів.

Попередження: застосування бездефектних або зачищених вихідних заготовок; короткочасне травлення та застосування інгібіторів у травильних ваннах; застосування адекватного калібрування інструмента, що попереджає утворення закатів і пошкоджень поверхні заготовок; дотримання технології холодної деформації (прокатки, волочіння тощо) з метою попередження поверхневих дефектів, які можуть призводити до раковин.

Усунення. Такі дефекти, у залежності від їх кількості, величини та розташування, можуть бути усунені шляхом вирізки дефектних місць смугової сталі або відсортуванням у разі виготовлення листів. Окремі дефектні ділянки можуть бути відремонтовані абразивною обробкою, однак так, щоб не були перевищені задані допуски за критичними розмірами виробу.

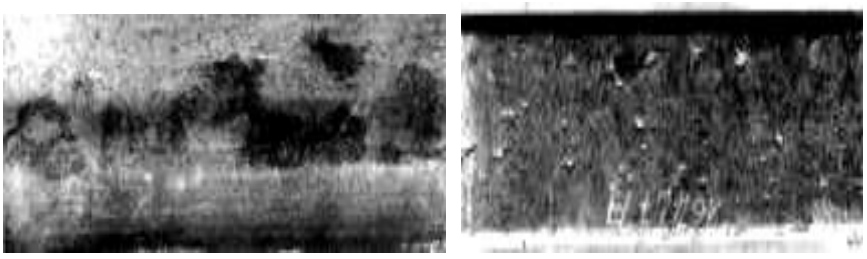
Металовироби (смуги, листи, труби тощо) із сильно розвиненими відшаруваннями, як правило, бракують.

Розкатане налипання – дефект поверхні виробу у вигляді розкатаних і налиплих на поверхню виробу бризків рідкої сталі, застиглих раніш на стінках виливниці, шару або скупчень часток металу з інструменту. Після штампування такі утворення можуть залишитися на поверхні поковок, а після прокатки – на розкаті з утворенням *раковини* або *прокатної пльони (див. вище)*.

Попередження дефекту – моніторинг якості заготовки та своєчасне очищення поверхні заготовки та інструменту від сторонніх матеріалів (окалини, часток металу тощо); застосовування ефективних технологічних мастил при обробці металу тиском; дотримання регламентованого температурного режиму деформації тощо.

Усунення дефекту – поверхневою зачисткою або травленням. У залежності від глибини дефекту – зниження сортності або бракування виробу.

Вкатана окалина («залишкова окалина») – проявляється як розташовані безладно або рядками по довжині довгомірних продеформованих виробів (поковок, сортових профілів прутків, листів, стрічки, дроту тощо) темні місця на їх поверхні – вкраплення або стежки оксидів. Вдавлювання на металі на цих ділянках присутні, але візуально можуть не ідентифікуватися (рисунок 2.50). Відповідні поглиблення на поверхні виробу виявляються тільки після видалення вкатаної окалини. Цей дефект погіршує зовнішній вигляд поверхні і заважає якісному нанесенню поверхневих покриттів, зокрема – на холоднокатаний лист.



а *б*

Рисунок 2.50 – Вигляд вкатаної окалини на поверхні виробу одразу після його деформування (*а*) та після травлення (*б*) [127…129, 131, 140]

Слід зауважити, що дефект поверхні металовиробу, пов'язаний з наявністю *вкатаної окалини*, називати «залишками окалини» не зовсім коректно, оскільки він може бути наслідком як «окалини після термічної обробки» (*див. рис. 2.27*), так і дійсних

«залишків окалини» після неякісного травлення (*див. нижче*) і проявляється після видалення окалини.

Причинами виникнення стають залишки первісної окалини (яка з'являється через несприятливий режим нагріву) внаслідок її сильного схоплювання з поверхнею заготовки, нерівномірний залишковий шар окалини; недостатнє обтиснення заготовки в окалиноломачі; неякісна робота гідрозбиву окалини; неякісне травлення (*див. нижче*).

Заходи попередження (у залежності від причини виникнення дефекту): підбір сприятливої захисної атмосфери та/або захисних покриттів при термічній обробці; повне видалення окалини з поверхні металу травленням, механічною обробкою або гідрозбивом безпосередньо перед деформуванням тощо.

Усунення дефекту: шліфуванням або токарною обробкою у межах допуску; додаткове травлення. Однак застосування цих засобів не завжди доцільно і потребує оцінки можливості використання виробів з урахуванням значущості дефекту щодо їх призначення. Застосування металу з такими дефектами з урахуванням їх величини і характеру розташування (частоти) можливе при невідповідальному призначенні продукції зі зниженням її сортності.

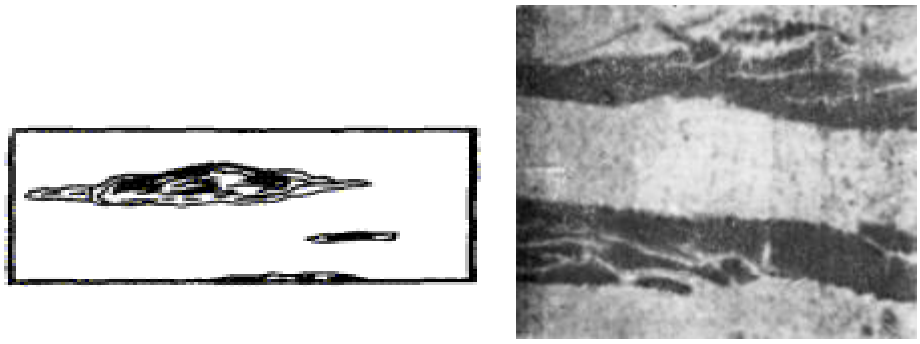
Розкатана кірочка – вкатування в поверхню виробу локального відшарування кірочки металу, яка знаходилась на злитку (заготовці) та зберіглася до чистового оброблення. Дефект за суттю може розглядатися як прояв однієї з попередніх невідповідностей.

Попередження: запобігання наявності кірочки на заготовці.

Усунення дефекту: видалення дефектної ділянки на виробі.

Розкатане забруднення поверхні *(«наліт шламу», «плями травлення»)* – дефект поверхні (рисунок 2.51), що представляє собою явні більш темні, безладно розподілені плями, розташовані поздовжньо за напрямком основної деформації. Дві «додаткові» назви дефекту, що наведені у дужках, які іноді використовуються у виробничій практиці, неточно його характеризують, оскільки вони притаманні саме процесу травлення (*див. нижче*).

Причини дефекту: порушення технології травлення, очищення та промивання заготовки. Його прояв *є наслідком* розкатки поверхні металу, забрудненої м'якими неметалевими включеннями (осадом із солей та оксидів заліза, спеченим тальком, полімеризованої олії та іншими продуктами взаємодії заліза з кислотами та мастильними речовинами тощо), які не були попередньо вилучені з первісної заготовки (злитку). Такі плями не пов'язані з поглибленнями на поверхні металу, і працездатність ділянок металу з цими дефектами не знижується.



а *б*

Рисунок 2.51 – Вигляд розкатаних забруднень на продеформованому металевому виробі (*а*) та збільшений фрагмент поверхні із забрудненням (*б*) [127…129, 131, 140]

Попередження дефекту: запобігання попадання частинок шлаку або вогнетриву у злиток; позапічне рафінування металу; дотримання технології технічного контролю якості заготовки з вилученням забруднень з її поверхні. Дотримання технології травлення та промивки, зокрема, розпушування гарячекатаних рулонів (бунтів катанки) перед травленням. Використання «прохідного» травлення з перемоткою рулону. Своєчасна зміна мастил та емульсії, що застосовуються при ОМТ. Повне видалення мастила і емульсії з холоднокатаного металу перед термічною обробкою. Використання емульсії, яка розкладається при холодній прокатці і не залишає осаду (плям) після нагрівання. По можливості, скорочення часу проміжного зберігання заготовки (особливо, після травлення).

Усунення дефекту: повторне травлення і прокатка на менший розмір; зачистка поверхні одним з відомих способів. Після видалення з поверхні виробу розкатаних забруднень, він, як правило, придатний для подальшого використання за призначенням.

Дефекти, що зумовлені суттєвими порушеннями режимів та технології обробки металу тиском

Окрім дефектів, представлених вище, причиною яких є, так би мовити, комплексний вплив несприятливих факторів *послідовних металургійних перероблень* (плавлення, лиття, попередня обробка тиском, термічна обробка, оздоблення), ряд *специфічних* невідповідностей виробів (напівфабрикатів) зумовлюється порушеннями технологічних режимів, навіть при використання якісної заготовки. При цьому мається на увазі, що критичні невідповідності попередніх перероблень були своєчасно вилучені. Тому тут мова йде, здебільшого, про дефекти, які зумовлені *тільки операціями самих технологій процесів обробки тиском.*

Певна кількість *аналогічних видів* дефектів знайшла відображення у тексті раніше. Серед таких дефектів характерними є й ті, що пов’язані з невірним вибором складу метала, використанням спеціального обладнання, яке забезпечує безпосереднє деформування заготовки, а також рядом операцій оздоблення: зварювання, порізка, формування рулонів (бунтів), травлення, нанесення покриттів тощо. Частина їх проявляється у спотворенні форми та розмірів виробу, зокрема, внаслідок помилок при настроюванні обладнання та порушень суцільності металу. Інші – у «травмуванні» *поверхні металу* при несприятливому контакті напівфабрикату чи виробу з іншими об’єктами.

Перш за все, розглянемо відповідні дефекти напівпродукту та металовиробів, які можуть стати критичними при визначенні придатності продукції внаслідок порушень вимог нормативно-технічної документації (НТД).

У ряді випадків бракувальною ознакою (дефектом) може стати **неякісна ідентифікація (маркування, таврування)** якісних виробів, що представляє собою нечітке і неповне нанесення позначень на поверхню виробу ударними металевими клеймами або фарбою, або іншими засобами.

Причини: неякісні нечіткі (зношені) клейма, недостатнє ударне навантаження при тавруванні; незадовільне зчеплення фарби з поверхнею виробу через відсутність знежирення її перед маркуванням; незадовільний стан трафаретів, недбалість персоналу тощо.

Попередження виникненню дефекту: дотримання регламентованих норм простежуваності та ідентифікації продукції [1].

Усунення дефекту: відокремлення продукції з вадами маркування; за можливості – заміна ідентифікатора (наприклад, шляхом вилученням тавра шліфуванням або зміною бирки тощо); оцінка доцільності зниження сортності аж до бракування продукції.

Частою бракувальною ознакою (дефектом) може стати критичне ***невиконання вимог НТД щодо показників фізико-механічних властивостей металу виробу***, тобто межі міцності, межі текучості, відносного видовження або стискання, твердості, ударної в'язкості, кількості згинань (для дроту), інших технологічних проб на зразках, відібраних від виробів.

Причиною таких дефектів можуть стати: помилки при використанні металу неналежного хімічного складу (наприклад, марки сталі). Якщо хімічний склад металу витриманий, то причинами відхилень за структурою і властивостями можуть стати порушення режимів деформації (мала або завелика ступінь деформації) особливо, в останніх пропусках. Зрозуміло, що структура та властивості металу також суттєво залежать від реалізації регламентованих режимів деформації, термічної або термо-механічної обробки (в тих випадках, коли вони застосовуються).

Попередження виникненню дефекту: ретельне дотримання вимог НТД до підготовки та ведення технологічного процесу обробки металу.

Усунення дефекту: у залежності від його походження, величини, значущості, виду та призначення виробу, технічної можливості та економічної доцільності тощо – додаткове оброблення, оцінювання придатності, зниження сортності аж до відбракування продукції.

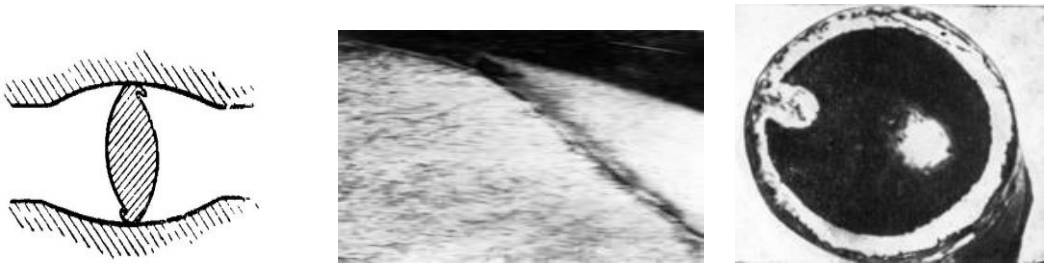
Спотворення *якості* металовиробів може стосуватися не тільки фізико-механічних властивостей металу та самого виробу, але й якості поверхні так само, як і форми та розмірів виробу, мотка (для стрічки та листа) або бунта (для дроту). Зазвичай невиконання відповідних вимог пов’язують, в основному, з порушеннями режиму та технології деформування металу та вадами його контакту з інструментом (елементами обладнання).

Значна кількість видів подібних дефектів стосується спотворення поверхні продукції, що може стати критичним для її використання за призначенням.

Із втратою поздовжньої стійкості елементів профілю при ОМТ пов’язана поява ***складок*** (рисунок 2.52).

Складки – на поверхні виробів зазвичай представляють собою придавлені виступи металу, що утворилися в процесі його деформування. Візуально, це вузькі прямі або слабо викривлені лінійні спучення, зокрема, у внутрішніх і зовнішніх кутах над або під опорною поверхнею профілю. У залежності від виду обробки тиском складки можуть проявлятися по-різному та мати різні специфічні назви.

При об’ємній штамповці (висаджуванні) складки зустрічаються в місцях різкої зміни поперечного перерізу виробів або за профілем різьблення внаслідок переповнення рівчака інструмента металом.



а *б* *в*

Рисунок 2.52 – Вигляд складки: схема утворення (*а*) та вигляд на поверхні виробу [137] (*б*) при куванні; *в* – на перетині труби [44]

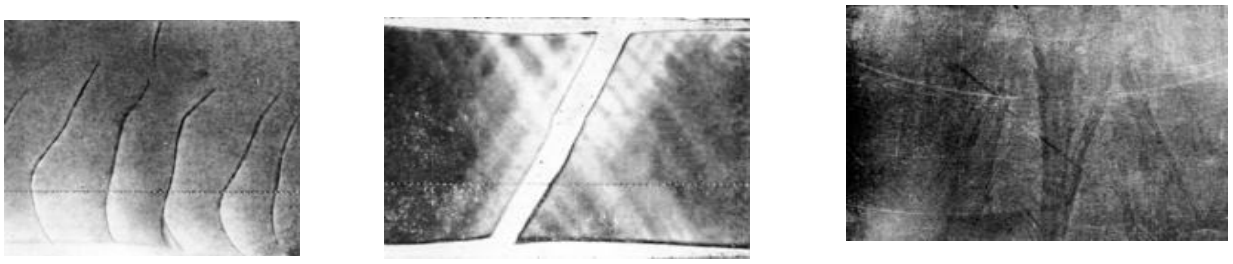
На поверхні поковки цей дефект має вигляд звивистої лінії, як правило, добре видимої та розташованої перпендикулярно до напрямку видовження (*див. рис. 2.52, б*). На

шліфі фіксується характерний перегин волокна металу в основі складки. Він представляє із себе, у більшій чи меншій мірі, розвинену несуцільність металу з окисненою поверхнею, що йде під гострим кутом вглиб поковки.

Причини виникнення за природою появи – втрата поздовжньої (для туби – тангенціальної) стійкості металу через неправильне наповнення ним осередку деформації (*див. рис. 2.52, в*) загортання задирків, отриманих на попередніх переходах (*див. рис. 2.52, а*); ексцентричне розміщення заготовок у попередньому та наступному калібрах (рівчаках); різкі удари при протягуванні або обкатці заготовок; невідповідність конструкції калібру (рівчаку, штампу) формі перетину заготовки; перекіс заготовки у калібрі (рівчаку, штампі); робота на несправному устаткуванні.

Спосіб запобігання виникнення – дотримання вимог НТД щодо технології та використання обладнання, старанна та кваліфікована робота персоналу.

Складки на стрічці (смузі) – *холоднокатаній, рідше – гарячекатаній* мають вигляд ліній або смуг, які вирізняються за своїм блиском і шорсткістю від іншої поверхні листової продукції з м'яких (низьковуглецевих) нелегованих сталей або виробів, виготовлених з них (рисунок 2.53).



а *б* *в*

Рисунок 2.53 – Вигляд складок (*а*), складки з лініями плинності (*б*) на поверхні листового прокату та «візерунки дресирування» (*в*) при дресируванні листів [127, 129, 130]

Складки та лінії плинності називають також «*круглим загином*», або «*лініями перегинів*», якщо вони зустрічаються на широкій холоднокатаній смузі. Вони можуть спостерігатися з одного боку, з двох сторін або по всій ширині прокату. Складки, що виникають через погане проходження листового прокату по елементах обладнання при прокатці і змотуванні позначають часто як «*фалди*».

При дресируванні складки і «*візерунки дресирування*» проявляються на поверхні смуг і листів у вигляді «морозних узорів» (*див. рис. 2.53, в*), розташованих в поздовжньому і поперечному напрямках, при невідповідності геометрії вихідної смуги параметрам обробки. Складки ускладнюють отримання гладкої поверхні холоднокатаних сталевих смуг і тонких листів або виробів, виготовлених з них (особливо, якщо до того ж виникають ще й лінії плинності – *див. рис. 2.53, б*). Через наявність на заготовці *складок* та *візерунків дресирування* може бути пошкоджена поверхня валків. У свою чергу, наступна прокатка (дресирування) пошкодженими валками може призвести до отримання продукції, що має на поверхні так звані «*відбитки валків*» чи «*сліди ударів*» (*див. нижче*). Смуги та листи з «візерунками дресирування» і «складками дресирування» непридатні або обмежено придатні для нанесення покриттів.

Загальною причиною виникнення дефекту стає зсув металу в результаті невідповідності форм і об'ємів на окремих етапах його формозміни. Це особливо характерно при використанні сталей, які мають чітко виражену область переривчастого плину (зумовленого різницею між значеннями верхньої та нижньої межі текучості) як у відпаленому, так і в зістареному стані. В результаті, суміжні об’єми металу деформуються по-різному, що супроводжується появою вказаних складок та напливів.

Прояву дефекту сприяють: занадто сильний вигин смуги у натяжному барабані (при прокатці, травленні і т. д.), що має занадто малий діаметр; злипання витків рулону;

порушення плавності переміщення металу валками при холодній прокатці та дресируванні; непаралельність осей змотування та прокатки; занадто вільний хід смуги, *хвилястість* її кромок, *коробуватість*, *шаблеподібність* (*див. нижче*); неправильне шліфування та профілювання валків; недотримання режиму натягу та змотування в умовах дресирування.

При усуненні чітко вираженої області переривчастого плину низьковуглецевої сталі, наприклад, шляхом холодної прокатки зі ступенем обтиснення понад 20% після рекристалізаційного відпалу, лінії плинності і складки на деякий час усуваються, але потім внаслідок старіння вони знову можуть проявитися. При цьому, загальна деформівність металу сильно знижується, і глибока витяжка стає ледь можливою.

Попередження прояву дефекту: дотримання відповідності товщини, профілю смуги і листа профілю застосованих валків та діаметру барабану, що змотує; уникнення різких перегинів і спучування при виготовленні, транспортуванні і зберіганні прокату; дресирування смуг і листів після рекристалізаційного відпалу; зменшення натягу змотування при дресируванні, не допускаючи втрати стійкості елементами виробу або поверхневими шарами металу; за можливості, використання сталі, спеціально розкисленої алюмінієм, яка є стійкою проти старіння.

Усунення дефекту. Наявні на смугах або листах незначні лінії плинності можуть бути усунені шляхом холодної прокатки з більш високим ступенем обтиснення або шліфуванням. Незначні складки можна усунути тільки шляхом подальшої холодної прокатки смуг з металу, який попередньо був підданий нормалізації.

При значному прояві дефекту на листовій продукції можлива вирізка дефектних місць, але, як правило, це невиправний брак.

Деякі особливості прояву *складок* мають місце при інших умовах деформування металу.

Складка на трубі представляє собою прогин з поздовжнім «западанням» стінки труби (*див. рис. 2.52, в*) й утворенням ***ужиму (затиску)*** поздовжньої орієнтації різної протяжності та глибини. Подальше деформування труб з ужимами призводить до дефекту, який на зовнішній поверхні має вигляд поздовжньої тріщини (*див. нижче*).

Причини появи дефекту зумовлені втратою тангенціальної стійкості поперечного перетину труби у процесі прокатки із завеликим обтисненням за діаметром, зокрема, в редукційному стані, а також робота на зношених дорнах, занадто сильній хвилястості труб, попередньо отриманих пілігримовою прокаткою. Складки на трубі також можуть з’явитися внаслідок гальмування поверхневих шарів металу через неправильні ступінчасті зміни швидкості обертання валків у редукційному стані (особливо при редукційно-розтяжній прокатці), при використанні сильно деформованої труби-заготовки, можливо – зім'ятої на попередніх етапах прокатки; при холодному волочінні без оправки тонкостінних труб через занадто велике обтиснення по діаметру.

Запобігання виникненню дефекту залежить від причини прояву дефекту і може, зокрема передбачати використання незім’ятої заготовки; зменшення подачі та ступеня деформації; вибір заготовки меншого діаметру; моніторинг та своєчасну заміну зношених дорнів тощо.

Усунення дефекту: труби зі складкою (із «запалою» стінкою) бракують. При невеликій протяжності такого дефекту на кінці труби можлива його вирізка.

Поздовжні зморшки (рисунок 2.54) – дефекти поверхні у вигляді розташованих хаотично груп поздовжніх поглиблень і виступів, що чергуються, в основному, по всій довжині виробу, переважно в зоні, яка відповідає роз'єму інструменту. На поперечному мікрошліфі зразку металу дефект має вигляд порожнин із закругленими кінцями, частково

заповнених окалиною. В зоні дефекту іноді спостерігається місцеве збільшення зневуглецьованого шару.

Дефект може мати вигляд *закатаних складок (див. вище)*, а на внутрішній поверхні труб – вигляд рисок (*див. нижче*).

При прокатці труб такі риски можуть з'являтися у вигляді «***отесу,*** або ***стирання***» (локальних ***зрізів*** поверхні труби), що являє собою групу поздовжніх *складок*, паралельних одна одній, розташованих в поздовжньому або поперечному напрямку труби.

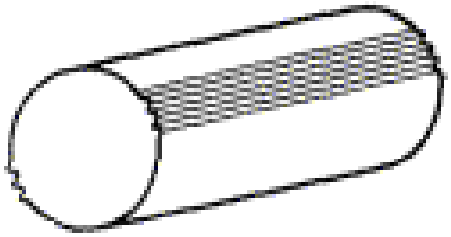


Рисунок 2.54 – Вигляд поздовжніх зморшок на поверхні круглого прокату [127, 129, 131]

Причинами виникнення дефекту при *поздовжній прокатці труб* таким же чином, як і в попередньому випадку, стає прояв місцевої втрати тангенціальної стійкості профілю (на трубах – стінки). Факторами, які можуть ініціювати прояв цього дефекту можуть стати навари металу на поверхні оправки; робота на зношеній оправці; застосування забрудненого сольового мастила; занижена температура гільз; перекіс або зсув валків трубопрокатного стану через вироблення підшипників. *При сортовій прокатці* прояву дефекту, здебільшого, на тонкій стінці профілів сприяють переповнення калібрів металом, завищені обтиснення бічних граней прокату, зокрема, в універсальних клітях прокатних агрегатів; неправильна настройка валків, розбіжність роз'ємів калібрів.

Спосіб запобігання виникненню – вірне налаштування обладнання та дотримання технологічних режимів деформації.

Спосіб усунення: при прокатці труб зморшки майже завжди присутні та припустимі, якщо не виводять товщину стінки труби за межі мінусових допусків. При прокатці сортової продукції наявність такого дефекту – бракувальна ознака.

Між циклами деформування та після обробки тиском напівфабрикати та продукція піддаються операціям транспортування, де є ймовірність додаткового травмування їх поверхні з утворенням западин та/або виступів. Відповідні дефекти самі по собі можуть стати критичними при оцінці відповідності виробів вимогам НТД, а також перетворитися у ***порушення суцільності виробу*** при наступних циклах ОМТ.

Підріз (рисунок 2.55) – дефект поверхні у вигляді значного поздовжнього поглиблення, розташованого по всій довжині або на окремих ділянках поверхні виробу (прокату).

При прокатці труб «*підрізом*» іноді називають й інші за виглядом та походженням дефекти поверхні: *поздовжню стрічку*, а також (*не зовсім коректно!*) – вузьке та тонке *відшарування* різної довжини, яке може мати місце як на зовнішній, так і на внутрішній поверхні труби. Таке відшарування одним кінцем сполучене з металом основи, а решта є прилеглою до тіла труби. Край такого «підрізу» буває злегка тупим або зазубреним. У поперечному перерізі його порожнина розташовується під кутом до поверхні, має гладкі стінки, плавно звужується вглиб. Порожнина може бути заповнена окалиною, змін мікроструктури навколо неї або немає, або може бути незначне зневуглецювання.

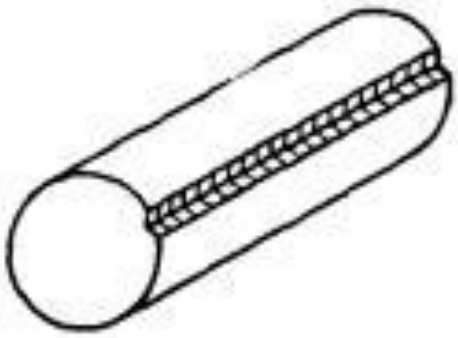


Рисунок 2.55 – Вигляд дефекту «підріз» на круглому прокаті [127…129]

Дефект буває поодиноким і груповим. При гвинтовій прокатці такий дефект орієнтований по гвинтовій лінії з кроком, який відповідає величині подачі заготовки у валках прошивного стану за один її оберт, помноженої на коефіцієнт видовження.

Причини виникнення: неправильна настройка валків та (або) привалкової арматури; одностороннє перекриття калібру (взаємний зсув калібрів у напряму осей валків). При прокатці труб – незадовільний стан поверхні валків косовалкових станів; гострі кромки і навар металу на оправці; неправильна установка оправки в осередку деформації; ексцентричний внутрішній отвір оправки або овальна оправка; вигнутий стрижень або збільшений діаметр наконечника; кут конусності розкатної ділянки оправки більше кута вихідного конуса валків; низька температура заготовок при прошивці; нещільне прилягання напрямних лінійок до валків; місцеве вищерблювання країв лінійок; незадовільна якість поверхні заготовки (наявність пльони).

Попередження виникнення дефекту: дотримання вимог НТД щодо технології та використання обладнання та оснащення.

Спосіб усунення – переведення продукції в брак.

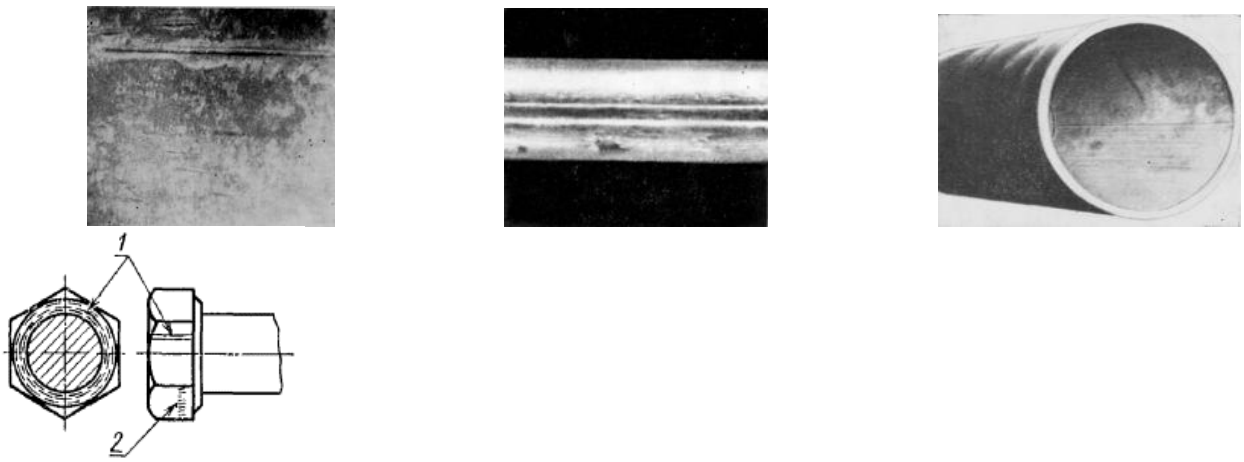
Риски представляють собою неглибокі (часто – в межах допуску) поверхневі поздовжні поглиблення з рівними краями і тупим кінцем одиничного або групового розташування, яке нерідко видно на всю глибину дефекту. У поперечному перетині риска має вигляд чашеподібної порожнини з гладкими стінками. У поглибленнях не спостерігаються сторонні включення. Дефект не супроводжується зміною структури металу. Іноді «*рисками*» називають дрібні відкриті тріщини на поверхні поковок, що утворюються при нагріві і наступному травленні.

Найчастіше риски проходять паралельно осі довгомірного виробу (рисунок 2.56, *а*). При стисканні на подальших операціях ОМТ краї рисок можуть зближуватись аж до утворення закатів (*див. нижче*), поверхневих тріщин (*див. нижче*) або волосовин. *На трубах* риски можуть розташовуватись, як на зовнішній так і внутрішній поверхні (рис. 2.56, *б, в*). *На кріпильних виробах*, що отримані холодним висаджуванням, можуть проявлятися риски як поздовжні і кільцеподібні, так і поперечні (рис. 2.56, *г*).

Причиною утворення рисок та подряпин зазвичай стають: нерегламентований контакт поверхні виробу з іншими твердими поверхнями, наприклад, з неврегульованою або зношеною валковою арматурою при трубній чи сортовій прокатці; волочіння крізь нерівномірно зношену волоку; налипання матеріалу на інструмент (валки, оправку) через нестачу мастила; застосування забруднених технологічних мастил тощо.

Запобігання: використання справного інструменту, оснащення та арматури, правильне їх налагодження; очищення інструменту від налипань та наварів; використання якісного технологічного мастила.

Усунення дефекту. Неглибокі зовнішні риски (подряпини) можуть бути видалені шліфуванням у межах допуску на певний розмір зі зниженням сортності продукції. Якщо риски знаходяться поблизу кромок листа, можливим є їх обрізання.



а *б* *в* *г*

Рисунок 2.56 – Вигляд риски, прикатаної на поверхні сортового прокату (а), на зовнішній (б) і внутрішній (в) поверхні труби; *г* - риски на головці болта після холодного висаджування (1 – поздовжні; 2 – поперечна) [129, 134, 137]

Усунення внутрішніх дефектів на трубах найчастіше неможливо (крім випадків використання спеціального шліфувального обладнання для труб з високолегованих сталей). В останньому випадку рішення щодо придатності труб до використання за призначенням приймається урахуванням вимог НТД до них.

Сильний прояв *риски* на виробі у виробничій практиці називають ***задиркою («задиром»).*** Цей дефект слід відрізняти від *«задирки при розрізанні»! – див. нижче*). Задирка при ОМТ представляє із себе дефект поверхні продеформованого виробу у вигляді широкого поздовжнього поодинокого або групового поглиблення з нерівним дном і краями, що утворився внаслідок впливу гострих частин обробляючого інструменту (наварів на ньому), направляючої арматури або зіпсованої поверхні транспортуючих роликів (рисунок 2.57). *При виготовленні кріпильних виробів* задирками називають гострий, у вигляді гребня виступ, що утворюється при нарізанні різьби, прорізці шліца гвинта, отворів під шплінт тощо.

Великі задирки на заготовці можуть *при наступній прокатці* викликати появу *закатів* (*див. нижче*).

Рисунок 2.57 – Вигляд задирки та рябі (поряд з нею) на поверхні прокатаного виробу [44, 127, 129, 131]

Заходи попередження. Дотримання технології виготовлення виробів на справно налаштованому обладнанні.

Усунення: невеликі задирки видаляють механічним обробленням, а при значних їх розмірах усунення може стати неможливим, що зумовлює остаточне відбракування продукції.

Продир – являє собою поздовжнє поглиблене (частково – аж до наскрізності) порушення суцільності поверхні виробу з нерівним дном механічного походження, розміри якого по довжині і ширині перевершують розміри задирки (*див. вище*) і можуть бути до кількох десятків міліметрів, а глибина до декількох міліметрів (рисунок 2.58) . На трубах дефект може мати довільну форму та розташування.

Рисунок 2.58 – Вигляд продиру на поверхні прокатаного виробу [44, 127, 129, 131]

Заходи попередження. Дотримання технології виготовлення виробів на справно налаштованому обладнанні.

Усунення: іноді продири вдається усунути механічним обробленням у межах допусків на розміри виробу; частіше – це непоправний брак.

Подряпини – це локальні світлі заглиблення глибиною 0,2…0,5 мм з неправильною формою та довільним напрямом розташування на поверхні виробу, довжина яких багаторазово перевищує ширину.

Істотних структурних змін в місці подряпин не виявляється. Дефект на мідних та алюмінієвих стрічках може мати вигляд ряду паралельних штрихових поверхневих смуг та іноді носить назву «***насічка***». На механічні і корозійні властивості виробів насічка не впливає, але помітно погіршує їх зовнішній вигляд.

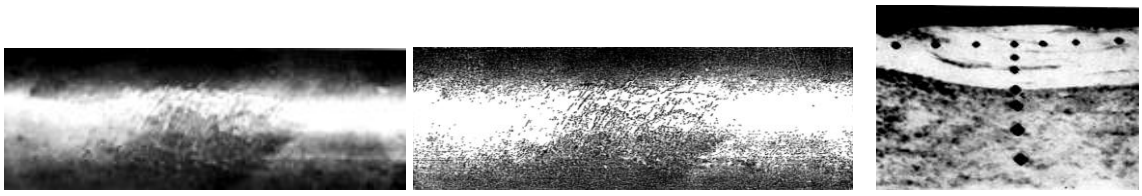
Подряпини можуть призводити до поверхневих поздовжніх тріщин при подальшій холодній деформації (наприклад, при волочінні труб).

Причинами виникнення дефекту стають: механічні пошкодження, у тому числі, внаслідок поверхневого впливу гострими частинами обробляючого інструменту, направляючої арматури та зіпсованої поверхні транспортуючих роликів; *при пресуванні труб* – через попадання уламків склошайб усередину гільзи; налипання металу на голку; наявність задирок на торці гільзи після експандирування; а також при складуванні та транспортуванні металу. Часто *подряпини* та *насічка* виникають *у процесі змотування* (з вібрацією) рулону листового металу або бунта довгомірного сортового прокату (дроту) внаслідок переміщення окремих витків смуги один відносно одного при недостатньому її натягненні.

Попередження. Використання справного інструменту, оснащення та арматури, правильне їх налагодження. Видалення задирок на інструменті. Використання при пресуванні склошайб технологічного мастила відповідного розміру. Щільне намотування рулону (бунта), особливо – внутрішніх витків. Забезпечення рівномірного, відносно малого натягнення смуги при змотуванні в рулон (бунт). Дотримання правил складування та транспортування продукції.

Усунення. Повністю дефект вилучити неможливо. Він погіршує зовнішній вигляд поверхні виробів і є неприпустимим в тих випадках, коли глибина залягання дефекту перевищує допуски. Вибірково на смугах дефект можливо усунути шляхом вирізки, а на листах – шляхом відсортовування. Оскільки подряпини при волочінні не порушують структуру основного металу, то можлива їх локальна зачистка без зняття стружки з урахуванням глибини і форми продукції. Для листів, що використовуються для виготовлення декоративних виробів, подряпини є неприпустимим дефектом.

При незначній глибині (зазвичай, менше за величину допуску) та на обмеженій площі поверхні виробів подряпини можуть виступати як **потертість *(стирання, зішліфовані ділянки)*** – це локальні абразивні ушкодження поверхні (рисунок 2.59) у вигляді місцевого порушення блиску або скупчень дрібних *подряпин*, що утворилися при терті витків стрічок, листів, смуг, труб, прутків і дроту із зовнішніми твердими об'єктами (сусідніми витками того ж самого металу, елементами обладнання, підлогою тощо).



а *б* *в*

Рисунок 2.59 – Вигляд потертих ділянок на зовнішній поверхні труби з підшипникової сталі (*а, б*) та відповідні місцеві структурні перетворення поверхневого шару (*в*) [44, 127, 129, 131]

Локальне утворення потертості, зокрема, на виробах з підшипникової сталі може супроводжуватись сильним розігрівом металу і відповідними структурними перетвореннями (*див. рис. 2.58, в*), які можуть бути критичними для тонкостінних труб відповідального призначення.

Попередження. Дотримання правильності транспортування і складування, моніторинг та своєчасне очищення поверхні інструменту. Застосування напрямних лінійок з антифрикційним покриттям, зокрема, олов'яно-цинковою бронзою. Поверхня контакту між механізмом перевезення і продукцією має бути виготовлена з м'якого металу або покрита «м'яким» матеріалом (наприклад, деревиною). Труби, що мають занадто велику кривизну, слід попередньо правити на пресі. Забезпечення проходження без прослизання довгомірного виробу крізь правильну машину, зокрема, очисткою від залишків мастила. При складуванні підйом виробів має бути вертикальним для забезпечення захисту від тертя з ґрунтом, підлогою цеха або з іншими об'єктами. Якщо застосування ланцюга або каната при підйомі неможливо уникнути, потрібно використовувати підкладки або покриття з пластику або іншого захисного нешкідливого матеріалу. Перев'язка (якщо її наявність регламентована НТД) має бути з тканини або з іншого неметалевого матеріалу. Зберігання металургійної продукції потрібно здійснювати на стелажах (*див. підрозділ 1.2.2.2*), бажано – в один шар на деревині, гумовому килимку або на іншому м'якому матеріалі. Одиниці продукції доцільно відокремлювати одна від одної «м'якими» прокладками (наприклад, виготовленими з пластику, картону тощо). При транспортуванні металовиробів вантажівки та залізничні вагони мають бути оснащені пристроями щодо призначеного перевезення (наприклад, мати обмежені «заглиблення» або дерев'яні «рами») для запобігання руху одиниць продукції та їх контакту з іншими об'єктами.

Усунення дефекту – при масовому виробництві усунути зовнішній прояв дефекту майже неможливо. У критичних випадках можлива частково зачистка подряпин

шліфуванням, якщо це є економічно доцільним і не виводить розміри виробу за межі допусків На трубах це можливе лише із зовнішньої поверхні; з внутрішньої – дефект усуненню не підлягає. Зміна структури металу може бути виправлена повторною термічною обробкою.

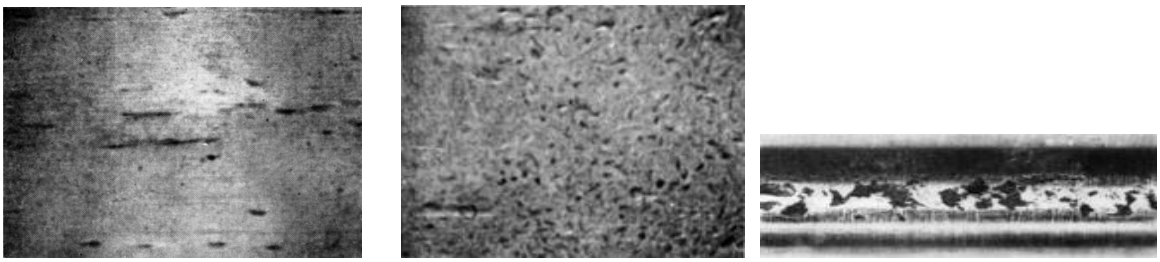
Шорстка поверхня *(«матовість», негляНсуватість)* – шорстка, нерівна поверхня, завищена висота шорсткості, що супроводжується відсутністю глянцю на вироблених холоднодеформованих листах, стрічках, трубах, дроті тощо, що зумовлює невідповідність вимогам НТД.

Причини виникнення. Загрублена або нерівномірно зношена поверхня інструменту; порушення умов нагріву в печах із захисною атмосферою; занадто товстий шар технологічного мастила в осередку деформації; здійснення полірування поверхні металу (при оздобленні продукції) суспензією абразиву, забрудненого великими твердими частками включень.

Запобігання дефекту: дотримання технології та режиму прокатки, термічної обробки та полірування металу.

Усунення дефекту: зачистка та додаткове полірування (за потреби) поверхні виробу.

Пори («виразки») – є одним з типових поверхневих дефектів продеформованих виробів (після ковки, об'ємного та листового штампування, прокатки профілів та листа зі сталі, міді, алюмінію, волочених прутків і дроту тощо). На відміну від дефекту «*пористість злитку*» (*див. вище*) та однойменниого *дефекту травлення* (*див. нижче*), ***пори*** при деформації – це невеликі поверхневі поглиблення, що мають витягнуту або точкову форму (рисунок 2.60). Більші з них, зазвичай – овальної форми, що не мають яскраво виражених країв або граней іноді називають «***виразками***». Дефекти обох різновидів часто зустрічаються спільно.



а *б* *в*

Рисунок 2.60 – Вигляд пор та виразок на поверхні прокатаних труби (*а*) та листа (*б*) і волоченого дроту (*в*) [44, 128, 129, 131]

Ці дефекти можуть бути заповнені окалиною, проникати більш-менш глибоко в метал і спостерігатися у вигляді локальних скупчень. Закатування окалини призводить до підвищеної шорсткості поверхні, посиленню інтенсивності наступного травлення, зниженню корозійної стійкості. Закута окалина часто ідентифікується лише при механічній обробці та після піскоструминної обробки виробів.

Зварні труби з такими дефектами без попередньої обробки (шліфування) непридатні для гальванічного покриття поверхні і лакування. При волочінні виразки і пори (див. рис. 2.60) у більшості випадків спостерігаються при діаметрі від 6 мм (або еквівалентному поперечному перерізі) і вище.

Причинами виникнення дефекту є наявність язвин і пор на поверхні гаряче- чи холоднокатаної заготовки через нерівномірне попереднє роз'їдання кислотою при травленні при наявності нерівномірного шару окалини, надто тривалий нагрів або невірно

обрану атмосферу печі, нагрів заготовки із залишками мастила на поверхні, які при відпалі дають пригари, наявність сильно окиснених роликів прохідної печі.

Попередження: вживання заготовки, що не містить язвин і пор, шляхом видалення окалини з її поверхні дробо- або піскоструминною обробкою чи шліфуванням (*див. підрозділ 1.2.2.2*); належне зберігання заготовок з дотриманням заходів проти корозії; застосування інгібіторів у травильному розчині; використання окалиноламачів при волочінні або гідрозбиву для видалення окалини при прокатці заготовок; постійний контроль за станом поверхні готових виробів.

Усунення дефекту. У випадках особливого призначення продукції (гальванічні покриття поверхні, висока корозійна стійкість тощо), коли потрібна повна відсутність на поверхні виразок і пор, застосовують шліфування або полірування металу у межах допуску. На листовому металі дефект повному виправленню не підлягає. Для довгомірних виробів подальшим холодним волочінням (на наступний розмір) іноді вдається зменшити (*не усунути!*) глибину дефекту. У більшості інших випадків пори і виразки не чинять негативного впливу на працездатність металовиробів.

Спотворення поверхні металовиробів може відбуватися не тільки у вигляді підріза, риски, продира, подряпини чи потертості (*див. вище*) при транспортуванні після обробки тиском, але й *у процесі обробки тиском* через утворення на металі чи інструменті поверхневих дефектів у вигляді наростів. Виступи на металі, що деформується, можуть формувати на поверхні інструменту (валків, штампів, волок тощо) западини, які будуть на наступних операціях формозміни переноситись на метал у вигляді його поверхневих виступів.

Нарости (налипання) – налипання металу на поверхню металовиробів у процесі деформації. Дефект часто зустрічається на зовнішній поверхні пресованих гільз (рисунок 2.61).

Рисунок 2.61 – Вигляд поверхні з налипанням металу [131]

Причиною виникнення дефекту зазвичай стають сприятливі умови для зварювання тиском (високі значення видовження металу та температури з утворенням ювенільних ділянок поверхні при відсутності достатнього розділового шару технологічного мастила або окалини. Ініціюють його прояв неякісна поверхня інструменту та її перегрів.

Попередження виникненню дефекту: дотримання вимог НТД щодо технології та використання обладнання та оснащення, зокрема, запобігання утворенню ювенільних (нових неокиснених) поверхонь металу при його деформуванні.

Усунення дефекту: це невиправний брак.

Відбитки – це поверхневі дефекти виробу, що представляють собою поглиблення або виступи, які зумовлені деформуючою дією нерегламентованих виступів або, відповідно – заглиблень на поверхні інструменту: прокатних валків, штампів, пуансонів, правильних роликів тощо (рисунок 2.62).

а *б* *в*

Рисунок 2.62 – Вигляд відбитків на поверхні виробу (*а, б*) та на збільшеній фотографії поверхні (*в*) [127, 129]

Причинами виникнення дефекту стають: налипання металу на валки прокатного стану або правильної машини, оправку, на суміжні витки металу в рулоні; вади на поверхні валків у вигляді раковин, через занадто інтенсивну дробоструминну обробку або викришування металу; наявність сітки розпалу (*див. далі*); наявність чужерідних частинок (метал, стружка, окалина) між інструментом і заготовкою; занадто сильний притиск інструмента до металу; недбале транспортування труб по холодильнику.

Відбитки також іменують ***«вдавленнями» («удавинами», «раковинами вдавлення», «вм'ятинами»)***, що віддзеркалює їх походження внаслідок деформації разом з частками окалини, обрізі, абразивів та інших чужорідних частинок, які потрапили на заготовку, вдавлені у метал і мають форму вдавленого предмета (див. рис. 2.62, *а*). Часто такі наслідки представляють собою поодинокі заглибини (див. рис. 2.62, *б*) з непологим переходом до поверхні виробу. Дно такої заглибини зазвичай окиснено (див. рис. 2.62, *в*).

Необхідно відрізняти сліди від відбитку деформаційного (прокатного) походження від раковин сталеплавильного та ливарного походження (*див. вище*). Останні утворюються через відокремлення локальних пльон та є наслідком деформації екзогенних (зовнішніх) неметалевих включень.

Раковини сталеплавильного та ливарного походження мають горбисте окиснене дно, перехід до основного металу у них плавний, у місці потоншених країв пльон має місце неоднакова глибина в різних місцях.

Відбитки прокатного походження можуть утворюватися внаслідок неправильної дробеструминної обробки валків, яка іноді застосовується для досягнення певної шорсткості поверхні продукції, що запобігає, наприклад, злипанню витків стрічки у рулоні. У такому разі вони іноді звуться «***відбитками прокатки***». При цьому, окремі ділянки поверхні, розташовані уздовж або поперек смуги або листа, відрізняються від решти поверхні більшою шорсткістю.

Дефекти дробеструминної обробки інструменту в залежності від ступеня порушення режиму цієї обробки мають різний вигляд: *точковість*, що повторюється через певні проміжки; *смугастість*, розташована паралельно або перпендикулярно напряму прокатки; *спіралеподібні смуги* тощо.

В процесі *змотування рулонів листового металу* одиничні або скупчені відбитки різної ширини (*як і подряпини – див. вище*) найчастіше спостерігаються з розміщенням на металі за напрямом прокатки.

Вм'ятини можуть супроводжуватися задирами (*див. вище*). Їх виступи можуть закатуватись, утворюючи дрібні короткі пльони овальної форми, що повторюються по довжині довгомірного виробу.

При прокатці труб відбитки можуть спостерігатися як на зовнішній, так і на внутрішній їх поверхні.

При профілюванні, зокрема, при виготовленні зварних труб відбитки проявляються як поздовжні поглиблення.

Зварні труби з цим дефектом без попередньої обробки непридатні для гальванічного покриття або лакування поверхні.

Попередження дефекту. Зачистка поверхні інструмента. Дотримання технології обробки заготовки. При формуванні рулону листового металу – щільне намотування

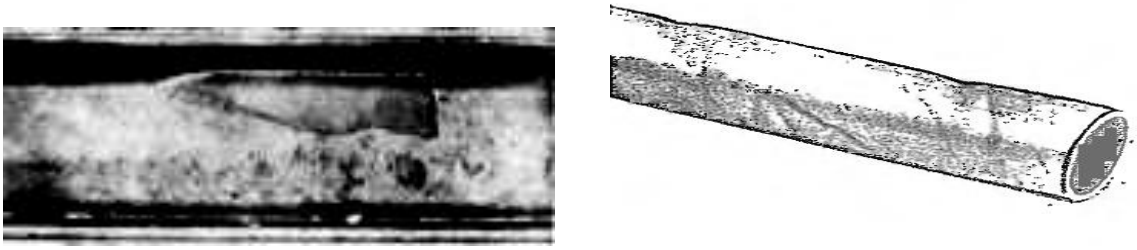
рулону, причому особливу увагу потрібно звертати на щільність намотування внутрішніх витків; рівномірний і відносно малий натяг смуги при її змотуванні в рулон. Припинення роботи при наявності налипань на поверхні інструменту, на зношеному інструменті та попаданні на заготовку та інструмент чужорідних часток.

Усунення дефекту. Абразивна зачистка поверхні інструменту та/або виробу. Якщо відбитки розташовані поблизу кромок листа, можливим є додаткове обрізання стрічки зі зміною чи зниженням сортності. При наявності відбитків на кінцях труби їх також слід відрізати. Усунення відбитків на внутрішній поверхні труби неможливо.

При виготовленні труб (здебільшого – тонкостінних) та *тонкої стрічки* вади на поверхні інструменту можуть проявитися не тільки у вигляді *відбитків*, але й як ***вм'ятини*** (*не плутати з попереднім дефектом!*) – це місцеві вдавлення (заглиблення), що починаються з поверхні, йдуть на всю товщину прокату *та фіксуються на його протилежній поверхні.*

При прокатці на стані ХПТ дефект виникає найчастіше в передчистовій ділянці калібру, і при зворотному русі кліті на оправці не розкатується (рисунок 2.63, *а*). Аналогічний дефект спостерігаються як *спіралеподібні* вм'ятини (рис. 2.63, *б*) *при обробці* труб у косорозташованих валках (роликах).

Причинами виникнення дефекту стають травмування поверхні прокату (переважно – тонкого та тонкостінного) деформуючим та обробним інструментом внаслідок порушень регламенту використання обладнання та технології. Негативний влив може зумовити наявність тугоплавких домішок в технологічному мастилі, комкування дрібної фракції мастила; попадання частин склошайби мастила всередину гільзи при пресуванні, а при штамповці – погане очищення заготовки від окалини перед укладанням її у формувальні рівчаки.



а *б*

Рисунок 2.63 – Вм'ятини на трубі після холодної пільгерної прокатки (*а*) та косовалкової обробки тиском (*б*) [44]

Корисно мати на увазі, що *при штамповці вм'ятинами* називають сліди заштампованої і надалі вилученої (витравленої або збитої) окалини, тобто по суті – *відбитки*.

Попередження прояву дефекту. Дотримання температурно-деформаційного режиму оброблення заготовки. Зменшення зазорів між рівчаками калібрів валків та поверхнею заготовки перед захопленням ними металу. Регулювання транспортуючих засобів (роликів рольгангів, жолобів). Використання технологічного мастила у відповідності з вимогами НТД. Ретельне очищення заготовки та інструменту від чужерідних матеріалів. При складуванні труб – застосування плоских прокладок; місця укладання труб повинні бути оббиті гумою або дошками.

Усунення дефекту – вм'ятини є невиправним браком.

При закритичному прояві вм'ятини або вдавлення, що супроводжується появою в тонкостінному виробі *наскрізного* отвору зі стоншеними краями, витягнутого за напрямом деформації, може з'явитися дефект, званий «***продавиною***» або ***«проколом»,*** або

«пробоїною». Вигляд дефекту частково співпадає з ідентифікацією «*шпаківні» (див. рис. 2.39)*, хоча причини виникнення у цих дефектів різні.

Причина появи цього дефекту – потрапляння стороннього тіла між деформуючим інструментом і виробом.

Попередження. Ретельне очищення поверхні заготовки та інструменту від сторонніх предметів.

Спосіб усунення – дефект є непоправним браком.

Рябизна («рябь») – неглибокі (долі мм) нерівності (заглиблення) довільної форми групового розташування на всій або на окремих ділянках поверхні виробів (зокрема, на гарячекатаних трубах; при об'ємному штампуванні дрібних деталей, зокрема, гайок тощо), які в процесі деформування не заповнюються металом через втиснення дрібної стружки чи окалини (рисунки 2.57 та 2.64). При виготовленні гарячедеформованих труб дефект з такою назвою може виникнути на їх внутрішній поверхні внаслідок подачі завищеної дози технологічного мастила на торець заготовки перед прошивкою або експандуванням, всередину гільзи при прокатці, а також – внаслідок підвищеного зносу оправки.

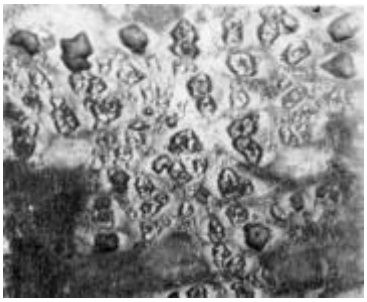


Рисунок 2.64 – Вигляд рябизни («рябі») на поверхні виробу [44, 129, 130]

Попередження. Очищення заготовки від чужорідних часток; загрублення шорсткості поверхні змащення. Використання технологічного мастила у відповідності до вимог технологічного регламенту.

Дефект є виправним шляхом травлення та наступного промивання виробу у нейтральному розчині.

Сітка відбитків – це дефект поверхні виробу у вигляді сіткоподібних періодично повторюваних невеликих *виступів* (рисунок 2.65), зазвичай, з одного боку листового прокату, що сформувалися внаслідок вдавлення металу у відповідну сітку тріщин зношеного інструменту (валків, штампів). Остання утворюється внаслідок неконтрольованого вироблення їх вибіленого шару, розпалу поверхні при застряганні в них гарячих смуг або порушення режиму охолодження.

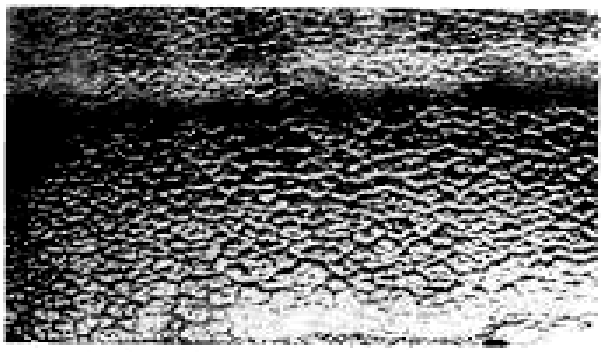


Рисунок 2.65 – Вигляд сітки відбитків на фрагменті поверхні продеформованого виробу [129, 130]

Запобігання виникненню дефекту: моніторинг зношування та своєчасна заміна інструменту, додержання температурних режимів його роботи та термінів використання.

Спосіб усунення дефекту: зачистка поверхні інструменту та виробів абразивом; у залежності від глибини дефекту – зниження сортності продукції.

Рифлена поверхня – це смуги («рифлення»), чітко видимі на поверхні листового прокату, які проходять по всій його довжині (найчастіше – *уздовж напрямку прокатки*). Вони можуть чинити негативний вплив при наступній глибокій витяжці листової заготовки. Смуга з рифленою поверхнею непридатна для гальванічного покриття і лише обмежено придатна для лакування.

Причиною виникнення дефекту є механічні пошкодження поверхні смуги через недостатнє шліфування чистових валків при наявності на їх поверхні окружних шліфувальних рисок (рисунок 2.66).

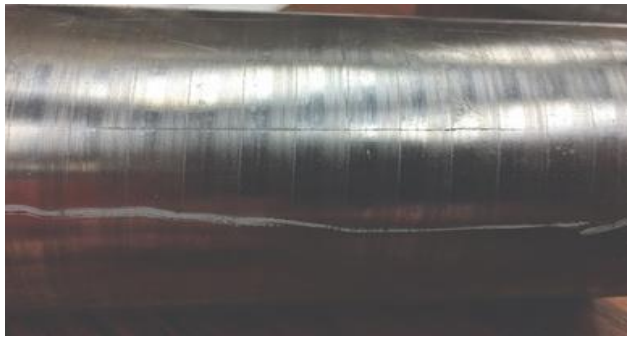


Рисунок 2.66 – Вигляд шліфувальних рисок, що залишилися на поверхні чистового валка і переносяться на лист при прокатуванні [129]

Попередження. Застосування валків з якісно шліфованою поверхнею.

Усунення дефекту – частково можливе шляхом повторної прокатки на дещо меншу товщину, але на валках з добре шліфованою поверхнею. Без додаткової обробки сортність продукції знижують. Механічна обробка (шліфування) рифленої поверхні смуги, як правило, неекономічна.

«Смугастість», «смуги прокатки» – світлі повторювані незначні нерівності поверхні приблизно рівної ширини, які розташовуються рівномірно або місцями на поверхні листової продукції *поперек напрямку прокатки* (рисунок 2.67). Дефект є типовим для швидкохідних широкополосних станів холодної прокатки, на яких метал після прокатки згортають у рулони. На холоднокатаних листах дефект зустрічаються рідко.

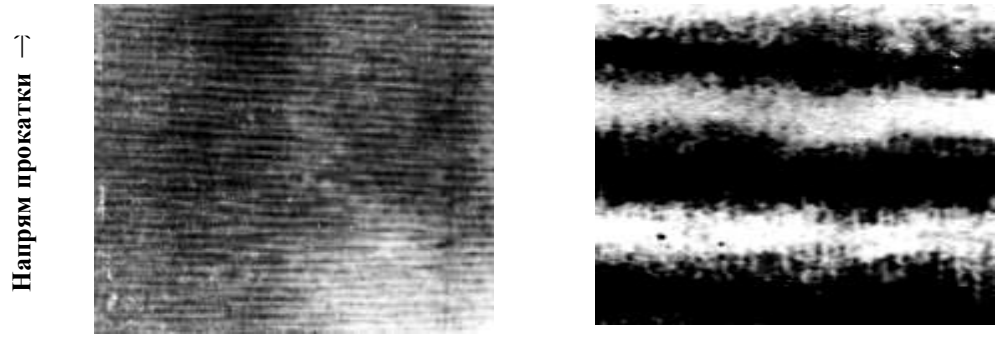


Рисунок 2.67 – Смуги на поверхні листового прокату (при різному збільшенні) [41, 130]

Причину прояву дефекту пов’язують з вібрацією валкового вузла швидкісних прокатних станів.

Попередження. Налагодження лінії приводу валків, їх балансування при шліфуванні з недопущенням ексцентриситету.

Усунення дефекту – частково можливе шляхом повторної прокатки на дещо меншу товщину, але на добре збалансованих валках та з меншою швидкістю. Без додаткової обробки сортність продукції знижують. Механічна обробка (шліфування) смугастої поверхні смуги, як правило, неекономічна.

Подальша обробка тиском низки представлених дефектів може ініціювати розвиток порушень суцільності металу по перетину і довжині виробів (напівфабрикатів). В результаті, у металі проявляються тріщини та розриви.

У залежності від величини, розташування і призначення металу внутрішні тріщини *можуть бути серйозним дефектом*, так як вони не тільки викликають зменшення поперечного перерізу, а й стають концентраторами напружень. При цьому, такі дефекти при звичайних умовах отримання та випробувань виробів зазвичай виявляються лише тоді, коли в місцях їхнього залягання відбувається руйнування, і тому – особливо небезпечні.

Тонкі тріщини, *що утворилися при гарячій прокатці* через неправильне калібрування, розташовуються у вигляді коротких або довгих ліній паралельно поздовжній осі металу (катанки) на різній відстані одна від одної і можуть бути нерегулярно розподілені по всьому периметру та перетину прокату. Вони тонше, ніж тріщини, пов'язані із закатами (*див. нижче*), і викликані зміщенням металу в калібрі. Аналогічний дефект при наявності таких металургійних дефектів як закати, волосовини тощо може мати місце при висадці та при прокатці труб.

Зі збільшенням ступеня пластичної деформації прояв дефекту стає помітнішим.

При гарячій деформації, зокрема, при прокатці труб дефект виникає: при калібруванні (редукуванні) підстуженої або недостатньо прогрітої заготовки з підвищеними обтисненнями; при наявності значних залишкових напружень в металі заготовки, який схильний до тріщиноутворення при прискореному охолодженні після прокатки, внаслідок випадіння нітридів або карбідів по кордонах зерен у складнолегованих сталях тощо.

При холодній прокатці, зокрема, труб дефект може проявитися внаслідок занадто високих обтиснень за умов нерівномірної деформації; наявності ударів при скиданні виробів в процесі передавання їх зі стану на стан, на ад'юстажі та при транспортуванні тощо.

Появу тонких тріщин провокують: наявність первісних тріщин, які зумовлені прослизанням металу в попередніх калібрах при гарячій прокатці; негативний прояв напружень розтягнення в осередку деформації; поглиблення, що виникають при деформації через дефектну поверхню інструменту; високий рівень тертя на контакті інструменту і заготовки; великі залишкові (внутрішні) напруження в металі через занадто швидке нагрівання або охолодження заготовки під гарячу деформацію та у ході подальшої деформації (наприклад, скручуванням) тощо.

Попередження дефекту залежить від встановленої причини його виникнення і може передбачати: дотримання регламенту виконання технологічних операцій обробки тиском: температурно-швидкісних та деформаційних параметрів процесу; правильне калібрування інструменту; використання якісної холоднокатаної або гарячекатаної заготовки; застосування якісних технологічних мастил.

Усунення дефекту. Поверхневі поперечні тріщини в металі великого перерізу можуть бути усунені обточуванням, якщо це є економічно та технічно доцільним, виходячи з матеріалу, призначення виробу, глибини залягання дефекту і припуску на механічну обробку. Однак є небезпека, що поперечні тріщини, які глибоко проникають у метал, не будуть видалені повністю, і згодом залишаться після холодної деформації в готових виробах. Це особливо небезпечно для титанових труб відповідального призначення. Тому титанові труби з поперечними тріщинами бракують.

Якщо такий дефект спостерігається на прутках і дроті малого поперечного перерізу, то він є невиправним браком.

Тріщини «гусячі лапки» проявляються протяжністю до 1 м *при волочінні дроту* у формі *кінчика стрілки,* що вказує напрямок волочіння. Така форма тріщини не завжди явно виражена і може бути на кінці округленою в залежності від ступеня деформації та геометрії волоки. Наявність таких тріщин, що лежать під поверхнею виробу, може виявити поздовжній мікрошліф металу. Дріт з цим типом ушкодження надзвичайно ламкий і може рватися в ході подальшої деформації. Відповідні обриви зазвичай відбуваються під кутом 45° до осі дроту без утворення шийки, що характерно для крихкого руйнування.

Причиною дефекту типу «гусячих лапок» стає нерівномірність деформації металу через несприятливу геометрію каналу волоки: відсутність перехідних кутів; відсутність або занадто короткий калібруючий пасок; похилий вхід дроту у волоку при неправильному центруванні волоки чи вигину дроту тощо.

Попередження дефекту – використання волок з вірно обраною геометрією робочої зони; правильне налаштування волочильного оснащення; запобігання поперечних вібрацій дроту на вході до волоки.

Усунення дефекту: дефект є бракувальною ознакою, яка, на жаль, виявляється тільки при порушеннях процесу волочіння (при обривах дроту). Систематичність прояву дефекту може стати основою для бракування партії продукції та переналагодження обладнання.

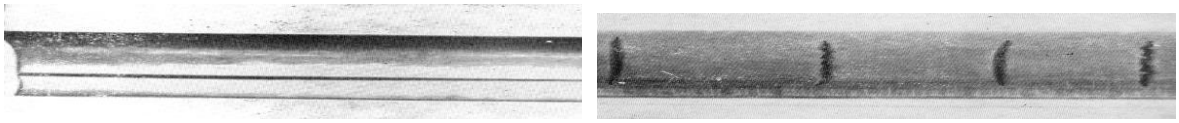
Розкатана («закатана») тріщина (*на додачу до матеріалів, викладених вище*) – дефект поверхні, який представляє собою заповнене окалиною порушення суцільності металу, що утворилося при його деформації (прокатці) за наявності на заготовці поздовжньої або поперечної тріщини. Такий дефект може бути причиною руйнування виробу як у процесі деформації, так і після нього.

Причини виникнення: наявність на поверхні заготовки тріщини, яку не було виявлено при вхідному контролі.

Запобігання виникненню дефекту: ретельний огляд і зачищення поверхні заготовки; дотримання технології технічного контролю.

Спосіб усунення дефекту: зачистка абразивом; у залежності від глибини дефекту – зниження сортності продукції аж до переведення її у брак.

Тріщини від залишкових напружень слід відрізняти від тріщин іншого походження, оскільки вони являють собою порушення суцільності металу ***після*** його виходу з осередку деформації у вигляді вузького розриву поздовжньої (рисунок 2.68, *а*) або поперечної (рис. 2.68, *б*) орієнтації, що йдуть вглиб виробу (заготовки, профілю, листа, труби, поковки, колеса, прутка, дроту тощо) майже під прямим кутом до поверхні. Краї тріщин бувають рівними або злегка звивистими; дефект транскристалітний, може бути локальним у певній частині виробу, зокрема, на кінцях або протяжним довжиною до декількох сотень міліметрів.



а *б*

Рисунок 2.68 – Вигляд поздовжньої (*а*) та поперечної (*б*) тріщини від залишкових напружень на поверхні сталевого дроту після волочіння [66, 48, 128, 129]

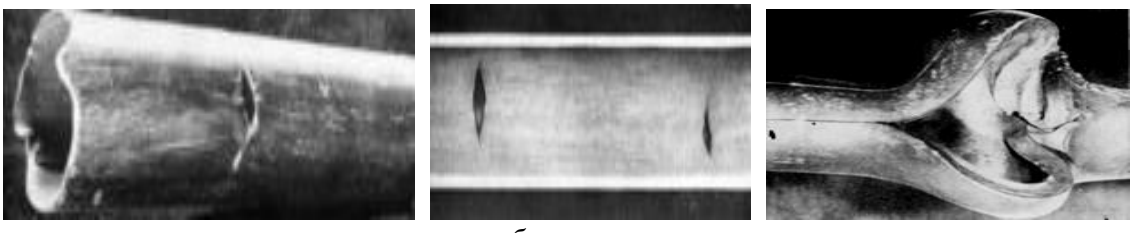
Аналогічний дефект може мати місце на зовнішній поверхні місця вигину виробу, який отриманий холодним листовим штампуванням (рисунок 2.69, *а*) та на грані чотиригранного профілю (рис. 2.69, *б*).

а *б*

Рисунок 2.69 – Ділянка поперечного перерізу зігнутого холодноштампованого виробу з поздовжньою тріщиною (*а*) та поперечні тріщини на шліфі грані чотиригранного профілю (*б*) [135, 137]

Розвиток у процесі деформації тріщин, у тому числі – розкатаних може призвести до появи в процесі та, здебільшого, ***внаслідок операцій обробки тиском*** різноманітних *розривів, рванин* та *розшарувань* – макроскопічних порушень суцільності виробів. Вище (*див. рис. 2.37, 2.44…2.46*) про це вже згадувалось. У цьому зв'язку розглянемо деякі типові випадки появи таких дефектів, що з'являються в різних умовах ОМТ .

Так, *при прокатці на безперервному стані* виявляють поперечні (рисунок 2.70, *а ,б*) і поздовжні ***розриви («розривини»***) тіла труби, основною причиною яких стають нерівномірність деформації та/або занадто великий зазор між валками, внаслідок чого в металі формуються напруження, які можуть розірвати стінку труби; установка оправки далеко за середньою лінією валків стану, через що деформація стінки труби ведеться на конічній частині оправки; занадто велика швидкість обертання валків; різні умови тертя на верхньому та нижньому валках тощо [48]. Супутніми факторами, що провокують прояв дефекту можуть бути перегрів або недогрів заготовки перед деформацією або нерівномірний розподіл температури за її перетином.



а *б* *в*

Рисунок 2.70 – Розриви: поперечні на зовнішній (*а*) і внутрішній (*б*) поверхні труби на безперервному розкатному стані та розрив труби на косовалковому обкатному стані (*в*) [44, 131, 140]

При виготовленні труб із застосуванням *гвинтової прокатки* у зв'язку зі складністю напружено-деформованого стану металу точно ідентифікувати вид розриву: *поздовжній* чи *поперечний*, - не вдається (рис. 2.70, *в*). *При прошивці* іноді має місце *розрив заднього кінця гільзи* із затиском в ній оправки. Серед специфічних причин, що

зумовлюють появу такого дефекту визначають: зміщення осі прошивки; перекіс лінійок; погане притиснення лінійок до валків [48]. *На обкатному косовалковому стані* додатковими негативними чинниками можуть стати: наявність дефектів, що утворилися на зовнішній поверхні сталевої трубної заготовки при її прокатці в прошивному або розкатному стані (наприклад, раковини на зовнішній поверхні, закати, подряпини, риски і т. д.), які стають зародками тріщин і розривів; надто велика відстань між валками або напрямним інструментом, особливо – при застосуванні вузьких напрямних лінійок або дисків; наявна відстань між напрямними лінійками в обкатному стані менше зовнішнього діаметра сталевої труби, внаслідок чого після прокатки метал на зовнішній поверхні зміщується і завертається (*див. рис. 2.44, в*); сильне підстуження труб тощо [48].

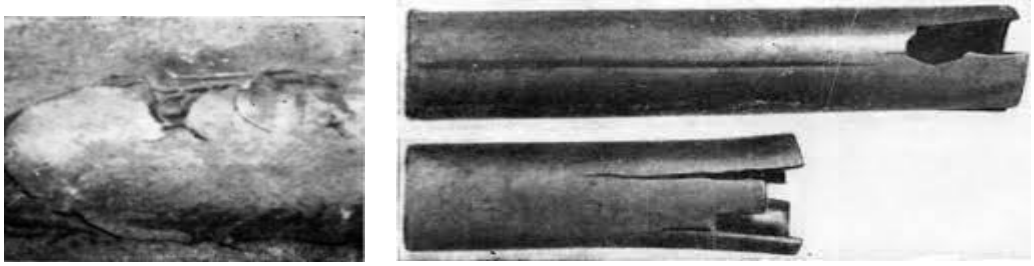
На редукційному трубопрокатному стані при поздовжній прокатці появу розривів можуть спровокувати: деформація труб з вже наявними дефектами (наприклад, з великими раковинами на зовнішній або внутрішній поверхнях, канавками на внутрішній поверхні, рисками); перегрів або перепал металу; сильна різностінність окремих ділянок труби; неточне або неправильне регулювання швидкості обертання валків, що зумовлює занадто великий натяг і внаслідок цього – великі напруження розтягнення [48].

У виробничій практиці при поздовжній прокатці труб (переважно тонкостінних) розриви, іноді називають «*шпаківнями», або* «*пробоїнами»*) (*див. також рис. 2.11, 2.39 та 2.43*). Вони можуть з’явитися у вигляді характерних кутоподібних поперечних розривів металу різної глибини (аж до наскрізних), розташованих в напрямку до роз'ємів калібрів, які повторюються по довжині труби.

Специфічними причинами появи такого дефекту може стати надмірна деформація по вершині калібру заготовки, яка має збільшену овальність, внаслідок чого у випусках виникають занадто великі додаткові напруження розтягнення. Негативно впливає також недостатня технологічна пластичність металу внаслідок наявності неметалевих включень, перепалу або перегріву металу; неякісне змащування або нерівномірний знос оправки при прокатці труб; завелика подача тощо.

Процес *пресування труб* з наявністю схеми трьохстороннього стискання, як правило, не супроводжується появою «класичних» розривів, що зумовлені напруженнями розтягнення. Тут розриви іноді іменують «*рванинами*». Вони представляють із себе *поверхневі* порушення суцільності металу (рисунок 2.71, *а*), які є результатом розвитку відповідних тріщин при несприятливих умовах в осередку деформації. Але можуть також з’явитися об’ємні порушення цілісності труби як на її зовнішній, так і на внутрішній поверхні внаслідок внутрішніх надривів (рис. 2.71, *б*), іноді – з формуванням відшарування (*див. рис. 2.49*).

Специфічними причинами появи розривів при пресуванні можуть стати: використання вихідної гільзи з рванинами; перевищення швидкості пресування; порушення суцільності плівки мастила; втрата поздовжньої сталості внутрішніх шарів металу при їх надмірному стисканні (у присутності тріщин); наявність у заготовці розшарування, розриву, напливу та завороту металу. Підсилюючими негативними чинниками є недогрів, перегрів або перепал металу; нерівномірне нанесення технологічного мастила; низька температура контейнера; знос матриці (втулки) контейнера; завищена шорсткість поверхні заготовки тощо.

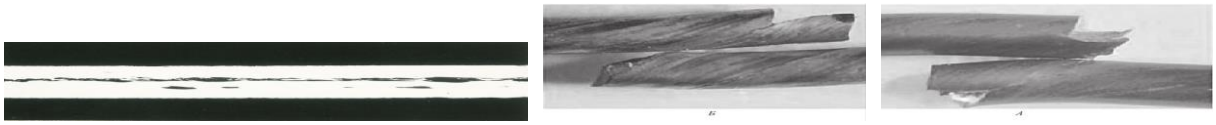


а *б*

Рисунок 2.71 – Вигляд розриву («рванини») на поверхні (*а*) та в об'ємі (*б*) пресованого виробу [44, 108, 129, 131, 143]

При куванні (гарячій об'ємній штамповці) розрив («*крихкість*») може проявитися у вигляді безладно розташованих порушень суцільності металу, більш значних у країв, проте вони можуть спостерігатися також по всій поверхні. Характер руйнування може бути як кристалічним або волокнистим, так і шиферним (*див. рис. 2.25*). Технологічними причинами дефекту можуть стати: неправильний режим нагріву (підігріву) і охолодження при куванні; занадто інтенсивний режим обробки тиском, а додатковими – наявність тонкої сітки тріщин у заготовці, які стають осередками, від яких починається загальне руйнування виробу.

При волочінні також можуть з'явитися зовнішні та внутрішні розриви, які за несприятливих умов деформування прутків та дроту можна розглядати як розвиток відповідних тріщин (*див. рис. 2.68*). При такій ОМТ також іноді спостерігається дефект у вигляді **«розшарування дроту»** (рисунок 2.72, *а*). Прояву розшарування дроту сприяє його скручування (рис. 2.72, *б*), зокрема, при розмотуванні бунта перед волочінням, що часто призводить до обривів (рис. 2.72, *в*).



а *б* *в*

Рисунок 2.72 – Розшарування волоченого дроту внутрішнє (*а*) та внаслідок скручування (*б*) з наступним обривом (*в*) [144]

Характерною ознакою *обриву від розшарування* при волочінні є наявність шва внаслідок закату (*див. нижче*), що нагадує поверхневу тріщину. Однак при більш ретельному дослідженні легко знаходиться й сама тріщина, яка розташована під поверхнею майже паралельно окружності дроту. На цьому місці є сліди поверхневих оксидів, що виникають раніше при окисненні матеріалу в процесі гарячої деформації.

Попередження дефекту пов'язане з виключенням певної причини його появи. Часто це визначається вибором оптимального (раціонального) ступеня обтиснення металу, дотриманням температурно-деформаційного режиму обробки заготовок, використанням вихідного напівфабрикату необхідної якості. В окремих випадках можлива проміжна механічна обробка: видалення шару заготовки з тріщинами, – і безпосередньо після цієї операції – остаточна обробка тиском. Засобами запобігання шкідливого впливу розшарування прутків та дроту при волочінні є: проведення останнього волочильного перероблення на машинах прямоточного типу, на яких закручування дроту не відбувається; видалення всіх чужорідних тіл і тріщин з поверхні заготовки; посилення контролю овальності заготовки (катанки) упродовж процесу волочіння; правильне регулювання волоки і осі волочіння; установка глушників вільних коливань дроту, що виходить з попередньої волоки; своєчасна заміна волочильних барабанів, що мають значний знос; відсутність будь-яких включень і частинок домішок у матеріалі катанки.

Усунення таких дефектів, як правило, неможливе. Вироби з розривами бракують. Допускається обрізка частини довгомірного виробу (наприклад, труби) з тріщинами і розривами лише в тому випадку, якщо вони розташовані на його кінцях.

Наскрізні розриви (*на додачу до матеріалів, викладених раніше*) часто мають місце при гарячій та холодній прокатці тонкого листового металу, труб та інших профілів (*див. рис. 2.24, 2.37, 2.44 та 2.45*).

Причинами появи дефекту у зв'язку з порушеннями регламенту процесів ОМТ можуть стати: деформація заготовки нерівномірної товщини, що супроводжується появою

надмірних напружень розтягнення у деяких місцях по ширині розкату; прокатка металу з низькою технологічною пластичністю, зокрема, у 2-х фазній зоні, що зумовлено температурно-деформаційним режимом; наявність на смузі при прокатці сторонніх предметів, наприклад, крихт з виробленої поверхні робочих валків; наявність на заготовці глибоких пльон або раковин, які при прокатці викликають місцеві порушення суцільності металу; тощо.

Попередження дефекту пов'язане з виключенням певної причини його появи.

Дефект є непоправним браком.

Рвана (бічна) кромка *(«надриви, або тріщини на бічних кромках»)* – це досить частий дефект листового металу (сталь, магній, вольфрам, молібден тощо) у вигляді його розривів, що проходять перпендикулярно або похило до напряму прокатки, на бічних кромках (рисунок 2.73). Їх можна розглядати як різновид розвинутих поперечних тріщин, які вражають усю товщину виробу, але іноді помітні тільки з поверхні. При утворенні крайових тріщин збільшується ризик непередбачуваного їх продовження до центру (осі) прокату у вигляді розривів.

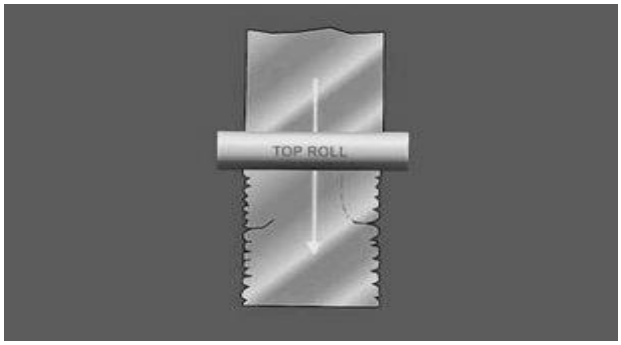


Рисунок 2.73 – Вигляд прокатаного листа з рваною кромкою та крайовими розривами (*TOP ROLL – верхній валок*) [16, 32, 43]

Дефект може з'явитися з двох або однієї сторони стрічки через порушення технології прокатки: надмірно великі обтиснення кромок стрічки внаслідок, наприклад, викривлення осі робочих валків або їх невірного профілювання; нерівномірне видовження по ширині листа (зокрема, внаслідок неправильного здвоювання при пакетній прокатці); прокатка металу з переохолодженими кромками; недостатня технологічна пластичність металу, зокрема – через його дефектну структуру; наявність неметалевих включень, залишків усадочної рихлості, внутрішніх пузирів та ін.; перегрів і, особливо, перепал заготовки перед прокаткою тощо.

Запобігання виникненню дефекту залежить від причини виникнення і передбачає її виключення. Здебільшого – це раціональний розподіл обтиснень при багаторазовій (безперервній) прокатці з їх зменшенням в останніх проходах; забезпечення ефективної роботи систем противигину на гідророзпору валків, дотримання заощадливого температурно-деформаційного режиму прокатки; забезпечення прокатки штаби однакової товщини по довжині та ширині заготовки; використання якісної заготовки.

Усунення дефекту можливе шляхом обрізки травмованих кромок листового прокату, що збільшує відходи і може супроводжуватись зміною призначення щодо його використання, зниженням сортності аж до відбракування.

Рванини від заворотів скоринки, що утворилася на металі першого прокатного перероблення через наявність відповідного дефекту на злитку (*див. матеріали попередніх підрозділів – рис. 2.15*), мають характерний вид. Ці дефекти на слябах, блюмах і штангах

(«заготовках») представляють із себе роздільні, часто – поодинокі напластування металу на тілі напівфабрикату або на його кінцевих частинах (рисунок 2.74).

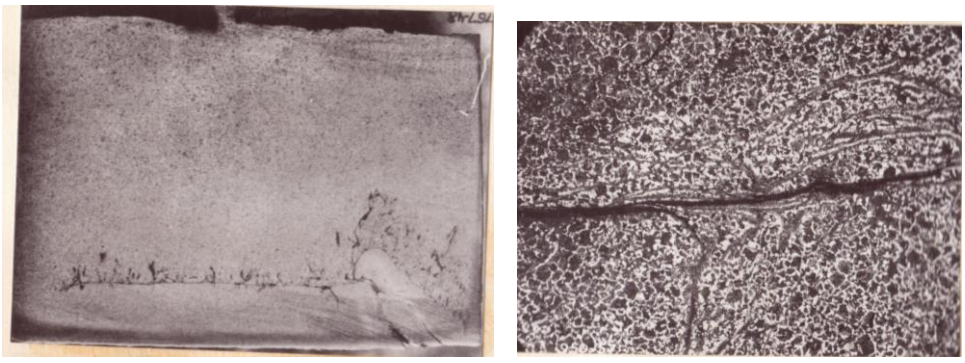
На макроструктурі поперечного перерізу (*див. рис. 2.24 та 2.37, б*) дефект має вигляд вигнутих, розгалужених тріщин і порожнеч (рисунок 2.75, *а*). Дефектна зона характеризується підвищеною схильністю до травлення у порівнянні з основним металом.

Мікроструктура металу в зоні завороту скоринки характеризується наявністю скупчень неметалевих включень з дифузійними оксидами, а також сильним зневуглецюванням, особливо для вуглецевих марок сталі (рис. 2.75, *б*).

Запобігання виникнення дефекту: ретельний огляд і зачищення поверхні злитка перед прокаткою; дотримання технології технічного контролю.

а *б*

Рисунок 2.74– Рванини від завороту скоринки на середині поверхні блюму (*а*) та на його кінцевій частині (*б*) [127…129, 140]



а *б*

Рисунок 2.75 – Дефекти на макроструктурі (*а*) та мікроструктура металу (*б*) в зоні рванини від завороту скоринки [129, 140]

Спосіб усунення дефекту: зачистка будь-яким способом; у залежності від глибини дефекту – зниження сортності заготовки аж до переведення її у брак.

Бракувальною ознакою, пов'язаною з порушенням вимог НТД до *якості поверхні виробів* (напівфабрикатів) можуть стати *нашарування*, які утворилися на металі внаслідок наступної деформації рванин, налипань, наростів та інших подібних утворень в процесі обробки тиском.

Прокатна пльона *(на додачу до матеріалів, що стосуються розкатаного однойменного дефекту виливка та заготовки, викладених вище – див. рис. 2.14, 2.48 та 2.49*) – типовий дефект поверхні, що представляє собою поздовжнє *розкатане* відшарування металу язикоподібної (кутоподібної) форми (рисунок 2.76) товщиною до 1,5…2 мм, частково з'єднане з основним металом.

а *б* *в*

Рисунок 2.76 – Вигляд прокатної пльони на плоскому (а, б) та круглому у перетині (в) прокаті [140]

При прокатці труб дефект, як правило, має групове розташування вздовж труби через рівні проміжки довжини як на зовнішній, так і на внутрішній поверхні виробу, а при гвинтовій прокатці розміщуватись за гвинтовою лінією.

Поверхня відшарувань, прилегла до основного металу, має гладкі або злегка хвилясті краї, окиснена. При видаленні пльон навколо порожнини спостерігається значне зневуглецювання з плавним переходом до нормальної структури металу. Особливістю дефекту є відсутність ліквації легкоплавких компонентів і неметалевих включень, які характерні для пльон сталеплавильного походження (*див. вище*).

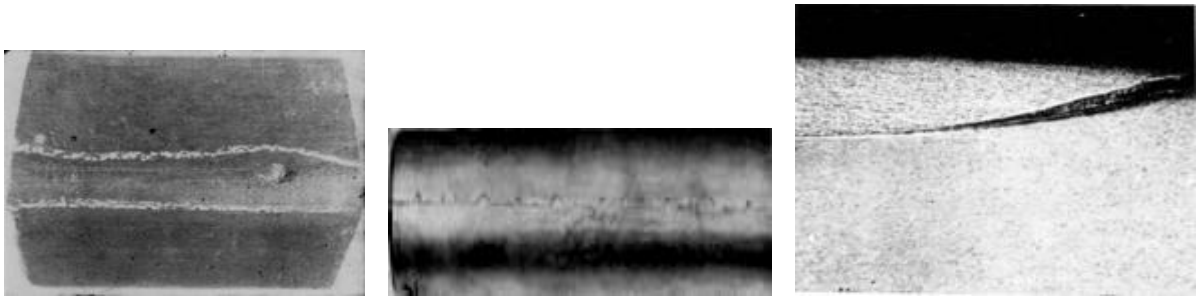
Дефект утворюється внаслідок деформування (розкатки) рванин, підрізів, відбитків, тріщин, слідів глибокої зачистки дефектів та грубих механічних ушкоджень заготовки, сильного зношення поверхні інструменту; внаслідок нерівномірного нагріву заготовок за довжиною та перетином; перегріву або перепалу металу тощо (*див. попередні відповідні матеріали*); *при прокатці труб* – при завеликому обтисненні металу перед носком оправки при прошивці; завеликій частоті обертання валків при малому куті їх нахилу до осі прошивки; *при пресуванні* – внаслідок налипання металу із залишків попереднього пресування; через знос втулки контейнера, задирів на торці гільзи тощо.

Попередження дефекту: запобігання деформації заготовки з глибокими поверхневими дефектами, дієвий ремонт заготовки, недопущення її травмування; моніторинг зношування інструменту; дотримання вимог НТД щодо ведення процесу ОМТ та використання обладнання.

Усунення дефекту: зазвичай дефект є непоправним браком тонкостінного виробу, хоча слід зазначити, що пльони у добре відпрацьованому трубопрокатному виробництві спостерігаються рідко. На сортовому прокаті та поковках можливим є механічне очищення поверхні виробів у межах допусків з оцінкою їх сортності.

Закат – дефект поверхні металовиробів, що утворився в результаті закатки (завальцювання) виступів або западин на поверхні напівфабрикату (виробів): облою, підрізу, задирок, грубих слідів зачистки або глибоких рисок, вуса (*див. нижче*), що були на заготовці. Дефект може мати місце при волочінні дроту, пресуванні, на зовнішній та внутрішній поверхні прокатаних труб, при прокатці бандажів та сортового металу тощо.

При прокатці закат часто розташовується з двох діаметрально протилежних сторін довгомірного виробу, хоча буває й одностороннім, що зумовлено наявністю якогось попереднього дефекту із вказаних вище, і може мати зазубрений край (рисунок 2.77, *а*).



а *б* *в*

Рисунок 2.77 – Вигляд закату на сортовому прямокутному профілі (*а*), на зовнішній поверхні труби (*б*) та на поперечному шліфі (*в*) прокату [129, 131, 140]

На поперечному шліфі (рис. 2.77, *в*) показано, що дефект йде під гострим кутом до поверхні на глибину більше 0,5…1,0 мм без розгалуження і може бути заповнений окалиною. Навколишній метал часто зневуглецьований.

Поверхневі закати на гарячекатаній заготовці при наступному волочінні можуть перетворитися на ***тріщини***, які проходять поздовжньо майже прямолінійно, але мають рвані краї (рисунок 2.78).

Рисунок 2.78 – Поздовжня тріщина на волоченому дроті (прутку), яка утворились через закати на гарячекатаній заготовці [135]

Причини виникнення. Завальцювання виступу, що з'явився у попередніх калібрах валків прокатного стану, зокрема, вуса (*див. нижче*), сприяє його вигин, наприклад, через втрату стійкості, неправильну форму калібру, завищені обтиснення при волочінні або внаслідок зносу інструменту, погане налаштування арматури обладнання. Іншими причинами утворення закатів є локальне руйнування заготовок у місцях розташування раковин, деформація заготовки з грубими слідами зачистки або з глибокими рисками на поверхні, нерівномірне розширення матеріалу в осередку деформації внаслідок значної різноструктурності за перерізом металу, а також вихід на поверхню заготовки неметалевих включень, усадочної раковини та ліквatів. При поздовжній прокатці труб причиною закату можуть стати завальцювання глибоких рисок або тріщин, що утворилися в попередньому калібрі, прошивка заготовки на пресі пілігримової установки зі зношеною головкою; потрапляння металу при пілігримовій прокатці у зазор між валками з утворенням на поверхні робочого конуса гострих бокових виступів, які при кантовці заготовки та зворотному русі кліті вдавлюються у метал.

Попередження виникнення дефекту: дотримання заданих умов обтиснення металу, належне налаштування валків та привалкової арматури; застосування заготовки, вільної від дефектів форми; попереднє запобігання утворенню порушень перерізу заготовки; правильне калібрування інструменту; рівномірний нагрів заготовки.

Усунення дефекту. Можливість усунення закату шляхом зачистки (шліфуванням або обточуванням) обумовлена його глибиною і частотою розташування, розміром, формою поперечного перерізу і призначенням виробу. У разі глибини закату більше допуску – це невиправний брак.

Ряд невідповідностей представляє із себе значне порушення вимог НТД до форми і розмірів (в «плюс» або «мінус») перетину продукції, що пов'язане з нерегламентованим плином металу в осередку деформації, внаслідок невідповідності заготовки формі калібрів інструменту (валків, штампів, плашок тощо) та порушень режиму деформування. Серед останніх зазвичай виділяють дефекти, що ідентифікують як: «вус» («лампас»), «уступ», «шов прокатки», «затиск» та ін.

Ряд *специфічних дефектів* проявляються при виготовленні безшовних і зварних труб.

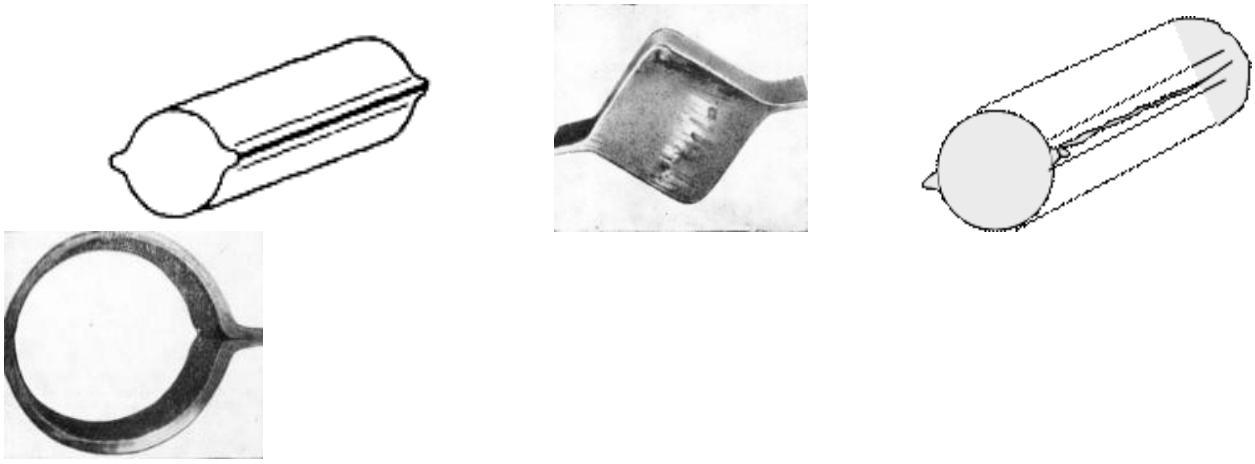
Недотримання діаметра труби являє собою мінусовий або плюсовий відступ від заданого значення за зовнішнім та (або) внутрішнім діаметром, що перевищує вимоги НТД.

Причини: неправильне налаштування редукційного та калібрувального станів, знос валків калібрувального стана; невідповідність розміру оправки; недотримання температурного режиму калібрування (редукування) труб; неправильна настройка правильної машини. *При пресуванні та волочінні* – знос матричного кільця (волоки); неправильно підібраний інструмент.

Попередження: дотримання вимог НТД щодо технології обробки металу, експлуатації обладнання та оснащення.

Усунення дефекту можливе шляхом виправної обробки тиском на менший розмір, а для прутків – шліфуванням або токарною обробкою з урахуванням технічної, технологічної та економічної доцільності.

Неналежний плин металу в осередку деформації може зумовити появу так званого ***«вуса»*** (на катанці та дроті, який іноді звуть ***«лампасом»***) – це дефект на поверхні довгомірного круглого, трубного або прямокутного виробу, який представляє собою поздовжній виступ паралельно його осі (рисунок 2.79, *а*) з двох діаметрально протилежних сторін (рис.2.79, *б, в*) або (рідше) – з однієї сторони (рис. 2.79, *г*) перетину.



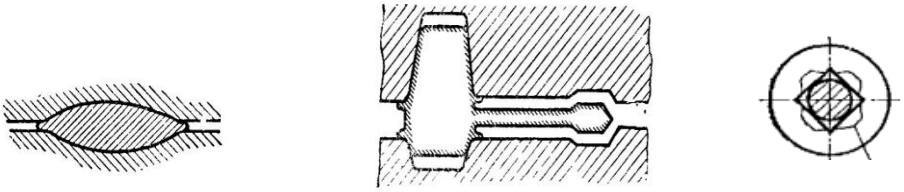
а *б* *в* *г*

Рисунок 2.79 – Вигляд вуса («лампаса») на прокатаному виробі: *а* – схема двостороннього розташування на круглому прутку та *б* – на квадратному профілі; *в* – односторонній «вус» на перерізі суцільного круглого та *г* – трубчастого профілю; () і (*в*) та труби (*г*) [44, 129, 131]

Утворення «вуса» при прокатці труб може бути пов’язане з *биттям валків* калібрувального стану, а також – із завеликою подачею при пілігримовій прокатці.

«Вус» може бути переривчатим. Часто при гарячій прокатці сталевої катанки «вус», або «лампас» виникає на кінцевих ділянках виробу, що пов’язане зі зміною режиму переднього або заднього натягу металу при безперервній прокатці (*див. підрозділ 1.2.2.3*).

При куванні, об’ємній штамповці та висаджуванні аналогічний дефект носить назву «***затиск»***, або ***«затискач»*** (рисунок 2.80)**,** а на деяких підприємствах – *не дуже коректно*: ***«задирок»***.



а *б* *в*

Рисунок 2.80 – Утворення затиску: *а*, б – унаслідок невідповідності чорнового рівчака (тобто – заготовки-напівфабрикату) чистовому рівчаку при плющенні (*а*), при об'ємній штамповці (*б*) та при висаджуванні (*в*) [119, 137]

Варіантом таких дефектів також можуть стати значні ***порушення допуску*** на розміри виробу (в «плюс» чи «мінус») при ОМТ.

Зокрема, при гарячій штамповці (ковці) недотримання допусків за перерізом виробу зветься **«послабленням розміру»**. По суті, це є «невідповідність» розміру вимогам НТД.

Прикладом послаблення розміру в «мінус» при прокатці стають ***короткі обидві полиці*** на фланцевих профілях через недостатню ширину смуги, що надходить в чистову кліть, можливо, через великий натяг в чистовій групі клітей; ***невиконання кутів*** прямокутного профілю через нестачу металу в кутах предчистового ромба.

Різновидом останнього дефекту при об'ємній гарячій штамповці є ***неповна фігура*** - маломірний профіль (рисунок 2.79, *а*) – брак з недотримання регламентованих розмірів.

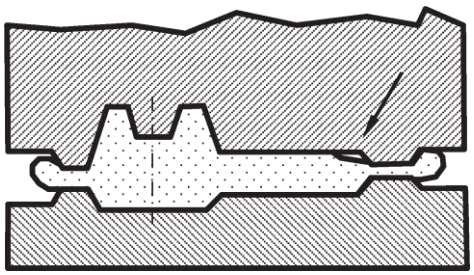


Рисунок 2.81 – Місцеве «послаблення розміру» при об'ємній штамповці (показане стрілкою) [127]

Дефект утворюється при незаповненні чистового рівчака штампа металом, головним чином, в місцях виступів, кутів, заокруглень і ребер. *Причинами цього дефекту* стають: використання зношеного штампу або замалі розміри заготовки, об'єм і профіль якої (наприклад, коло замість квадрата) не відповідає штампу, що використовується; недостатній нагрів металу.

Затиск від головкою

Певні дефекти форми виробу виникають внаслідок *нерегламентованого впливу* (або відсутності впливу) інструменту на заготовку.

При прокатці в якості такого дефекту можна розглядати ***«недокат»***, який являє собою залишок нерозкатаного злитка, заготовки, гільзи або труби внаслідок застрягання (припинення процесу прокатування) заготовки у валках за різних причин (порушення умов захвату металу через завищене обтиснення, аварійне відключення приводу через перевищення критичного моменту прокатки, невірне налаштування ввідної арматури тощо).

У процесі кування іноді спостерігається аналогічний специфічний дефект – «**ломбій**», який проявляться у зіпсуванні форми поковки внаслідок отримання нею удару

молота до того, як заготовка була укладена в нижню фігуру штампу або після видалена з неї, а також замалі кількість ударів під час кування та/або вага падаючих частин молота.

При пресуванні та волочінні труб причиною дефекту може бути надмірний ***заплив*** (зі зменшенням отвору!) матричного кільця; неправильно підібраний вихідний отвір матричного кільця; використання стоншеної (зношеної) голки при виробництві труб тощо.

При пресуванні внаслідок несвоєчасного відведення підпірної голки, зносу відрізного кільця, низької та нерівномірної температури заготовки (гільзи) та/або перегріву засвердленого переднього торця заготовки іноді спостерігаються **«прес-утяжина», «недопресовка», випресовка з «сорочкою»** (відсутність відокремлення випресовки з утворенням на трубі так званої «***сорочки***»). Це проявляється у наявності частини непродеформованого металу, що утворюється в задній осьовій зоні пресової заготовки або виробу, що відпресували. У різних випадках дефект проявляється по-різному: у виробах суцільного перерізу він може бути яскраво вираженим; при пресуванні труб – слабкіше.

При *холодному висаджуванні* невірне налаштування деформуючого інструменту може супроводжуватись невиконанням розмірів виробу, наприклад, при виробництві цвяхів – це спотворення шляпки або невиконання гострого кінця.

Також дефект може з'явитися внаслідок наявності великої кількості окалини на заготовці.

Запобігання появі дефекту пов'язано з усуненням причин його виникнення.

Усунення дефекту: зазвичай, такі відхилення відносно незначні і не перешкоджають застосуванню виробів за призначенням, але можуть викликати зниження сортності продукції. При значному порушенні нормативних вимог до якості продукції – її бракування.

Схожим за походженням дефектом, що часто спостерігається на поверхні граней *волочених* шестигранних або чотиригранних сталевих прутків великих перерізів, рідше – на круглих профілях, і ще рідше – на дроті стає ***«чорновина».*** Цей дефект має вигляд темних необроблених місць на поверхні, *що не зазнали деформації*. Візуально він подібний до виразок від окалини і зазвичай розташовується більш-менш регулярно у поздовжньому напряму (рисунок 2.82).

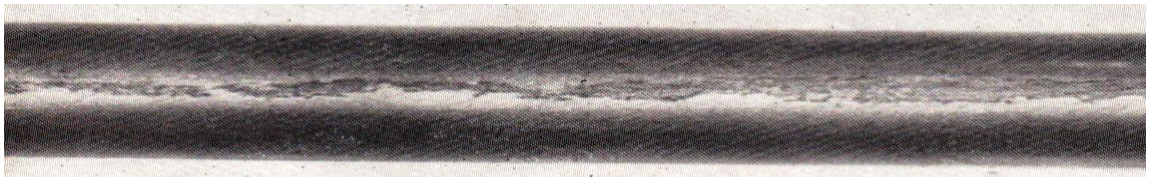


Рисунок 2.82 – Вигляд чорновини на поверхні круглого профілю після волочіння [135]

Причиною виникнення цього дефекту стає неприпустиме порушення «в мінус» формою та/або розмірами вихідної (до волочіння) заготовки регламентованих допусків, що зумовлює замалу ступінь обтиснення у проміжних та/або чистовій волоках.

Попередження. Застосування вихідних заготовок правильної (встановленої) форми, що мають розміри в межах обумовлених допусків. При збільшенні сумарного обтиснення ймовірність прояву дефекту знижується.

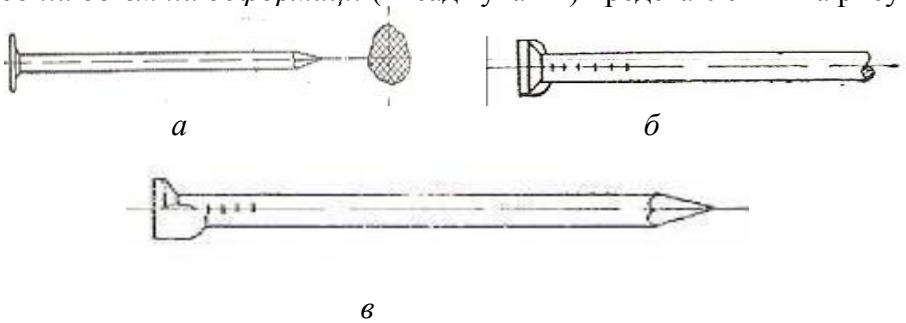
Усунення. Додаткове волочіння на менший розмір, якщо протяжність дефектних місць не надто велика. В разі круглого у перетині металу можливе також обточування або шліфування в межах допуску (якщо ця операція є економічно доцільною).

Частим конкретним варіантом «*послаблення розмірів*» виробу «*в плюс*» стає протилежний дефект: **«збільшений профіль»**, що характеризується загальним або місцевим *збільшенням* розмірів виробу (напівфабрикату) за напрямком, що

перпендикулярний деформації обтиснення при прокатці, ходу «баби» на молоті, пуансона при висаджуванні тощо).

В якості прикладів прояву дефекту *при прокатці* можна розглядати «вус» (*див. рис. 2.79*), ***довгі полиці*** на фланцевих профілях через переповнення металом чистового калібру, зокрема, через вироблення передчистового калібру.

Приклад подібного дефекту, що характеризується збільшенням локальних розмірів виробу при *холодній об'ємній деформації* (висаджуванні) представлений на рисунку 2.83).



а *б*

в

Рисунок 2.83 – Вигляд цвяхів зі збільшеними розмірами: головки (*а*), вусиків під головкою (*б*) та напливом під головкою (*в*) [140]

Причини виникнення дефекту зумовлені, перш за все, неприпустимо завищеними розмірами заготовки та (або) порушеннями в конструкції чи налаштуванні обладнання, незадовільним технологічним мастилом, застосуванням невідповідного за розмірами інструменту; перевищенням регламентованого рівня заданих температурно-деформаційних режимів обробки. Зокрема, при холодному висаджуванні цвяхів попередній перегрів металу може призвести до появи місцевих напливів (рис. 2.83, *в*) [140].

При гарячій прокатці причинами дефекту можуть стати: занадто велике поширення металу, зокрема, внаслідок відсутності потрібного заднього натягу на кінцевих ділянках при виході розкату з останньої кліті безперервного стану; переповнення калібру через несприятливу форму поперечного перерізу заготовки, отриманої з попереднього калібру; неправильна подача металу в калібр, зокрема – скручування заготовки; неправильне налаштування чи знос калібрів валків та (або) привалкової арматури при поздовжній прокатці.

Попередження: правильний вибір геометрії інструменту та заготовки; дотримання температурно-деформаційного режиму обробки тиском; забезпечення правильної подачі заготовки в калібр інструменту; дотримання регламентованого режиму деформації, зокрема, недопущення зношення інструменту та утримуючої арматури, зокрема, – при безперервній прокатці.

Усунення дефекту. У більшості випадків «*збільшений профіль*» є невиправним браком протяжних виробів, зокрема, прокату. У деяких випадках вдається заощадливим режимом деформації з поступовим зменшенням обтиснень при безперервній прокатці розкатати виступи *без закатів* (*див. вище*). Кінцеві ділянки катанки з «вусами» відрізають. Іноді (на виробах обмеженої довжини) допускається видалення таких дефектів зачисткою. Наприклад, усунення *затиску* при куванні (гарячій штамповці) можливе зачищенням (шліфуванням) або обточуванням виробу (у межах допуску), що обумовлено його розмірами, місцем розташування і призначенням. У разі неможливості видалення затиску – це невиправний брак. Наявність дефекту не допускаються в місцях зміни перетину стержня, наприклад, під головкою болта.

Іноді *при прокатці труб* виявляють схожий за формою до «вуса» дефект, званий як «**шов прокатки**» (рисунок 2.84), який також іноді називають «*лампасом*» (*див. попередні матеріали*).

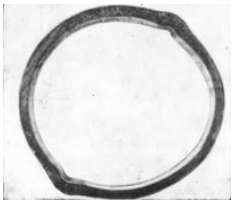


Рисунок 2.84 – «Шов прокатки» («лампас») на темплеті труби [44]

Цей дефект представляє із себе потовщення на зовнішній поверхні труби, розташоване в поздовжньому напрямку. Зазвичай, як і у випадку з появою «вуса», є два діаметрально протилежних шва прокатки («лампаси»). Дефект спостерігається тільки при поздовжній прокатці труб на оправці. При поперечно-гвинтовій та періодичній прокатці (з поворотом заготовки) такий дефект фізично не може утворитися. При пресуванні труб (найчастіше – тонкостінних) може утворитися односторонній «шов прокатки». Деформація такого дефекту може при подальшій прокатці викликати появу *закатів* (*див. вище*), що, напевне, і визначило не дуже коректну назву «*шов прокатки*».

Причина виникнення шва прокатки суттєво відрізняється від вуса (затиску), хоча і пов'язана з переповненням калібру та занадто великим обтисненням (недостатнім відношенням ширини калібру до висоти для даних розмірів трубної заготовки). Вона фізично *зумовлена втратою «окружної» стійкості стінки* труби, переважно – у місці роз'єма калібрів валків. Цьому сприяють занадто великий зазор між валками; значний взаємний зсув струмків калібру; неправильна установка оправки; неточна установка вхідного жолоба по осі прокатки стану; занижена температура трубної заготовки тощо.

Попередження дефекту: зменшення обтиснення (вибір оправки необхідного діаметра, дотримання заданого діаметру трубної заготовки, періодичний контроль профілю калібру за допомогою шаблону); коригування установки валків (струмки верхнього і нижнього валків повинні повністю збігатися); зменшення зазору між верхнім і нижнім валками; правильна установка оправки (циліндрична частина оправки повинна збігатися із середньою лінією валків стану); правильна установка вхідного жолоба по осі стану для прокатки труб (дно вхідного жолобу і направляюча повинні знаходитися на одній висоті); дотримання заданої температури гарячої деформації.

Усунення дефекту: при значній величині «шва прокатки» («лампаса») усунути їх неможливо. Невисокі «шви прокатки» в ході подальшого процесу обробки при прокатці труби в інших станах можуть розкататися та зникнути. При цьому потрібно відстежувати можливу появу закатів та запобігати цьому.

Значна кількість дефектів металопродукції пов'язана із суттєвим порушенням вимог до форми виробів при формальному виконанні їх суцільності, що, здебільшого, зумовлене вадами настроювання технологічного обладнання й оснащення та може стати критичним для отримання якісної продукції.

Нижче наведені приклади спотворення поперечного перерізу профілів внаслідок вад налагодження обладнання.

При гарячій деформації сортового металу можуть спостерігатися:

– **ромбічність**, коли грані металу запроєктованого прямокутного перерізу не утворюють один з одним прямих кутів (рисунок 2.85, *а*), наприклад, внаслідок втрати стійкості високого профілю заготовки при її осаджуванні на цилідричній частині валків або у штампі. Схожий дефект *при листовій прокатці*: ***площинна ромбічність***, яка характеризується різними розмірами діагоналей листа, – може бути зумовлена завданням листової заготовки окремими «картками» у валки уперед одним і тим же кутом без чергування, а також порушенням технології поперечної різки смуги;

– **бочкоподібність** – перетин виробу, який повинен бути прямокутним у плані, внаслідок деформування занадто високої заготовки з великим тертям на контакті з валками на гладкій бочці або у вільних калібрах штампу отримує опуклі поверхні бокових граней (рис. 2.85, *б*);

– **увігнутість** (рис. 2.85, *в*) – перетин виробу, який повинен бути прямокутним у плані, внаслідок деформування отримує *увігнутість* граней. Зокрема, цей дефект може з'явитися при прокатці з натягом, а також у процесі кування при активному веденні операції *протягування* заготовки з круглим поперечним перерізом. Цьому сприяє недостатній прогрів металу або мала вага падаючих частин молота, а також недостатня довжина кінця, що відтягується, внаслідок дії напружень на кінцях поковки.

Іноді на торці (зазвичай – задньому) прокатаної продукції має місце увігнутість у вигляді так званого **«ластівчиного хвоста»** ***(***або ***«ялинки»)*** (рисунок 2.86).

Він представляє із себе форму, що характеризується відмінністю довжини бокових поверхонь прокату (блюму, слябу, товстого чи тонкого листа) у порівнянні з його середньою (осьовою) частиною, що при *сортовій* прокатці *утворюється через неоднакове видовження* (за шириною та/або висотою) металу внаслідок прояву несиметричності процесу деформування металу, зокрема, у зв'язку з нерівномірністю його об'ємних властивостей.

При *листовій* прокатці *вихідною причиною виникнення* такого дефекту зазвичай стають *поперечна різнотовщинність* листової заготовки (*див. нижче*), невірне профілювання (опукле чи увігнуте) поверхні робочих валків або вади роботи системи їх противигину.

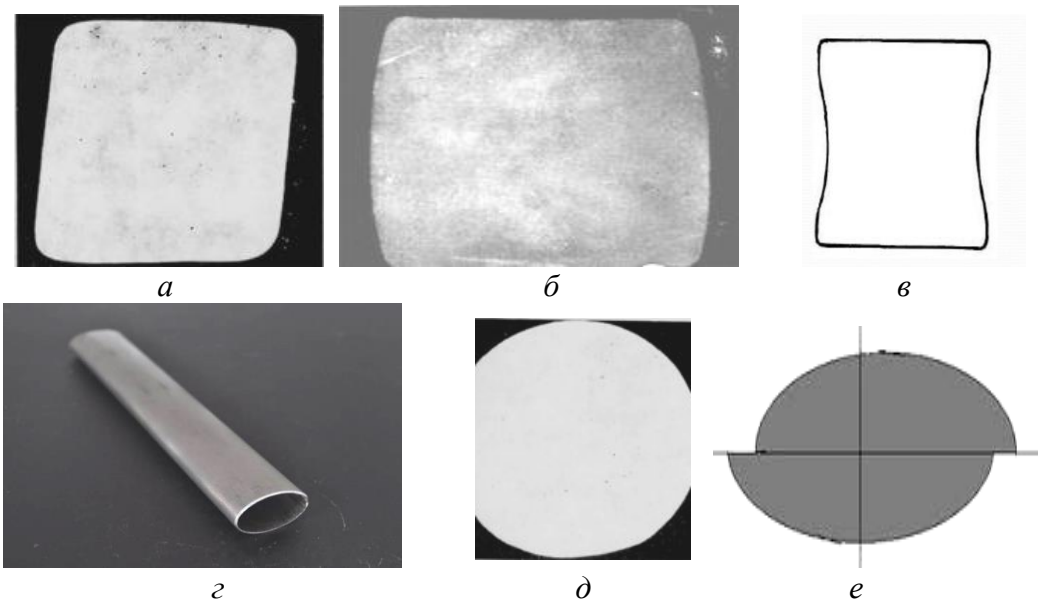


Рисунок 2.85 – Деякі види спотворення форми поперечного перерізу гарячедеформованих виробів: *а* – ромбічність перерізу заготовки; *б* – бочкоподібність; *в* – увігнутість; *г* – овалізація; *д* – плоскі боки; *е* – нерівні сторони [127, 128, 131, 142, 143]

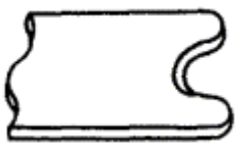


Рисунок 2.87 – Вигляд нерівного заднього торця листового прокату, що зветься «*ластівчиний хвіст*» [130]

Усунення дефекту зазвичай передбачає відрізку зайвої або дефектної ділянки прокату з оцінкою можливості здачі продукції за розміром, що кратний мірній довжині; зниження сортності продукції аж до її бракування;

– **овальність** (див. рис. 2.85, *г*) – бажаний круглий переріз чистового профілю сильно відрізняється від кола, зокрема, при прокатці через знос калібрів або вади калібровки та режиму обтиснень.

Зокрема*, овальність труб* представляє собою різницю значень взаємно перпендикулярних максимального і мінімального діаметрів виробу (труби, стакану) в одному поперечному перерізі. *Різновидами овальності* можуть бути: овальність по всій довжині труби по зовнішній поверхні; овальність внутрішньої поверхні; відхилення від величини заданої овальності біля переднього кінця труби.

Причини виникнення. При гарячій прокатці: знос оправки; неточне розточування калібрів останніх клітей калібрувального прокатного стану; зміщення калібрів. *При холодній деформації на стані ХПТ:* занадто великий знос калібруючої ділянки струмка валка; занадто великий або занадто малий зазор між валками; непаралельність осей верхнього та нижнього валків при прокатці; неправильне регулювання правильних роликів правильної машини. *При волочінні:* знос волочильної фільєри або оправки; невірно встановлена волока; викривлення труби або її частини під час волочіння; велика внутрішня хвиля в гарячекатаній трубі-заготовці. На *трубозварювальних станах* – неправильна установка калібрувальних роликів;

– **плоскі боки** на круглому профілі (див. рис. 2.85, *д*) можуть виникнути при незаповненому чистовому калібрі прокатних валків через недостатній перетин передчистового овалу, зменшення поширення при підвищенні температури прокатки;

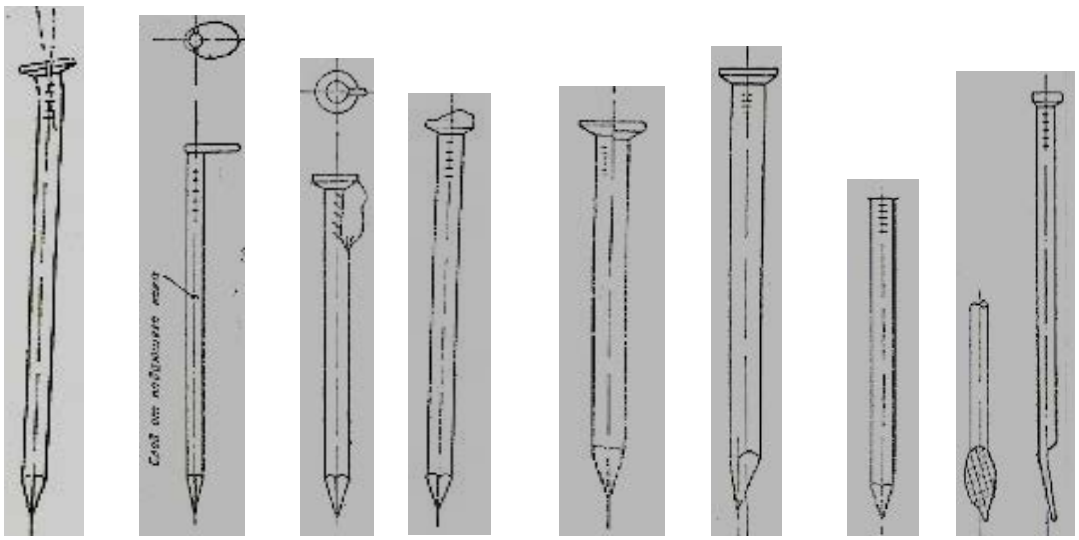
– **нерівні сторони виробу** можуть виникнути при взаємному зсуві частин роз'ємного інструменту (калібрів верхнього та нижнього валків при прокатці або верхнього та нижнього штампів при відповідному процесі деформування). По суті, це зумовлює нерегламентовану несиметричність виробу, а при його сильному прояві іноді на поверхні видовженого сортового прокату паралельно його осі можуть сформуватися поздовжні виступи (див. рис. 2.85, *е*). Такий дефект при сортовій прокатці іноді називають «***уступом».***

При прокатці несиметричність обтиснень металу в калібрі може проявись в утворенні, наприклад*,* **різної товщини полиць** на кутовому або фланцевому профілі, **зріз кута при вершині** (для квадратного профілю та куточка). Останній дефект також може бути зумовлений неправильно встановленою арматурою перед чистовим калібром або після нього.

Аналогічний дефект при гарячій об'ємній штамповці одержав назву **перекіс** – це об'ємне спотворення форми виробу, яке проявляється у зміщенні його осей симетрії. Перекоси поковки на молоті бувають поздовжні та поперечні.

При висадці на кувальній машині *перекіс* оцінюють за зсувом бічних матриць, а «**ексцентричність**» – за зсувом пуансона відносно осі заготовки, яка затиснута в матриці. При недотриманні симетричності в розмірах поковки внаслідок одностороннього перерозподілу матеріалу за її перетином і висоті може спостерігатися дефект, званий **«зміщення при куванні»**. При цьому, діаметр і висота поковки, в середньому, збережені.

Взаємний зсув відносно осі виробу та/або взаємний зсув частин роз'ємного інструменту, їх перекіс або знос при холодному висаджуванні, зокрема, цвяхів може призвести до суттєвого спотворення їх форми (рисунок 2.87).



а *б* *в* *г* *д* *е* *ж* *з*

Рисунок 2.87 – Спотворення форми цвяхів внаслідок зсуву відносно осі виробу та/або взаємного зсуву елементів роз'ємного інструменту: *а* – вигин під головкою; *б* – зсув головки цвяха від осі виробу; *в* – цвях розплющений під головкою; *г* – наплив металу на головці цвяха; *д* – одна половина головки цвяха менше іншої; *е* – зсув центру вістря цвяха від осі виробу; *ж* – цвях без головки; *з* – цвях зі сплющеним кінцем [130]

Окрім названих, *причинами виникнення таких дефектів* можуть стати: *при гарячій прокатці* неправильна установка валків і арматури; сильний знос валків і підшипників; невірно вибраний режим обтиснень; перекіс смуги у ребровому калібрі, якщо ширина дном калібру більше товщини смуги; неправильне регулювання направляючих роликів і лінійок; коливання розмірів по ширині і товщині обраних вихідних заготовок; недостатній або нерівномірний прогрів матеріалу перед гарячою деформацією та ін.

Попередження виникненню цих дефектів пов'язане з адекватним вибором заготовки та режиму її деформування, правильним налаштуванням обладнання (рівчаків валків та/або привалкової арматури при прокатці, оснащення, штампів та пуансонів при ковці та штамповці тощо.

Спосіб усунення. Можливість усунення представлених дефектів обумовлена подальшою деформацією або обробкою поверхні зі зняттям стружки (для напівфабрикатів круглого перерізу – обточуванням) залежно від величини дефекту і характеру його розташування (частоти); при цьому слід враховувати економічну доцільність цих заходів усунення. У деяких випадках гарячої штамповки (ковки) можливим стає перештампування в новому штампі або заварка, якщо невідповідність незначна. Малий перекіс поковки може бути виправлений її правкою на кувальному пресі або шляхом заточування (вирівнюванням) базових місць, що визначається величиною зміщення в площині зсуву. Іноді достатнім може бути нагрівання для переводу надлишку металу в окалину. При цьому слід мати на увазі, що перештампування може призвести до остаточного браку, зокрема, внаслідок заштамповки знову утвореної окалини. Шляхом додаткової обробки (правки) іноді можна усунути відхилення в розмірах кутів і радіусів. При незначному зменшенні або перевищенні розмірів можливі зниження сортності, додаткова обробка або часткове відбракування. Овальність труб *може бути виправлена* додатковим волочінням або холодною пілігримовою прокаткою і волочінням на інший діаметр.

Значні відхилення в розмірах параметрів. які не можуть бути усунені, є непоправним браком.

Суттєві **відхилення від заданих форми і розмірів** поперечного перерізу, зокрема, для гнутих (профільованих) фасонних профілів, можуть спостерігатися найчастіше для кутів, радіусів закруглення по ширині фланців і полиці, по висоті стінки і товщині, а також у відігнутих кромках (рисунок 2.88).

Вади розмірів довжини проявляються у виході протяжності виробів за допуски, встановлені нормативними документами.

Рисунок 2.88 – Вигляд значних відхилень форми і розмірів перерізу фасонного профіля у порівнянні із заданим (показаний пунктиром) [51, 100]

При прокатці сортових профілів і труб це може бути наслідком використання невідповідної заготовки, порушень режиму деформування, неправильної настройки оснащення пилок (розугодження швидкостей прокату, що виходить з останньої кліті стану, та пересування летючих ножиць або невірної установки упорів пилок, недостатньо жорсткого їх кріплення, а також неповної подачі прутка до упору при різанні).

Досить часто і в інших процесах ОМТ мають місце дефекти *загальної* форми виробу.

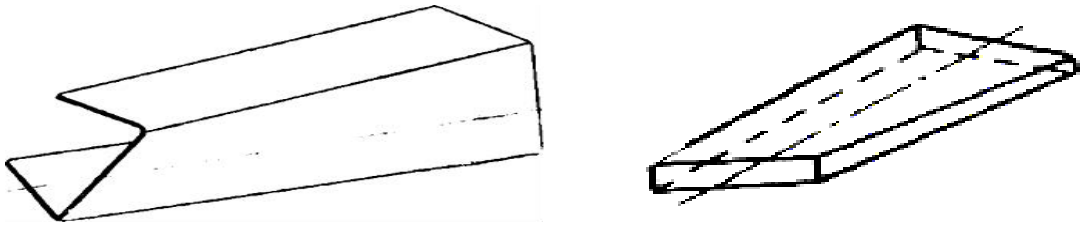
При штамповці на молоті або пресі прояв дефекту також може залежати від температурної усадки поковки, а при *згинанні* – від стабільності довжини заготовки, конструкції і установки упорів на висадочних і згинальних штампах тощо.

Аналогічний дефект є характерним і *при виготовленні сіток,* як наслідок невірно визначеної заготовки (дроту для плетеної або зварної сітки, поганої настройки блоку різання та плетіння на машині (*див. підрозділ 1.2.2.3*).

Засоби попередження: використання належної заготовки; суворе дотримання режиму обробки тиском та різання; вірне налагодження різального інструменту, постійний контроль за роботою обладнання з правильним здійсненням його налагодження та технології виробництва тощо.

Усунення дефекту: у разі якщо розмір дефектної продукції є більший за вимоги НТД, її можна виправити обрізкою (механічною обробкою) до необхідного розміру або до розміру, що є кратним необхідному. У разі меншого розміру – це невиправний брак.

При **скручуванні** заготовки відповідні границі її контуру стають непаралельними одній загальній площині. При цьому, закручування може розповсюджуватися не тільки по довжині, але й по ширині поковки. Такий дефект може мати місце при ковці, прокатці фасонних профілів та листа (рисунок 2.89), а також – при гвинтовій прошивці трубної заготовки.



а б

Рисунок 2.89 – Схеми скручування фасонного профілю (а) та листа (б) [46, 130, 141, 142]

Причини виникнення можуть бути різними при різних видах ОМТ. *При виготовленні фасонних профілів прокаткою* – це нерівномірне обтиснення профілю по ширині калібру внаслідок неправильного встановлення валків або привалкової арматури.

При прокатці штаби – нерівномірна деформація по її ширині внаслідок неправильного положення прокатних валків, передніх або задніх проводок або різнотовщинності смуги, що надходить у валки; відсутність стабілізуючого натягу, невірна настройка ножиць.

При прошивці трубної заготовки – надмірне вироблення напрямних лінійок; занижена вісь прошивки більше норми; перегрів металу в поєднанні з підвищеними обтисненнями.

При куванні – недбалість у роботі; неправильне ведення обтиснень; несприятливі розміри заготівки (занадто велика конусність); незадовільний стан інструменту та обладнання.

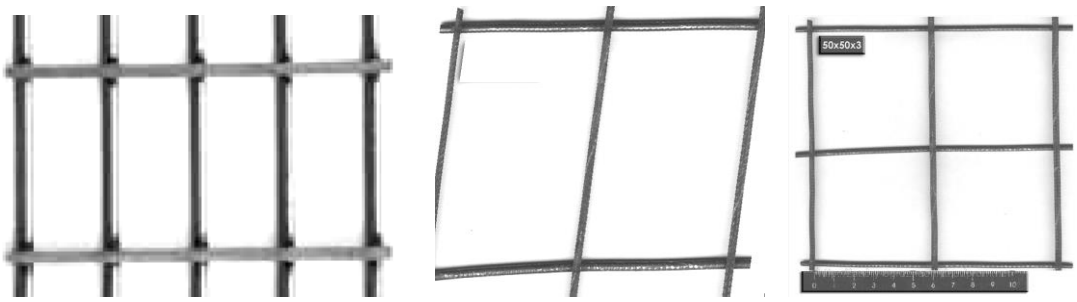
При холодній об'ємній штамповці неточна зупинка заготовки на упорі або у фіксаторі веде до отримання виробів з невірним контуром або з порушенням правильності взаємного розташування його внутрішнього і зовнішнього контурів. До цього може також призвести неналагодженість або неправильна установка, знос і поломка штампів (матриць) з утворенням складок і зморшок при витягуванні, наявність задирок на краях вирубуваних виробів або отворів, що пробиваються, пропуск отворів при поломці тонких пуансонів і т. д.

Попередження. Ретельне виконання всіх регламентованих операцій при ОМТ; правильне налаштування та використання обладнання.

Усунення. Можливе часткове застосування виробів з подібними незначними відхиленнями для невідповідального призначення. Як правило, такий дефект є невиправним браком.

Значна група дефектів формується як порушення вимог до *прямолінійності* та *площинності* виробів.

До таких специфічних дефектів геометрії виробів при *виготовленні плетеної або зварної сітки* (*див. підрозділ 1.2.2.3*) також можна віднести **невідповідність розмірів і форми комірки сітки** вимогам застосовного НД. Це може проявитися в порушенні регламентованих розмірів комірки, зокрема, утворенні прямокутника (рисунок 2.90, *а*) або ромбу (рис. 2.90, *б*) замість квадрату, викривленні однієї із сторін комірки (рис. 2.90, *в*) тощо.



а *б* *в*

Рисунок 2.90 – Вигляд деяких дефектів форми комірок зварної сітки:
а – прямокутник; *б* – ромбічність; *в* – викривлення сторони [110…113]

Основною причиною виникнення дефекту є невірне налаштування блока подачі дроту до машини.

Засоби запобігання: постійний контроль за роботою та правильне налаштування оснащення машини.

Усунення дефекту: при незначному прояві дефекту можливим є використання продукції зі зниженням її сортності; в інших випадках – це невиправний брак.

Поздовжня кривизна представляє собою вигин виробу по довжині щодо основної осі деформації у вертикальній або/та горизонтальній площинах, що може спостерігатися на блюмах, слябах і заготовці, довгомірному сортовому (рисунок 2.91, *а*) та пласкому (рис. 2.91, *б*) прокаті, трубах, прутках, відпресованих виробах і поковках, а також – при холодному висаджуванні на кріпильних металовиробах (рисунок 2.92), у більшій мірі – при складному контурі перерізу продукції (напівфабрикату) не тільки в процесі обробки металу тиском, але й у процесах правки або обрізки.

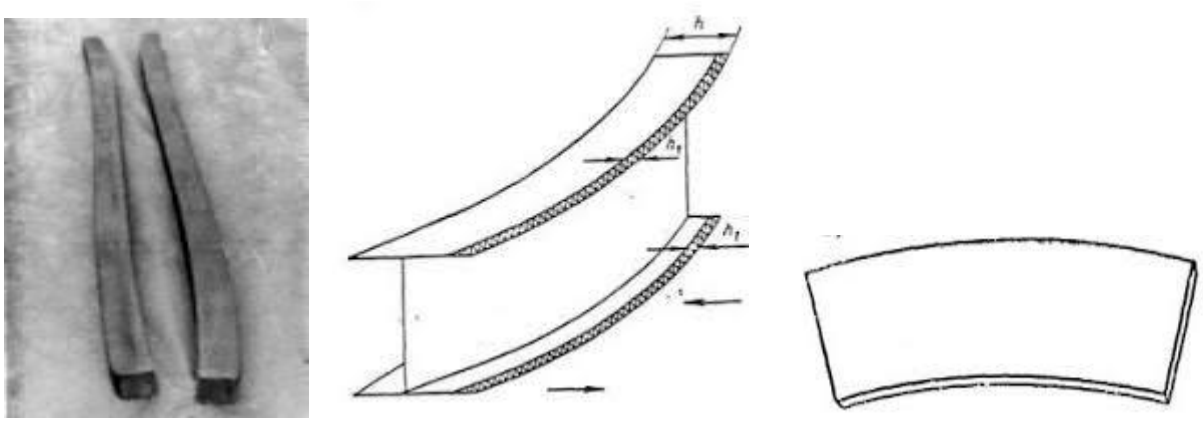
При сортовій прокатці причинами поздовжньої кривизни (*див. рис. 2.91*) можуть стати нерівномірне обтиснення металу у калібрах, знос арматури, пов'язаної з установкою валків, або неправильна установка валків (коли, наприклад, осі валків не лежать в одній площині), структурна неоднорідність у гарячекатаній смузі; недотримання технології кантування.

При листовій прокатці дефект також може проявитися через використання клиноподібної у поперечному перетині заготовки; зміщення смуги, сутунки або пакету листів від осі прокатки при задачі у профільовані валки; вироблення підшипників валків; перекіс осей валків у вертикальній площині або деформування різнотовщинної заготовки з видачею так званого ***«серпоподібного», або «шаблеподібного» прокату*** (*див. рис. 2.91, б*).

Однією з причин появи кривизни у вертикальній площині *при прокатці блюмів, слябів, заготовки та листової сталі* може бути нерівність діаметрів (у калібрах – катаючих діаметрів) валків, що причиняє так званий *верхній* або *нижній* «тиск» на штабу.

Забезпечення верхнього або нижнього тиску може бути корисним на обтискних або на трубопрокатних станах для зменшення динамічних навантажень на ролики прийомних рольгангів при виході розкату з валків. Але при прокатці товстого листа таке явище може спричинити його вигин у вертикальній площині (рисунок 2.93, *а*), утворення складок бокової поверхні (рис. 2.93, *б*) при наступній прокатці та порушення площинності прокату (*див. нижче*).

При холодній висадці, зокрема – кріпильних виробів типу цвяхів (*див. рис. 2.92*) поява дефекту може бути зумовлена неузгодженістю роботи механізму подачі довгомірної заготовки та відрізного або деформуючого інструменту, що зумовлює втрату поздовжньої стійкості виробів.



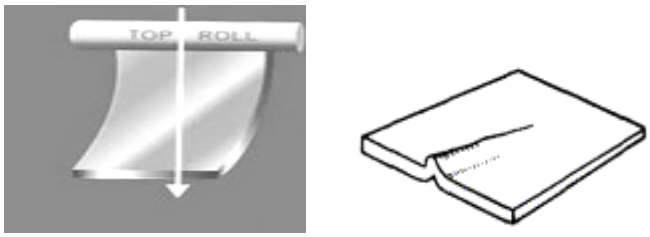
а *б* *в*

г

Рисунок 2.91 – Вигляд поздовжньої кривизни сортового (*а*) та фасонного (*б*) профілей та листової штаби (*в*) з демонстрацією способу вимірювання величини дефекту (*г*) [127, 142]

а *б*

Рисунок 2.92 – Зігнутий (*а*) та кривий (*б*) цвях [130]



а *б*

Рисунок 2.93 – Вигин товстого листа під дією нижнього «тиску» (*а*) та формування *складки* (*б*) металу на боковій кромці прокату (TOP ROLL– верхній валок) [42, 126, 141, 142]

При прокатці труб часто до такої невідповідності можуть призвести: незадовільна настройка калібрувального, редукційного або правильного стану; погане регулювання трубозварювальних агрегатів, деформування заготовки із занадто великою різнотовщинністю (різностінністю); нерівномірна температура по перетину або довжині стакану при прошивці; неправильна установка відвідного рольганга; нерівномірне охолодження розкату на холодильнику; недбале зв'язування в пакети та зберігання, неправильне транспортування.

При волочінні та *пресуванні* прояв дефекту часто спостерігається при не співпадінні осі заготовки та волоки (філь'єри); нерівномірному нанесенні технологічного мастила;

нерівномірному нагріванні чи охолодженні *заготовки* в процесі її *попередньої обробки тиском* (прокаткою, куванням, штамповкою, пресуванням); неякісній правці в прав***и***льній машині тощо.

Викривлення при ковці, або осадці (рисунок 2.94) проявляється як наслідок втрати поздовжньої стійкості заготовки під дією інструменту. При цьому, поздовжня вісь поковки (та площинність) у більшій чи меншій мірі викривлені.

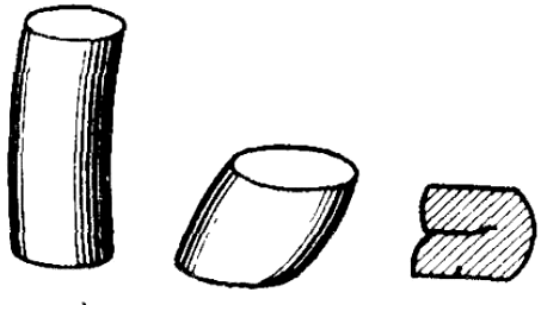


Рисунок 2.94 – Прояв викривлення при ковці (осаджуванні) [145]

Причинами виникнення дефекту можуть стати недостатня прямолінійність первісної заготовки; несприятливе співвідношення розмірів поковки, наприклад, занадто велика її конусність; несправність обрізних пуансонів або невдала конструкція штампів; витягання застряглих поковок зі штампів; занадто швидке і одностороннє охолодження; нагрів для термообробки і охолодження поковок в горизонтальному положенні; неправильне складування, несприятливі умови транспортування, особливо, неохолоджених виробів.

Попередження виникненню викривлення продеформованого виробу (напівфабрикату): забезпечують дотриманням технології обробки заготовки; вірним налаштуванням обладнання; використанням заготовки, яка не має різнотовщинності та неприпустимого вихідного викривлення; рівномірним прогрівом заготовки; рівномірним охолодженням валків; використанням смуги з однаковими по перерізу властивостями міцності.

Усунення дефекту: кривизну довгомірних сортових виробів виправляють правкою (*див. підрозділ 1.2.2.2*) в нагрітому чи холодному стані. Значне викривлення осі короткої заготовки може перевести її в остаточний брак. Використання листової продукції із а зумовлено можливістю додаткової обрізки кромки по довжині. Значний прояв цього дефекту на листової продукції веде до її відбракування.

Гарячу правку поковок (при великому поперечному перерізі) здійснюють виправленням під кувальним пресом; застосування холодної правки супроводжується лише частковим виправленням. Можливість використання напівфабрикату оцінюється величиною зміни розмірів. Незначне відхилення від прямолінійності допускається для поковок валів, що мають великі припуски на механічну обробку. Кривизна кованих колінчастих валів і напіввісей зазвичай не спостерігається, якщо охолодження і термообробку здійснюють в підвішеному стані у вертикальному положенні.

В усіх нормативних документах щодо якості прокатаної тонколистової продукції регламентуються показники її ***планшетності*** («площинності») – *хвилястості та коробуватості.*

Хвилястість та коробуватість – це дефекти, притаманні листовій продукції з різних металів, які виявляються у відсутності площинності (наявності місцевого вигину) в поперечному та/або поздовжньому напрямках.

Хвилястість проявляється у періодичних (хвилеподібних) відхиленнях поверхні виробу від площинності по всій їх ширині (рисунок 2.95, *а*), а також на крайках листів чи

смуг з однієї сторони (*хвилястість кромок одностороння* – рис. 2.95, *б*), з двох сторін (*хвилястість кромок двостороння*) або усередині по осі смуги. Поряд з цими різновидами дефекту іноді на широких тонких гарячо- і холоднокатаних смугах зустрічається «*позацентрова хвилястість*». Наявність хвилястості зумовлює специфічний вигляд пакету листів (рис. 2.95, *в*). Її величина визначається за схемою на рисунку 2.96.

Коробуватість представляється, здебільшого, поодинокими спученнями поверхні листа (див. рис. 2.95, *г*) внаслідок підвищеного місцевого обтиснення середньої частини смуги. Аналогічний дефект притаманній процесу *виготовлення сітки* з проявом її неплощинності.

Причини виникнення: при прокатці листа – місцеві умови нерівномірного деформування та тертя по ширині заготовки; нерівномірність структури металу (відмінності за опором деформації); використання клиноподібної або ромбоподібної у перетині заготовки; неправильне профілювання або шліфування валків, їх нерівномірне зношування; нерівномірне охолодження (розігрівання) бочки валків; неефективна робота систем регулювання товщини та різнотовщинності листового прокату тощо. При виготовленні сітки – невірне налаштування блоку правки дроту.

Спосіб запобігання виникнення – налаштування обладнання для забезпечення необхідної форми та рівномірності розмірів виробу по його ширині шляхом профілювання валків, вибору вірного режиму обтиснень; підвищення натягу; використання пласкої заготовки тощо. Для недопущення *хвилястості* листів необхідно або збільшити опуклість валків (наприклад, шляхом підсиленого охолодження країв бочки), або знизити

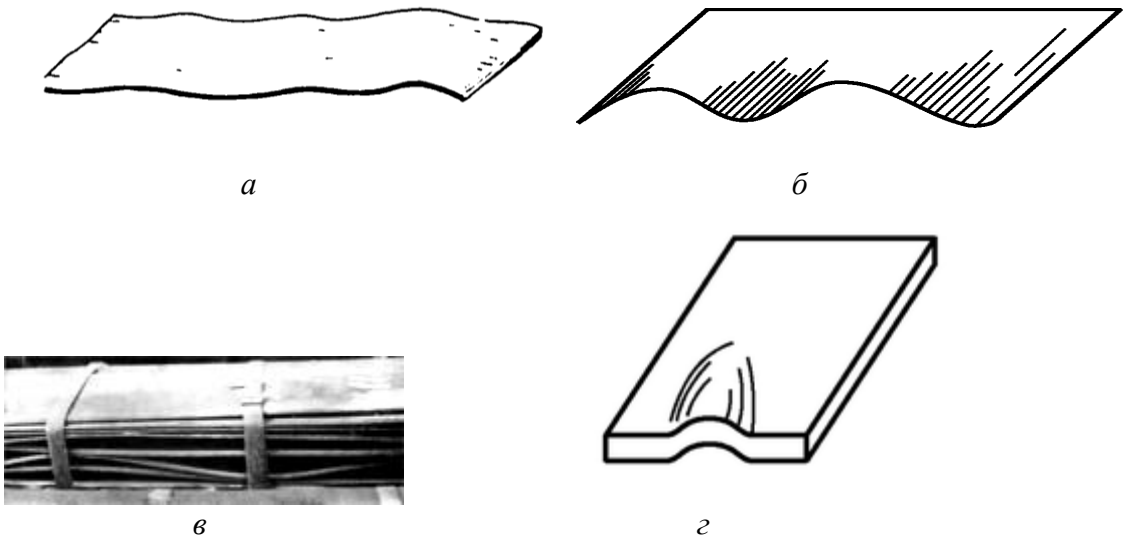


Рисунок 2.95 – Вигляд: хвилястості по всій ширині листа (*а*), односторонньої (*б*), пакету листів з хвилястістю (*в*) та коробуватості (*г*) [146, 147]

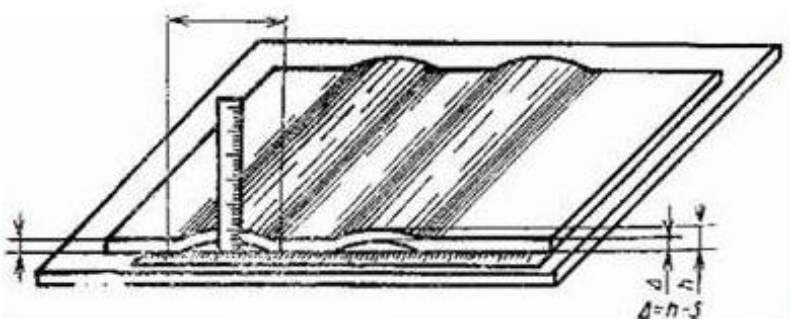


Рисунок 2.96 – Схема вимірювання величини хвилястості прокатаного листа [146]

обтиснення, щоб зменшити прогин валків. Для запобігання *коробуватості* необхідно зменшити опуклість валків або збільшити обтиснення.

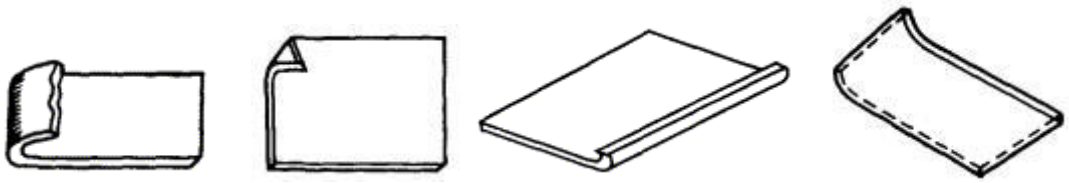
Спосіб усунення: при незначному прояві дефекту на листі – правка прокаткою або дресируванням у холодному чи теплому стані. При великому прояві – переведення металовиробу у брак. Неплощинна сітка, як правило, є невиправним браком.

До дефектів, які також відображують відсутність площинності при прокатці *листового* металу можна віднести **заворот торця** (рисунок 2.95, *а*) та **загнутий куточок** (рис. 2.97, *б*) внаслідок, наприклад, випадкового удару металу об арматуру прокатного або травильного обладнання; **заворот кромки** (рис. 2.97, *в*), що може утворитися при проходженні стрічки крізь вузькі проводки, при косому задаванні розкату у валки, через захоплення неякісно змотаних рулонів кліщами кранів або складуванні таких рулонів; **підгиб** (рис. 2.95, *г*), що може утворитися при різанні гарячих листів на ножицях з похилим ножом.

Для попередження появи вказаних дефектів треба додержуватись технології виготовлення, оздоблення, транспортування та зберігання листових напівфабрикатів та продукції.

Спосіб усунення: при незначному прояві дефекту – правка або видалення дефектної ділянки. При великому прояві – переведення металовиробу у брак.

Зрозуміло, що *неплощинність* притаманна тільки прокатаній листовій продукції, хоча **хвилястість при деформуванні труб** як відповідний специфічний дефект проявляється у періодичних коливаннях зовнішнього або (та) внутрішнього їх діаметра в формі більш-менш виражених хвиль по довжині труби *без надривів металу*. Використання таких труб може бути пов'язано з труднощами подальшої переробки (наприклад, при роботі потокових ліній).



а *б* *в* *г*

Рисунок 2.97 – Дефекти площинності листового прокату внаслідок його механічного пошкодження [146] (*пояснення позицій – у тексті*)

При прояві дефекту *на зовнішній поверхні труб* такий дефект іноді називають «**кільцеватість**» або «**горби на трубах**», або «**гофри**», або «**зовнішні бунти**». Вони ідентифікуться як незначні кільцеподібні відбитки на поверхні труби, що періодично повторюються на невеликій відстані один від одного (рисунок 2.98).

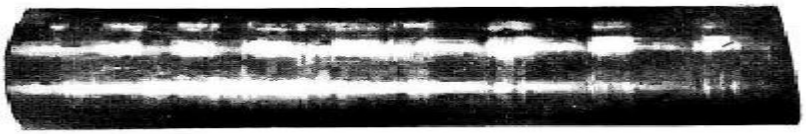


Рисунок 2.98 – Вигляд кільцеватості на поверхні мельхіорової труби [126]

Причинами дефекту можуть стати: *при гарячій деформації* – недотримання налаштування прошивного преса і елонгатора; *на пілігримовому стані* – надмірно велика

подача металу та відсутність плавного переходу від поліруючої до холостої ділянки калібру пільгервалка (*див. рис. 1.81 та 1.82*); зсув бойків калібрів його валків; несправність поворотного механізму подаючого апарату; перекіс осей валків; *на обкатному стані* – заниження температури прокатки; наявність ексцентриситету робочих валків, їх неправильне регулювання; *на розкатному стані* – незадовільне калібрування валків; використання зношених оправок або валків; *при пресуванні труб* – це найчастіше перевищення різностінності заднього кінця труби-заготовки (гільзи) у порівнянні з її переднім кінцем внаслідок втрати поздовжньої стійкості металу, а також нерівномірний прогрів заготовки по її довжині; знос матричного кільця; *при холодній деформації* – забруднення внутрішньої та зовнішньої поверхонь труби (погане травлення, промивка, фосфатування та змащення); занадто інтенсивне обтиснення поперечного перерізу; невірне використання інструменту з налиплими частинками на поверхні або взагалі несправного інструменту; *на стані ХПТ чи ХПТР* – невірне розміщення або занадто довгий або тонкий, або зігнутий стрижень оправки; неправильна форма або занадто сильний знос калібрів; неправильна установка роликів (занадто сильний їх притиск) або вироблення роликів правильної машини; *при волочінні* труб – занадто висока швидкість; знос матричного кільця, погана підготовка поверхні труб перед волочінням; завелике обтиснення поперечного перерізу, неякісне технологічне мастило; *при виготовленні зварних труб* – різкі коливання по товщині первісної смуги; неякісна зачистка задирок.

Попередження виникненню дефекту: дотримання регламентованих режимів процесу деформування металу та роботи обладнання; рівномірний прогрів заготовки; рівномірне охолодження інструменту; використання заготовки, яка не має неприпустимих відмінностей за різностінністю; рівномірне та достатнє видовження заготовки; використання заготовки з однаковими за перерізом властивостями міцності; процес пресування слід вести, починаючи з більш різностінного кінця заготовки, забезпечуючи рівномірний нагрів гільз перед деформацією; вибір необхідної швидкості холодної деформації, що відповідає даній марці сталі і стану заготовки перед волочінням або холодною прокаткою; зменшення ступеня деформації; правильне розташування оправки (стрижень оправки повинен мати необхідну за технологією довжину та поздовжню стійкість); використання прямих стрижнів оправки, які мають необхідний діаметр; своєчасна заміна несправного інструменту, в тому числі – інструменту з налиплими частинками.

Усунення дефекту: усунення хвилястості труби можливо у випадку подальшого застосування холодної деформації (волочінням, прокаткою) на менший розмір зі зниженням сортності виробів. При сильному прояві – це невиправний брак.

Схожий за проявом дефект може мати місце і *при волочінні дроту*. Він проявляється частіше при деформації м'яких металів (золото, свинець, олово тощо) і представляє із себе «**пережими**» – періодичні потоншення на 15…45% діаметру дроту на виході з волоки аж до його обриву (рисунок 2.99).

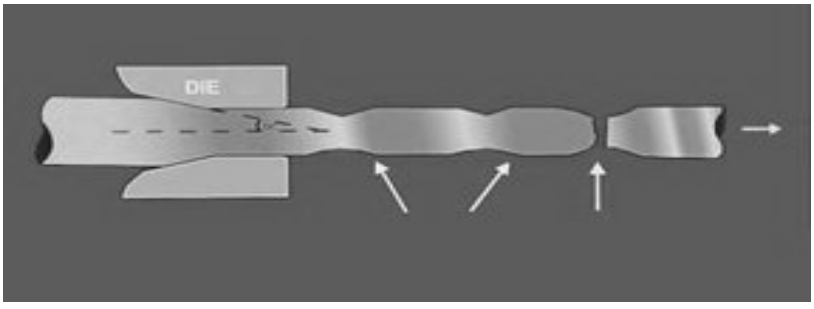


Рисунок 2.99 – Дріт з пережимами та обривом (показані стрілками) на виході з волоки (DIE - волока) [32]

Причинами виникнення дефекту можуть стати: нерівномірність властивостей по довжині заготовки; наявність включень, які можуть призводити до ослаблення ділянок дроту; занадто великі обтиснення за пропуск; завеликий рівень тертя у волоці.

Попередження виникненню дефекту: створення в осередку деформації товстого і якісного шару мастила. Зменшення обтиснення. Застосування заготовки без різких коливань по товщині; своєчасна заміна або правильне налаштування інструменту.

Дефект є невиправним браком.

Періодичні виступи часто спостерігаються при згинанні поздовжніх виробів, зокрема – труб уздовж їх осі на *поверхні* з меншим радіусом. Це так звані **брижі**, які утворюються на частині поперечного перетину внаслідок втрати поздовжньої стійкості стінки металу через появу напружень стискання (рисунок 2.100).

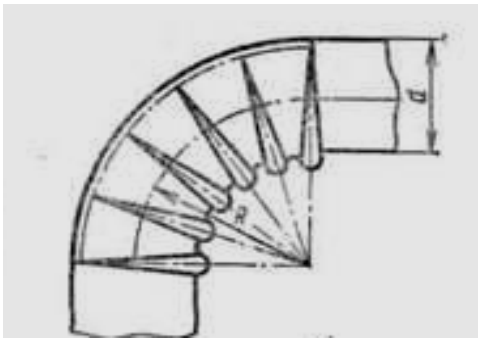


Рисунок 2.100 – Схема утворення брижів на внутрішній поверхні при згинанні труби [127]

Треба розуміти, що одночасно зовнішня поверхня виробу за більшим радіусом згинання отримує поздовжнє напруження розтягнення з ризиком спотворення вихідної форми перетину та появи тріщин.

Попередження виникненню дефекту: дотримуватись технології згинання з неперевершенням критичних умов деформування металу; використання опорних роликів необхідного діаметру; здійснення гнуття на деформівній оправці; місцевий нагрів металу тощо.

Усунення дефекту: при незначній висоті бриж допускається використання виробу за призначенням. При спотворенні форми перетину виробу та/або значній висоті бриж – це невиправний брак.

Ряд дефектів продеформованої поздовжньої металопродукції пов'язана з нестабільністю їх розмірів.

Різноширинність по довжині – дефект, який проявляється на листовій продукції та фланцевих профілях (швелери, балки тощо) і представляє собою відсутність постійної ширини профілю по довжині стрічки, наприклад, звужений передній та/або задній кінці у порівнянні із серединою профілю.

Причинами дефекту можуть стати фактори, які впливають на розширення металу: вади геометрії заготовки, нестабільність або відсутність на кінцевих ділянках стрічки переднього або заднього натягу при безперервній прокатці; нерівномірність тертя; нестабільність температури деформації, низька якість попередньої термічної обробки, тощо; при виготовленні профілів згинанням – нерівномірність поздовжньої деформації місць згину.

Попередження виникненню дефекту: стабілізація деформаційно-температурних режимів обробки упродовж прокату; правильний вибір заготовки.

Усунення дефекту: обрізка (за можливості та доцільності) дефектних бокових кромок прокату; зниження сортності продукції аж до її бракування.

Поздовжня різнотовщинність – відхилення форми, що характеризується нерівномірністю товщини металопродукції або її елементів по довжині.

Причини виникнення: дефект найчастіше викликається великим температурним перепадом по довжині розкату, особливо на тонкій гарячекатаній стрічці; відсутністю переднього натягу розкату *при його виході* з останньої кліті (або заднього натягу при *вході металу* в першу кліть) безперервного стану. Можливою причиною також може бути ексцентричність валків при поздовжній прокатці, яка проявляється у *періодичності* прояву дефекту та *хвилястості* листа (*див. вище*). При *нескінченній прокатці стрічки* підвищена поздовжня різнотовщинність часто фіксується у місцях розташування зварного шва. Таке відхилення обумовлюються технологією і, як правило, не розглядаються як дефекти, хоча при подальшій переробці холоднокатаної смуги (зокрема, при її глибокому штампуванні) наявність поперечного зварного шва (навіть частково або повністю розкатаного) обмежує технологічні можливості отримання якісної продукції.

Аналогічний дефект у вигляді **поздовжньої різностінності** може мати місце при прокатці труб (рисунок 2.101) на редукційному стані з технологічним натягом. Також дефект може бути викликаний нерівномірним зносом оправки по її довжині.

При виготовленні зварних труб аналогічний дефект може виявитися внаслідок вібрації обладнання при автоматичному зварюванні через поздовжні вади (зокрема, наявність свищів у зварному шві (*див. рис. 2.40*).

Попередження виникненню дефекту: дотримання технології виробництва.

Усунення дефекту: труби з поздовжньою різностінністю можна переробляти на станах ХПТ або волочінням; у критичних випадках – обрізка дефектних частин прокату; зниження сортності продукції.

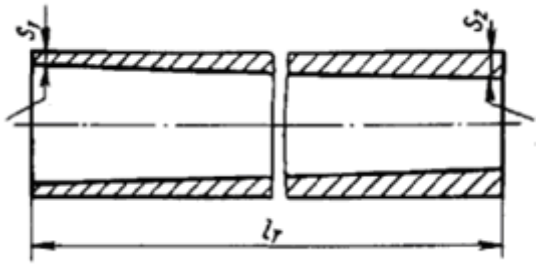


Рисунок 2.101 – Вигляд поздовжнього перетину різностінної труби (S_i – товщина стінки труби) [44]

Частим дефектом металопродукції є нерівномірність товщини виробу за його поперечним перерізом.

Відповідний дефект при прокатці листового металу проявляється як «**поперечна різнотовщинність»**. Цей дефект зазвичай представляє собою суттєву увігнутість або опуклість («сочевицеподібність») поперечного перерізу продукції, що при наступній прокатці може викликати нерівномірність видовження за шириною стрічки та появу «ластівчиного хвоста» або «ялинки» (*див. рис. 2.92*), а на листі – хвилястості або коробуватості (*див. рис. 2.95*).

Причини виникнення. Наявність поперечної різнотовщинності заготовки; незадовільне профілювання або перекіс валків, їх великий знос, недостатнє використання системи противигину валків; нерівномірний нагрів заготовки або валків.

Попередження: дотримання вимог НТД щодо технології обробки металу та експлуатації обладнання.

Усунення. При незначному прояві дефекту можлива додаткова прокатка металу на меншу товщину або його дресирування. Значний прояв дефекту є бракувальною ознакою.

Аналогічний дефект при виготовленні труб фіксується як їх **різностінність** – неоднакова товщина стінки гільзи (труби) за її перерізом (рисунок 2.102), яка, до речі, може бути різною за довжиною виробу.

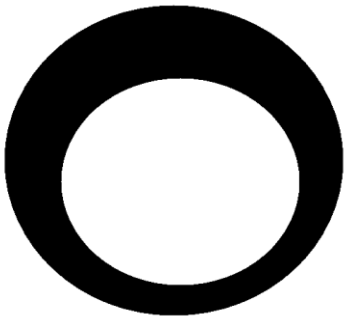


Рисунок 2.102 – Вигляд перетину різностінної гільзи після прошивки [44]

Різновидами дефекту є ***різностінність переднього кінця*** гільзи, ***різностінність заднього кінця*** гільзи. Такий дефект може мати місце при прошивці на пресі злитків, круглої та квадратної заготовки з одержанням стаканів. Аналогічний дефект може проявитися при пілігримовій прокатці (*див. вище*), а також при пресуванні труб (*див. вище*) як ***«зміщення отвору труби»***: відсутність співвісності виробу та отвору в ньому.

Причини виникнення різностінності труб залежать від особливостей обробки металу на відповідному обладнанні.

При прошивці – це може бути косий зріз або зім'яття переднього торця заготовки, зміщення конуса при засвердленні перед прошивкою; відсутність співвісності інструменту і заготовки; мале обтиснення перед носком оправки; овалізація гільзи у вхідному конусі валків внаслідок великої відстані між лінійками або великого зносу останніх; знос робочої поверхні наконечника прошивня; вигин голки; вібрація стрижня; наявність наварів на торці оправки; нанесення нерівномірного шару технологічного мастила; завищений температурний перепад по перетину заготовки при її нагріванні тощо. *При гарячій прокатці труб* – використання заготовки, що має неправильну форму перетину або розміри, її недостатня прямолінійність; косий зріз торця; нерівномірний прогрів заготовки; ексцентричність при прошивці; неспіввісне центрування оснащення стану поперечно-гвинтової прокатки; неправильна установка оправки в стані поперечно-гвинтової прокатки або в стані поздовжньої прокатки; нерівномірний знос оправки, а також калібрів у калібрувальному або редукційному станах; налипання матеріалу на оправку; вигин стрижня оправки; неправильно вибрана температура попередньої прошивки трубної заготовки тощо. *При холодній прокатці труб* – застосування трубних заготовок (гарячекатаних або пресованих) із зсувом каналу труби від осі; вироблення калібрів при прокатці в стані ХПТ; застосування овальних оправок; занадто великий зазор між калібрами валків станів ХПТ; занадто велике зближення валків стана ХПТ тощо. *При пресуванні* – відсутність співвісності оснащення пресу; завдання у прес різностінної гільзи; вигин голки; різнотовщинність мастильних шайб; нерівномірний нагрів по перетину гільзи та ін. *При виготовленні зварних труб* – поперечна різнотовщинність стрічки-заготовки.

Попередження виникненню дефекту. Дотримання вимог НТД щодо технології та експлуатації обладнання.

Усунення дефекту – у залежності від інтенсивності прояву – можлива подальша виправна прокатка на стані ХПТ. У критичних випадках – відбракування виробу.

Граненість (рисунок 2.103) може розглядатися як різновид різностінності труби (*див. вище*) і представляє собою порушення круглої форми перетину внутрішнього отвору труби з одержанням квадрату або шестигранника (залежно від типу стана та сортаменту продукції) з утворенням відповідної нерівномірності товщини стінки.

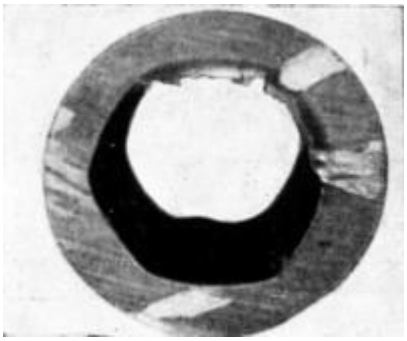


Рисунок 2.103 – Вигляд граненості внутрішнього отвору труби [44]

Причини виникнення: занадто велике обтиснення за діаметром у редукційному стані (особливо при редукційно-розтяжній прокатці); прокатка труб із замалим відношенням зовнішнього діаметра до товщини стінки.

Попередження виникненню дефекту. Дотримання вимог НТД щодо технології та експлуатації обладнання.

Усунення дефекту, як правило, неможливе. Труби невідповідального призначення з невеликою граненістю можна використовувати лише в окремих випадках.

Різнотовщинність у зварному шві – недостатня або надмірна товщина стінки труби в поздовжньому зварному шві.

Причини виникнення: занадто низька або занадто висока, або неспіввісна установка різця при видаленні грата струганням; обробка зварного сполучення нефасонним або зношеним (викришеним) різцем.

Попередження виникненню дефекту. Правильна установка та використання сравного різця при струганні.

Усунення дефекту або неможливе, або обмежено здатністю виправлення профілю зварної труби її додатковим деформуванням на менший розмір. Труби з таким дефектом повинні бути відсортовані.

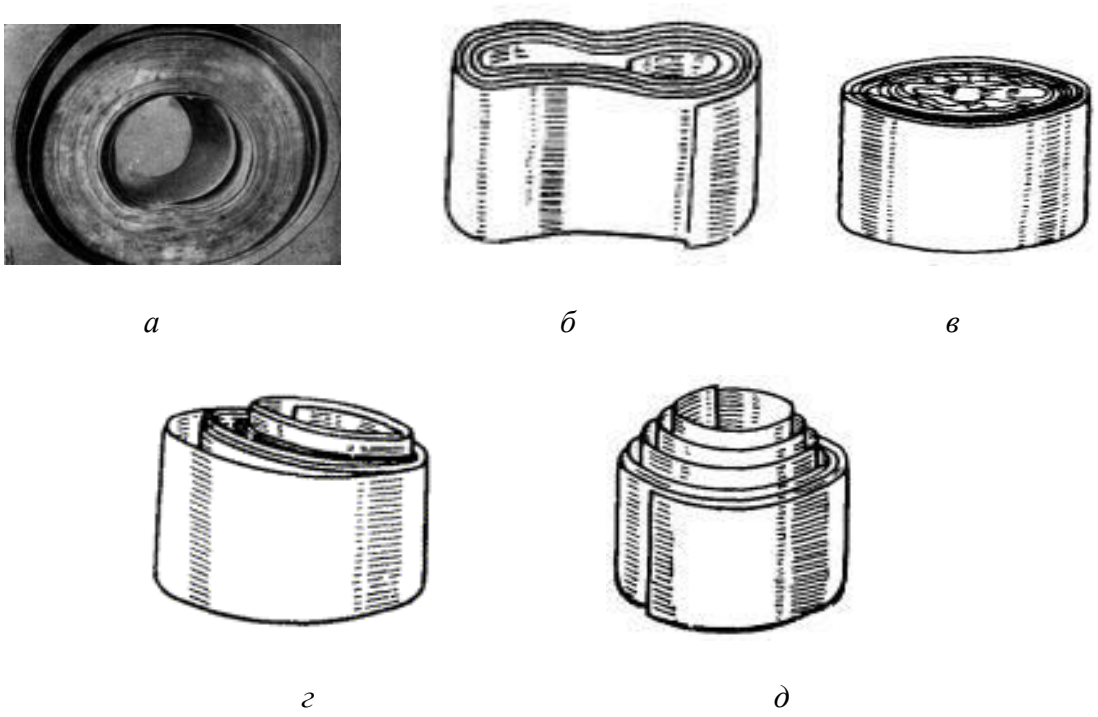
Часто *продукцією*, що передається споживачеві, стає сформований рулон (бунт) довгомірного виробу. При цьому, сам виріб може задовольняти вимогам НТД, а оформлення його постачання – ні. Відповідні дефекти утруднюють подальшу переробку металовиробу.

У листопрокатному виробництві при змотуванні стрічки у рулон необхідної за перетином круглої форми та його транспортуванні виділяють наступні дефекти.

Овальність рулону (рисунок 2.104, *а*) – це порушення кільцеподібної форми рулонів гарячо- і холоднокатаних смуг внаслідок неякісного транспортування та зберігання рулонів або їх занадто великої маси.

Попередження. Дотримання певної маси рулону, яка відповідає товщині смуги; намотування стрічки на гільзу (оправку); обережне транспортування; зберігання рулонів в «один шар» (виключення розміщення рулонів один на одному).

Усунення. Можливо тільки шляхом перемотування рулонів.



а *б* *в*

г *д*

Рисунок 2.104 – Дефекти рулону листового металу [130] (*пояснення позицій – у тексті*)

Зім'ятий рулон (рис. 2.104, *б*) – дефект у вигляді спотворення круглої форми рулону, що утворюється при порушенні режимів його укладання або транспортування.

Попередження виникненню дефекту: дотримання регламентованих температурних та швидкісних режимів змотування смуги у рулон, запровадження заходів щодо збереження рулону при транспортуванні.

Усунення дефекту: розмотування рулону з наступними правкою смуги та повторним змотуванням металу у рулон. Сильно сплющений рулон може бути визнаний невиправним браком.

Рулон зі складками (рис. 2.104, *в*) – дефект форми рулону, при якому на окремих ділянках витків смуги утворилися складки внаслідок наявності коробуватості, серпоподібності (*див. вище*) або несправності налаштування правильних і мотальних машин.

Попередження виникненню дефекту: змотування у рулон стрічки, що не має вад площинності; правильне налаштування обладнання моталок.

Усунення дефекту: розмотування рулону з наступними прокаткою (дресируванням) і правкою смуги та повторним змотуванням металу у рулон. Сильний прояв складок у рулоні може зумовити переведення продукції у брак.

Розпушений («розпущений») рулон (рис. 2.104, *г*) – дефект форми рулону у вигляді нещільно змотаної смуги, що часто зумовлено відсутністю узгодження швидкостей барабана моталки та виходу смуги з чистової кліті прокатного стана.

Попередження виникненню дефекту: узгодження швидкостей змотування та прокатки стрічки; правильне налаштування обладнання моталок.

Усунення дефекту: розмотування рулону з наступним повторним змотуванням металу у рулон. Ця операція може бути підставою для зниження сортності продукції.

Телескопічний рулон (рис. 2.104, *д*) – дефект форми рулону у вигляді виступів витків з внутрішньої частини рулону, що утворюються через невірне налаштування мотальних машин.

Попередження виникненню дефекту: правильне налаштування обладнання моталок.

Усунення дефекту: розмотування рулону з наступним повторним змотуванням металу у рулон. Ця операція може бути підставою для зниження сортності продукції.

Злипання витків (шарів) стрічки може проявитися у змотаному рулоні холоднокатаної сталевої смуги (або в пакеті листів), що причиняє пошкодження поверхні металу при його розмотуванні (розділенні карток).

Причинами виникнення дефекту стають всі фактори, що сприяють зварюванню металу під тиском, а саме: занадто великий натяг при змотуванні смуги; залишки емульсії та інших мастильних матеріалів на поверхні смуги або листа; нерівне (за кромкою) змотування смуги; несприятлива геометрія смуги тощо, – які підсилюються порушенням температурного режиму нагрівання й укладання рулонів (пакетів) та складу захисного газу в печі при наступній термічній обробці металу. У загальному випадку злипання пов'язане з одночасним впливом декількох причин. Іноді ж єдиною причиною злипання можуть бути невидалені залишки травильного розчину з поверхні стрічки.

Попередження. Використання валків з чистою поверхнею; зменшення натягу змотування; повне видалення мастильних матеріалів та залишків травильного розчину з поверхні листа або смуги; рівне по кромці змотування смуги; вибір оптимальної геометрії смуги; оптимальний температурний та атмосферний режим наступної термообробки листів або рулонів смуги; правильне укладання пакетів і рулонів в нагрівальних печах; незначне розпушування витків у рулоні або створення зазору між листами в пакеті перед нагріванням.

Усунення дефекту. При незначному розвитку злипання дефектні місця можуть бути вирізані. При повному злипанні – це невиправний брак.

Дефекти, аналогічні невідповідностям формування рулонів, мають місце і при прокатці дрібносортної та арматурної сталі, гарячекатаного дроту, при волочінні дроту та тонких труб за умов змотуванні продукції в бунт (моток). Тут може мати місце **злипання та переплутування витків.**

Причинами дефекту стають неузгодженість швидкості намотування продукції на шпулю зі швидкістю видачі металу з останнього деформаційного перероблення; занадто висока температура змотування; неякісна робота механізмів моталки тощо.

Запобіганні дефекту – дотримання технології виробництва, синхронізація роботи елементів обладнання

Усунення дефекту можливе при незначному прояві перемоткою з формуванням якісного бунта (мотка); при суттєвому переплутуванні витків та їх злипанні – переведення продукції в брак.

Іноді у мотку стрічки або дроту після деформації заготовки виявляють **багатокінцевість** – специфічний дефект бунтового формування виробу, який проявляється у наявності у бунті більше, ніж двох відрізків продукції.

Причиною дефекту стає підвищена обривність стрічки (дроту) внаслідок завеликих напружень розтягнення, наявності неметалевих включень у металі, порушень режиму обтиснень тощо та недбале формування бунта (мотка).

Запобігання дефекту: дотримання технології виробництва та нормативів експлуатації обладнання.

Усунення дефекту пов’язане з готовністю технології та персоналу до переробки збільшеної кількості відрізків продукції замість реалізації потокового процесу виробництва. Якщо моток (бунт) є товаром, наявність такого дефекту має призвести до зниження його сортності або забракуванню.

2.2.5 Дефекти зварювання

При виробництві зварних виробів (зокрема, труб та сітки, а також при формуванні зварюванням встик заготовки для забезпечення нескінченної прокатки стрічки або дроту) поява ряду дефектів може бути пов'язана з невиконанням вимог до якості місць зварювання.

Взагалі, *дефектами зварних з'єднань* вважають будь-які відхилення від заданих нормативними документами параметрів з'єднань при зварюванні, що утворилися внаслідок порушення вимог до зварювальних матеріалів, підготовки, складання і зварювання деталей, термічної та механічної обробки зварних з'єднань й конструкції в цілому [148].

При цьому, в зоні зварного з'єднання (рисунок 2.105) розрізняють місця основного металу (показано світло-сірим кольором), зону термічного впливу (сірий колір) і метал зварного шва (темно-сірий колір) [148].

Рисунок 2.105 – Зони зварного з'єднання [148] (*пояснення – у тексті*)

За даними Американського товариства інженерів-механіків (ASME) причини дефектів зварювання розподіляються так: 45% – помилки вибору технології зварювання, 32% – помилки зварювальника, 12% – збої у роботі зварювального обладнання, 10% – неправильно підібрані зварювальні матеріали, 1% – інше.

Класифікація дефектів зварювання викладена у ДСТУ 3491, а також у ДСТУ EN ISO 6520-1. Їх поділяють на шість груп (рисунок 2.106) [149, 150]:

А) ***Тріщини***, відображені на рис. 2.106, *е, ж* (код дефекту за ДСТУ 3491 – «100», код дефекту за класифікацією Міжнародного інституту зварювання «*Е*») – порушення суцільності, викликане місцевим розривом шва, що може виникнути в результаті охолодження або впливу навантажень.

Б) ***Пори*** (відповідні коди дефекту: «200», «*А*») – порушення суцільності довільної форми без кутів, утворене газами, що затримались у розплавленому металі (*на рис. 2.106, е, ж показані скупченнями точок*).

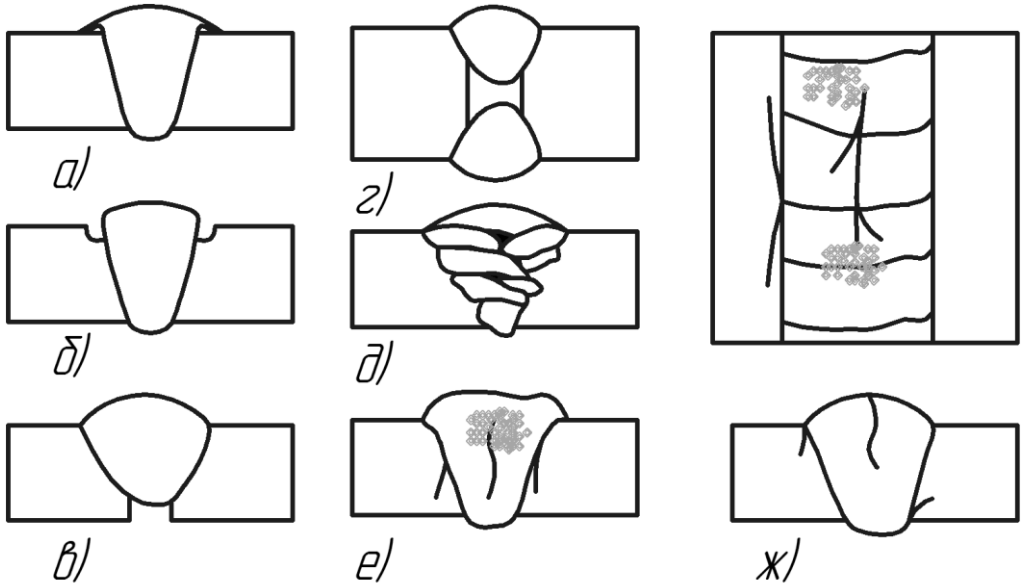


Рисунок 2.106 – Схематичне представлення основних дефектів зварних з'єднань [148…150]

В) ***Тверді включення***, відображені на рис. 2.106, *д* (код дефекту «300») – тверді сторонні металеві чи неметалеві речовини у металі зварного шва. Включення, які мають хоча б один гострий кут, називаються *гострокутними включеннями*.

Г) ***Несплавлення*** («401»), показане на рис. 2.106, *г*, та *непровар* («402»), показаний на рис. 2.106, *в* – відсутність з'єднання між металом зварного шва і основним металом або між окремими валиками зварного шва.

Д) ***Порушення форми шва*** («500») – відхилення форми зовнішніх поверхонь зварного шва або геометрії з'єднання від усталеного значення у вигляді *напливу* (рис. 2.106, *а*), *підрізу* (рис. 2.106, *б*) або *зміщення кромок* (рис. 2.106, *в*) тощо.

Е) Інші дефекти («600») – усі дефекти, що не можуть бути віднесені до однієї з перелічених вище груп, наприклад, ***прожог***, який характеризується поглибленням або отвором у зварному шві внаслідок перегріву металу, ***випадкова дуга*** («601») – місцеве пошкодження поверхні основного металу, що прилягає до зварного шва і виникло в результаті випадкового горіння дуги; ***бризки металу*** («602») – краплі наплавленого або присаджувального металу, які утворились під час зварювання і прилипли до поверхні затверділого металу зварного шва або навколо шовної зони основного металу; ***поверхневі задирки*** («603») – пошкодження поверхні, викликане видаленням тимчасово привареного пристрою; ***потоншення металу*** («604») – зменшення товщини металу до значення, меншого за допустиме, при механічному обробленні.

У свою чергу, вказані дефекти також поділяють на різновиди, які мають специфічні причини.

Так, ***тріщини***, що виникають у зварних з'єднаннях, можуть мати місце у металі зварного шва, зоні термічного впливу та основному металі (*див. рис. 2.105*). Вони поділяються:

–***залежно від орієнтації*** на:

- *поздовжні* («101», *«Ea»*) – зорієнтовані паралельно до осі зварного шва та, переважно, обумовлюються високими усадковими напруженнями;
- *поперечні* («102», *«Eb»*) – зорієнтовані упоперек до осі зварного шва. Вони зазвичай не є глибокими та утворюються в результаті поздовжньої усадки металу з низькою пластичністю;
- *радіальні,* або *зіркоподібні* («103», *«E»*) – радіально розбіжні з однієї точки.

Крім цього, окремо виділяють такі види тріщин:

- *розташовані у кратері зварного шва* («104», *«Ec»*);
- *відокремлені* («105», *«E»*);
- *розгалужені* («106», *«E»*);
- *мікротріщини* («1001»), що виявляються фізичними методами при не менш ніж 50-кратному збільшенні;

– ***за механізмом утворення*** на:

- *холодні тріщини* – локальні міжкристалічні руйнування металу зварних з'єднань у вигляді тріщин, що виникають у шві або навколошовній зоні під дією залишкових напружень, спричинених зварюванням. Основними причинами появи холодних тріщин є: природна схильність структури металу, наприклад, мартенситної чи перлітної, до тріщиноутворення; присутність у структурі металу водню (воднева крихкість); значний (від -100 до +100 °С) діапазон робочих температур експлуатації з'єднання; висока жорсткість конструкції з'єднань; помилки у виборі технології зварювання;
- *гарячі тріщини* – це крихкі міжкристалічні руйнування металу шва у навколошовній зоні. Вони виникають у твердо-рідкому стані в процесі кристалізації та при високих температурах у твердому стані та розташовуються на межі зерен. Гарячі тріщини, в основному, зумовлені дією двох факторів: наявністю рідких прошарків між зернами металу в процесі кристалізації та усадковими деформаціями. В процесі твердіння відбувається переміщення домішок і шлаків у міжзеренні простори, що знижує деформаційну спроможність шва та навколошовної зони. Нерівномірність усадки шва і

основного металу при охолодженні викликає внутрішні напруження і, як наслідок, появу мікро- і макроскопічних тріщин.

Загальними методами зниження тріщиноутворення при зварюванні є:

- прожарювання флюсів перед зварюванням;
- попереднє підігрівання заготовок до 250…450 °С;
- зварювання у режимі з оптимальними параметрами;
- повільне охолодження металу після зварювання;
- проведення після зварювання м'якого відпалу з метою зняття залишкових напружень.

Для зменшення появи холодних тріщин використовують різноманітні технологічні прийоми, наприклад, зварювання переривчастим швом, багатопрохідне зварювання тощо.

До зменшення утворення гарячих тріщин призводять такі технологічні прийоми як:

- зменшення об'єму провокуючих домішок (сірка, фосфор та ін.) у металі заготовок, що зварюються;
- зменшення у металі шва елементів, що утворюють хімічні сполуки з низькою температурою твердіння (хром, молібден, ванадій, вольфрам, титан), що порушують зв'язок між зернами;
- зниження жорсткості закріплення зварюваних заготовок і конструктивної жорсткості зварного вузла, що чинять опір деформуванню елементів при остиганні.

Виникнення ***пор*** при зварюванні переважно зумовлюється газами, що затримались у розплавленому металі. За розташуванням їх поділяють на такі, що:

- *рівномірно розподілені* по зварному шву («2012»);
- *розташовані скупченням* («2013») – група газових порожнин (три або більше), розміщених купчасто з відстанню між ними меншою за три максимальні розміри найбільшої з порожнин;
- *розташовані ланцюжком* («2014») – ряд газових пор, розміщених в лінію, звичайно паралельно до осі зварного шва, з відстанню між ними, меншою за три максимальні розміри найбільшої з пор.

До *порожнин* також, відносять наступні їх різновиди:

- *довгаста порожнина* («2015», «*Ab*») – несуцільність, витягнута вздовж осі зварного шва, з довжиною, що не менше ніж у два рази перевищує її висоту;
- *свищ* («2016», «*Ab*») – трубчаста порожнина в металі зварного шва, викликана виділенням газу. Форма та положення свища визначаються режимом твердіння та джерелом газу. Зазвичай свищі групуються у скупчення та розподіляються ялинкоподібно;
- *поверхнева пора* («2017») – газова пора, що порушує суцільність поверхні зварного шва
- *усадкова раковина* («202», «*R*») – порожнина, що утворюється внаслідок зсідання металу під час твердіння.

Окремим випадком усадкової раковини є *кратер* («2024», «*K*») – усадкова раковина на кінці валика зварного шва, не заварена до або під час виконання наступних проходів.

При зварюванні під флюсом появі водневих пор запобігають, в основному, очищенням зварювальних матеріалів та основного металу від водневих сполук та введенням до флюсу фториду кальцію.

Виділяють такі види ***твердих включень***:

- *шлакове включення* («301», *«Ba»*) – шлак, що потрапив у метал зварного шва;
- *флюсове включення* («302», *«G»*) – флюс, що потрапив у метал зварного шва;
- *оксидні включення* («303», *«J»*) – оксиди металу, що потрапили у метал зварного шва під час твердіння;
- *металеве включення* («304», *«H»*) – частинка чужорідного металу (вольфрамова, мідна тощо), що потрапила до металу зварного шва.

Виділяють такі типи ***несплавлення та непровару*** як відсутність з'єднання між металом шва і основним металом або між окремими валиками зварного шва:

- за боковою поверхнею;
- між валиками;
- у корені зварного шва.

До ***порушень форми зварного шва*** за ДСТУ 3491 відносять:

- *підріз неперервний* («5011», *«F»*) або *підріз переривчастий* («5012», *«F»*) – поздовжня заглибина на зовнішній поверхні валика зварного шва, що утворюється при зварюванні;
- *усадкова канавка* («5013») – підріз з боку кореня одностороннього зварного шва, викликаний зсіданням металу по межі сплавлення (рисунок 2.107);

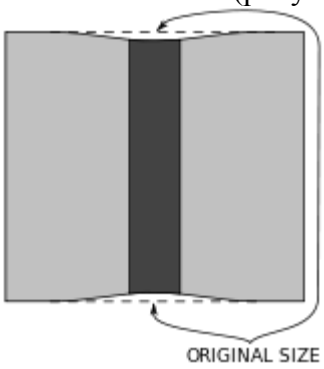


Рисунок 2.107 – Вигляд поздовжньої усадкової канавки в місці зварного шва (ORIGINAL SIZE – номінальний, потрібний розмір, показаний пунктиром) [148]

- *перевищення опуклості стикового* («502») і *кутового* («503») швів – надлишок наплавленого металу на лицьовій стороні шва (стикового і кутового, відповідно) понад установлене значення;
- *перевищення проплаву* («504») – надлишок наплавленого металу на зворотній стороні стикового шва понад установлене значення;
- *неправильний профіль зварного шва* («505») – кут між поверхнею основного металу і площиною, дотичною до поверхні зварного шва, менший від установленого значення;
- *наплав* («506») – надлишок наплавленого металу, що натік на поверхню основного металу, але не сплавлений з ним;
- *лінійне зміщення* («507») – зміщення між двома зварюваними елементами, при якому їх поверхні розташовані паралельно, але не на потрібному рівні;
- *кутове зміщення* («508») – зміщення між двома зварюваними елементами, при якому їх поверхні розташовані під кутом, що відрізняється від потрібного (рисунок 2.108);

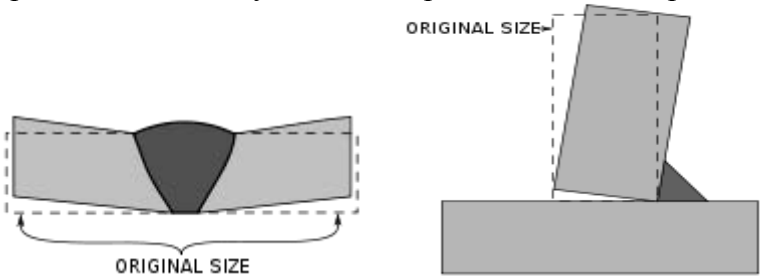


Рисунок 2.108 – Вигляд кутового зміщення (ORIGINAL SIZE – номінальний, потрібний розмір, показаний пунктиром) [148]

- *натікання* («509») – метал зварного шва, який осів внаслідок дії сили тяжіння і не має сплавлення зі з'єднуваною поверхнею. Натікання часто виникають при зварюванні кутових або стикових швів у горизонтальному положенні;

- *пропалювання* («510») – витікання металу зварювальної ванни, внаслідок якого утворюється наскрізний отвір у зварному шві;
- *неповне заповнення розроблення крайок* («511») – поздовжня неперервна або переривчаста канавка на поверхні зварного шва через недостатність присаджувального металу при зварюванні;
- *надмірна асиметрія кутового шва* («512») – надмірне перевищення розмірів одного катета над іншим;
- *нерівномірна ширина шва* («513») – відхилення ширини від установленого значення уздовж зварного шва;
- *нерівна поверхня* («514») – груба нерівномірність форми поверхні підсилення шва по довжині;
- *увігнутість кореня шва* («515») – неглибока канавка з боку кореня одностороннього зварного шва, яка утворилась внаслідок усадки;
- *пористість кореня зварного шва* («516») – наявність пор у корені зварного шва внаслідок виникнення бульбашок під час затвердіння металу;
- *відновлення* («517») – місцева нерівність поверхні в місці відновлення зварювання;
- *спотворення форми* – викривлення нейтральної осі виробу після зварювання (рисунок 2.109), що виникає внаслідок прояву залишкових напружень у металі.

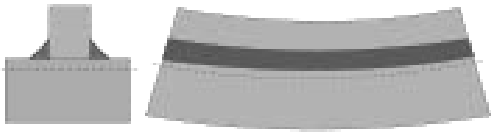


Рисунок 2.109 – Вигляд викривлення (спотворення форми) нейтральної осі виробу внаслідок зварювання (NEUTRAL AXIS – нейтральна вісь) [148]

Як видно, назви та походження дефектів зварних з'єднань, значною мірою, збігаються з дефектами металу, його лиття та термічної обробки, що представлені вище (*див. підрозділи 2.2.1…2.2.3*).

Доцільним при цьому уявляється мати *стандартизований* перелік, опис та маркування дефектів, що мають місце в технологіях ОМТ типу ДСТУ 3491 та ДСТУ EN ISO 6520-1.

Зокрема, одним з типових прикладів *специфічного прояву* дефектів зварювання в технологіях ОМТ є ***короткі непроварені ділянки*** *(див. рис. 2.106, в*) у зварному шві труб, що проявляються на тілі виробу з певною періодичністю або хаотично, причому їх протяжність і глибина в місці формування зварного шва можуть бути самими різними. Цей дефект в перехрестях дротів при виготовленні зварних сіток також часто має місце (рисунок 2.110).

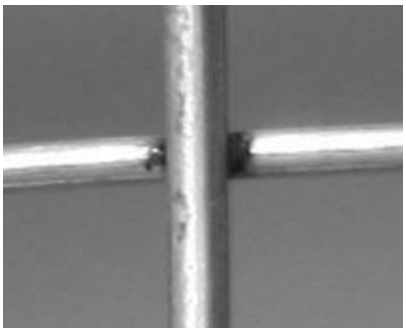


Рисунок 2.110 – Вигляд з'єднання дротів в перехрестях зварної сітки [110…113]

При забезпеченні суцільності стрічки зварюванням при нескінченній прокатці або волочінні дроту дефекти зварного шва можуть бути причиною розривів металу та травмування поверхні інструменту.

В узгодженні з попередніми даними, *причинами виникнення таких дефектів* стають: ліквація вуглецю і сірки в металі; забруднення електрода або зминання його кінця при русі вздовж заготовки (періодично) при різних видах електрозварювання; неправильне регулювання або зношений (пошкоджений) індуктор і (або) контакт; зміщення кромок смуги, підготовлених до зварювання; задирки на кромках стрічки унаслідок поганої зачистки або обрізки крайок; ексцентричність роликів бічного тиску при зварюванні труб; неповний притиск відрізків дроту при виготовленні сітки тощо.

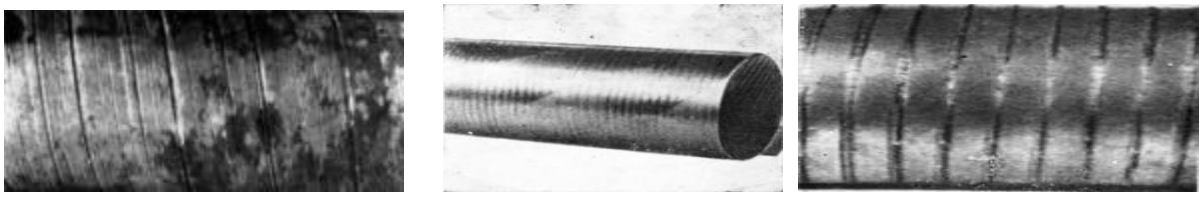
Попередження дефектів: забезпечення необхідного притиску зварюваних елементів виробу, створення умов для плавного і безперервного руху зварювальних електродів уздовж місця зварювання; своєчасна заміна зварювальних електродів; *при виготовленні зварних труб* – регулювання ходу роликів бічного тиску, а при необхідності – їх заміна; використання в залежності від розміру труби відповідних індукторів і контактів; при стиковому зварюванні стрічки або дроту – забезпечення якісної підготовки торців, що зварюються.

Усунення: як правило, більшість дефектів зварювання можна переварити. Труби після такого ремонту можна застосовувати тільки для невідповідального призначення зі зниженням сортності.

2.2.6 Дефекти операцій оздоблення металовиробів після обробки тиском

Вище вже згадувались, що для доведення виробів до вимог НТД, окрім операцій деформування, застосовують певні види оброблення металу, які є складовими технологій ОМТ: термічна обробка, правка, різання, обточування, шліфування, полірування, нанесення покриттів, зберігання тощо). Але й самі ці процеси можуть призвести до появи відповідних дефектів, основні з яких розглянуто далі.

Гвинтовий слід внаслідок правки являє собою спіралеподібні пошкодження (плоскі вдавини, насічки, подряпини) на поверхні металу круглого перетину (рис. 2.111, *а*), який був підданий правці у «косих» роликах. Дефект частіше спостерігається на циліндричних виробах у місцях, що мають відхилення від круглого профілю.



а *б* *в*

Рисунок 2.111 – Вигляд гвинтового сліду на циліндричному профілі після правки (*а*) та обточування різцем (*б, в*) при різному збільшенні) [131]

Причина утворення – неправильна установка правильних роликів, що викликає надто сильну локальну деформацію; пошкоджені правильні ролики (викришування на їх поверхні або сильний знос); пригари, раковини і відшаровування на поверхні металу, що піддається виправленню.

Запобігання дефекту: належне налаштування й експлуатація обладнання та дотримання технології правки.

Усунення дефекту: для металу круглого перетину можливе шліфування. Усунення дефектів профілів з формою перерізу, відмінною від круглої, наприклад, прямокутною чи овальною ускладнено.

Гвинтоподібні сліди обточування циліндричних виробів (рис. 2.111, *б, в*) – це поверхневі дефекти, що візуально подібні до попередньої невідповідності, але виникають при обробці *різанням* круглого профілю, наприклад, труб. Вони можуть мати вигляд шорсткуватих локальних чи розташованих уздовж всієї обробленої заготовки спіралеподібних неглибоких рисок від дії різця або відбитків від затискних кулачків. На поверхні металу після такої обробки завжди залишаються спіралеподібні сліди. Якщо їх величина менша допуску, вони не є дефектом.

Причини виникнення: погані установка та заточення або знос різця; невірно обрана швидкість різання; недостатнє або занадто сильне закріплення заготовки в затискних кулачках патрона при обточуванні; зношення або знос затискних кулачків; заїдання заготовки через наявність залишків окалини в напрямних роликах (люнетах) токарного верстата; ексцентриситет при установці заготовки в напрямних роликах верстата.

Попередження. Застосування вихідних заготовок, добре очищених від окалини. Правильна настройка токарного верстата. Своєчасна зміна зношених затискних кулачків верстата та різців. Застосування оптимальної швидкості різання.

Усунення. Повторне обточування на менший діаметр (якщо це технічно та економічно доцільно).

Неповний різ спостерігається зазвичай при чистовому обрізанні елементів кріпильних виробів. Зокрема, при виготовленні цвяхів можуть спостерігатися недорублені окуски на вістрі (рисунок 2.112).

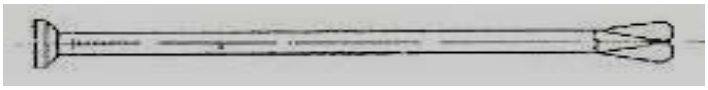


Рисунок 2.112 – Вигляд цвяха з недорубленими окусками на вістрі [115…117]

Причиною дефекту стають неправильна настройка (закріплення) або затуплення відрізних ножів автомата, а також завелика пластичність металу.

Запобігання прояву дефекту – правильне налаштування обладнання, своєчасна заміна зношених ножів; якісна підготовка заготовки.

Усунення дефекту – зниження сортності виробів аж до переведення її в брак.

Косий зріз – проявляється у неперпендикулярності торця сортових профілів, смуг, листів, трубної заготовки та труб до їх поздовжньої осі (рисунок 2.113) в процесі розрізання штаби на мірні довжини для наступної деформації або передачі до складу.

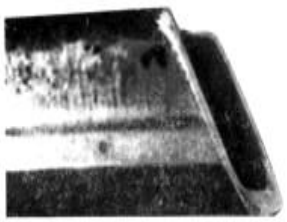


Рисунок 2.113 – Вигляд косого зрізу на сортовому профілі [127…129]

Причинами дефекту можуть стати: в *потоці сортової прокатки* – неузгодженість швидкостей виходу розкату зі стану та частоти обертання пили або швидкості летючих ножиць; підгиб диска пили; неточність розмітки і різання; неправильний кут подачі заготовки, неправильний профіль вирізів у ножах; застосування невідповідних за розміром або тупих пил. На *листовій продукції* – завеликий зазор між дисковими ножами; значна одностороння хвилястість кромки і пов'язаний з цим неплоский притиск листа до основи неякісна збірка пакетів листів. *На трубах* – погане закріплення або установка

труби в затискному пристосуванні при різанні на пилі або на обрізному верстаті. На пресованій трубній заготовці – знос відрізної матриці; велика різниця діаметрів отвору в відрізному кільці і наконечнику верхньої голки; неповна посадка внутрішньої втулки контейнера на матрицю.

Запобігання прояву дефекту: дотримання технології ОМТ; дотримання технології правки перед розрізанням заготовки та самого різання; синхронізація ходу пили і розкату; точна розмітка і встановлення, а також щільний притиск смуг і листів, які мають хвилястість; міцний притиск труби в затискному пристрої при різанні на пилі або на відрізному верстаті; точна установка різального інструменту; моніторинг зношування ножів (пил, відрізного кільця) та своєчасна їх заміна тощо.

Усунення дефекту: вирізка дефектних кінців виробу; додаткова обрізка смуги (труби) прямокутним різом у межах допуску; зниження сортності продукції.

Ступінчастий різ («зазубрини»). Дефект часто проявляється при обрізці бокових кромок стрічки, наприклад, перед формовкою зварних труб як місцева зміна напряму поздовжньої утворюючої прокату (рисунок 2.114), зокрема, при обробці шаблеподібної та/або неплощинної стрічки; внаслідок зношення дисків пил, їх викривлення або наявності на них зубів різної висоти.

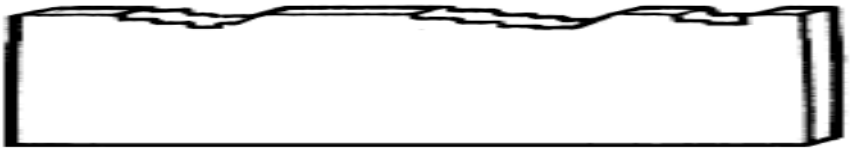


Рисунок 2.114 – Вигляд ступінчастого різу («зазубрини») на боковій кромці стрічки [130]

Попередження виникненню дефекту: використання прямолінійної та площинної заготовки; дотримання технології різання; використання справного ріжучого обладнання.

Усунення дефекту: ремонт стрічки шляхом додаткового обрізання кромок у межах допуску. При цьому може стати необхідним переведення виробу зменшеної ширини або зниження його сортності.

Грубий зріз або скол з відривом металу проявляється як наявність на поперечному перерізі заготовки в місці різу зім'ятої частини та частини з грубою шорсткістю.

Причини дефекту. Знижена пластичність металу заготовки, порушення режиму різання або зношення ріжучих кромок ножів, завеликий притиск ножів до металу.

Запобігання дефекту: дотримання технології та режиму різання, використання пил або ножиць з ножами, які розміщені під кутом у площині, що перпендикулярна осі виробу.

Усунення дефекту: за необхідності – шліфування торця заготовки після дефектного різу, якщо це є економічно та технічно доцільним.

Задирка при розрізанні (*відрізняти від «задирки» при прокатці!*) – це дефект поверхні у вигляді гострого гребеня (рисунок 2.115), утворення якого є характерним при різанні або відокремлюючих операціях листової штамповки. Зокрема, він характерний для контуру різу та місць вирубки та пробивки заготовки з в'язкого металу відрізними (вирубними) штампами зі зношеними кромками. У цьому разі задирка проявляється гострим тонким нерівним виступом (*гребенем*).

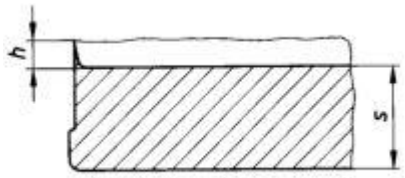


Рисунок 2.115 – Вигляд частини перетину деталі із задиркою після відокремлюючої операції листової штамповки [78, 137]

Причини виникнення. Тупий або зношений різальний інструмент. Неправильно вибрані швидкість різання та подача (хід) інструменту. Неоптимальна величина зазору між робочими поверхнями матриці і пуансона, нещільне кріплення штампу в пресі; занадто низька температура заготовки при різанні; неповна обрізка кінців виробу у певному перетині на верстатах.

Попередження. Застосування різального інструмента, що відповідає умовам обробки (врахування складу, властивостей і розмірів металу, що розрізають); правильне налаштування штампів; вибір і підтримка необхідної відповідної температури та швидкості різання; своєчасна заміна зношеного різального інструменту.

Усунення. Видалення задирок можливе при додатковій обробці (шліфовкою, зачисткою, додатковим обрізанням).

Завусенець – незрізаний залишок задирки *(див. вище)*. Залишені на заготовці завусенці можуть викликати *закат* або *затиск* при наступних операціях ОМТ *(див. вище)*.

Причини дефекту. Використання тупих (зношених) ножів чи пил при торцевому різі заготовки. Погана підготовка та установка обрізного штампу; зміщення поковки під час укладання її на обрізну матрицю.

Запобіганню дефекту сприяє використання справного ріжучого обладнання та дотримання технології різу (вирубки, обрізання тощо).

Усунення дефекту – можливе шляхом зачистки місць недбалого різу.

Забоїни – це дефект поверхні (здебільшого – поковок) у вигляді розташованого поглиблення неправильної форми, часто – з гострими краями, що утворився від удару. Аналогом дефекту при ОМТ стає вм'ятина (*див. рис. 2.63*)

Причинами дефекту можуть стати необережне витягання захватами застряглої поковки з порожнини штампу, ударне травмування гарячих поковок при транспортуванні або складуванні; попадання сторонніх предметів («відсічок») в обрізний штамп; спільна очистка в барабанах або дробоструминних установках великих і дрібних поковок та ін.

Запобігання дефекту: усунення потенційних причин його виникнення (наприклад, застосування обережних прийомів транспортування, дотримання технології та режиму механічного очищення поковок тощо).

Усунення дефекту: у залежності від ступеня пошкоджень та призначення виробів – ремонт абразивною обробкою, зниження сортності або відбракування.

Ряд дефектів металовиробів можуть виникнути при порушенні регламентованих режимів механічної обробки їх поверхні, наприклад, при усуненні абразивною обробкою інших дефектів.

Подряпини при шліфуванні – темні смуги або подряпини, розташовані впоперек напряму пересування виробу (осі прутку) при верстатному шліфуванні, які порушують загальний світлий блискучий зовнішній вигляд поверхні. Аналогічний дефект може спостерігатися при ОМТ як негативний вплив валків та привалкової арматури (*див. рис. 2.111*). Одночасно з подряпинами при шліфуванні може виявлятися локальна ***сітка***

шліфувальних тріщин перепалу, ***«локальних прижогів»***, а також ***кольори мінливості*** (*див. рис. 2.28*), які свідчать про підвищену температуру поверхні при шліфуванні [135].

Причини виникнення. Вібрація штанги (прутка) у станках-автоматах при шліфуванні, наявність на металі поверхневих дефектів прокатного походження. Застосування шліфувальних кругів з невідповідною зернистістю або з дефектами. Недостатнє охолодження стрічки при шліфуванні. Занадто сильний притиск шліфувального інструменту.

Попередження. Налагодження роботи обладнання та самого процесу шліфування. Застосування належного шліфувального інструменту та забезпечення необхідного охолодження, які відповідають матеріалу, що обробляється. Вибір оптимальної сили притиску шліфувального інструменту до оброблюваної заготовки з певного матеріалу з урахуванням його стану (твердості) після термічної обробки.

Усунення дефекту. Окремі дефекти можуть бути усунуті при повторній шліфовці. Усунення сітки шліфувальних тріщин ускладнено. При неможливості додаткової обробки сортність виробу знижують.

Сліди полірування проявляються у нерівномірності блиску полірованої поверхні, на якій зазвичай стають видимими спіралеподібні смуги або шорсткість (рисунок 2.115).

Рисунок 2.116 – Вигляд поверхні після полірування (видні сліди обробки та шліфувальні тріщини) [135]

При цьому, як і при попередньому дефекті, місцями можуть зустрічатися сліди перепалу: «***тріщини перепалу***», «***прижоги***» (*див нижче*), - і ***кольори мінливості***. Схильність до утворення «слідів полірування», рівно як і шліфування (*див. вище*) збільшується з підвищенням вмісту вуглецю і ступеня легування сталі. Холоднокатана сталева смуга зі слідами полірування непридатна для нанесення поверхневих покриттів, оскільки в результаті не досягається однорідний блискучий вигляд і погіршується стан поверхні.

Причини виникнення. Нестабільне пересування смуги під час полірування, наявність на ній поверхневих дефектів прокатного походження. Занадто сильний притиск полірувального інструменту. Застосування пошкодженого полірувального інструменту або невідповідної зернистості. Неякісна полірувальна паста.

Попередження. Дотримання необхідної величини притиску при поліруванні. Застосування якісних полірувальних матеріалів. Застосування для полірування вихідних виробів без раковин і відшарувань.

Усунення. Шліфування поверхні та повторне полірування з дотриманням вимог НТД.

Операції оздоблення (на додачу до «тріщин перепалу», про які мова йшла вище) можуть супроводжуватись появою тріщин у напівфабрикаті, яких не було видно на попередніх операціях обробки тиском.

Торцеві тріщини з'являються *при різанні*, головним чином, крупних профілів тупим або погано налаштованим інструментом. Під дією виникаючих залишкових

напружень матеріал розтріскується іноді через 2…6 годин після різання. Тому цей дефект *обробного походження* за фізичною суттю є аналогічним тріщинам внаслідок залишкових напружень (*див. матеріали до рис. 2.68*). Взимку брак за торцевими тріщинами особливо зростає, оскільки низька температура сприяє розтріскуванню металу навіть при різанні профілів з характерним розміром менше 50 мм. Торцеві тріщини на поковках після їх розрізання легко виявляються за їх розташуванням на кінцях і торцях виробів. Дефект також може проявитися у вигляді розривів на торцях (рисунок 2.117) та/або бічних кромках листа після порізки.

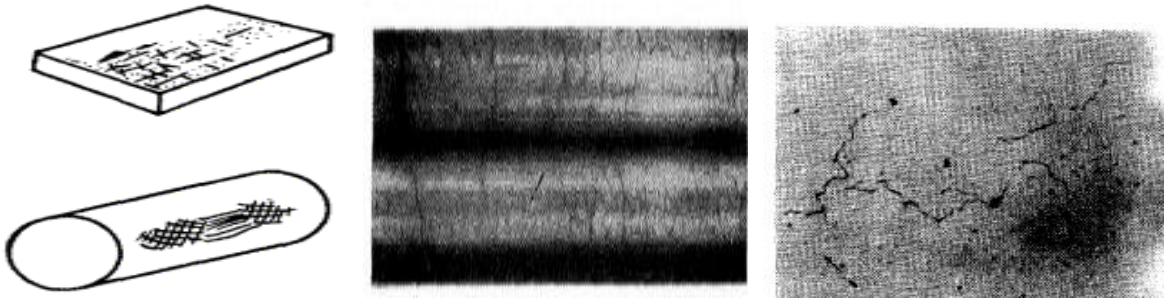
Рисунок 2.117 – Вигляд торцевої тріщини на кромці листа після розрізання [135]

Запобігання дефекту: використання добре заточеного та налаштованого інструменту; застосування підігріву заготовки перед розрізанням до 300…500 ºС.

Усунення дефекту: дефект може бути виправленим шляхом додаткової обрізки виробу та здачею його за меншим розміром. У разі сильного прояву на крупних виробах дефект є невиправним браком.

Шліфувальні тріщини *(«перепали», «прижоги»)* – дефект поверхні у вигляді тонкої сітки павутиноподібних тріщин (розташованих перпендикулярно до напряму шліфування) або окремих довільно спрямованих дрібних поверхневих розривів (рисунок 2.118). Наявність шліфувальних тріщин характеризує підвищену схильність матеріалу до втомного руйнування. Тому виробничі назви: «*перепал*» або «*прижог*», – для цього дефекту є невдалими і такими, що лише частково відповідають їх фізичній суті.

До утворення шліфувальних тріщин особливо схильні високовуглецеві та леговані сталі, чутливі до виникнення тріщин від залишкових напружень, перш за все – в твердому (підкаленому) стані.



а *б* *в*

Рисунок 2.118 – Шліфувальні тріщини: зовнішній вигляд (*а*), фотографія поверхні (*б*) та її макроструктура (*в*) [135]

Причини дефекту: абразивна зачистка (шліфування) металу, який має високу твердість, крихкість і малу теплопровідність; занадто сильний притиск шліфувального інструменту, особливо – занадто твердого; недостатнє охолодження металу при такій обробці.

Попередження дефекту: підбір для кожного металу відповідної величини притиску і зернистості абразивного інструменту; достатнє охолодження металу при шліфуванні. Метал після шліфування необхідно ретельно оберігати від механічних пошкоджень під час внутрішньозаводських і зовнішніх (до споживача) перевезень.

Усунення дефекту: додаткове поверхневе стругання 1 обточування у межах допуску. При неможливості додаткової обробки сортність виробу знижують аж до відбракування.

Плями іржі (*«плямиста корозія», «червонуватість», «іржа», «корозійні плями», «місця корозії»*) – дефект поверхні металовиробів (гарячекатаних та холоднокатаних листів та стрічки, прутків, дроту, холоднодеформованих труб з нелегованої сталі тощо) у вигляді по різному забарвлених (від коричневого до червонуватого кольору) світлих і темних, як правило, шорсткуватих ділянок (плям), що утворилися внаслідок окиснення (рисунок 2.119). Після видалення плями помітним стає роз'їдання поверхні. Наявність плям іржі може значно ускладнити застосування продукції (наприклад, холоднодеформованих труб).

а *б* *в*

Рисунок 2.119 – Плями іржі (*а*), корозійна пляма (*б*) та місця корозії (*в*) [135]

Причини виникнення: недостатня або незадовільна консервація при зберіганні виробів; недостатня або незадовільна упаковка; залишки на поверхні виробів продуктів травлення, які сприяють корозії; підвищена вологість на складах, надмірно тривале зберігання металу у виробника, продавця або споживача. Для волоченої пруткової сталі, поверхня якої при подальшій обробці піддається обробці точінням, допускається наявність неглибоких місць корозії.

Попередження: усунення з поверхні залишків продуктів травлення; правильна консервація та пакування. Застосування відповідних консервуючих засобів. Зберігання в сухому приміщенні.

Усунення: невеликі плями іржі можуть бути видалені додатковим травленням, шліфуванням або поліруванням, якщо при цьому не будуть перевищені допуски за критичними розмірами. Сортність металу, до стану поверхні якого пред'явлені високі вимоги, знижують, якщо подальшою обробкою описані дефекти повністю не усуваються.

2.2.7 Дефекти травлення металовиробів

Серед операцій оздоблення металургійної продукції особливе місце займає процес травлення, призначений для видалення окалини з поверхні напівфабрикатів та виробів, оскільки вона є безумовно шкідливим чинником при забезпеченні якості [151]. При цьому можливе утворення ряду *додаткових* характерних дефектів, розглянутих нижче.

Недотрав (*«непротрав», «плями травлення», «фігурне травлення»*) – це дефект поверхні у вигляді плям або смуг, що утворилися при неповному або нерівномірному травленні з вилучення окалини (рисунок 2.120). При наступній ОМТ такий дефект може призвести до появи «вкатаної окалини», про що мова вже йшла (*див. рис. 2.50*).

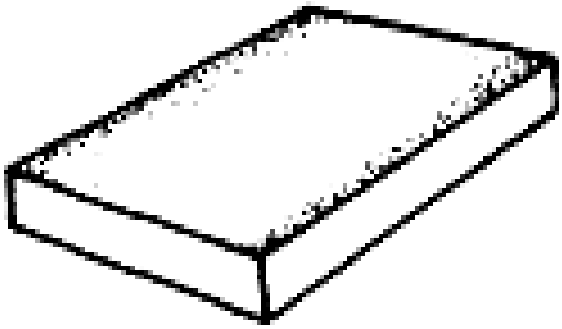


Рисунок 2.120 – Зовнішній вигляд виробу з недотравом [151]

Попередження виникненню дефекту: дотримання технології травлення (складу травильного розчину, температури та часу обробки виробу).

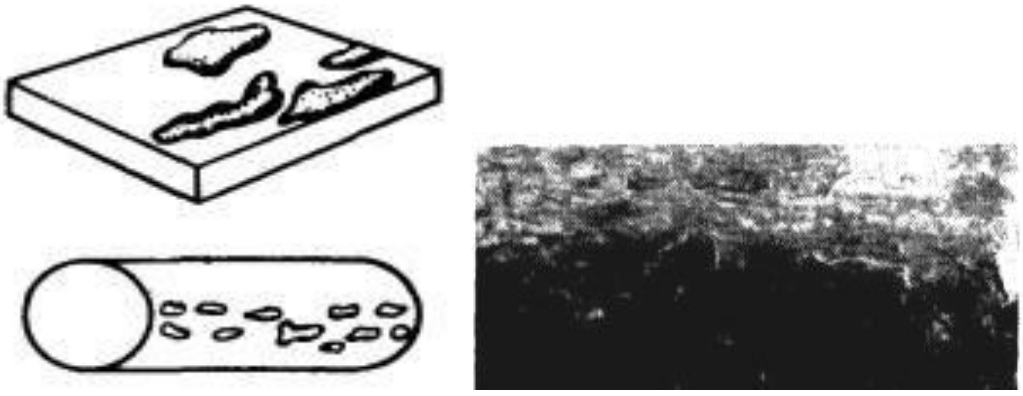
Усунення дефекту: додаткове травлення або механічне оброблення поверхні, наприклад, її абразивна зачистка. Наявність окалини на товарній продукції може бути підґрунтям для визнання її браком.

Залишки окалини *(«плями окалини», «чорновина»)* – дефект поверхні, що представляє собою окремі ділянки поверхні, покриті окалиною, яка залишається після механічної та (або) хімічної обробки (рисунок 2.121). Так, після термічної обробки металу в окиснювальній атмосфері на його поверхні може утворитися товстий шар окалини (*див. рис. 2.27*). Шар оксидів також може утворитися на металі в процесі гарячої деформації. При наступній ОМТ такий дефект може призвести до появи «вкатаної окалини», про що мова вже йшла (*див. рис. 2.50*). Одна з назв цього дефекту – «***чорновина***» – формально співпадає з однойменним дефектом при волочінні (*див. рис. 2.82*), підставою чого була наявність залишків окалини на поверхні, *яка не зазнала деформації*.

При видаленні з поверхні заготовки окалини в травильних ваннах цей вид браку виникає від недостатньої концентрації кислоти при надлишку залізного купоросу і, за суттю, є *недотравом* (*див. вище*)

Попередження виникненню дефекту пов’язано із запобіганням та усуненням причин його появи.

Усунення дефекту: шліфовкою, додатковим травленням



а *б*

Рисунок 2.121 – Залишки окалини: *а* – вигляд на листі та прутку; *б* – фотографія поверхні виробу із залишками окалини [151]

Наліт *(плівка)* шламу *(наліт після травлення, плями грязі, плями від травлення)* – дефект у вигляді осаду, що утворився на поверхні металу при порушенні технології травлення, чищення і промивання виробу. Аналогічний дефект у вигляді *плям забруднення* може спостерігатися після термічної обробки виробу (*див. рис. 2.29*). Цей

шлам може містити солі металів, спечений тальк, залишки полімеризованого мастила і т. д. При наступній ОМТ такий дефект перетворюється у «розкатане забруднення» (або так звані «наліт шламу» чи «плями травлення»), що *вище було відображено на рис. 2.51*.

Попередження виникненню дефекту: дотримання технології травлення (складу травильного розчину, температури та часу обробки виробу), наступних промивки та чищення.

Усунення дефекту: механічна обробка (зачистка), іноді - додаткове травлення.

Перетрав ***(«пори та виразки від травлення», «перетравленість», «загальний перетрав», «плямиста корозія при травленні», «розтрав», «точковий перетрав», «точки при травленні»)*** – дефект поверхні у вигляді точкових або контурних ніздрюватих поглиблень та виразок внаслідок травлення (рисунок 2.122). Візуально пори та виразки *від травлення* схожі з однойменним дефектом, що буває *при обробці тиском* (*див. рис. 2.60*).

а *б* *в*

Рисунок 2.122 – Вигляд перетраву: на плоскому виробі *(а)*; на круглому виробі *(б)*; *в* – на фотографії поперечного шліфа поверхні [151]

Причини дефекту: використання гарячо- або холоднокатаної заготовки з порами та виразками, а також пригарами від залишків технологічного мастила, що зумовлює нерівномірне роз'їдання оксидів кислотою при травленні; надмірна концентрація травильного розчину; порушення температурного і часового режиму травлення (занадто інтенсивне травлення на окремих ділянках або усієї поверхні металу); відсутність перемішування травильного розчину у ванні; недостатня кількість інгібіторів травлення у травильному розчині; погані промивання виробу і нейтралізація залишків кислоти після травлення.

Попередження виникненню дефекту: застосування гарячо- і холоднокатаних заготовок без пір, язвин та поверхневих забруднень; дотримання технології травлення (складу травильного розчину, температури та часу обробки виробу), нейтралізації та наступної промивки.

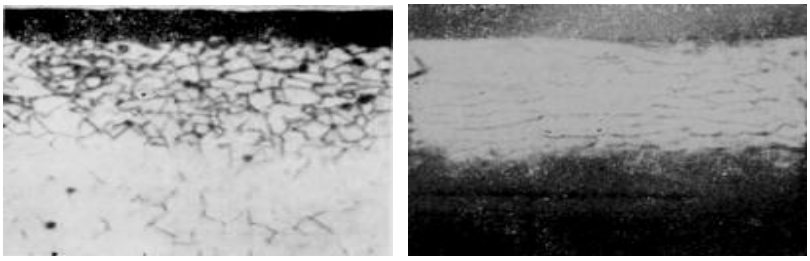
Усунення дефекту: при невеликих розмірах і глибині пор і виразок від травлення – шліфування (така обробка особливо необхідна для виробів відповідального призначення). Зварні труби з цими дефектами без попереднього шліфування непридатні для гальванічного покриття поверхні і лакування. При значних кількості та величині дефектів – це невиправний брак.

Травильні тріщини – дефект поверхні, що представляє собою сітку вузьких розривів металу, утворених при травленні металу, що мав залишкові внутрішні напруження від структурних перетворень або деформації (рисунок 2.123). Візуально цей дефект схожий на тріщини від розкатаних бульбашок при прокатці (*див. рис. 2.36, б*), але походження його інше [151].

Попередження виникненню дефекту: здійснення пом’якшуючої термічної обробки металу перед травленням.

Усунення дефекту: вирізання дефектних місць або відсортування виробів як невиправний брак.

Міжкристалітна корозія *при травленні* являє собою роз'їдання корозійностійких (аустенітних та феритних) сталей в специфічних агресивних середовищах, що починається від поверхні виробу та поширюється вглиб металу, переважно, вздовж кордонів зерен (рисунок 2.123, *а*); при цьому власне зерна (внутрішньозеренні об'єми) кородують слабо. Ці міжкристалітні роз'їдання, що виявляються засобами мікроструктурного аналізу, можуть приводити до порушення зв'язку між зернами аж до появи тріщин (рис. 2.123, *б*) та міжкристалічного руйнування при наступній термічний обробці, що було представлено вище (*див. рис. 2.19*).



а *б*

Рисунок 2.123 – Мікрошліфи приповерхневого шару металу з міжкристалітною корозією після травлення: *а* – розвиток дефекту по границях зерен; *б* – перехід дефекту в тріщину [151]

Причинами виникнення дефекту стають:

– виділення карбідів, збагачених хромом, по границях зерен при *попередньому* нагріванні в несприятливу область температур (аустенітні сталі 400…900 °С, феритні сталі – вище 900 °С). Інтенсивне карбідоутворення після таких нагрівів веде до збіднення приграничних об'ємів хромом, і відповідно – до зниження корозійної стійкості сталі;

– занадто високий вміст вуглецю в сталі даної плавки;

– занадто низьке співвідношення: «титан – вуглець» (концентрація титану нижче чотириразового змісту вуглецю за масою);

– коксування при нагріванні, наприклад, при відпалі після холодної деформації виробів, на поверхні яких були залишки мастила.

Попередження виникненню дефекту. Застосування при травленні сталі зі зменшеним вмістом вуглецю або із уведенням до складу сталі сильних карбідоутворюючих і стабілізуючих структуру елементів (титан, ніобій, тантал). Вміст останніх повинний бути у достатній кількості по відношенню до вмісту вуглецю. Вміст вуглецю в нержавіючій сталі, що піддається попередньому (перед травленням) температурному впливу в інтервалі 400…900 °С, має бути менше 0,03%; у разі короткочасних нагрівів (наприклад, при зварюванні) або при тривалих нагрівах, але при низьких температурах – менше 0,07%. Схильну до міжкристалітної корозії сталь слід застосовувати в тих випадках, коли конкретні умови служби (температура, середовище, тривалість) безпечні з точки зору можливого розвитку міжкристалітного роз'їдання (корозії). Сталь визнають стійкою, якщо корозійне роз'їдання за умов використання не перевищує 0,05 мм у глибину металу.

Усунення. Розвинутий дефект є невиправним браком.

2.2.8 Деякі дефекти при нанесенні покриттів на металовироби

Для запобігання або зменшення негативного впливу дефектів поверхні металовиробів на якість продукції та покращення її декоративних властивостей

застосовують різноманітні металеві (цинк, олово, свинець, алюміній, благородні метали тощо) та неметалеві (полімери, смоли, фарби, консерваційні мастила та ін.) покриття (*див. підрозділ 1.2.2.2*) [151]. Але відповідні процеси нанесення покриттів також можуть супроводжуватись специфічними невідповідностями, що відображено в ряді нормативних документів: ДСТУ 2491 «Покриття металеві та неметалеві неорганічні. Терміни та визначення»; ДСТУ 2831 «Покриття металеві та неметалеві неорганічні веломотовиробів. Загальні вимоги та методи контролю» та ін., – деякі характерні з яких розглянуто нижче.

Відсутність ***(***або ***зміщення границь)*** **покриття** – дефект характеризується наявністю на поверхні металевих виробів ділянок без покриття [151].

Причини дефекту. Наявність на поверхні заготовки вкатаної окалини, різного роду неметалевих включень, жирових забруднень та ін. Зокрема, при цинкуванні сталевої стрічки можлива поява «*непроцинковки*» через осадження вуглецю на поверхні виробу в процесі попередньої термічної обробки сталі.

Попередження дефекту: ретельне очищення та офлюсування поверхні виробу перед нанесенням покриття; застосування світлого відпалу при попередній термічній обробці заготовки.

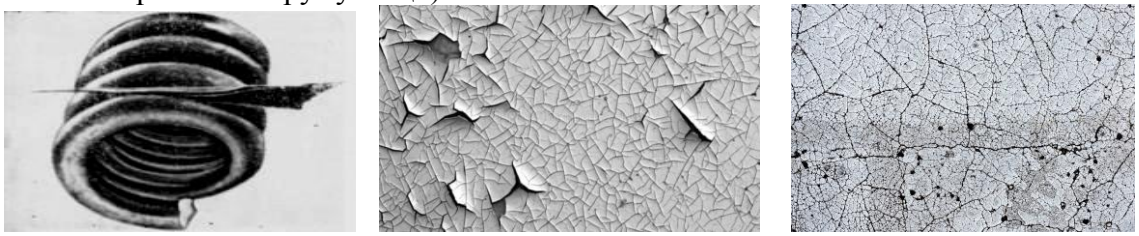
Усунення дефекту: зниження сортності продукції, аж до переведення її в брак.

Відшаровування покриття ***(«спучення», пухирі, недостатня адгезія).*** Зустрічаються два види цього дефекту:

– *«лущення»* – часткове відокремлення верхнього шару покриття від попередньо нанесеного технологічного підшарку, наприклад, цинкового покриття від «нижнього» залізо-цинкового сплаву (рисунок 2.124, *а, б*);

– відокремлення усього покриття від основного металу, наприклад, відшарування як цинкового «верхнього» шару, так і «нижнього» залізо-цинкового «підшарку» [48, 151].

Головними причинами відшаровування покриття є *низька адгезія* до основи, що зумовлюється вадами технології його нанесення (режиму підготовки смуги, складу матеріалу покриття у розплаві чи в електроліті, температури розплаву чи електроліту, густини електричного струму тощо).



а *б* *в*

Рисунок 2.124 – Відшарування цинкового покриття з поверхні дроту після випробування на навивання (*а*), лакофарбового покриття з поверхні плоского виробу (*б*) та вигляд тріщин покриття з точковими включеннями (*в*) [48, 151]

Найчастіше відшаровування покриття відбувається у виробів з товстим покриттям, особливо, при сильних механічних навантаженнях (ударах). Причиною відшаровування покриття може також бути водень, абсорбований при попередній термічній обробці поверхнею підшарку, який при виділенні призводить до появи здуття (*пухирів*).

Попередження дефекту: дотримання технології з ретельним знежиренням та знепилюванням поверхні заготовки безпосередньо перед нанесенням покриття, забезпечення відсутності вологи і мастила в стислому повітрі, яке використовується при знепилюванні; уникнення силових впливів на вироби.

Усунення дефекту: зниження сортності продукції, аж до переведення її в остаточний брак.

Тріщини покриття – вузькі видимі неозброєним оком поверхневі порушення суцільності покриття (рис. 2.124, *в*) [48, 151].

Причини дефекту. Зазвичай, недостатній час та (або) температура формування покриття.

Попередження дефекту: дотримання технології нанесення покриття.

Усунення дефекту: зниження сортності продукції, аж до переведення її в остаточний брак.

Точкові включення металевих часток у покриття є наслідком наявності великодисперсної нерозплавленої фракції порошкового матеріалу в матеріалі покриття (*див. рис. 2.124, в*) [48, 151].

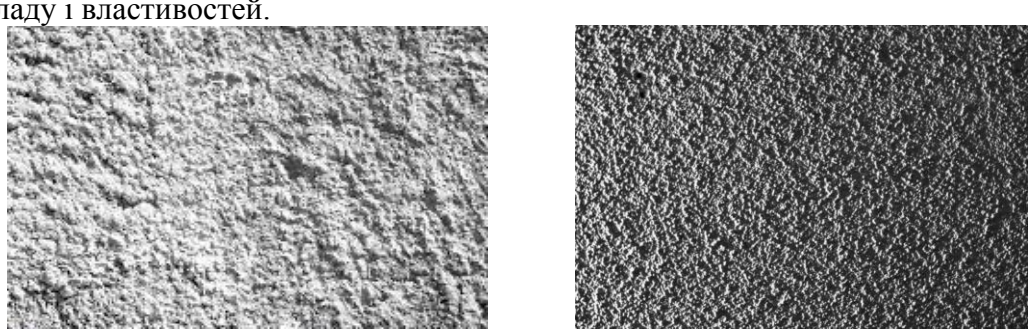
Попередження дефекту: просіювання матеріалу покриття перед його підготовкою до використання та нанесенням на заготовку.

Усунення дефекту: зниження сортності продукції, аж до переведення її в остаточний брак.

Рельєфна недосконалість ідентифікується як нерівномірність товщини покриття, якщо вона перешкоджає зборці деталей з покриттями. Зазвичай, до такого виду дефектів відносять покриття з різного роду *напливами, натіканнями, нашаруваннями, горбками, хвилястістю, шорсткою* (грубою) поверхнею (рисунок 2.125, *а*) [48, 151].

Причини виникнення дефекту. Надмірна шорсткість поверхні заготовок, на які наносять покриття напиленням, використання забрудненого або нерівномірного за фракціями порошку; недотримання умов нанесення покриття або витягування виробу з розплаву покриття (наприклад, із цинку); відхилення фізико-механічних властивостей матеріалу покриття від вимог НТД. Зокрема, при гарячому цинкуванні – насичення розплаву залізо-цинковими та іншими з'єднаннями, особливо, при формуванні підповерхневих шарів покриття.

Попередження дефекту: дотримання технології нанесення покриття на заготовку, його складу і властивостей.



а *б*

Рисунок 2.125 – Вигляд поверхневої рельєфної недосконалості (*а*) та шорсткості покриття (*б*) [48, 151]

Усунення дефекту: зниження сортності продукції, аж до переведення її в остаточний брак.

Шорсткість покриття *(*рис. 2.125, *б)*. Цей дефект часто виділяють в окремий вид.

Причини підвищеної шорсткості можна розділити на дві категорії: ті, що виникають на підготовчих операціях, і ті, що утворюються при нанесенні покриття (зокрема, гальванічного). Перша категорія охарактеризована при розгляді попереднього дефекту. Шорсткість, що виникає при нанесенні гальванічного покриття, утворюється, найчастіше, через наявність в електроліті твердих часток, які можуть бути продуктами розчинення анодів і утворення шламу [48, 151].

Попередження дефекту: фільтрація електроліту.

Усунення дефекту: зниження сортності продукції.

Блискучі точки і риски на покритті можуть утворитися внаслідок щільного механічного його контакту з елементами обладнання або вимірювальним інструментом [48, 151].

Попередження дефекту: дотримання регламентованих (заощадливих) режимів роботи обладнання при виготовленні виробів з покриттям, а також – прийомів технічного контролю.

Усунення дефекту: прояв дефекту може зумовити зниження сортності продукції.

Пористість *(«пітинг»)* – невеликі поглиблення в покритті**,** які нагадують наколювання (*див. також рис. 2.60, б*); на дотик покриття стає шорстким. Цей дефект проявляється у вигляді виразок, розташованих зазвичай в області найбільшої товщини покриття при електрохімічному нанесенні останнього [48, 151].

Причини виникненн дефекту. Нестача змочувача; наявність в електроліті органічних та інших забруднень (наприклад, при оцинкуванні – забруднення залізом). При надлишку органічних добавок виразки великі та глибокі. При забрудненні залізом виразки дрібні і часті з появою на виробі, в основному, при середній та великій густині електричного струму. При нікелюванні дефект виникає в результаті прилипання бульбашок водню до поверхні катода.

Попередження дефекту: дотримання технології нанесення покриття.

Усунення дефекту: зниження сортності продукції, аж до переведення її в брак.

Плями кольору мінливості виглядають як аналогічний дефект при термічній обробці виробів *(див. рис. 2.28),* але на відміну від попередніх матеріалів викликаються занадто високим показником розтікання матеріалу покриття (зокрема – фарби), а також – нанесенням надмірно товстого шару покриття [48, 151].

Попередження дефекту: оптимізація товщини шару покриття, що наноситься; заміна складу покриття (фарби).

Усунення дефекту: зниження сортності продукції.

Неоднотонність кольору *(«сіре покриття»).* Цей дефект притаманний виготовленню оцинкованих виробів і проявляється у відсутності рівномірного світло-сірого кольору по всій поверхні покриття, або іноді – у появі сірого кольору тільки в деяких місцях на виробах. Металографічні дослідження показують, що таке покриття повністю складається із залізо-цинкового сплаву з відсутністю верхнього шару цинку [48, 151].

Головною причиною появи покриттів сірого кольору є порушення режиму охолодження оцинкованих виробів після витягування їх з ванни гарячого цинкування. Цьому явищу може сприяти підвищений вміст в сталі силіцію, вуглецю, титану або їх нерівномірний розподіл.

Попередження дефекту: дотримання регламентованої технології цинкування сталевих виробів.

Усунення дефекту: зниження сортності продукції.

Запитання для самоконтролю до розділу 2

1. Надайте характеристику поняттю «дефект». Як класифікують дефекти?
2. Як виявляють дефекти продукції (напівпродукту)?
3. Покажіть різницю між категоріями: «дефект» і «брак».
4. Надайте характеристику наявному стану унормування дефектів металовиробів.
5. Визначте основні дефекти первісного металу та литої заготовки. Які з них є невиправними?

6. Як пов’язані дефекти злитків з дефектами первісного металу?
7. Як та за якими критеріями розсортовують на групи злитки за наявністю дефектів?
8. Як ідентифікують наявність ліквацій у злитках?
9. Які вірогідні причини можуть викликати появу раковин і тріщин у злитку?
10. Яка різниця між дефектами злитків: «тріщина», «розривина» та «шпаківня»? Запропонуйте заходи з усунення цих дефектів.
11. Яка різниця між дефектами злитків: «плівка» та «заворот скоринки»? Запропонуйте заходи з усунення цих дефектів.
12. Які переваги (недоліки) має безперервнолитий метал у порівнянні зі злитками при їх формуванні у виливницях?
13. У чому полягає різниця між термічною та термомеханічною обробкою металу?
14. Надайте характеристику основним дефектам термічної обробки металу, поясність їх вірогідні причини та запропонуйте заходи із запобігання цим дефектам.
15. Чим суттєво відрізняються дефекти «перегрів» та «перепал» металу?
16. Опишіть можливі порушення суцільності металу внаслідок його термічної обробки? Як пов’язані ці порушення з його попередніми перероблюваннями?
17. Чому можуть виникнути спотворення форми металовиробів при їх термічній обробці та після неї?
18. Як і чому може змінитися поверхня виробів після їх термічної обробки? Як запобігти таким змінам?
19. Чому поверхневе зневуглецювання сталевих заготовок при термічній обробці вважають дефектом?
20. Як можуть бути пов’язані дефекти металовиробів, які отримані методами обробки тиском, з попередніми етапами перероблення металу?
21. Які фактори можуть зумовлювати появу несуцільностей у металі при його обробці тиском? Які заходи слід запроваджувати для зменшення ймовірності негативного впливу цих факторів?
22. Чим небезпечні тріщини у заготовці? Запропонуйте заходи з усунення цього дефекту.
23. Як пов’язані механічні напруження у металі з появою у ньому тріщин?
24. Чому у продеформованому металі можуть з’явитися раковини, розривини, розшарування та шпаківні?
25. В якому процесі обробки тиском може з’явитися дефект «апельсинова кірка»? Чим цей дефект шкідливий? Як його усувають?
26. Які вірогідні причини появи пльони та відшарування на продеформованому металі? Запропонуйте заходи з усунення цих дефектів.
27. Відкіля на продеформованому металі може з’явитися «вкатана окалина»? Як вилучити цей дефект та запобігти його появі?
28. Як порушення режимів обтиснень та монтажу складових роз’ємного інструменту при різних видах обробки тиском може відбитися на формі продукції?
29. Яка вірогідна причина появи при прокатці дефекту «сітка відбитків»?
30. Яких дефектів стосується «послаблення розміру» продукції?
31. Чим відрізняється дефект з назвою «чорновина» при обробці тиском та травленні металу?
32. Як ідентифікують (вимірюють величину) викривлення виробів?
33. Надайте характеристику видам неплощинності прокатаної листової продукції. Як її виправити?
34. Надайте характеристику вадам стабільності розмірів продукції обробки тиском. Як їм запобігти?
35. Надайте характеристику дефектам формування рулонів листової продукції. Як їх виправити та запобігти їх появі?

36. Надайте характеристику дефектам зварювання. Які з них притаманні продукції металургії? Запропонуйте заходи із запобігання їх прояву.
37. Надайте характеристику основним дефектам оздоблення металопродукції. Визначте заходи із запобігання їх прояву.
38. Надайте характеристику основним дефектам травлення металопродукції. Визначте заходи з їх усунення та запобігання їх появі.
39. Надайте характеристику основним дефектам при нанесенні покриттів на металовироби. Визначте заходи з їх усунення та запобігання їх появі.

ДЖЕРЕЛА ІНФОРМАЦІЇ

1. Технічне регулювання та контроль на підприємстві/ А.М. Должанський та ін.; за заг. ред. А. М. Должанського. Дніпро : «Свідлер А.Л.», 2021. 523 с.

2. Металургія чорних та кольорових металів. URL: https://studfile.net/preview/16727097/ (дата звернення: 01.07.2021р.).

3. ДСТУ 2439:2018. Хімічні елементи та прості речовини. Терміни і визначення основних понять, назв та символів. Вид.офіц. Київ : УкрНДНЦ, 2018. 12 с.

4. Загальна хімія : навч. посібник / В. І. Булавін [та ін.] ; заг. ред. В. І. Булавін ; Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». 2-ге вид., перероб. та допов. Харків : НТУ «ХПІ», 2019. 376 с.

5. Шишков М.М., Шишков М.М. СНГ. Марочник сталей и сплавов ведущих промышленных стран мира. Донецк : «Юго-Восток», 2005. 576 с.

6. Технология прокатки – металлургия черных металлов. URL: https://ump-m.com/spravochnik/texnologiya-prokatki-metallurgiya-chernyx-metallov.html (дата звернення: 07.07.2021р.).

7. Гуляев Ю.Г., Друян В.М., Шифрин Е.И. Стальные трубы. Изготовление, применение, сортамент : справочник. Днепропетровск: РВА «Днепро-ВАЛ», 2002. 350 с.

8. Ефименко Г.Г., Гиммельфарб А.А., Левченко В.Е. Металлургия чугуна. Киев : Вища школа, 1988. 351 с.

9. Виробництво виливків з чавуну. Частина 1. URL: https://dokumen.tips/documents/-ff-2015-01-12-.html?page=1 (дата звернення: 07.07.2021р.).

10. Технологія конструкційних матеріалів і матеріалознавство : підручник для студ. техн. спец. вищих навч. закладів / В. В. Попович, В. В. Попович. Львів : Світ, 2006. 624 с.

11. Ковшов В. М., Іващенко В. П., Бочка В. В., Петренко В. О. Технологія доменної плавки: Підручник. Дніпропетровськ : Акцент ПП, 2016. 176 с.

12. Мовчан В. П., Бережний М. М. Основи металургії. Дніпропетровськ : Пороги, 2001. 336 с.

13. Основи металургійного виробництва металів і сплавів / Чернега Д. Ф., Богушевський В. С., Готвянський Ю. Я. та ін.; за ред. Д. Ф. Чернеги, Ю. Я. Готвянського. Київ : Вища школа, 2006. 503 с.

14. Бойченко Б. М., Охотський В. Б., Харлашин П. С. Конвертерне вирбництво сталі: теорія, технологія, якість сталі, конструкції агрегатів, рециркуляція матеріалів і екологія: Підручник. Дніпропетровськ : РВА «Дніпр-ВАЛ», 2006. 454 с.

15. Хричиков В. Е., Меняйло О. В. Ливарне виробництво чорних і кольорових металів: Навч. посібник. Видання друге, доопрацьоване. Дніпропетровськ : НМетАУ, 2015. 89 с.

16. Теоретичні основи процесів кольорової металургії: підручник / Ігнатьєв В. С., Пожуєв В І., Бредихін В. М. та ін.; за ред. д.т.н., професора Червоного І Ф ; Запоріз. держ. інж. акад. Запоріжжя : ЗДІА, 2012. 200 с.

17. Металургія рідкісних металів. URL: https://msd.com.ua/metallurgiya-redkix-metallov/metallurgiya-redkix-metallov/ (дата звернення: 15.08.2021р.).

18. Кольорова металургія України. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki (дата звернення: 20.08.2021р.).

19. Металургія кольорових металів: навч. посібн. для вищих навч. закладів / О.В. Рабинович та ін. Дніпропетровськ : НМетАУ : Журфонд, 2009. 54 с.

20. Розвиток кольорової металургії України. URL: https://www.bibliofond.ru/view.aspx?id=607901 (дата звернення: 18.08.2021р.).

21. Афанасьєва О. В Мідь та сплави на її основі. Алюміній і його сплави // Матеріалознавство та конструкційні матеріали : навч. посіб. URL: https://openarchive. nure.ua/handle/document/8653 (дата звернення: 01.08.2022р.).

22. Основи матеріалознавства : навч. посіб. / авт.-упоряд. Т. Б. Боброва. URL: https://bit.ly/3mZEoVx (дата звернення: 02.08.2022р.).

23. Металургія кольорових металів. Ч.5. Металургія важких металів. Кн.2. Технологія міді та нікелю : підручник / В. П. Грицай та ін. ; за заг. ред. д.т.н., проф. І. Ф. Червоного. Запоріжжя :ЗДІА, 2011. 448 с.

24. Колобов Г. О., Пожуев В. І., Телин В. В. Титан вторинний. Ч. 2. Монографія. Запоріжжя : ЗДІА, 2007. 126 с.

25. Спеціальні сплави, РЗМ та благородні метали. Навчальний посібник / Куцова В.З., Носко О.А., Ковзель М.А. – Дніпропетровськ: НМетАУ, 2007. – 163 с.

26. Гарнець В. М., Коваленко В. М. Конструкційне матеріалознавство. Київ : Либідь, 2007. 384 с.

27. Металургія кольорових металів. Ч.5. Металургія важких металів. Кн.1. Технологія свинцю та цинку : підручник / В П. Грицай та ін. ; за заг. ред. д.т.н., проф. І. Ф. Червоного. Запоріжжя : ЗДІА, 2011. 480 с

28. Физико-химические свойства элементов / под ред. Г.В. Самсонова. Киев : Наукова думка, 1965. 808 с.

29. Поляков О. І., Гасик М. І.. Електрометалургія феросплавів, спеціальних сталей і сплавів: Підручник / Дніпропетровськ : Журфонд, 2009. 116 с..

30. Основи металургійного виробництва металів і сплавів : підручник / Д. Ф. Чернега та ін. ; за ред. Д. Ф. Чернеги, Ю. Я. Готвянського. Київ : Вища школа, 2006. 503 с.

31. Гасик М.И., Емлин Б.И. Электрометаллургия ферросплавов. (Учебник для вузов с грифом Минвуза СССР). Киев-Донецк:Техніка, 1983. 376с.

32. Металургія кольорових металів. Ч.4. Металургія благородних металів : підручник / М. О. Маняк та ін.; за заг. ред. д.т.н., проф. І. Ф. Червоного. Запоріжжя: ЗДІА, 2009. 548 с.

33. Буслаева Т. М. Химия и технология платиновых металлов. URL: https://www.docsity.com/ru/himiya-i-tehnologiya-platinovyh-metallov/1467672/ (дата звернення 08.09.2021р.).

34. Ливингстон С. Химия рутения, родия, палладия, осмия, иридия, платины. URL: https://uvelir.info/books/himija_rutenija_rodija_palladija_osmija_iridija_platiny/ (дата звернення 08.09.2021р.).

35. Виготовлення платини. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/ (дата звернення 28.09.2021 р.).

36. Платина. URL: http://neiau.org/ukrayinski-platynovi-perspektyvy-chy-ye-shans-na-zhyttya (дата звернення 28.09.2021 р.).

37. Середа Б. П. Обробка металів тиском: навчальний посібник. Запоріжжя : ЗДІА, 2009. 344 с.

38. Данченко В. М., Грінкевич В. О., Головко О. М. Теорія процесів обробки металів тиском: підручник. Дніпропетровськ : Пороги, 2008. 370 с.

39. Илюкович Б. М., Нехаев Н. Е., Левченко Л. Н., Лойферман М. А. Прокатка и калибровка экономичных тавровых профилей. Киев : Техника, 1990. 151 с.

40. Николаев В. А. Калибровка валков для прокатки простых профилей: учеб. пособие для студ. ЗГИА. Запорожье : ЗГИА, 2002. 153 с.

41. Середа Б. П. Прокатне виробництво: навчальний посібник. Запоріжжя : ЗДІА, 2008. 312 с.

42. Мазур В. Л., Сафьян А. М., Приходько И. Ю., Яценко А. И. Управление качеством тонколистового проката. Киев : Техніка, 1997. 384с.

43. Сафьян М. М., Мазур В. Л., Молчанов А. И. Технология процессов прокатки и волочения: Листопрокатное производство : учебник для вузов. Киев : Вища школа, 1988. 351 с.

44. Друян В. М., Гуляев Ю. Г., Чукмасов С. А. Теория и технология трубного производства. Днепропетровск : РИА «Днепр-ВАЛ», 2001. 544 с.

45. Стасовський Ю. М. Виробництво зварних труб : конспект лекцій. Дніпропетровськ : НМетАУ, 2006. 46 с.

46. Левченко Л. М., Головко О. М. Виробництво гнутих профілів : навч. посібник. Дніпропетровськ : НМетАУ, 2004. 29 с.

47. Должанский А.М. Развитие теории смазочного действия при волочении с применением сухих смазок и совершенствование технологии производства на этой основе. Дис. … докт. техн. наук. Днепропетровск. Государственная металлургическая академия Украины. 1997. 557 с.

48. Коковихин Ю. И. Технология сталепроволочного производства. Киев : ИСИО, 1995. 608 с.

49. Стеблюк В. И., Марченко В. Л., Белов В. В., Гривачевский А. Г. Технология листовой штамповки. Киев : Вища школа. Головное изд-во, 1983. 280 с

50. Кузнецу-штамповщику : справочное пособие / Л.Н. Соколов и др. Донецк : Донбасс, 1986. 144с.

51. Зильберг Ю. В. Теория обработки металлов давлением. Днепропетровск : Пороги, 2009. 434 с.

52. Огородников В. А. Деформируемость и разрушение металлов при пластическом формоизменении. Киев : УМК ВО, 1989. 152 с.

53. Середа Б. П. Бєлоконь Ю. О., Оніщенко А. М. Теорія обробки металів тиском : навч.-метод. посібник для студ. ЗДІА. Запоріжжя : ЗДІА, 2012. 129 с.

54. Василев Я. Д., Мінаєв О. А. *Теорія поздовжньої прокатки* : *підручник*. Донецьк : УНІТЕХ, 2009. 488 с.

55. Клименко П.Л. Упрочнение стали и цветных металлов при холодной и горячей деформации. Днепропетровск : Пороги, 2011. 187 с.

56. Губенко С. И., Большаков В. И. Физические основы пластической деформации металлов: учебное пособие для вузов. Днепропетровск: ПГАСА, 2004. 126 с.

57. Губенко С. И., Парусов В. В. Деформация металлических материалов. Днепропетровск : Арт-Пресс, 2006. 316 с.

58. Лахтин Ю. М. Металловедение и термическая обработка металлов. URL: http://chertezhi.zp.ua/index.php/literatura/89-metallurgiya/materialovedenie/literatura/108-lakhtin-yu-m-metallovedenie-i-termicheskaya-obrabotka-metallov (дата звернення 28.09.2021 р.).

59. Середа Б.П. Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов. Запорожье : ЗГИА, 2001. 208 с.

60. Келоглу Ю. П., Захаревич К. М., Карташевская М. И. Металлы и сплавы : справочник. Кишинев : Карта Молдовенянськэ, 1977. 264 с.

61. Грудев А. П., Зильберг Ю. В., Тилик В. Т. Трение и смазки при обработке металлов давлением. URL: https://lib-bkm.ru/14092 (дата звернення 02.11.2021 р.).

62. Большаков В. И., Долженков И. Е., Долженков В. И. Термическая обработка стали и металлопроката : учебник для студентов высших технических учебных заведений. Днепропетровск : Gaudeamus, 2002. 271 с.

63. Кузін О. А., Яцюк Р. А. Металознавство та термічна обробка металів. Підручник. Львів: Афіша, 2002, 304 с.

64. Металознавство і термічна обробка металів і сплавів / Ю.М. Таран, Є.П. Калінушкін, В.З. Куцова і ін. Дніпропетровськ : Дніпрокнига. 2002. 260 с.

65. Середа Б. П., Кругляк І. В., Бєлоконь Ю. О. Конструкції агрегатів цехів обробки металів тиском : навч.- метод. посібник для магістрів. ЗДІА. Запоріжжя : ЗДІА, 2012. 166 с.

66. Сусліков Л. М., Студеняк І. П. Неруйнівні методи контролю : Навчальний посібник. Ужгород : Видавництво УжНУ, 2016. 192 с.

67. Кофанова Н. К. Коррозия и защита металлов : учеб. пособие. Алчевск : Донбасский горно-металлургический институт, 2003. 181 с.

68. Системи менеджменту якості : підручник / Должанський А. М. та ін. Дніпро : «СВІДЛЕР А.Л.», 2017. 562 с.

69. Середа Б. П., Кругляк І. В. Технологія ковальсько-штампувального виробництва. Ч. 2. Навч.-метод. посібник для студ. ЗДІА. Запоріжжя : ЗДІА, 2009. 200 с.

70. Технологические процессы ковки и штамповки. Курсовое проектирование / П. П. Омельченко, Б. С. Каргин, А. Д. Кирицев и др. Київ : Вища шк., 1986. 151 с

71. Справочник по оборудованию для листовой штамповки / Л. И. Рудман, А. И. Зайчук, В. Л. Марченко и др.; Под общ. ред Л. И. Рудмана. Київ : Техніка,1989. 231 с.

72. Соколов Л. М., Алієв І. С., Марков О. Є., Алієва Л. І. Технологія кування. Краматорськ : ДДМА, 2011. 268 с.

73. Класифікація поковок. URL: https https://utmk.com.ua/uk/ (дата звернення 28.09.2021 р.).

74. Технология холодной объемной штамповки. URL: https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/109757/Tekhnologiya_holodnoj_obemnoj_shtampovki.pdf?sequence=1 (дата звернення 28.09.2021 р.).

75. Попов Е.А., Шубин И.Н., Ковалев В.Г. Технология и автоматизация листовой штамповки. URL: https://djvu.online/file/z119C3CVv0Ty7 (дата звернення 02.10.2021 р.).

76. Должанский А.М., Друян В.М., Алябьев В.Л. Теоретическое определение напряжений при профилировании труб // Теория и практика металлургии. 2000. № 3 (17). С. 32 - 35.

77. Должанский А.М., Алябьев В.Л. Определение геометрических и деформационных параметров при профилировании тонкостенных труб // Теория и практика металлургии. 2000. № 4 (18). С. 36 - 40.

78. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке. URL : https://ru.djvu.online/file/ILgGjU7DQmV0j (дата звернення: 15.11.2021р.).

79. Основи попереково-гвинтової прокатки. URL: https://vseosvita.ua/lesson/omtlektsiia-2osnovy-poperekovo-hvyntovoi-prokatky-16170.html (дата звернення: 17.11.2021р.).

80. Схема прокатки шестерні з осьовою подачею заготовки (зображення). URL : https://bstudy.net/614805/tehnika/poperechnaya_prokatka (дата звернення 18.11.2021р.).

81. Профилирование валков листовых станов / А.А. Будаква и др. Киев : Техника, 1986. 190 с.

82. Илюкович Б. М. Прокатка и калибровка. Справочник: в 6 т.: Днепропетровск : Днепро-Вал, 2002. Т. 1. 506 с.

83. Допуски і посадки : навч. посібник / Г. І. Влащенко та ін. / ред. Л.М. Тіщенко. Харків : «Ч.П. Червяк», 2005. 177 с.

84. Огинский И. К., Данченко В. Н., Самсоненко А. А., Бояркин В. В. Процессы деформации металла на основе многовалковых калибров: Монография. Днепропетровск : Пороги, 2011. 355с.

85. Кранові рейки (зображення). URL: https://mskukraine.com/products/black-metal/relsy/rel-sy-kr80-kranovye/ (дата звернення 05.10.2021 р.).

86. Про ефективні шляхи вдосконалення режимів регульованого повітряного охолодження бунтового прокату в промислових умовах. / Е.В. Парусов та ін. //Наукові праці ВНТУ. 2017, № 3. С. 1-8.

87. Аналіз технологічних особливостей охолодження бунтового прокату на лінії Стелмор ВАТ «ММЗ»/ Е.В. Парусов та ін. // Наукові праці ВНТУ. 2017. № 3. С. 15-23.

88. Мищенко О.В., Филимонов В.И. Производство гнутых профилей с отбортовками в роликах методом интенсивного деформирования. URL: https://cyberleninka.ru/article/n/otsenka-dliny-zony-plavnogo-perehoda-pri-formoobrazovanii-profiley-s-otbortovkami.pdf (дата звернення 05.10.2021 р.).

89. Филимонов А. В., Филимонов С. В. Изготовление полузакрытых гнутых профилей в роликах методом интенсивного деформирования. URL: http://www.st-idm.ru/userfiles/profili.pdf (дата звернення 15.11.2021 р.).

90. Друян В.М., Должанский А.М., Алябьев В.Л. Состояние и проблемы изготовления винтообразных профилированных труб // Теория и практика металлургии. 1999. № 6. С. 32-34.

91. Должанский А.М., Ермакова О.С. Деформация катанки в роликовом окалиноломателе. Сообщения 1…3 // Металлургическая и горнорудная промышленность. 2005. № 3. С. 52-54; 2005. № 4. С. 51-55; 2006. № 1. С. 58-61.

92. Должанский А.М., Друян В.М., Алябьев В. Л. Определение внеконтактной деформации при профилировании труб волочением // Металлургическая и горнорудная промышленность. 2000. № 6. С. 50-51.

93. Железнодорожные колеса и бандажи KLW/ URL: https://interpipe.biz/upload/catalog/20140524234716e25c2ad1b7429587ef1dee7120fa9378.pdf. (дата звернення 17.11.2021р.).

94. ДСТУ ГОСТ 10791:2016 Колеса суцільнокатані. Технічні умови (ГОСТ 10791-2011, IDT). [Чинний від 2012-01-01]. Вид. офіц. Київ : Держспоживстандарт України, 2012. 32 с.

95. Залізнична продукція. URL: https://interpipe.biz/clients/wheelproduction (дата звернення 17.11.2021р.).

96. ДСТУ 7560:2014 Профіль для бандажних кілець. Сортамент. [Чинний від 2015-04-01]. Вид. офіц. Київ : Мінекономрозвитку, 2014. 5 с.

97. Бандаж. URL : http://www.interpipe.biz – Колеса и бандажи для железнодорожного транспорта; Технологічна інструкція, «Виробництво бандажів і кільцевих виробів на кільцебандажній лінії КПЦ», ВАТ «ІНТЕРПАЙП НТЗ», 2009. 46 с. (дата звернення: 28.10.2021 р.).

98. Технологія обробки металів і сплавів тиском. URL: https://nubip.edu.ua/sites/default/files/u132/navchal_na_praktika_tkm_obrobka_tiskom.pdf (дата звернення 01.11.2021р.).

99. Барабанний волочильний стан (зображення). URL : https://poznayka.org/s4017t2.html (дата звернення: 01.11.2021 р.).

100. Волочильний стан. URL : http://volochilschik.ru/ (дата звернення: 01.11.2021 р.).

101.Схема багаторазового волочіння без ковзання. URL: https://poznayka.org/s4017t2.html (дата звернення: 01.11.2021 р.).

102. Ланцюговий волочильний стан. URL : https://proizvodim.com/volochenie-sxema-processa-produkciya-oborudovanie-i-instrument.html (дата звернення: 01.11.2021 р.).

103. Должанский А.М., Очеретная Н.Н. Обеспечение знакопеременного кручения проволоки выбором высоты ее съема с тягового барабана при волочении //. Металлургическая и горнорудная промышленность. 2010. № 4. С. 63-65.

104. Должанский А.М. Определение тягового напряжения и оптимального угла волоки с учетом критерия формы очага деформации. Сообщения 1, 2 и 3 // Металлургическая и горнорудная промышленность. 2003. № 2. С. 70-73; № 3. С. 71-73; № 4. С. 61-63

105. Должанский А.М., Клюев Д.Ю., Орлянская В.Ю. Тяговое напряжение при использовании вращающейся волоки // Теория и практика металлургии. 2001. № 1(21). С. 39-41.

106. Сумісне безфільєрне та фільєрне волочіння сталевої низьковуглецевої катанки - перспективний шлях розвитку технологій виробництва дроту / А.М. Должанський, А.О. Жадан, О.Б. Ломова, І.М. Ломов // Металлургическая и горнорудная промышленность. 2011. № 7. С. 181-184.

107. Сортамент профільних труб сталевих, їх характеристики і застосування URL : https://metinvest-smc.com/ua/articles/sortament-profilnikh-trub-stalevikh-ikh-kharakteristiki-i-zastosuvannya/ (дата звернення 17.11.2021р.).

108. Данченко В.Н., Миленин А.А., Головко А.Н. Производство профилей из алюминиевых сплавов. Теория и технология. Днепропетровск : НМетАУ, 2010. 448 с.

109. Метизи. URL : https://bmd.by/category/94-metiznye-izdeliya.html (дата звернення: 17.11.2021 р.).

110. Сітка дротяна. URL: http://homehill.ru/otdelka/sten/setka-dlya-shtukaturki.html (дата звернення: 17.11.2021 р.).

111. Сітка дротяна. URL: http://allsteel.com.ua (дата звернення: 10.09.2020р.).

112. Сітка зварна. URL: http://setkadnepr.com.ua/ (дата звернення: 10.09.2020р.).

113. Сітка зварна. URL: http://metizy-94.all.biz (дата звернення: 10.09.2020р.).

114. Точкове зварювання. URL: http://www.stankom.com/oborudovanie-dlya-proizvodstva-setki/oborudovanie-dlya-proizvodstva-svarnoy-setki/ (дата звернення: 10.09. 2020р.).

115. Гвоздильная машина Shenda: Гвоздильный автомат URL: http://nail-machine.ru/1-automatic-nail-making-machine.html (дата звернення: 10.10.2020р.).

116. Гвоздильный автомат. URL: http://nail-machine.ru/1-automatic-nail-making-machine.html (дата звернення: 10.10.2020р.).

117. Инструмент для производства гвоздей. URL: www. rem. dn.ua/ Instrumenty/proizwodstwo-gwozd.htm (дата звернення: 10.10.2020р.).

118. Бунатян Г.В. Современные крепёжные изделия и соединения в машиностроении. URL: https://www.studmed.ru/bunatyan-gv-sovremennye-krepezhnye-izdeliya-i-soedineniya-v-mashinostroenii_f6d21f35a35.html (дата звернення 10.11.2021р.).

119. Болти. URL: https://uniform-met.ru/articles/o-boltakh-ikh-vidakh-naznachenii-i-primenenii/ (дата звернення: 10.11.2021р.).

120. Накатування різьби. URL : https://extxe.com/5095/tehnologicheskie-metody-obrabotki-metallov-davleniem/ (дата звернення: 11.11.2021р.).

121. Технологічна схема виготовлення стандартних болтів на висадочному автоматі. URL: https://mtomd.info/archives/998 (дата звернення: 11.11.2021р.).

122. Кузнечно-штамповочное оборудование. Прессы-автоматы для объемной штамповки. URL : http://www.tehnoinfa.ru/kuznechnoeoborudyvanie/17.html/ (дата звернення: 07.11.2020р.).

123. Рослик І. Г., Ковзік А. М., Внуков О. О. Основи порошкової металургії. Частина 1. Виробництво порошків. Навч. Посібник. Дніпро : НМетАУ, 2019. 50 с

124. Степанчук А.М. Теоретичні та технологічні основи отримання порошків металів, сплавів і тугоплавких сполук: Підручник. Київ : НТУУ „КПІ”, 2006. 353 с

125. Степанчук А.М., Билык И. И., Бойко П. А. Технология порошковой металлургии. Киев : Вища школа, 1989. 415 с.

126 ДСТУ 2658-94. Прокат чорних металів. Терміни та визначення дефектів поверхні. [Чинний від 1995-07-01]. Вид. офіц. Київ : Держспоживстандарт України, 1996. 37 с.

127. Атлас дефектов стали. URL: http://www.dias-ltd.ru/upload/rd/vasin_yugaj_atlas_ defectov_nt_sbornik.pdf (дата звернення 27.11.2021р.).

128. Бигеев А.М. Дефекты стали. URL: https://chermetinfo.elpub.ru/jour/article/ view/1063 (дата звернення 27.11.2021р.).

129. Дефекты поверхности. URL: http://tsucer.narod.ru/defekt.html (дата звернення: 11.11.2020р.).

130. Мазур В.Л., Добронравов А.І., Чернов П.П. Запобігання дефектів листового прокату. Київ : Техніка, 1986. 142 с.

131. Атлас дефектов стальных горячекатаных бесшовных труб / Г.И. Гуляев и др. Тбилиси : Изд. «Сакартвело», 1991. 152 с

132. Ліквація. URL: https://ozlib.com/823962/tehnika/obschee_predstavlenie_stroenii_metallov (дата звернення: 11.11.2021р.).

133. Види дефектів виливків. URL: http://uas.su/books/mnlz/4.3.2/razdel432.php (дата звернення: 26.11.2021р.).

134. Газові пузирі. URL: http://ndt-welding.com/defektyi-poverhnosti-osnovnogo-metalla-puzyiri/ (дата звернення: 30.11.2021 р.).

135. Дефекти поверхні. URL: http://tsucer.narod.ru/defekt.html (дата звернення: 30.06.2020р.).

136. Дефекти термічної обробки. URL: https://tehnoinfa.ru/tehnologijaobrobotki/17.html (дата звернення: 03.12.2021р.).

137. ДСТУ ISO 6157-1:2004 Вироби кріпильні. Дефекти поверхні. Частина 1. Болти, гвинти та шпильки загальної призначеності [Чинний від: 2006-01-01]. Київ : Держспоживстандарт України, 2004. 12 с.

138. Розшарування металу. URL: http://metallopraktik.ru/novosti/defekt-metalla-rassloenie/ (дата звернення: 10.12.2021р.).

139. Свищ у металі. URL: https://stroilab-sl.ru/kontrol-kachestva-svarnyh-soedinenij/ (дата звернення: 10.12.2021 р.).

140. Розкатана плена та розривини. URL: http://metallopraktik.ru/novosti/defekt-metalla-prokatnaya-plena/ (дата звернення: 10.12.2021р.).

141. Спотворення форми виробів при деформації. URL: https://markmet.ru/defekty-stalei/otkloneniya-razmerov-i-formy-po-dline (дата звернення: 21.12.2021 р.).

142. Спотворення форми виробів при деформації. URL: https://markmet.ru/defekty-stalei/diagonalnye-iskazheniya-%E2%80%94-rombichnost (дата звернення: 21.12.2021р.).

143. Дефекти пресованих труб. URL: https://fccland.ru/proizvodstvo-trub/7470-brak-pri-pressovanii-metalla.html (дата звернення: 11.11.2021р.).

144. Розшарування дроту. URL: https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/8344/103-109.pdf?sequence=1&isAllowed=y (дата звернення: 21.12.2021р.).

145. Викривлення при осаджуванні. URL: https://www.metalcutting.ru/content/defekty-pri-osadke-i-vysadke-metalla (дата звернення: 28.12.2021р.).

146. Планшетність. https://market.severstal.com/ru/ru/g/2015 (дата звернення: 28.12.2021р.).

147. Хвилястість. URL: https://markmet.ru/defekty-stalei/volnistost (дата звернення: 28.12.2021р.).

148. Дефекти зварних з'єднань. URL: https://zvarka.info/vipravlennya-defektiv-zvaryuvannya/ (дата звернення: 28.12.2021р.).

149. Биковський О. Г., Піньковський І. В. Довідник зварника. Київ : Техніка, 2002. 336 с.

150. Роянов В. О., Зусін В. Я., Самотугін С. С. Дефекти та якість при зварюванні і споріднених процесах : gідруч. для студ. зварюв. та машинобуд. напрямків вищ. навч. закл. (Приазов. держ. техн. ун-т). Маріуполь : Рената, 2010. 226 с.

151. Справочник гальваника / Б.И. Байрачный и др. Харьков: Изд-во «Прапор», 1998. 180 с.

Предметний покажчик

А
Агломерат 19, 23, 26, 29, 88, 97, 103, 126
Алотропна модифікація:
- α-залізо 10, 177
- γ-залізо 10, 177

Алюміній 14, 16, 57, 60, 79, 82, 129, 168, 367, 396, 416, 423, 453, 521
Алюмохромит ($(Fe,Mg)(Cr, Al)_2O_4$. 13
Амальгама 133, 136, 139
Амальгамування 135, 139
Аустеніт 177, 428, 432
Афінаж 136, 141, 151

Б
Бесемерівський процес (виготовлення сталі) 36
Блюмінг 253, 278, 301, 304
Боксити 35, 38, 41, 58, 61
Болт 236, 267, 372, 385, 445, 466, 488
Брак 410, 412, 417, 426
Брауніт $3Mn_2O_3 \cdot Mn\underline{Si}O_3$ 12
Брикетування 25, 88
Бронза 13, 64, 101, 367

В
Виливниця 16, 48, 50, 54, 107, 126, 412, 419
Виливок (злиток) 16, 34, 48, 54, 181, 412
Витривалість (матеріалу) 173
Відпал:
- 1-го роду 179
- 2-го роду 179
- гетерогенізаційний 179
- гомогенізаційний 179, 182
- дифузійний 182
- ізотермічний, 181
- неповний, 181
- перерекристалізаційний 179
- повний, 180
- рекристалізаційний 167, 182, 387
- реставраційний 182
- сфероїдизаційний 178, 181

Відпускання: 179,183, 186, 430
- високотемпературне («високе») 187
- низькотемпературне («низьке») 186
- середньотемпературне («середнє») 186

Волока 346
Волочіння: 164, 173, 175, 309, 346, 373
- багаторазове (багатоперехідне, багатократне) 352
- багатоступінчасте 349
- барабанне, бунтове 352
- бухтове 352
- вільне (без протинатягу) 348

- грубо-середнє 348
- дроту 346, 348
- ковзанням та накопиченням дроту на тяглових барабанах 352
- мокре 351, 357
- надтонке (0,1…<0,4 мм) 348
- найтонкіше, або мікронне (<0,1 мм) 348
- нерухомою контактною поверхнею волок 348
- одноразове (одноперехідне, однократне) 348
- одноступінчасте 349
- особливо товсте (більше 8 мм) 348
- протинатягом 348
- пруткове 352
- прямоточне без ковзання 348
- рухомою контактною поверхнею інструменту 348
- середнє (1,6…<6 мм) 348
- сухе 348
- товсте (6…<8 мм) 348
- тонке (0,40…<1,6 мм) 348
- труб 359

Вольфрам 16, 57, 107, 130, 396, 405, 419
Вольфраміт 109
Втома (матеріалу) 173, 411
Вуглецевий еквівалент 170, 296
Вуглець 11, 27, 29, 33, 36, 123, 177

Г
Гайка 18, 373, 385, 388
Гарнісаж 71, 78, 124, 126
Гартування: 179, 183
- *без поліморфного перетворення* 179
- з *поліморфним перетворенням* 179

Гаусманіт $(Mn^{II}Mn_2^{III})O_4$ 12
Гвинт 18, 373, 385, 388
Границя (межа) міцності 162, 247, 269
Границя (межа) текучості 162, 175, 226, 264, 275, 297
Графіт 177

Д
Дендрит 54
Десульфурація 34
Дефекти:
- «апельсинова кірка» 455
- багатокінцевість (бунта) 505
- бочкоподібність 435, 489
- «брижі» 500
- бульбашки 419, 425, 443, 451
- вдавлення 471
- викривлення 435, 496
- відбитки 470
- відпускна крихкість 430
- відсутність покриття 521
- відшарування 457, 521

- «візерунок дресирування» 462
- вкатана окалина 458
- включення 415, 420, 428, 507, 521
- вм’ятина 471
- волосовина 451
- вус 484, 487
- в’язкість 430
- гвинтровий слід 511
- горби (на трубах) 498
- гофри 498
- граненість 503
- ексцентричність (при куванні) 490
- забоїна 514
- забруднення 425, 437, 459, 519
- заворот (скоринки, кірочки, кромки, торця) 424, 481, 498
- завусенець 514
- загнутий куточок 498
- задирка 466, 507, 513
- закат 482
- залишкова окалина («плями окалини») 518
- затиск 463, 485, 487
- збільшений профіль 487
- зім’ятість (рулону) 504
- злипання витків (рулону) 505
- зміщення кромок 507, 511
- зміщення отвору (перетину труби) 507
- зміщення при куванні 490
- зморшки 463
- значні 409
- зневуглецювання 438
- «кільцеватість» 498
- кірочка 459
- кольори мінливості («побіжалості») 437
- коробуватість 496
- косий зріз 502, 512
- кривизна 494
- критичні 409
- лампас 484
- «ластівкін хвіст» 489
- ліквація 413
- лінії плинності 462
- «лом-бій» 486
- лускатість 426, 456
- малозначні 409
- матовість 469
- міжкристалітне руйнування 428
- м’які плями 428
- навуглецювання 438
- надриви 447, 478, 480
- налипання 458,470
- наліт (плівка) шламу 518
- наплив 423, 456

- нарост 412, 424, 470
- насічка 467, 511
- нашарування 457, 522
- невиконання кутів (профілю) 485
- неглянсуватість 469
- недогрів 429, 456
- недокат 485
- недолив 412, 414
- недопресовка 486
- недотрав («непротравлення») 517
- незлитина 421
- неоднорідність кольору 523
- неоднорідність напилення 522
- неповна перекристалізація 429
- неповне відпущення 429
- неповний різ 512
- непровар 509
- неспай 421
- низька твердість 428
- «окалина» 436
- овальність (труби) 490, 503
- перегрів 427
- пережим 499
- перекіс 412, 490
- перепал 426, 515
- переплутування витків (бунта) 505
- перетрав («розтрав») 519
- підвищена твердість 429
- підгиб 498
- підріз 464, 509
- піттінг 523
- плена 455, 482
- плівка 423, 455
- плями іржі 517
- плями травлення 459, 517
- подряпина 465, 467, 514
- повздовжня стрічка 464
- пори (пористість) 469, 523
- порожнина 416, 448, 508
- порушення допуску 485
- послаблення розміру 485
- потертість 468
- пробоїна 473
- продавина 473
- продир 467
- прожог 507
- прокол 473
- пузирі 419, 425, 446, 451
- раковина 412, 415, 449, 457, 471
- рвана (бічна) кромка 480
- рванина 434, 447, 478, 481
- «рельєфна недосконаліть» 522

- риска 464, 465, 523
- рифлення 474
- рихлість 416
- різностінність 412, 502
- різнотовщинність 489, 501
- різноширинність 500
- розпушеність (рулону) 504
- розрив (розривина) 447
- розшарування 453, 479
- ромбічність 489, 494
- руйнування (по сердцевині) 431
- рябизна («рябь») 473
- свищ 421, 449, 508
- серпоподібність 494
- сітка відбитків 473
- «сіре покриття» 523
- складка 461
- скол металу 513
- скручування 479, 492
- слід полірування 515
- смугастість 474
- «сорочка» 486
- стирання («отес») 464
- строкатість твердості 430
- ступінчастий зріз («зазубрина») 513
- телескопічність (рулону) 504
- тріщина 420, 432, 440, 475, 506, 515, 519, 522
- увігнутість 436, 489, 510
- удавина 471
- ужимина 425
- утяжина 486
- флокени 431
- хвилястість («гармошка») 455
- «червонуватість» 517
- «чорновина» 486, 518
- шаблеподібність 494
- шлакові включення 415
- «шов прокатки» 488
- шорсткість 469, 522
- шпаківня 421, 448
- явні 409
- «язвини» 428
- «ялинка» 489, 501

Деформація: 158, 164, 173, 276, 399
- відносна («умовна») 159, 226
- гаряча 167
- зсувна 158
- критична 168, 359
- лінійна 158, 354
- логарифмічна («істинна») 159, 226
- пластична 158, 162, 173
- пружна 158

- тепла 167
- холодна 164
Деформовність 270
Дислокація 173
Допуски 237, 338
Драга 135
Дресирування 287, 290
Дроблення (руди) 23

Е
Евтектика 137, 139, 178
Електроліз 62, 76, 80, 93, 105, 151, 398
Електролізер 62, 73, 81
Електроплавильна піч 43, 71, 73, 90
Електропровідність 166
Елонгація 322

Ж
Жерсть (бляха) 17, 215, 287

З
Залізняк :
- бурий $Fe_2O_3 \cdot nH_2O$ 11, 22
- магнітний (магнетит) Fe_3O_4 11, 22
- пірит FeS_2 11
- червоний (гематит) Fe_2O_3 11, 22
Залізо 10, 13, 22, 27, 31
Зачистка: 190, 201
- абразивна 199, 203
- вибіркова 201
- вогнева 202
- дробоструминна 204
- електрична 205
- електроконтактна 205
- електрохімічна (хімічна) 205
- лезвійна 204
- легкодугова 205
- плазмова 205
- суцільна 201
Збагачення (сировини, руди) 23
Зварювання: 192, 225, 379, 405
- дугове 318
- електроконтактне (опором) 316
- індукційне 317
- контактне (дротів сітки) 316, 379
- плазмове 318
- струмами високої частоти 317
- точкове 380
Зворот (відпочинок) 167
Злиток (виливок) 47, 54, 77
Злитковоз 279, 281
Зміцнення (наклеп) 165, 232

Знеміцнення 167

І
Ідентифікація 195, 218, 317
Інвар 85
Індуктор 317
Іридій 140, 146

К
Кантувач 55, 280, 282
Калібрування 235, 249, 267, 282, 299, 301, 314, 321, 347, 404
Квалітети 292, 405
Ковка: 224
- вільна 225, 228
- у штампах 225, 228

Ковкість 80
Ковш сталерозливочний 51, 56
Коефіцієнт:
- Лоде 163
- напруженого стану 172
- тертя 175, 261

Кокс 21
Конвертер 36
КОРЕКС (COREX) – процес рідкофазного відновлення заліза 32
Корозія:
- електрохімічна 206
- хімічна 205

Кристалічна ґратка:
- об'ємноцентрована кубічна 10
- гранецентрована кубічна 10

Круппівський сиродутний процес (Krupp Rennverfahren) 32
Кускування (руди) 23, 25
Купелювання 139

Л
Латунь 64
Легування 14, 16, 49, 79, 122
Ледебурит 178
Литво 45, 54
Ліганд 154
Лігатура 14, 136
Ліквідус 178
Лудіння 215

М
Магнієтермія 72, 74
Магнохромит ($Mn,Fe)Cr_2O_4$ 13
Манган (марганець) 9, 11, 28, 34
Манганін 12
Маніпулятор 230, 280, 282
Манганіт $MnO(OH)$ 12
Маркування 218

Мартенівська піч («мартен») 40
Мартенсит 179, 183
Мастило 116, 247, 258, 289, 324, 327, 351, 367, 371
Матриця 242, 244, 362
Межа (границя) міцності (металу) 162, 164
Межа (границя) текучості (металу): 162
- вимушена 163
- стандартизована 162
Мельхіор 64, 101
Металізація 31, 217
Метод:
- Байєра (переробки бокситів) 61
- електролізу 62, 93
- Содеберга (електролізу алюмінію) 62
Мідрекс (спосіб відновлення заліза) 31
Мідь 11, 64
Міксер 26, 55
Міцність 182, 256
Модифікування 14, 16
Модуль зсуву 10
Модуль пружності (модуль Юнга) 162
Молібден 16, 57, 115
Молот 229, 236
Мульда 26, 41

Н
Нагартування 115
Напруження: 160, 171,186, 259, 314, 354, 358
- головні 160
- нормальні 161, 164
- тангенціальні (зсувні) 160
- текучості 162, 164, 169
Нейзільбер 85
Никелін 86
Нікель 10, 57, 85, 129
Ніхром 13, 86
Ножиці:
- гільотинні 192, 196
- дискові 197, 244
Нормалізація 168, 179, 182
Нормативний документ (НД) 10, 13, 18, 61, 65, 101, 303, 321, 326
Нормативно-технічна документація (НТД) 9, 18

О
Оздоблення (обробляння, оброблення) 190, 235, 396
Окатиші 19, 23, 32
Окатування 25
Окислення 104
Оксид 11, 22, 35, 41
Опір (пластичному) зсуву 163
Оправка 226, 229, 259, 265, 273, 322, 329, 349
Осмій 140, 146

П

Пакування 206, 222
Паладій 140, 152
Паливо (доменної плавки) 21, 25, 67
Патентування 182
Переплав: 45
- електронно-променевий 50
- електрошлаковий 50, 78
- плазмений 49, 205
- плазменно-дуговий 49

Перліт 178, 181, 308
Пила:
- важільна 198
- маятникова 198
- салазкова 198

Піролюзит $MnO_2 \cdot xH_2O$ 12
Піч: 20, 40, 43, 49
- електроплавильна 43
- індукційна 46
-доменна 20
-дугова 31, 43, 47
-конвертерна 36
-мартенівська 40

Пластичність 52
Платина 10, 133, 140
Платініт 86
Платиноїди 140, 147
Позапічна обробка (сталі) 344
Поковка 225, 232, 238
Покриття: 178, 190, 205
- алюмінієве 217
- гумове 213
- дифузійне 217
- захисне 206
- електроосаджене 216
- емальне 211
- кадмієве 217
- консерваційне 206
- лакове 209
- лакофарбне 209
- металеве 213
- неметалеве 207
- нікелеве 217
- олов’яне 215
- полімерне 212
- свинцеве 217
- фосфатне 209
- хромове 216
- цинкове 101, 214

Порошкові матеріали:
- «альні» 395
- «альніко» 395

- «альсіфер» 395
- аморфні 395
- антифрикційні 394
- електроконтактні 395, 404
- електротехнічні 395
- ерозійностійкі 395
- конструкційні 395
- мінералокераміка («кермет») 395
- «магніко» 395
- магнітодіелектрики 395
- магнітом'які 395
- магнітотверді 395
- «пермалой» 395
- пористі 394
- «потіючі» 395
- ферити 395
- фільтрувальні 394
- фрикційні 394

Правка: 199, 244, 249
- пресова 201
- розтягненням 201
- роликова 200

Прес 201, 229, 236, 239, 249, 322, 340, 361, 391
Пресування: 361
- бокове 362
- гаряче 403
- зворотне 363
- напівбезперервне 363
- пряме 363
- рухомий контейнер 362

Прокат: 180, 191, 196, 234, 253, 282, 291
- дрібносортний 196, 200, 223, 308
- дріт 348
- крупносортний 200
- середньосортний 200
- стрічка 224, 283
- труби 322

Прокатка: 158, 164, 172, 182, 251, 278, 309
- безперервна 252, 258, 299
- гаряча 255, 258, 261
- заготівельна 252
- коса 271
- листова 190, 257, 282
- напівбезперервна 278
- нескінченна 258
- пілігрімова 262
- поздовжня 252, 258, 261
- поперечна 276
- послідовна 285
- сортова 190, 258, 291, 303

- спеціальних профілів 252, 291
- трубна 258, 261, 264, 321, 335
- холодна 255, 258, 264, 287

Простежуваність 218, 327
Процес:
- Холла-Еру (електролізу алюмінію) 62
- Содеберга (електролізу алюмінію) 62

Профілювання 257, 313, 318
Прошивка: 227, 271, 273, 322, 329
- наростаюча 364, 369
- заповнююча 364, 369
- наскрізна 364, 370

Псиломелан $mMnO•MnO_2• nH_2O$ 12
Пуансон 242, 361
Пурпурит $Mn^{3+}[PO_4]$ 12

Р
Рафінування: 43, 52, 65, 69, 76, 84, 93, 98, 100, 140, 150
- алюмінію 61, 63

Редукування (труб) 258, 260, 276, 321
Рекристалізація: 167
- вторинна 168
- збираюча 167
- первинна 167

Реній 117
Різнотовщинність (прокату): 286, 341
- поздовжна 286, 501
- поперечна 286, 489, 501

Розкиснення (сталі) 16, 34, 39, 45
Розливка: 54
- безперервна 55
- зверху 54
- сифоном (знизу) 54

Родій 140, 143, 148, 152
Родохрозит (марганцевый шпат, малиновый шпат) $MnCO_3$ 12
Розкатка 271, 322, 333, 342
Рольганг 279, 314, 323
Руда 11, 21, 30, 57, 65, 71, 86, 96, 110, 117, 126
Руйнування (металу, виробу) 160, 173, 192, 418, 429, 444
Рутеній 140, 146

С
Саморіз 390
Свинець 11, 57, 94, 138
Силіцій (кремній) 11, 16, 28, 34, 125
Сітка: 374
- важка 378
- зварна 375, 378
- легка 378
- просічно-витяжна 282, 375
- «рабиця» 375, 377
- ткана (плетена) 374

Сірка 11, 28, 34, 38, 90, 98, 118
Складування 224, 316
Скрап 334
Скрап-процес (виготовлення сталі) 40
Скрап-рудний процес (виготовлення сталі) 40
Слябінг 279
Солідус 178, 182
Сорбіт 182, 187, 308
Сортування (грохочіння) руди 24
Спікання: 402, 405
- рідкофазне 402
- твердофазне 402

Сталь:
- броньова 283
- високоякісна 306
- вуглецева 15, 179, 184, 228, 283, 288, 294, 326, 369
- гарматна 17
- динамна 283
- доевтектоїдна 178, 180
- евтектоїдна 178, 180
- електросталь 15, 43
- електротехнічна 168, 283
- електрошлакового переплаву 15, 78
- заевтектоїдна 178, 180
- залізничного транспорту 17
- звичайної якості 284, 292
- інструментальна 17, 221, 230, 285
- кипляча 17, 35, 56
- конвертерна 15
- конструкційна 17, 184, 283, 285, 287, 395
- котельна 17, 321
- мартенівська 15, 52
- напівспокійна 35, 55
- нержавка (корозійностійка) 283, 318
- низьковуглецева 16, 167, 283, 287, 350
- легована 16, 180, 283
- підшипникова 17, 271, 321, 331
- ресорно-пружинна 291
- снарядна 17
- спокійна 35, 56
- топочна 17
- трансформаторна 168, 283
- трубна 17
- якісна 218, 283, 288, 294

Стан прокатний:
- автоматичний 260, 322, 326, 338, 371
- безперервний 191, 196, 221, 260, 278, 285, 304
- дванадцятивалковий 256
- двадцятивалковий 256, 291
- дрібносортний 278, 300, 306
- дротовий 307
- дуо 256, 279, 304

- калібрувальний 259, 325, 328, 333
- кварто 256, 284
- косої прокатки 275, 322, 324, 327
- крупносортний 197, 304
- кулепрокатний 335
- листопрокатний 253, 256, 278, 285
- лінійний 258, 304
- напівбезперервний 278, 285, 287
- нереверсивний 305
- пілігрімовий 261, 322
- повздовжної прокатки 251, 258, 315
- поперечної прокатки 251, 276
- послідовної прокатки 258, 285, 304
- профілезгинальний 310, 313, 315
- реверсивний 256, 280, 289, 304
- рейковий 331
- середньосортний 305
- сортопрокатний 278, 299, 303, 309
- стрічковий 283
- тріо 304
- трубопрокатний 278, 299, 303, 309
- трьохвалковий з «косим» розташуванням валків 322
- універсальний 279, 299, 304, 313
- ХПТ (холодної покатки труб) 261, 264, 336
- ХПТР (холодної прокатки труб роликами) 261, 269, 271, 320, 336
- ширкосмуговий 283, 285

Стандарт 9, 15, 18, 207, 218, 282, 293, 310, 312, 323, 326, 371
Стандартизація 179, 187, 207
Старіння 179, 187
«Стелмор» (метод охолодження катанки) 309
Сульфатно-кислотне виробництво 11

Т

Твердість 177, 180, 182, 186, 230, 284
Текстура (деформації) 164, 168
Температура:
- гомологічна (збіжна) 167
- кипіння 185
- Кюрі 10
- плавлення 198, 279, 396, 398, 402, 404

Теплоємність 10
Тертя:
- ковзання 170
- коефіцієнт 171, 226, 255, 259, 354, 369
- машинне 170
- руху 170
- спокою 170

Технічне регулювання 9, 18
Технічний контроль 9, 206, 217, 252, 407
Технологічна операція 72, 215, 284, 302, 330, 340, 347, 404
Технологічний перехід 61, 314, 383
Томасовський процес (виготовлення сталі) 37

Труба:
- багатошарова 315
- зварна 315
- профільована 318, 320
- прямошовна 315, 317
- спіралешовна 315, 317

У
Ударна в'язкість 10, 52, 187, 338
Упаковка 222, 343, 384
Управління якістю 9
Усадка 402
Усереднення (руди) 24, 88

Ф
Фазова діаграма 177, 180, 183
Файнштейн 88, 92, 150
Ферит 177
Феровольфрам 108,130
Феромагнітні властивості 10
Феромарганець (фероманган) 12, 15, 30, 126
Феронікель 129
Фероплатина 147, 149
Феросилікомарганець 127
Феросиліций 15, 30, 42, 82, 125, 129
Феротитан 129
Феросплави 14, 18, 122
Ферохром 13, 123, 127
Флотація 25, 87, 90, 110, 117, 180
Флюс доменний 21, 66, 68, 84, 97, 126
Формування (пресування) порошків: 398
- вибухом 402
- вібраційне 400
- динаміне 402
- ізостатичне 400
- ізотермічне 401
- імпульсне 400
- мундштучне 400
- прокаткою 401
- шлікерне 400
Фосфатування 209
Фосфор 14, 28, 34, 37, 44, 112, 126

Х
ХіЛ (спосіб відновлення заліза) 31
Хром 13, 16, 29, 109, 127
Хромистий залізняк - хромит заліза $Fe(CrO_2)_2$ 13
Хромпікотит $(Mg,Fe)(Cr, Al)_2O_4$ 13

Ц
Царська горілка 108, 115, 140, 149, 152
Цвях: 373, 382

- будівельний 382
- «дуплет» 382
- столярний 382
- тарний 382
- толевий 382
- трефовий 382
- формувальний 382

Цементація 11, 105, 154, 185, 187
Цементит 178
Цинк 33, 57, 79, 96, 100, 138
Цинкування 214

Ч
Чавун:
- доевтектичний 178
- евтектичний 178
- доменні феросплави 14
- заевтектичний 178
- ливарний 14, 29
- переробний 14, 28, 33, 41

Ш
Шеєліт 109, 130
Шліх 135, 148
Шліхтування (промивка) золота 135
Штамп 225, 228, 233, 249, 341, 373, 387
Штамповка 228, 233, 242, 245, 248, 373, 387, 399
Штейн 66, 87, 92, 100, 150
Шуруп 373, 390

Щ
Щільність (густина) 10, 26

Я
Якість 18, 21, 34, 39, 118, 162, 175, 191, 204, 231, 233, 244, 247, 263, 293, 332, 337, 403, 407, 409, 411

C
Coilbox 286
COREX (Coal-Reduction-Experience) – процес рідкофазного відновлення заліза 32

D
Direct Reduced Iron *(DRI)* 31

H
HyL (спосіб відновлення заліза) 31

K
Krupp Rennverfahren (Круппівські сиродутний процес) 32

M
Midrex (спосіб відновлення заліза) 31

Іменний покажчик

А
Адамський С.Д. 289
Айнбіндер С.Б. 170
Альшевський Л.Є. 358
Андреюк Л. В. 170
Анісіфоров В.П. 260
Амонтон 170
Ахматов О.С. 170

Б
Байєр 61
Бартлет Нейл 141
Бінгам 171
Бочвар А.А. 178
Брескіна А.І. 290
Бринель 64
Боуден Ф.П. 170

В
Ваткін Я.Л. 251
Вердеревський В.А. 270
Виноградов О.П. 251
Віккерс 101

Г
Гадфільд 13
Генки 163
Госс 168
Грудєв О.П. 289
Грюнер П. 263
Губер 163
Гук 161
Гун Г.Я. 169, 369

Д
Данченко В.М. 251
Деберейнер 141
Дерягін Б.В. 170
Діннік О.О. 251
Друян В.М. 251
Дьомкін Н.Б. 170

Е
Ернст Г. 170
Еру 64

Є
Ємельяненко П.Т. 251

З
Зайков М.А. 169
Зибель Е. 172
Зюзін В.І. 169

К
Кельвін 167, 182
Клименко П.Л. 251
Костецький Б.І. 170
Крагельський І.В. 170
Кулон 162, 170
Кюрі 10

Л
Лавров П.П. 261
Лебединський В.В. 152
Лоде 163

М
Мазур В.Л. 289
Матвеєв Ю.М. 274
Менделеєв Д.І. 9, 13, 100, 140
Мерчент М. 170
Мізес 163
Молчанов О.І. 286
Монель 85
Моос 13, 115, 136, 138
Мутьєв М.С. 251

Н
Надаї А. 163, 170
Носаль В.В. 270
Ньютон І. 171

П
Паркес 138
Паттинсон 138
Пляцковський О.О. 263, 369
Полухін В.П. 169
Прозоров Л.В. 369
Прудковський Б.А. 369
Пуасон 162

Р
Рижиков А.М. 370

С
Сафьян М.М. 251, 286
Сен-Венан 162
Сіжурне Ж. 369
Содеберг 62
Солтан С.Л. 286

Т
Тейбор Д. 170
Тетерин П.К. 263, 268
Треска 162
Третьяков А.В. 169

Х
Ханін М.І. 251
Холл 62

Ц
Целіков О.І. 256, 263

Ч
Чекмарьов О.П. 251
Чорнявський О.О. 263
Чуйко П.І. 290

Ш
Шведов 171
Шевакін Ю.Ф. 264, 370
Шевченко А.А. 260
Шломчак Г.Г. 165

Ю
Юнг 10

ДОДАТОК А

Таблиця А1 – **Деякі характеристики видів металургійної продукції**

Вид продукції	Заготовка, матеріал	Форма постачання	Нормативні документи		Основні показники якості	Основний спосіб виготовлення
			національні та країн СНД	Міжнародні, регіональні та інших країн*		
1	2	3	4	5	6	7
1 Чавун товарний	Шихтові матеріали	Чавун переробний; ковкий; ливарний; аустенітний; з кулястим графітом для виливків; високоміцний; з кулястим графітом; аусферитний; зі спеціальними властивостями; марки; загальні вимоги та норми	ДСТУ EN 1562…1564; ДСТУ EN 10001; ДСТУ EN 13835; ДСТУ 2551; ДСТУ 3132; ДСТУ 3133; ДСТУ 3925;	ISO 9147; EN 1562…1564; EN 10001; EN 10021; EN 13835; ГОСТ 805; ГОСТ 1585; ГОСТ 4832; ГОСТ 7293; ГОСТ 7769; ГОСТ 11849; JISS2201*; JISS 2202	Хімічний склад, структура та технологічні параметри	Плавка в доменній печі
	1.2 Чавун рідкий різного складу	Чавун у виливках (з кулястим, вермикулярним, пластинчастим графітом; зі спеціальними властивостями; ковкий; легований; антифрикційний тощо). Марки, технічні умови	ДСТУ 3925; ДСТУ 3926; ДСТУ 8851	ГОСТ 1215; ГОСТ 1412; ГОСТ 1585; ГОСТ 7293; ГОСТ 7769; ГОСТ 28394	Хімічний склад, структура, механічні властивості	Плавка в доменній печі, лиття

1	2	3	4	5	6	7
	1.3 Модифікатори для чавуну	Модифікатори та брикети модифікувальні. Загальні технічні умови	ДСТУ 3361; ДСТУ 3362		Хімічний склад	Брикетування
2 Вироби з чавуну	-	Виливки з чавуну і сталі. Терміни та визначення дефектів		ГОСТ 19200	Терміни та визначення дефектів	Нормування
	-	Виливки з металів і сплавів. Допуски розмірів, маси та припуски на механічну обробку		ГОСТ 26645	Допуски	Нормування
	Чавун	Вироби з чавуну	ДСТУ EN; 10021 (в частині чавуну)	EN 10021	Склад, структура, вимоги до виробів	Плавка в доменній печі, спеціальна обробка
		Опоки суцільнолиті		ГОСТ 8909	Розміри, склад	
	Чавун різних марок	Дріб	ДСТУ 3184	ГОСТ 11964	Хімічний склад, розміри часток	Плавка в доменній печі, лиття, спеціальна обробка
	Чавун високоміцний	Труби, фітинги, допоміжні деталі та їх з’єднання для трубопроводів	ДСТУ ISO 7005-2; ДСТУ EN 969; ДСТУ EN 10284; ДСТУ 5996; ДСТУ Б В.2.5-25	ISO 7005-2; EN 969; EN 10284; ГОСТ 6942; ГОСТ 9583	Хімічний склад, структура, розміри, вимоги до виробів	
		Апарати колонні	ДСТУ 2898			

1	2	3	4	5	6	7
	Чавун	Посуд чорний	РСТ УССР 114-88		Хімічний склад, вимоги до виробів	
		Вироби для побутових печей	РСТ УССР 99-84			
		Радіатори опалювальні	ДСТУ Б В.2.5-2	ГОСТ 8690		
	Чавун різного складу	Литво з чавуну (ковкого, сірого, з різною формою графіту тощо (для будування редукторів та ін.). Технічні умови	ДСТУ EN 1561…1564; ДСТУ 8833; ГСТУ 3-26-41	EN 1561…1564; ГОСТ 1215; ГОСТ 3443;ГОСТ 26358;		
	Чавун, матеріал покриття	Прилади сантехнічні емальовані	ДСТУ Б В.2.5-7	ГОСТ 18297		
		Посуд зі склоподібним та фарфоровим емалевим покривом	ДСТУ ISO 2724	ISO 2724		
3 Сталь товарна	Шихтові матеріали для виплавки сталей	Сталі та нікелеві сплави; загальної призначеності, конструкційні, інструментальні, автоматні, нержавкі з поліпшеною тривкістю до атмосферної корозії, жаростійкі та жароміцні; ресорно-пружинні, шарико- та роликопідшипникові, зварювальні; з високою	ДСТУ EN 10020; ДСТУ EN 10021 (в частині сталі); ДСТУ EN 10025-2; ДСТУ EN 10027-1,2; ДСТУ EN 10028-2…7; ДСТУ EN 10083-1, 2, 3;	ISO 404; ISO 683-17; ISO 4952; ISO 6930-1; ISO 6934-1; ISO 7153-1; ISO 9327-2…5; ISO 9328-5; ISO 9329-4; ISO 16143-3; EN 10020; EN 10021; EN 10025-2; EN 10027-1,2;	Вміст складових, властивості, специфічні вимоги щодо призначення (розмір зерна, зварюва-ність, глибина цементова-ного шару; корозійна	Плавка в сталеплавиль-ному агрегаті

1	2	3	4	5	6	7
		межею плинності, для високих і низьких температур експлуатації, для наступного деформування та роботи під тиском; дрібнозернисті; піддані нормалізації або прокатці; після термічної, хіміко-термічної або термомеханічної обробки, для попередньо напруженого бетону та ін.). Визначення й класифікація. Назви та системи позначення. Марки. Технічні умови	ДСТУ EN 10084…10085; ДСТУ EN 10088-1, 3; ДСТУ EN 10132-4; ДСТУ EN 10222-2…5; ДСТУ EN 10250-2, 3; ДСТУ EN 10269; ДСТУ EN 10277-2…5; ДСТУ EN 10343; ДСТУ ISO 404; ДСТУ ISO 683-17; ДСТУ ISO 16143-3; ДСТУ EN ISO 4957; ДСТУ ISO 4952; ДСТУ ISO 6930-1; ДСТУ ISO 6934-1; ДСТУ ISO 9327-2…5;	EN 10028-2…7; EN 10083-1, 2, 3; EN 10084; EN 10085; EN 10088-1, 3; EN 10132-4; EN 10222-2…5; EN 10250-2, 3; EN 10269; EN 10277-2… 5; EN 10343; EN ISO 4957; СТ СЭВ 4422; ГОСТ 380; ГОСТ 801; ГОСТ 977; ГОСТ 1050; ГОСТ 1414; ГОСТ 1435; ГОСТ 4543; ГОСТ 5520; ГОСТ 5632; ГОСТ 5781; ГОСТ 5950; ГОСТ 9045; ГОСТ 14959; ГОСТ 10884; ГОСТ 10994 ГОСТ 19281; ГОСТ 19265;	стійкість тощо)	

1	2	3	4	5	6	7
			ДСТУ ISO 9328-2…5; ДСТУ 2651; ДСТУ 4581-4; ДСТУ ГОСТ 30208	ГОСТ 20072; ГОСТ 21022; ГОСТ 27772; ГОСТ 30208; ГОСТ EN 10269		
4 Метали чорні вторинні		Метали чорні вторинні. Терміни та визначення	ДСТУ 3674		Терміни та визначення	Нормування
	Лом чорних металів	Метали чорні вторинні. Загальні технічні умови та технічні умови постачання	ДСТУ 4121	ГОСТ 16482	Склад	Плавка в сталеплавильному агрегаті
5 Феросплави	Шихтові матеріали для виплавки феросплавів	Феробор. Марки		ГОСТ 14848	Хімічний склад, характеристики виду постачання	Нормування. Плавка в електросталеплавильному агрегаті
		Феровanадій. Марки, технічні умови та умови поставки		ISO 5451; ГОСТ 27130		
		Феровольфрам. Технічні умови		ISO 5454; ГОСТ 17293		
		Феромарганець. Загальні технічні умови	ДСТУ 3547	ISO 5446		
		Фероніобій. Марки, технічні вимоги та умови постачання	ДСТУ ГОСТ 16773	ISO 5453; ГОСТ 16773		
		Феромолібден. Технічні умови		ISO 5452; ГОСТ 4759		
		Феросилікомарганець. Марки, технічні умови	ДСТУ 3548; ДСТУ 4127	ISO 5447; ГОСТ 4756		

1	2	3	4	5	6	7
		Феросилікохром. Марки	ДСТУ ГОСТ 11861	ISO 5449; ГОСТ 11861		
		Феросиліцій. Марки, Загальні технічні умови	ДСТУ 4127			
		Феротитан. Марки	ДСТУ ГОСТ 4761	ISO 5454; ГОСТ 4761		
		Ферохром. Марки	ДСТУ ГОСТ 4757	ISO 5448; ГОСТ 4757		
		Силікокальцій. Марки		ГОСТ 4762		
6 Ливарні вироби зі сталі	-	Виливки з чавуну і сталі. Терміні та визначення дефектів		ГОСТ 19200	Терміни та визначення дефектів	Нормування
	-	Виливки з металів і сплавів. Допуски розмірів, маси та припуски на механічну обробку		ГОСТ 26645	Допуски	Нормування
	Рідка сталь	Лиття в оболонкові ливарні форми. Загальні вимоги та норми	ДСТУ 3022		Склад; розміри	Лиття
	Сталева заготовка у різному вигляді	Вироби сталеві з поліпшеними деформаційними властивостями у перпендикулярному напрямку до поверхні виробу. Технічні умови постачання	ДСТУ EN 10164	EN 10164	Вид продукції, хімічний склад, фізичні властивості	Лиття; відповідна обробка
	Сталі різних марок у рідкому стані	Виливки сталеві різного призначення,	ДСТУ EN 10213-1…4;	ISO 404; EN 10021;	Хімічний склад;	Лиття

1	2	3	4	5	6	7
		зокрема, по витоплюваним моделям (для роботи під тиском та ін.). Технічні умови	ДСТУ 2540; ДСТУ 8781;	EN 10079; EN 10213-1…4+ A1; ГОСТ 977; ГОСТ 21357; ГОСТ 30153	Форма і розміри; спосіб лиття	
	Нелеговані та леговані сталі без термічного обробляння та термічно оброблені	Пласкі ливарні вироби для використання під тиском	ДСТУ EN 10028-2…7	EN 10028-2…7; ГОСТ ЕН 10028-2…7		
	Сталі конструкційні	Опоки ливарні суцільнолиті та з литих елементів	ДСТУ ГОСТ від 14973 до 14995;	ГОСТ 8909; ГОСТ 14973… 14995; ГОСТ 17127 … 17132; ГОСТ 22959 … 22963	Розміри, специфічні властивості	
	Сталі конструкційні	Прокатні валки		ОСТ 24.013.04-90; ОСТ 24.013.20-90; ОСТ 24.013.21-85	Розміри, марки сталі; структура; механічні властивості	Лиття, механічна та термічна обробка
	Сталі різні	Дріб	ДСТУ 3184;	ГОСТ 11964	Хімічний склад, механічні властивості, розміри	Розпилювання в охолоджувачі

1	2	3	4	5	6	7
	Сталі високолеговані	Порошки сталеві розпилені		ГОСТ 13084; ГОСТ 14086	Хімічний склад, розміри частинок	Розпилювання рідкої сталі в охолоджувачі, подрібнення
	Сталі	Кулі молольні (для кульових млинів та ін.)	ДСТУ 3499 ДСТУ 8538	ГОСТ 7524	Хімічний склад, механічні властивості, розміри	Лиття (або прокатка в кулепрокатному стані)
	Сталі конструкційні	Фланці різних конструкцій та призначення	ДСТУ ISO 7005-1; ДСТУ ГОСТ 12819 … 12822	ISO 7005-1	Конструкція, зварюва-ність, розміри	Лиття
7 Прокат сталевий сортовий гарячекатаний	-	Терміни	ДСТУ 2924		Терміни	Нормування
	-	Прокат сортовий сталевий гарячекатаний круглий, квадратний, шестигранний, штабовий. Сортамент	ДСТУ 4737; ДСТУ 4746; ДСТУ 4747	EN 10058; EN 10059; EN 10061; ГОСТ 103; ГОСТ 2591; ГОСТ 2879	Сортамент	Нормування
	-	Поверхневі дефекти прокату	ДСТУ 2658		Види поверхневих дефектів	Нормування
	Сталева лита заготовка	Вироби гарячекатані з конструкційних сталей, зокрема, з різними обробкою, властивостями та призначенням. Технічні умови постачання	ДСТУ EN 10025-1, 3…6	EN 10025-1, 3…6	Види виробів, властивості, розмірні ряди; види обробки та призначення	Прокатка

1	2	3	4	5	6	7
	Сталева лита заготовка або після попередньої гарячої деформації	Прокат зі сталі конструкційної, інструментальної, вуглецевої та легованої, високої оброблюваності різанням, ресорно-пружинної, зокрема, для терпугів, рашпилів, зубил та крейцмейселів. Технічні умови	ДСТУ 2957; ДСТУ 7806; ДСТУ 8429; ДСТУ 8968;	ГОСТ 1414; ГОСТ 4543; ГОСТ 5210; ГОСТ 14959	Види профілів, склад сталі, структура, форма, розміри, властивості	Прокатка, термічна обробка
		Лист, широкі плоскі вироби, прутки, сортовий і фасонний прокат з конструкційної сталі. Технічні умови (в частині сортового та фасонного прокату)	ДСТУ ISO 630	ISO 630		
		Технічні умови постачання прутків, стрижнів, дроту, профілів та полірованих виробів з корозійнотривких сталей конструкційного призначення	ДСТУ EN 10088-5	EN 10088-5		Гаряча прокатка; термічна обробка

1	2	3	4	5	6	7
	Сталева гарячекатана заготовка з різних сталей (легованої та нелегованої; інструментальної, швидкоріжучої, пружинної тощо)	Штаба (полоса), прутки та прути (із заданими високотемпературними властивостями, з інструментальної нелегованої та легованої, нержавіючої сталі, для роботи під тиском, під зварювання тощо). Технічні умови та вимоги постачання.	ДСТУ 3833 ДСТУ 3953; ДСТУ 4747/ГОСТ 103; ДСТУ ISO 1035-3; ДСТУ 3833; ДСТУ 3953; ДСТУ EN 10092-1; ДСТУ EN 10207; ДСТУ EN 1022; ДСТУ EN 10272; ДСТУ EN 10273; ДСТУ ISO 4951-1…3	ISO 1035-3; ISO 4951-1…3; EN 10058; EN 10092-1; EN 10207 EN 10221; EN 10272; EN 10273; ГОСТ 82; ГОСТ 103; ГОСТ 803; ГОСТ 1435; ГОСТ 1577; ГОСТ 4405; ГОСТ 5950; ГОСТ 6765; ГОСТ 11269; ГОСТ 19265	Форма і розміри перерізу, марка сталі; маса 1 м кількість метрів у тонні. Класи якості поверхні. Умови постачання сталей після деформації та термо-деформацій-ної обробки	
	Блюми та заготовка з легованих і нелегованих сталей (загального призначення, конструційніх тощо)	Прокат гарячекатаний (вироби): сортовий калібрований; зі спеціальними властивостями; для терпугів, рашпілів, зубіл; електротехнічний; із спеціальним оздобленням; для будівельних	ДСТУ EN 1004; ДСТУ EN 10025-1; ДСТУ 2957; ДСТУ 3684; ДСТУ 7807; ДСТУ 7809; ДСТУ 8539; ДСТУ 8608; ДСТУ 8609;	ISO 7129; EN 10025-1; EN 10048; ГОСТ 535; ГОСТ 1050; ГОСТ 1051; ГОСТ 1414; ГОСТ 2879; ГОСТ 4543; ГОСТ 5210; ГОСТ 5949;		

1	2	3	4	5	6	7
		конструкцій, холодного видавлювання та висаджування, різання тощо). Технічні умови, сортамент.	СОУ МПП 77.140-093:2005	ГОСТ 7417; ГОСТ 8560; ГОСТ 10702; ГОСТ 11036; ГОСТ 14955; ГОСТ 14959; ГОСТ 18968; ГОСТ 27772		
	Сталева гарячекатана сортова заготовка	Прокат фасонний, круглий, квадратний, шестигранний, гарячекатаний в прутках, штабах та бунтах для стержнів млинів; заготовка для куль, що мелють, тощо). Загальні технічні умови	ДСТУ ISO 1035-1…4; ДСТУ EN 10058…10061; ДСТУ EN 10277-1; ДСТУ EN 10278 ДСТУ 4484; ДСТУ 4746…4738; ТУ 14-2-1230-99; ТУ 27.1-05393056-268:2010; ТУ 27.1-05393056-269:2010	ISO 1035-1…4; EN 10058…10061; EN 10277-1; EN 10278 ГОСТ 535; ГОСТ 2590; ГОСТ 2591; ГОСТ 5950; ГОСТ 8559; ГОСТ 7417; ГОСТ 14955; DIN 178; DIN 671/H9; DIN1013; DIN1014; DIN 7527; ISO 657; EN 10210-1; EN 14195;	Діаметр, маса 1м, (граничні відхилення маси), кількість метрів у тонні; розміри, допуски	

1	2	3	4	5	6	7
		Профілі спеціальні (для хімічного та нафтового машинобудування, тракторобудування, суднобудування, вагонобудування, для ресор; шахтних стійок; для кріплення гірничих виробок; для ободів автомобільних коліс; для лемішів, скребків конвеєрів; для профілю боковини вугільного конвеєра; сільськогосподарського та будівельного призначення, гіпсокартонних систем тощо). Сортамент та технічні умови	ДСТУ ISO 657-18; ДСТУ EN 10210-1; ДСТУ EN 14195; ДСТУ Б EN 14195; ДСТУ 3664; ДСТУ 7550; ДСТУ 7556…7563; ДСТУ 8391; ДСТУ 8770; ДСТУ 8810; ТУ У 14-2-1240-2000; ТУ У 27.1-26524137-1341:2005; ТУ У 27.1-00190319-1267-2001; ТУ У 27.1-00190319-1279-2002; ТУ У 27.1-05393056-261:2007	ГОСТ 5267.0, 6…13; ГОСТ 5422; ГОСТ 5521; ГОСТ 5757; ГОСТ 7419; ГОСТ 7511; ГОСТ 14635; ГОСТ 18662; ГОСТ 18968; ГОСТ 30565	Форма і розміри поперечного перерізу, маса 1 м (граничні відхилення розмірів та маси), мірна довжина при розкрою-ванні, кількість метрів у тонні, кривизна по довжині	
		Катанка (дріт) з вуглецевої сталі	ДСТУ ISO 16124;	ISO 8457-1; ISO 16120-1, 4;	Діаметр, допуски на	

1	2	3	4	5	6	7
		(нелегованої, звичайної якості, спеціального призначення, для волочіння, протягування; канатна, з підшипникової сталі, в бунтах для перероблення на дріт та підкат, для огородження та виготовлення дротяних виробів тощо). Загальні вимоги.	ДСТУ EN 10087; ДСТУ EN 10218-2; ДСТУ EN 10263-1…4; ДСТУ EN ISO 16120-1, 4; ДСТУ 2770; ДСТУ 2959; ДСТУ 3683; ДСТУ EN 10016-1, 2	ISO 16124; EN 10016-1, 2; EN 10087; EN 10218; EN 10263-1…4; EN ISO 16120-1,4; ГОСТ 30136; ГОСТ 30267; ГОСТ 30958	діаметр, теоретична маса 1 м; кількість метрів у тонні	Прокатка на дрібно-сортному або дротовому стані
	Сталева заготовка	Профілі двотаврові та швелери; шпунтові профілі типу «Ларсен»; профілі зетові та кутикові, штабобульба загального призначення. Сортамент та технічні умови	ДСТУ 2251; ДСТУ 3436; ДСТУ 7549; ДСТУ 7551…7555; ДСТУ ISO 657.1, 2, 5, 11, 15, 16, 19, 21; ДСТУ EN 10024; ДСТУ EN 10034; ДСТУ EN 10055; ДСТУ EN 10056-1, 2 ДСТУ EN 10067;	ISO 657-1, 2, 5, 11, 15, 16, 19, 21; EN 10024; EN 10025-1, 2; EN 10034; ISO 657.1, 2, 5, 11, 15, 16, 19, 21; EN 10024; EN 10034; EN 10055; EN 10056-1, 2 EN 10067; EN 10248-1,2; EN 10249-1, 2; EN 10279; ГОСТ 4781; ГОСТ 5157;	Сортамент; розміри перерізу профіля, (граничні відхилення розмірів), маса 1 м та відхилення маси, мірна довжина розкрою	Прокатка на рейкобалковому або універсальному стані

1	2	3	4	5	6	7
			ДСТУ EN 10248-1, 2; ДСТУ EN 10249-1, 2; ДСТУ EN 10279; ДСТУ 8768; ДСТУ 8769; ДСТУ 8806; ДСТУ 8807; ДСТУ Б В.2.6-73; ТУ У 14-2-1185-97)	ГОСТ 5267. 1…5; ГОСТ 8239; ГОСТ 8240; ГОСТ 8278; ГОСТ 8281; ГОСТ 8509; ГОСТ 8510; ГОСТ 19425; ГОСТ 21026; ГОСТ 23121; ГОСТ 26020 ASTM A6/A6M; DIN 1028;; JIS A 5523; JIS A 5528		
	Заготовка зі спеціальної сталі	Рейки різного призначення (залізничні, кранові, трамвайні, рудничні тощо)	ДСТУ 2484; ДСТУ 3611; ДСТУ 3799; ТУ 14-2-1194-97 ТУ У 27.1-05393056-257-2004; ТУУ27.1-05393056-265:2009	ГОСТ 4121; ГОСТ 7173; ГОСТ 7174; ГОСТ 8161; ГОСТ 9797; ГОСТ 9798; ГОСТ 9960; ГОСТ 17507; ГОСТ 17508; ГОСТ 18232; ГОСТ 19240; ГОСТ 24182; ГОСТ 26110; ГОСТ 26168	Форма та розміри поперечного перерізу, допуски; склад сталі, механічні властивості, маса 1 м	

1	2	3	4	5	6	7
	Заготовка з вуглецевої сталі після формування на пресах	Бандажі трамвайні, локомотивні тощо, колеса катані	ДСТУ 3678; ДСТУ 3717	ГОСТ 398; ГОСТ 3225; ГОСТ 5000; ГОСТ 5257; ГОСТ 9036; ГОСТ 10791; BS 5892, ч.4; UIC 810-1,2; TGLG-02-99	Марка сталі, форма, розміри, вид обробки, властивості	Об’ємна штамповка, поперечна прокатка на колесо-бандажних прокатних станах
	Заготовка з конструкційних легованих та нелегованих сталей	Прокат для холодного видавлювання та висаджування	ДСТУ 3684	ГОСТ 10702	Марка сталі, ширина, товщина, властивості	Сортова прокатка
	Блюми та заготовка зі сталі вуглецевої, низьколегованої та легованої	Трубна катана заготовка	ДСТУ 3666; ГСТУ 3-009-2000		Марки сталі, діаметр, допуски на діаметр	Прокатка на сортопрокат-ному або трубо-заготівельному стані
	Заготовка сталева гарячекатана заготовка, сталь вуглецева та низьколегована	Прокат (сталь) в прутках, мотках для армування залізобетонних конструкцій, у тому числі – гладкий та періодичного профілю, для попередньо	ДСТУ ISO 6934-1…3; ДСТУ ISO 6935-1; ДСТУ EN 10080; ДСТУ ASTM A615/A615M ДСТУ 3760	ISO 6934-1…3; ISO 6935-1; EN 10080; ASTM A615/A615M ГОСТ 5781; ГОСТ 10884	Номінальний діаметр, параметри профілю, кількість метрів у тонні, маса 1 погонного метра та її	Прокатка на сортопрокат-ному або дротовому стані

1	2	3	4	5	6	7
		напруженого бетону тощо. Технічні вимоги			допустимі відхилення; Механічні властивості, хімічний склад сталі	
	Заготовка сталева зі сталей різних марок	Профілі періодичної подовжньої прокатки різного призначення (зокрема, для осей автомобілей)	ТУ У ДП 14-2-1248-2000	ГОСТ 8319	Форма, розміри поперечного перерізу, допуски, маса 1 м, кількість метрів у тонні, марка сталі	Прокатка на сортопрокатному стані
		Профілі періодичні поперечно-гвинтової прокатки		ГОСТ 8320.0		Прокатка на стані поперечно-гвинтової прокатки
	Кругла катана сталева заготовка	Шари (кулі) сталеві прокатані, штамповані (для кульових млинів)	ДСТУ 3499	ГОСТ 7524	Діаметр, граничні відхилення по діаметру, розрахунковий об’єм, номінальна маса виробу, кількість виробів у	Прокатка на кулепрокатному стані

1	2	3	4	5	6	7
					тонні, твердість	
	Блюми та заготовка з різних сталей; матеріал покриття	Фасонні вироби (з тепловою ізоляцією з пінополіуретану та захисною оболонкою); двошарові стрічкові для лемішів; для ножів землерийних машин; для лопаток парових турбін тощо	ДСТУ 4484	ГОСТ 535; ГОСТ 15891; ГОСТ 17152; ГОСТ 19422; ГОСТ 30732	Форма, розміри поперечного перерізу, марка сталі	Прокатка на сортопрокатному стані, оздоблення, нанесення покриття
8 Прокат листовий гарячекатаний	-	Прокат листовий гарячекатаний. Сортамент	ДСТУ 2834; ДСТУ 8540	ГОСТ 4041; ГОСТ 16523; ГОСТ 19903	Сортамент	Нормування
	Сляби зі сталей різного складу та призначення	Прокат товстолистовий різного призначення (загального призначення, конструкційний, для атомних енергетичних установок, мостів, суднобудівництва, котлів і посудин, що працюють під тиском, для холодного штампування; корозійностійкий та жароміцний; з легованих та нелегованих сталей;	ДСТУ ISO 3573; ДСТУ ISO 4995; ДСТУ ISO 13976; ДСТУ EN 10028-1; ДСТУ EN 10029; ДСТУ EN 10051; ДСТУ EN 10111; ДСТУ EN 10139; ДСТУ EN 10163-3;	ISO 3573; ISO 4995; ISO 13976; EN 10028-1; EN 10029; EN 10051; EN 10111; EN 10139; EN 10163-3; ГОСТ ЕН 10028-4; ГОСТ 82; ГОСТ 1577; ГОСТ 4041; ГОСТ 5520; ГОСТ 5521;		

1	2	3	4	5	6	7
		підвищеної міцності. Технічні умови	ДСТУ 3360; ДСТУ 8803; ДСТУ 8804; ДСТУ 8817	ГОСТ 6713; ГОСТ 7350; ГОСТ 11268 ГОСТ 11269; ГОСТ 14637; ГОСТ 16523		
	Сталева заготовка	Лист, широкі плоскі вироби, прутки, сортовий і фасонний прокат з конструкційної сталі (в частині листа та плоских виробів). Технічні умови	ДСТУ ISO 630; ДСТУ EN 10163-1, 2; ДСТУ 8541	ISO 630; EN 10163-1, 2		
	Сляби, сталь гарячекатана різних марок	Листи та штаби сталеві (підвищеної міцності, для зварних газових балонів тощо). Технічні вимоги постачання та якість поверхні	ДСТУ EN 10120; ДСТУ 8969	EN 10120		
	Сляби та листовий підкат зі сталі підвищеної якості	Лист і штаба з електротехнічної сталі текстуровані у стані повного оброблення. Технічні умови постачання	ДСТУ EN 10107	EN 10107		
	Сталеві листові заготовки	Сталь багатошарова листова (зокрема, широкополосна та універсальна)		ГОСТ 6765; ГОСТ 10885		

1	2	3	4	5	6	7
	Сталева листова заготовка	Листи з ромбічним та сочевицеподібним рифленням. Технічні умови	ДСТУ 8783	ГОСТ 8568		
9 Прокат листовий холоднодефор-мований	-	Прокат листовий холоднокатаний. Сортамент		ГОСТ 19904	Сортамент	Нормування
	Гарячекатаний лист з конструкційної високоякісної та корозійностійкої сталі	Прокат тонколистовий холоднокатаний загального та спеціального призначення, в тому числі – торговельної якості, електротехнічний, з високою границею плинності для холодного штампування та ін.). Технічні умови.	ДСТУ ISO 3574; ДСТУ ISO 4997; ДСТУ EN 10130; ДСТУ EN 10131; ДСТУ EN 10268; ДСТУ 2834; ДСТУ 8971	ISO 3574; ISO 4997; EN 10130; EN 10131; EN 10268; ГОСТ 1577; ГОСТ 3836; ГОСТ 5582; ГОСТ 7350; ГОСТ 9045; ГОСТ 11268; ГОСТ 11269; ГОСТ 16523; ГОСТ 17066; ГОСТ 21427	Товщина, марки сталі, розміри розкрою, форма, механічні властивості, (корозійна стійкість), структура, якість поверхні	Прокатка на листопрокатних станах, термічна обробка, оздоблення
	Гарячекатана стрічка з інструментальної, пружинної, конструкційної, корозійностійкої сталі та сталі звичайної якості	Стрічка холоднокатана різного призначення; чорна бляха (жерсть) для виготовлення білої бляхи	ДСТУ ISO 11951	ISO 11951; ГОСТ 503; ГОСТ 2283; ГОСТ 2284; ГОСТ 3559; ГОСТ 3560; ГОСТ 4986; ГОСТ 5497;		

1	2	3	4	5	6	7
				ГОСТ 8851; ГОСТ 15146; ГОСТ 19851; ГОСТ 21996; ГОСТ 23522		
	Сталева гарячекатана штаба	Штаба сталева вузька холоднокатана для термооброблення. Технічні умови постачання. Загальні вимоги	ДСТУ EN 10132-1, 3, 4; 40 ДСТУ EN 10139 ДСТУ EN 101	EN 10132-1, 3, 4; EN 10139; EN 10140	Товщина, допуски, вид сталей та термічної обробки	
	Гарячекатаний лист з низьковуглецевої сталі	Прокат листовий зі сталі підвищеної міцності, для холодного штампування, зокрема, посуду тощо	ДСТУ 7808; ДСТУ 8969	ГОСТ 4041; ГОСТ 9045; ГОСТ 24244	Товщина, ширина, допуски, марки сталі, якість поверхні	
	Листовий підкат, матеріал покриття	Сталь листова та рулонна і жерсть (бляха) з покривом різного призначення та способом нанесення (плакіруванням, електролітичним цинковим, цинко-нікелевим, свинцево-олов'яним, хромовим, лаковим, склоподібним – методом гарячого	ДСТУ ISO 4998…5002; ДСТУ ISO 11949; ДСТУ ISO 11950; ДСТУ EN 10131; ДСТУ EN 10143; ДСТУ EN 10202;	ISO 4998…5002; ISO 11949; ISO 11950; EN 10131; EN 10143; EN 10202; EN 10346; ГОСТ 803; ГОСТ 3559; ГОСТ 3836; ГОСТ 13345; ГОСТ 14918; ГОСТ 30246	Товщина, марки сталі, маса та товщина шару покриття, розміри розкрою, якість поверхні	Прокатка на листопрокатних станах, оздоблення прокату, нанесення покриття

1	2	3	4	5	6	7
		занурювання тощо). Технічні умови	ДСТУ EN 10346; ДСТУ 4480; ДСТУ 4481; ДСТУ Б В.2.7-58			
Вироби з листового прокату після додаткового механічного обробляння	Гарячекатаний та холоднокатаний сталевий лист	Профілі сталеві гнуті різної форми (швелери, кутові, коритні, С-подібні; зетові рівно- і нерівнополичні; замкнуті зварні квадратні та прямокутні; з гофрами тощо) та призначення (для вагонобудування, віконних і ліхтарних палітурок і віконних панелей промислових будівель, штукатурних робіт тощо). Сортамент та технічні умови	ДСТУ EN 10219; ДСТУ EN 13658-1, 2; ДСТУ 2251…2255; ДСТУ 3436; ДСТУ 8769; ДСТУ 8806 ДСТУ 8808; ДСТУ 8854; ДСТУ 8897; ДСТУ 8898; ДСТУ Б В.6-8; ДСТУ Б В.2.6-8; ДСТУ Б В.2.6-9	EN 10219; EN 13658-1, 2; ГОСТ 7281; ГОСТ 7511; ГОСТ 8278; ГОСТ 8281…8283; ГОСТ 9234; ГОСТ 10551; ГОСТ 11474; ГОСТ 13229; ГОСТ 14635; ГОСТ 19771; ГОСТ 19772; ГОСТ 24045; ГОСТ 25577; ГОСТ 30245	Вид профілю, розміри та допуски поперечного перерізу; маса 1 м довжини, маса 1 м^2, розміри розкрою, вид покриття заготовки	Профілювання зі згинанням
	Гарячекатаний та холоднокатаний сталевий лист	Листи та смуги металеві самонесучі для покрівлі, зовнішнього обшиття і внутрішнього облицювання. Технічні умови на продукцію та вимоги	ДСТУ Б EN 14782; ДСТУ Б EN 14783	EN 14782; EN 14783	Розміри та допуски поперечного перерізу; маса 1 м^2, розміри розкрою, вид покриття заготовки	Профілювання

1	2	3	4	5	6	7
	Гарячекатаний та холоднокатаний сталевий лист	Лист просічно-витяжний	ТУ У 27.1-25484714-001-2002		Розміри гратки, граничне навантажен-ня	Штамповка, розтягнення
	Холоднокатаний сталевий лист у рулонах	Стрічка різана з холоднокатаного прокату. Технічні умови	ДСТУ 8970	ГОСТ 19851	Матеріал, товщина та ширина стрічки, якість кромок та поверхні	Різання дисковими ножицями
10 Труби безшовні гарячедеформо-вані	Сталева трубна заготовка з різних сталей	Труби безшовні гарячедеформовані різного призначення (загального, для механічної обробки, велопромисловості, мастилопроводів та паливопроводів, підшипникові тощо) Технічні умови.	ДСТУ EN 10210-1, 2; ДСТУ EN; 10216; ДСТУ EN 10220; ДСТУ 3667	ISO 2938; EN 10210-1, 2; EN 10216-2; EN 10220; ГОСТ 800; ГОСТ 8731; ГОСТ 8732; ГОСТ 9940; ГОСТ 11017; ГОСТ 12132; ГОСТ 19277; ГОСТ 23270; ГОСТ 30564; ГОСТ 3262; DIN 17121/2448; DIN 1629/2448; DIN 1629; DIN 1630/2448; DIN 2391;	Діаметр, товщина, допуски стінки, марки сталі, механічні властивості, структура, маса 1м, кількість метрів у тонні	Прошивка, пресування, прокатка на трубопрокатних станах

1	2	3	4	5	6	7
				DIN 2393-2; DIN 2394-2; DIN 2462; API Spec. 5L; API 5CT; ASTM A53; ASTM A106; ASTM A120; ASTM A179M; ASTM A213; ASTM A312; ASTM A512; ANSI B36.10; B.S. 3601; NF A 49-210; NF A 49-310; UNI 663; JIS G 3454		
	Труба-заготовка	Труби сталеві прецизійні		ГОСТ 9567; DIN 2391; ASTM A213; ASTM A312		
	Трубна заготовка з вуглецевих та легованих сталей	Труби зі спеціальними властивостями (високого тиску, для енергомашинобудування, нафтопереробної та нафтохімічної промисловості;	ДСТУ ISO 65; ДСТУ ISO 3183; ДСТУ ISO 11960; ДСТУ EN 10216-2; ДСТУ 3667	ISO 65; ISO 3183:1996; ISO 9329-4; ISO 11960:2004; EN 10216-2; ГОСТ 550; ГОСТ 631…633;		

1	2	3	4	5	6	7
		обсадні; для суднобудівництва; бурильні ніпельного з'єднання для геолого-розвідувальних робіт; з корозійностійкої сталі; обсадні насосно-компресорні; для нафтопроводів, придатні для нарізування нарізей). Технічні умови		ГОСТ 5654; ГОСТ 6238; ГОСТ 7909; ГОСТ 8467; ГОСТ 9940; ГОСТ 11017; ГОСТ 22786; ГОСТ 24030; ГОСТ 26250; ГОСТ 30564; ГОСТ 3262; DIN EN 10210-1; DIN 1629; DIN 1630; DIN 2462; DIN 17456; DIN 17458; ANSI B36.19; API Spec. 5D, 5CT, 5B, 7; ASTM A53; ASTM A106; ASTM A213; ASTM A312; ASTM A450		
	Трубна заготовка з вуглецевої сталі, матеріал покриття	Труби з покриттям зовнішньої та/або внутрішньої поверхні (тепловою ізоляцією з пінополіуретану та	ТУ У 23371749-004-96	ГОСТ 30732	Діаметр, товщина стінки, матеріал та товщина	(Прокатка на трубопрокатних агрегатах або пресування), нанесення покриття

1	2	3	4	5	6	7
		захисною оболонкою; емальовані			покриття, допуски	
	Сталеві труби круглого перерізу	Труби профільні безшовні та електрозварені (квадратні, прямокутні, овальні, плоскоовальні тощо) у частині безшовних труб	ДСТУ ISO 4200; ДСТУ 8943	ISO 4200; ГОСТ 8638; ГОСТ 8639; ГОСТ 8642; ГОСТ 8644; ГОСТ 8645; ГОСТ 8646; ГОСТ 13662; ГОСТ 13663; DIN EN 102-1; DIN 2395; DIN 2906; ASTM A36; ASTM A500; ASTM A501;ASTM A512	Форма та розміри заготовки і труб, допуски, матеріал, механічні властивості; маса 1 м	Прошивка, пресування, прокатка та профілювання на трубопрокатних станах; формовка та зварювання на трубо-електрозварю-вальних станах, оздоблення
11 Труби холоднодефор-мовані та теплодефор-мовані	Труби-заготовки гарячекатані з вуглецевих та легованих сталей	Труби безшовні різного призначення (загального; конструкційні, корозійностійкі, для будівництва, енергомашинобудуван-ня, опори освітлення, для буріння свердловин, з підвищеною якістю поверхні; підшипникові, для	ДСТУ ISO 4200; ДСТУ EN 40-5; ДСТУ EN 10216; ДСТУ EN 10220; ДСТУ 3666; ДСТУ 3667; ТУ 14-3-161-139-94; ТУ 14-3-161-153-95; ТУ 14-3-190-82;	ISO 4200; EN 40-5; EN 10220; EN 10216-2; ГОСТ 529; ГОСТ 550; ГОСТ 800; ГОСТ 1060; ГОСТ 2936; ГОСТ 8733; ГОСТ 8734; ГОСТ 9940; ГОСТ 9941;	Діаметр, товщина стінки, марки сталі, механічні властивості, структура металу, маса 1м, кількість метрів у тоні, допуски на них; якість поверхні	Прокатка на станах холодної та теплої прокатки (ХПТ, ХПТР), пресування, волочіння

1	2	3	4	5	6	7
		трубопроводів; зі спеціальними властивостями; для суднобудування, мотовелопромисло-вості; маслопроводів і паливопроводів; високого тиску тощо)	ТУ 14-3-251-74; ТУ 14-3-460-75; ТУ 14-3-554-76; ТУ 14-3-653-78; ТУ 14-3-690-78; ТУ 14-3-754-78;ТУ 14-3-1043-81; ТУ 14-3-1354-85; ТУ 14-3-1823-91; ТУ 14-3-1900-93; ТУ 14-3-1922-94	ГОСТ 10498; ГОСТ 11017; ГОСТ 12132; ГОСТ 19277; ГОСТ 21729; ГОСТ 22786;ГОСТ 24030; ГОСТ 30563; ГОСТ 30564; DIN 1629/2448; DIN 1630/2448; DIN 2391; DIN 2462; DIN EN 10210-1; E DIN EN 10216-2; DIN 17121/2448; DIN 17456; DIN 17458; DIN 17459; ASTM A179M ASTM A213; ASTM A312; ASTM A511; ANSI B.36.19; ASTM A213; ASTM A179; ASTM A268; ASTM A269;		

1	2	3	4	5	6	7
				ASTM A271; ASTM A312; ASTM A335; ASTM A376; ASTM A789; ASTM A790; B.S. 6323; NF A49-117; NF A311;NF A321; UNI 6363; JIS G 3455		
	Труба-заготовка з вуглецевої сталі	Труби для роботи під тиском з нормованими властивостями	ДСТУ EN 10216; ТУ 14-3-251-74	EN 10216-2; ГОСТ 11017; DIN 2391; ASTM A179M		
	Труби гарячекатані та холоднодеформо-вані з різних сталей	Труби холоднодеформовані прецизійні та особливо тонкостінні (для гідравлічних та пневматичних енергосистем тощо). Технічні умови постачання	ДСТУ EN 10305-4, 6; ТУ 14-3-966-80	EN 10305-4, 6 ГОСТ 10498; ASTM A632; NF A 49-217		Прокатка на станах ХПТ та ХПТР; волочіння
	Труби-заготовки з різних матеріалів	Труби сталеві прецизійні, в тому числі спеціального призначення (калібровані по	ДСТУ EN 10305-1; ТУ 14-3-419-75; ТУ 14-3-560-76; ТУ 14-3-630-77;	EN 10305-1; ГОСТ 9567; ГОСТ 12132; DIN 2391-1; DIN 2393-2;	Діаметр, товщина стінки, механічні властивості,	

1	2	3	4	5	6	7
		внутрішньому діаметру; для корпусів занурених електродвигунів та електронасосів, закріплення гідравлічних шахтних стояків, для мотовелопромисло-вості тощо)	ТУ 14-3-690-78; ТУ 14-3-1941-94; ТУ 14-3-1447-86; ТУ 14-8-1-97	DIN 2394-2; ASTM A213; ASTM A312; ASTM A512	допуски на них, кривизна	
		Труби безшовні біметалеві різного призначення	ТУ 14-3-702-78	ГОСТ 10192; ГОСТ 22786	Діаметр, товщина стінки, товщина шарів, допуски на них, кривизна, механічні властивості	Холодна прокатка, волочіння
	Труби холоднодеформовані з вуглецевих та легованих сталей	Трубки малих розмірів (капілярні)		ГОСТ 14162; ASTM A632; NF A 49-217		Холодна прокатка з наступним волочінням
	Сталеві труби круглого перерізу	Труби профільні безшовні та електрозварені (квадратні, прямокутні, овальні, плоскоовальні, зіркоподібні, спеціаль-них профілів тощо) різного призначення. Технічні вимоги	ДСТУ ISO 4200; ДСТУ 8943 ТУ 14-3-232-74; ТУ 14-3-326-74; ТУ 14-3-553-76; ТУ 14-3-592-77; ТУ 14-3-1281-84; ТУ 14-3-1442-86;	ISO 4200; ГОСТ 2936; ГОСТ 6856; ГОСТ 8638; ГОСТ 8639; ГОСТ 8642; ГОСТ 8644 … 8646; ГОСТ 13662; ГОСТ 13663; DIN EN 102-1;	Форма і характерні розміри перерізу, товщина стінки, маса 1м, кількість метрів у тоні, розміри розкрою, марки сталі	Деформування та зварювання на трубо-електрозварю-вальному агрегаті; профілювання прокаткою або волочінням

1	2	3	4	5	6	7
			ТУ 14-3-1819-91; ТУ 14-3-1894-93	DIN 2395; DIN 2906; ASTM A36; ASTM A500; ASTM A501; ASTM A512		
12 Труби зварені та паяні	Лист та стрічка з різних сталей	Труби зварені одно- та двошовні, прямошовні та спіралешовні різного призначення (у тому числі холоднодеформовані, для магістральних трубопроводів, водогазопровідні, конструкційні тощо) з різних сталей у частині зварених та паяних труб	ДСТУ ISO 4200; ДСТУ EN 10219-1, 2; ДСТУ EN 10220; ДСТУ EN 10305-2; ДСТУ 8943; ТУ 14-3-412-75; ТУ 14-3-492-76	ISO R65; ISO 4200; ISO 9330-2; EN 10219-1, 2; EN 10220 EN 10305-2; ГОСТ 3262; ГОСТ 5005; ГОСТ 8638; ГОСТ 8639; ГОСТ 8642; ГОСТ 8644; ГОСТ 8645; ГОСТ 8646; ГОСТ 8696; ГОСТ 10704…10707; ГОСТ 11068; ГОСТ 13662; ГОСТ 13663; ГОСТ 20295; DIN EN 102-1; DIN 2393-2; DIN 2395; DIN 2440;	Діаметр, товщина стінки, допуски, марки сталі, класи міцності	Деформування та зварювання на трубо-електрозварю-вальному агрегаті (пайка), наступна деформаційна обробка на станах ХПТ, ХПТР та/або волочіння (за потреби)

1	2	3	4	5	6	7
				DIN 2441; DIN 2458/1615; DIN 2906; E DIN EN 10217-2; DIN 17455; ASTM A36; ASTM A53; ASTM A312; ASTM A500; ASTM A501; ASTM A512 ASTM A554; API Spec.5L; NF A49-112; BS 1387; UNI 3829; UNI 4148; UNI 4149 NF A49-168; ГОСТ 11068		
		Труби звернуті паяні двошарові		ГОСТ 11249		
13 Дріт та прутки волочені	-	Сортамент	-	DIN1013 (частково скасований); DIN 7527 (частково скасований); ГОСТ 2333; ГОСТ 2771;	Діаметр, допуски, матеріали, механічні властивості, маса 1 м, кількість метрів у	Нормування

1	2	3	4	5	6	7
				ГОСТ 7417; ГОСТ 8559; ГОСТ 8560; ГОСТ 14955	тонні, форма поставки	Нормування
	-	Зварювальні матеріали. Дроти та стрічки електродні, дроти та прутки для дугового зварювання нержавких, жароміцних, високоміцних сталей у захисних газах або без них. Класифікація	ДСТУ EN ISO 14343; ДСТУ EN ISO 16834; ДСТУ EN ISO 21952	ISO 14343; ISO 16834; ISO 21952; EN ISO 14343; EN ISO 16834; EN ISO 21952		
	Катанка та дріт з різних сталей	Дріт сталевий загального та іншого призначення (конструкційний, нержавіючий, канатний; поліграфічний; пружинний; для холодного висаджування, підшипниковий, струнний, спіцевий, кардний, для металокорду; для заклепок і розпірок сепараторів підшипників для засобів обчислювальної	ДСТУ 3683; ДСТУ EN 10218-1, 2; ДСТУ ISO 2232; ДСТУ ISO 2701; ДСТУ ISO 4101; ДСТУ ISO 4782; ДСТУ ISO 6984; ДСТУ ISO 7900; ДСТУ ISO 8458-1…3; ДСТУ ISO 9975; ДСТУ ISO 16143-3; ДСТУ ISO 16124:	EN 10218-1, 2; ISO 2232; ISO 2701; ISO 4101; ISO 4782; ISO 6984; ISO 7900; ISO 8458-1…3; ISO 9975; ISO 16124: ISO 16143-3; ГОСТ 792; ГОСТ 839; ГОСТ 1071; ГОСТ 3110; ГОСТ 3282; ГОСТ 3282; ГОСТ 3875;	Діаметр, допуски, матеріал, механічні властивості, маса 1 м, кількість метрів у тонні, форма поставки	Волочіння

1	2	3	4	5	6	7
		техніки; для виготовлення дротяних виробів тощо)		ГОСТ 4605; ГОСТ 4727; ГОСТ 5437; ГОСТ 5468; ГОСТ 5663; ГОСТ 7372; ГОСТ 7480; ГОСТ 9161;ГОСТ 9389; ГОСТ 11850; ГОСТ 14311; ГОСТ 14963; ГОСТ 15598; ГОСТ 16135; ГОСТ 17305; ГОСТ 18143; ГОСТ 18834; ГОСТ 27265; ГОСТ 2912		
	Гарячекатаний сортовий прокат, катанка, попередньо тягнута заготовка з різних сталей	Прутки та стрічка різні (нагартовані, термічно оброблені, шліфовані, калібровані, з вуглецевої та легованої та/або корозійностійкої, інструментальної сталі)	ДСТУ ISO 630 ДСТУ ISO 6935-1; ДСТУ EN 10058…10060; ДСТУ EN 10272; ДСТУ EN 10273; ДСТУ EN 10277; ДСТУ 3833;	ISO 630; ISO 6935-1; EN 10058… 10060; EN 10272; EN 10273; EN 10277; ГОСТ 1435; ГОСТ 5950; ГОСТ 7417; ГОСТ 18907; ГОСТ 19265		Волочіння, пресування, прокатка

1	2	3	4	5	6	7
			ДСТУ 3953			
	Катанка та дріт з конструкційної сталі	Сталь чистотягнута для шпонок. Сортамент	–	ГОСТ 8786; ГОСТ 8787		Волочіння, пресування
	Катанка з прецизійних сплавів	Дріт з прецизійних сплавів з високим електричним опором, магнітом'яких, із заданими фізичними властивостями тощо		ГОСТ 10160 ГОСТ 12766-1; ГОСТ 14081; ГОСТ 14118; ГОСТ 18143	Діаметр, допуски, хімічний склад, фізичні властивості (коефіцієнт розширення, пружність, електропровідність тощо), маса 1 м, кількість метрів у тоні	
	Катанка з вуглецевих сталей, дріт переробний	Дріт з вуглецевої сталі для армування залізобетонних конструкцій (зокрема, класу Вр-1), рукавів, шин (бортовий) тощо	ДСТУ ISO 16650; ДСТУ ISO 23717; ДСТУ EN 10080; ДСТУ ISO 6934-1…3; ДСТУ ISO 6935-1; ДСТУ ASTM A615/A615M:2; ДСТУ 3760;	ISO 6934-1…3; ISO 6934-3; ISO 6935-1; ISO 16650; ISO 23717; EN 10080; ASTM A615/A615M:2 ГОСТ 5781; ГОСТ 6727; ГОСТ 7348; ГОСТ 10884	Форма, діаметр номінальний, глибина рифлень (при наявності), допуски, матеріал, механічні властивості, маса 1 м, кількість	

1	2	3	4	5	6	7
			ДСТУ Б В.2.6-167:2011		метрів у тонні	
	Катанка сталева та дріт холод-нотягнутий	Дріт для зварювання	ДСТУ EN ISO 14341; ДСТУ EN ISO 18275	EN ISO 14341; EN ISO 18275; ГОСТ 2246	Діаметр, допуски, хімічний склад, механічні властивості, маса 1 м, кількість метрів у тоні	
		Дріт наплавний у мотках	ДСТУ 3671	ГОСТ 7372; ГОСТ 10543; ГОСТ 26101		
14 Продукція метизного виробництва	Катанка сталева та дріт холоднотягнутий	Дріт сталевий та дротяні вироби. Загальні вимоги. Розміри та допуски	ДСТУ EN 10218-2	EN 10218-2	Розміри та допуски	Волочіння та наступна спеціальна обробка
		Канати сталеві різних конструкцій та призначення. Загальні вимоги, використання, догляд та випробування.	ДСТУ ISO 2408; ДСТУ EN 12385-1, 3…6, 8…10	ISO 2408; EN 12385-1, 3…6, 8…10; ГОСТ 2172; ГОСТ 2688; ГОСТ 3067; ГОСТ 3068; ГОСТ 3070; ГОСТ 3071; ГОСТ 3090; ГОСТ 3241; ГОСТ 7675; ГОСТ 7676; ГОСТ 10505; ГОСТ 10506; ГОСТ 13840;	Марка сталі, хімічний склад, механічні властивості, конструкція, розміри, допуски; характерис-тики покриття (при наявності)	Волочіння та наступне плетіння на канатних машинах, нанесення покриття (за потреби); оздоблення

1	2	3	4	5	6	7
				ГОСТ 16853; ГОСТ 18899; ГОСТ 18901		
	Дріт холоднотягнутий, матеріали покриття	Сталевий колючий дріт без покриття та покритий цинком або цинковим сплавом	ДСТУ EN 10223-1	EN 10223-1; ГОСТ 285	Конструкція, розміри, заготовка, маса 1 м;) характеристики покриття (при наявності	Формування на спеціальних машинах, нанесення покриття (за потреби)
	Сталевий дріт, матеріал покриття	Дріт з покриттям різного призначення (оцинкований, сталемідний, сталеалюмінієвий, луджений, латуньований, з полівінілхлоридною ізоляцією, для ліній електричних передач тощо)	ДСТУ ISO 7900; ДСТУ EN 10244-1,2; ДСТУ EN 10244-2	ISO 7900; EN 10244-1,2 ГОСТ 839; ГОСТ 1526; ГОСТ 1668; ГОСТ 3822; ГОСТ 3920; ГОСТ 4775; ГОСТ 6323; ГОСТ 9124; ГОСТ 9850; ГОСТ 15892; ГОСТ 26366	Діаметр, допуски, хімічний склад, механічні властивості, маса 1 м, кількість метрів у тоні, матеріал та характеристики покриття	Волочіння, нанесення покриття, оздоблення
	Сталевий дріт сердечника та матеріал плакірування стрічковий або порошковий	Дріт біметалевий сталемідний. Технічні умови		ГОСТ 3822	Вид продукції, матеріали основи та покриття, форма та розміри	З’єднання поверхневого шару з основою виробу (обтисненням, накаткою), волочіння на

1	2	3	4	5	6	7
					перерізу, допуски	кінцевий розмір перерізу (калібрування)
	Металева стрічка або катанка та порошки наплавочних матеріалів	Дріт порошковий для дугового зварювання	ДСТУ 7217	ГОСТ 26271	Розміри сталевої стрічки та дроту, характеристики наповнювача (склад, дисперсність, тощо)	Формування профілю виробу для розміщення порошків гнуттям стрічки або подовжнім розрізанням катанки, заповнення профілю порошком, формовка закритого профілю, волочіння на кінцевий розмір
	Сталевий дріт	Сітки різної конструкції та призначення (зі зварними чарунками, плетена, ткана, «семянка», зі зчепленими ланками, квадратними чарунками; для внутрішніх та зовнішніх штукатурних	ДСТУ ISO 9044; ДСТУ EN 10223-4,5,6; ДСТУ EN 13658-1, 2; ДСТУ Б В.2.6-173:2011	ISO 9044; EN 10223-4,5,6; EN 13658-1, 2; ГОСТ 2715; ГОСТ 3187; ГОСТ 3193 ГОСТ 3306; ГОСТ 3339; ГОСТ 3584; ГОСТ 3826; ГОСТ 5336; ГОСТ 6613;	Конструкція, засіб виготовлен-ня, форма та розмір чарунок, кількість ниток дроту на 1 дм, матеріал та діаметр дроту, вид	Зварювання, плетіння або інші види з’єднання на спеціальному обладнанні, нанесення покриття (за потреби), оздоблення

1	2	3	4	5	6	7
		робіт тощо). Технічні умови		ГОСТ 8478; ГОСТ 9074; ГОСТ 13603; ГОСТ 23279	термічної обробки, характеристики покриття (при наявності)	
	Дріт сталевий	Болти різних модифікацій	ДСТУ ISO 4014…4016; ДСТУ ISO 4162; ДСТУ ISO 8992; ДСТУ ISO 15071; ДСТУ ISO 15072	ISO 4014… 4016; ISO 4162; ISO 8678; ISO 8765; ISO 8992; ISO 15071; ISO 15072 EN 1662; EN ISO 4014; EN ISO 4016; EN ISO 8765; EN 14219 EN 24015; BS 4933; BS EN 24015; BS EN 28765; DIN 603; DIN 604; DIN 608; DIN 931; DIN 933; DIN 960; DIN 6914; DIN EN 24014…	Форма, маса, розміри, допуски; механічні властивості, характеристики нарізі, характеристики покриття (при наявності)	Гаряча, тепла або холодна об’ємна штамповка на висаджу вальних станках-автоматах; термічна обробка. нанесення покриття (за потреби), оздоблення

1	2	3	4	5	6	7
				24016; DIN EN 28765; DIN ISO 8765; DS/ISO 4015; IST L 905; JIS B1180;NBN E 27-001; NBN EN 28765; NEN-ISO 4015; NEN-ISO 8765; NF E25-113; NF E25-152; NF E27-351; NF EN 24015; NF EN 28765; NBN EN 24015; NS-ISO 4015; NS-ISO 8765; OENORM EN 24015; OENORM EN 28765; SFS-EN 28765; SFS-ISO 4015; SS-EN 24015; SS-EN 28765; UNI 5738; UNI EN 24015; UNI EN 28765; UNI ISO 5738; ГОСТ 1759;		

1	2	3	4	5	6	7
				ГОСТ 7783; ГОСТ 7785… 7787; ГОСТ 7795; ГОСТ 7796; ГОСТ 7798; ГОСТ 7801; ГОСТ 7802; ГОСТ 7805; ГОСТ 7808; ГОСТ 7811; ГОСТ 7817; ГОСТ 8144; ГОСТ 11530; ГОСТ 11674; ГОСТ 15589… 15591; ГОСТ 17673; ГОСТ 18125; ГОСТ 18126		
	Пруток або дріт сталевий	Болти та костилі залізничні	ДСТУ ISO 8992	ISO 8992 ГОСТ 799; ГОСТ 24379.1	Форма, маса, матеріал, механічні властивості, розміри, допуски	Гаряча об’ємна штамповка на висаджувальних станках-автоматах, термічна обробка
		Гвинти різних модифікацій	ДСТУ ISO 1207; ДСТУ ISO 1479; ДСТУ ISO 1481…1483;	ISO 1207; ISO 1479; ISO 1481…1483; ISO 1580;	Форма, розміри, допуски, матеріал,	Гаряча, тепла або холодна об’ємна штамповка на

1	2	3	4	5	6	7
			ДСТУ ISO 1580; ДСТУ ISO 2009; ДСТУ ISO 2010; ДСТУ ISO 2342; ДСТУ ISO 2702; ДСТУ ISO 4017; ДСТУ ISO 4018; ДСТУ ISO 4029; ДСТУ ISO 4032…4034; ДСТУ ISO 4759-1; ДСТУ ISO 4762; ДСТУ ISO 7045…7051; ДСТУ ISO 7053; ДСТУ ISO 7721; ДСТУ ISO 8992; ДСТУ ISO 10509; ДСТУ ISO 10642; ДСТУ ISO 10666; ДСТУ ISO 15480…15483	ISO 2009; ISO 2010; ISO 2342; ISO 2702; ISO 3269; ISO 4017; ISO 4018; ISO 4026…4029; ISO 4032…4034; ISO 4759-1; ISO 4762; ISO 4766; ISO 7045…7051; ISO 7053; ISO 7380; ISO 7434…7436; ISO 7721; ISO 8992; ISO 10509; ISO 10510; ISO 10642; ISO 10666; ISO 15480… 15483; EN 24766; EN 27434… 27436; EN ISO 1207; EN ISO 1479;	механічні властивості, характеристики нарізі та покриття (при наявності)	висаджувальних станках-автоматах; термічна обробка, нанесення покриття (за потреби)

1	2	3	4	5	6	7
				EN ISO 1481… 1483; EN ISO 1580; EN ISO 4762; EN ISO 7045… 7051; EN ISO 7380; EN ISO 10642; EN ISO 10666; BS 4168; BS 4174; BS 4219; BS 7600; BS 7635; BS EN ISO 1207; BS EN ISO 1479; BS EN ISO 1481…1483; BS EN ISO 1580; BS EN ISO 4762; BS EN ISO 7045… 7051; BS EN ISO 7380; BS EN ISO 10642; BS EN 24766; BS EN 27434… 27436; DIN 84; DIN 417; DIN 438;		

1	2	3	4	5	6	7
				DIN 551; DIN 553; DIN 913… 916; DIN 965; DIN 7971…7973; DIN 7976; DIN 7981…7983; DIN ISO 1207; DIN ISO 1479; DIN ISO 1481… 1483; DIN ISO 7046; DIN ISO 7049… 7051; DIN EN ISO 1207; DIN EN ISO 1580; DIN EN ISO 4762; DIN EN ISO 7045…7048; DIN EN ISO 7380; DIN EN ISO 10642; DIN EN 24017; DIN EN 24018;		

1	2	3	4	5	6	7
				DIN EN 24766; DIN EN 27434…27436; DS/ISO 1481…1483; DS/ISO 2342; DS/ISO 4766; DS/ISO 7049; DS/ISO 7050; DS/ISO 7051;DS/ISO 7434... 7436; EQVDIN 84; NBN E 27-104… 27-106; NBN E 27-109; NBN E 27-110; NF E25-106; NF E25-119… 25-121; NF E25-125… 25-129; NF E25-149; NF E25-160… 25-163; NF E25-656… 25-658; NF E25-661; NF E25-662; NF EN ISO 1207;		

1	2	3	4	5	6	7
				NF EN ISO 1479; NF EN ISO 1481…1483; NF EN ISO 1580; NF EN ISO 4762; NF EN ISO 7045…7051; NF EN ISO 7380; NF EN ISO 10642; NF EN 24766; NF EN 27434… 27436; NS-ISO 4766; NS-ISO 7434; NS-ISO 7435; OENORM ISO 1479; з OENORM ISO 1481 по OENORM ISO 1483; OENORM ISO 4766; OENORM ISO 7049…7051; OENORM ISO 7434… 7436; SFS-ISO 1481… 1483;		

1	2	3	4	5	6	7
				SFS-ISO 7049… 7051; SFS-EN 24766; SFS-EN 27435; SFS-EN 27436; SS-ISO 1479; SS-ISO 1481… 1483; SS-ISO 4766; SS-ISO 7049… 7051; SS-ISO 7434… 7436; UNI 8920; UNI ISO 4766; UNI ISO 7434… 7436; UNI EN 24766; UNI EN 27434… 27436; ГОСТ 1476… 1479; ГОСТ 1481… 1486; ГОСТ 1488; ГОСТ 1491; ГОСТ 1759.0; ГОСТ 8878; ГОСТ 9124; ГОСТ 10336… 10341;		

1	2	3	4	5	6	7
				ГОСТ 10344; ГОСТ 10618… 10621; ГОСТ 11074; ГОСТ 11075; ГОСТ 11644; ГОСТ 11650… 11652; ГОСТ 11738; ГОСТ 14731; ГОСТ 17473… 17475; ГОСТ 28964		
		Гайки різних модифікацій	ДСТУ ISO 2320; ДСТУ ISO 4032… 4035; ДСТУ ISO 4161; ДСТУ ISO 4775; ДСТУ ISO 7042…7044; ДСТУ ISO 7719; ДСТУ ISO 8673… 8676; ДСТУ ISO 8992; ДСТУ ISO 10663; ДСТУ ISO 15071	ISO 2320; ISO 4032…4036; ISO 4161; ISO 4775; ISO 7042…7044; ISO 7719; ISO 7720; ISO 8673…8676; ISO 8992; ISO 10513; ISO 10663; ISO 15071; ГОСТ 1759.0; ГОСТ 18126; ГОСТ 2524; ГОСТ 2526; ГОСТ 2528;	Форма, розміри, допуски, матеріал, механічні властивості; характеристики нарізі та покриття (при наявності)	Гаряча, тепла або холодна об’ємна штамповка на висад-жувальних станках-автоматах, накатування різьблення, термічна обробка, нанесення покриття (за потреби)

1	2	3	4	5	6	7
				ГОСТ 3032; ГОСТ 5915; ГОСТ 5916; ГОСТ 5918; ГОСТ 5919; ГОСТ 5927; ГОСТ 5929; ГОСТ 5931; ГОСТ 15521 …15526; ГОСТ 10605… 10610; ГОСТ 10657; ГОСТ 11532; ГОСТ 15526; EN 1884; EN ISO 7719; EN ISO 10513; BS EN 1664; BS EN ISO 7719; BS EN ISO 10513; BS ISO 7720; BS ISO 10663; DIN 555; DIN 6915; DIN EN 1664; DIN EN 24032… 24036; DIN EN 28673… 28676;		

1	2	3	4	5	6	7
				DIN EN ISO 7719; DIN EN ISO 10513; DS/ISO 4775; DS/ISO 7414; NF E25-410; NF E25-422; NF E25-663; NF EN ISO 7719; NF EN ISO 10513; NBN E 27-001		
	Дріт сталевий	Шурупи різних модифікацій	ДСТУ ГОСТ 809; ДСТУ ГОСТ 1145; ДСТУ Б Д.2.2-8:2008	ГОСТ 809; ГОСТ 1144… 1147; ГОСТ 11473		
	Сталеві стрічка або лист	Шайби	ДСТУ ISO 887; ДСТУ ISO 7094; ДСТУ ГОСТ 13463; ДСТУ ГОСТ 13464; ДСТУ ГОСТ 22355; ДСТУ ГОСТ 24197;	ISO 887; ISO 7089… 7092; ISO 7093-1,2 ISO 7094; ISO 8738; ISO 10669; ГОСТ 4087; ГОСТ 4090; ГОСТ 6958;	Вид, зовнішній та внутрішній характерні розміри, товщина, допуски, матеріал, механічні властивості,	Листова штамповка зі стрічки, оброблення, нанесення покриттів (за потреби)

1	2	3	4	5	6	7
			ДСТУ СТ СЭВ 280	ГОСТ 9060; ГОСТ 9649; ГОСТ 10450; ГОСТ 10461… 10464; ГОСТ 10906; ГОСТ 11371; ГОСТ 11648; ГОСТ 11872; ГОСТ 13438; ГОСТ 13439; ГОСТ 13463… 13466; ГОСТ 14734; ГОСТ 17777; ГОСТ 17778; ГОСТ 18123; ГОСТ 22355; ГОСТ 22356; ГОСТ 24197; ГОСТ 28848 СТ СЭВ 280	теоретична маса, характеристики покриття (при наявності)	
	Дріт прямокутний з пружинної сталі	Шайби пружинні	ДСТУ ГОСТ 21797	ГОСТ 6402; ГОСТ 19115 ГОСТ 21797	Матеріал, механічні властивості, діаметр кріпильної деталі, зовнішній діаметр,	Гнуття заготовки навкруги циліндричної оправки з наступним розрізанням напівфабрикату уздовж осі

1	2	3	4	5	6	7
					товщина та ширина квадратного дроту, допуски	оправки; термічна обробка, оздоблення
	Дріт круглий або напівплющений	Шплінти, шпильки	ДСТУ ISO 8992	ISO 8992; ГОСТ 397	Матеріал, механічні властивості, форма, розміри, допуски, умовний діаметр, маса 1000 шт.	Плющення прокаткою (протяжкою), гнуття за шаблоном, оздоблення
	Сталевий дріт	Цвяхи без покриття та оцинковані різного призначення (загального, шиферні тощо). Технічні умови	ДСТУ EN 10230-1; РСТ УССР 1822-89	EN 10230-1; DIN 68163; DIN 1160; ГОСТ 283; ГОСТ 4028…4030; ГОСТ 4032; ГОСТ 4034; ГОСТ 4035; ГОСТ 4038; ГОСТ 9870	Матеріал, форма, довжина, діаметр (марка сталі), маса; вид та характеристика покриття (при наявності)	Холодна об’ємна формовка на цвяхових станках-автоматах, штамповка; нанесення покриття (за потреби)
	Сталева стрічка	Кнопки толеві. Загальні технічні умови	РСТ УССР 1909-81			
	Сталевий дріт	Заклепки різних модифікацій		ISO 14588; ISO 15973… 15984;	Матеріал, форма, характерні	

1	2	3	4	5	6	7
				ISO 16582… 16585; EN ISO 15973… 15984; EN ISO 16582…16585; DIN 660; DIN 661; DIN 6791; ГОСТ 10299… 10304; ГОСТ 12638… 12644; ГОСТ 14797… 14801; ГОСТ 14803; ГОСТ 14805	розміри, маса 1000 шт.	
	Дріт з перерізом різної форми з пружинних сталей	Пружини гвинтові циліндричні	ДСТУ ISO 16249; ДСТУ 2262	ISO 16249; ГОСТ 16118; ГОСТ 13764… 13676	Розміри перерізу (діаметр) дроту, конструкція, діаметр пружини зовнішній та внутрішній, матеріал, механічні властивості тощо	Навивка на оправку на спеціальному обладнанні, термічна обробка

1	2	3	4	5	6	7
	Дріт сталевий	Фібра	ДСТУ IEC 60667-1 ТУ У В.2.7-28.7-00191046-015	IEC 60667-1	Розміри, форма	Розділення дроту на частки, гнуття за шаблоном на спеціальних станках-автоматах
		Ланцюги різних конструкцій	ДСТУ ГОСТ 13568 (ИСО 606); ДСТУ 3074; ДСТУ 3555; ДСТУ ISO 10190	ISO 606; ISO 10190; DIN 8187/8188; ГОСТ 13568	Конструкція, розміри, міцність, властивості покриття (при наявності)	Різання, гнуття, формування, збірка ланцюга, зварювання на спеціальному обладнанні; нанесення покриття (за потреби)
	Дріт сталевий	Дріб (включаючи номенклатуру показників дробу мисливського, спортивного і картечі)	ДСТУ 3184; ДСТУ 7714	ГОСТ 11964	Розмір часток	Різання дроту на частки певного розміру та оброблення
	Дріт сталевий, матеріали покриття	Електроди покриті металеві для ручного дугового зварювання різного призначення	ДСТУ ISO 5184; ДСТУ EN ISO 3580; ДСТУ EN ISO 3581; ДСТУ EN ISO 6848; ДСТУ EN ISO 14172; ДСТУ EN ISO 18275;	ISO 5184; EN ISO 3580; EN ISO 3581; EN ISO 6848; EN ISO 14172; EN ISO 18275; ГОСТ 9466; ГОСТ 9467; ГОСТ 10051; ГОСТ 10052; ГОСТ 14111;	Розміри (діаметр, довжина); хімічний склад стрижня, грануло-метричний склад матеріалів	Розрізання дроту на мірні довжини; правка; змішування компонентів та напресовка обмазки у спеціальних установках,

1	2	3	4	5	6	7
			ДСТУ 2221	ГОСТ 51215	покриття (обмазки)	термічна обробка
	Дріт з різних сталей	Стрічка сталева плющена різного призначення	ДСТУ 2091; ДСТУ 8970	ГОСТ 808; ГОСТ 10234; ГОСТ 21997; ГОСТ 22366	Марка сталі, форма і розміри перерізу, механічні властивості	Плющення в прокатних станах в роликах (протяжка) чи волочіння
15 Вироби листової штамповки	Сталева стрічка	Петлі для вікон та дверей		ГОСТ 5088	Форма, розміри; матеріал заготовки	Холодна штамповка; спеціальна формовка
	Сталева листова заготовка	Плитки облицювальні металеві. Загальні технічні умови	РСТ УССР 1921-82		Форма, розміри; матеріал заготовки	Холодна штамповка-вирубка
	Сталевий лист, матеріали покриття	Вироби посудогосподарські (з покриттям та без нього)	ДСТУ 3276; ДСТУ 3277	ГОСТ 18970; ГОСТ 20558; ГОСТ 24132; ГОСТ 24788; ГОСТ 27002	Форма, розміри виробу; марка сталі, матеріал покриття, товщина сталевого листа та покриття,	Операції листової штамповки (вирубка, формовка, гнуття тощо) на штампах (пресах); нанесення покриття (за потреби)
		Вироби столові з нержавкої сталі із сріблястим покриттям	-	ISO 8442; ГОСТ 28973		
		Дека металева. Технічні умови	РСТ УССР 1555-73			
	Нержавіюча сталева стрічка	Вироби господарчі	РСТ УССР 1762-86		Вид, форма, призначення, розміри	У залежності від виробу

1	2	3	4	5	6	7
16 Вироби кування та гарячого об'ємного штампування	Заготовки з різних сталей та сплавів	Сортові профілі ***ковані*** (круг, квадрат, стрічка звичайного та конструктивного призначення, вільного кування та такі, що працюють під тиском, штамповані, за замовленнями та ін.). Загальні вимоги та технічні умови	ДСТУ ISO 9327; ДСТУ EN 10222; ДСТУ EN 10250-1, 4; РСТ УССР 1708-76	ISO 9327; EN 10222; EN 10250-1, 4; ГОСТ 1133; ГОСТ 4405 EN 10222; ГОСТ EN 10222; ГОСТ 7062; ГОСТ 7505; ГОСТ 8479; ГОСТ 25054	Матеріал, вид, форма, призначення, розміри, допуски	Кування на молотах та пресах гарячого деформування
17 Кольорові метали і сплави	Брухт та відходи кольорових металів і сплавів. Загальні технічні умови	Брухт та відходи кольорових металів і сплавів. Загальні технічні умови	ДСТУ 3211	ГОСТ 1639		Збір відходів виробництв
	-	Алюміній та сплави алюмінієві деформівні. Марки. Види продукції	ДСТУ ISO 209-1, 2 ДСТУ ГОСТ 11069	ISO 209-1, 2; ГОСТ 4784; ГОСТ 11069	Марки та хімічний склад, види продукції	Нормування
	Боксити	Алюміній та алюмінієві сплави. Позначення зливків нелегованого та легованого алюмінію для переплавлення, лігатур та виливків (системи числових позначень, позначень хімічними символами, запису хімічного складу)	ДСТУ EN 1780-1, 2, 3	EN 1780-1, 2, 3	Хімічний склад та позначення	Нормування

1	2	3	4	5	6	7
	-	Іридій	ДСТУ ГОСТ 13099	ГОСТ 13099	Марки	Нормування
	-	Магній та сплави (здеформовані та ін.) на основі магнію	ДСТУ ISO 3116; ДСТУ ISO 8287; ДСТУ 2187	ISO 3116; ISO 8287; ГОСТ 804; ГОСТ 2581; ГОСТ 2856; ГОСТ 14957	Марки, склад	Нормування
	-	Мідь та мідні сплави	ДСТУ ISO 1190-1; ДСТУ EN 1412; ДСТУ ГОСТ 859; ДСТУ ГОСТ 5017; ДСТУ ГОСТ 15527;	ISO 1190-1; EN 1412; ГОСТ 493; ГОСТ 859; ГОСТ 5017; ГОСТ 15527; ГОСТ 17711; ГОСТ 18175	Позначення, маркування, Європейська система нумерування та позначення матеріалів. Марки, склад	Нормування
	Боксити, первинний алюміній	Алюміній (первинний та вторинний) та його сплави загального та спеціального призначення (ливарні, для виробництва поршнів, для розкислення, для виробництва феросплавів, алюмотермії, легування,	ДСТУ ISO 209-1,2; ДСТУ EN 575; ДСТУ EN 576; ДСТУ EN 1676; ДСТУ ГОСТ 11069; ДСТУ 2839; ДСТУ 3015; ДСТУ 3752; ДСТУ 3753	ISO 209-1,2; EN 575; EN 576; EN 1676; ГОСТ 295; ГОСТ 1131 ГОСТ 1583; ГОСТ 2685; ГОСТ 4784; ГОСТ 11069; ГОСТ 19181; ГОСТ 30620	Хімічний склад, домішки, форма поставки	Вилучення глинозему з бокситів, електроліз та обробка, плавка, переплавлення, лиття

1	2	3	4	5	6	7
		деформування тощо). Технічні умови				
	Розплав алюмінію	Алюміній та алюмінієві сплави. Виливки загального призначення, для переплавлення, циліндричні, плоскі, для дроту. Хімічний склад і механічні властивості Технічні умови	ДСТУ EN 1676; ДСТУ EN 1706	EN 1676; EN 1706; ГОСТ 4004; ГОСТ 9498; ГОСТ 11069; ГОСТ 19437	Хімічний склад, розміри, механічні властивості, форма поставки	Вилучення глинозему з бокситів, електроліз та обробка, плавка, переплавлення (за потреби); лиття
	Розплав алюмінію, (або алюмінієва стрічка та активуючі матеріали)	Алюміній для розкислення, виробництва феросплавів та алюмотермії - у вигляді виливків (або активованого дроту)	ДСТУ 3753	ГОСТ 295	Хімічний склад матеріалів; розміри заготовки та активованого дроту	Лиття (або формовка активованого дроту з використанням волочіння)
	Розплав алюмінію	Алюмінієва лігатура	ДСТУ EN 575	EN 575	Хімічний склад, форма поставки	Плавка, обробка розплаву, лиття
	Комплексні руди гідротермальних родовищ	Вісмут		ГОСТ 10928	Хімічний склад, форма поставки	Вилучення з руди за спеціальною технологією, плавка, лиття
	Вольфрамові руди	Вольфрамовий концентрат		ГОСТ 213	Хімічний склад, форма поставки	Вилучення з руди за спеціальною

1	2	3	4	5	6	7
						технологією, плавка, лиття
	Поліметалічні та комплексні руди, відходи виробництва кольорових металів	Германій монокристалічний		ГОСТ 16153	Хімічний склад, форма поставки	Спеціальна технологія та обробка
	Відходи переробки цинкових, свинцевих і мідних руд	Кадмій (звичайної та високої чистоти)		ГОСТ 1467; ГОСТ 22860	Хімічний склад, форма поставки	Вилучення із сировини за спеціальною технологією, плавка, твердіння
	Супутній матеріал у нікелевій руді	Кобальт. Технічні умови	ДСТУ ГОСТ 123	ГОСТ 123	Хімічний склад, форма поставки	Вилучення із сировини за спеціальною технологією, плавка, твердіння
	Кварцити (дрібний білий пісок)	Кремній (силіцій) полікристалічний моносилановий та сплави на його основі	ДСТУ 2963	ГОСТ 2169; ГОСТ 19658; ГОСТ 22025	Хімічний склад, форма поставки	Вилучення із сировини за спеціальною технологією, плавка, твердіння
	Бішофіт, карноліт, магнезіт	Магній первинний у чушках. Технічні умови	ДСТУ 2187-93 (ГОСТ 804-93)	ISO 8287:1984; ГОСТ 804	Хімічний склад, форма поставки	Електроліз розплаву, плавка, твердіння

1	2	3	4	5	6	7
	Манганова руда	Марганець металевий, азотований тощо		ГОСТ 6008	Хімічний склад, форма поставки	Збагачення, відновлення, плавка, твердіння
	Мідні руди та шихтові матеріали (олово, цинк та ін.)	Мідь та мідні сплави: латуні бронзи (мідно-фосфористі, оброблювані тиском, ливарні та ін.).Технічні умови	ДСТУ EN 1982; ДСТУ ГОСТ 5017; ДСТУ ГОСТ 15527; ДСТУ 2530; ДСТУ 3211; ДСТУ 3473; ДСТУ 3474; ДСТУ ГОСТ 193	ISO 431; EN 1982; DIN 2.0040; DIN 2.0065; DIN 2.0076; DIN 2.0090; DIN 2.0220; DIN 2.0230; DIN 2.0240; DIN 2.0250; DIN 2.0280; DIN 2.0323; DIN 2.0371; DIN 2.0380; DIN 2.0375; DIN 2.0401; DIN 2.0403; DIN 2.0460; DIN 2.0650; DIN 2.0932; DIN 2.0936; DIN 2.1016; DIN 2.1020; DIN 2.1030; DIN 2.1248 ASTM C10200; ASTM C10220;	Хімічний склад, форма поставки	Плавка, рафінування, розливання у виливки

1	2	3	4	5	6	7
				ASTM C12000; ASTM C12200; ASTM C21000; ASTM C22000; ASTM C23000; ASTM C26000; ASTM C26200; ASTM C26800; ASTM C27200; ASTM C35000; ASTM C36000; ASTM C37700;ASTM C37800; ASTM C38500; ASTM C51100; ASTM C51900; ASTM C52100; ASTM C95200; ASTM C95210; ASTM C82500; ASTM C68600; ГОСТ 1639; ГОСТ 4515; ГОСТ 613…614; ГОСТ 493; ГОСТ 1020; ГОСТ 5017; ГОСТ 15527; ГОСТ 17328; ГОСТ 17711;		

1	2	3	4	5	6	7
				ГОСТ 18175		
	Нікелеві руди, шихтові матеріали (нікель, мідь, олово, цинк та ін.)	Нікель, сплави нікелеві та мідно-нікелеві, константан, манганін для кріпильних виробів із заданими властивостями за високих та/або низьких температур	ДСТУ EN 10269 (у частині нікелевих сплавів); ДСТУ ГОСТ 492	EN 10269; ГОСТ 492; ГОСТ 849; ГОСТ 19241	Хімічний склад, форма поставки	Плавка, розливання у виливки
	Рудні мінерали олова, шихтові матеріали (олово, мідь, цинк та ін.)	Олово, олов'яні сплави та припої (у зливках)	ДСТУ EN 610; ДСТУ EN 611-1, 2;	ISO 4383; EN 610; EN 611-1, 2; ГОСТ 860; ГОСТ 1320; ГОСТ 21930; ГОСТ 21931	Хімічний склад, форма поставки	Плавка, розливання у виливки
	Мінерали ртуті (зокрема, кіновар)	Ртуть		ГОСТ 4658	Хімічний склад, форма поставки	Вилучення із сировини за спеціальною технологією (випал, металотермія)
	Поліметалічні руди, шихтові матеріали (свинець, мідь, олово, цинк та ін.)	Свинець та свинцеві сплави (високої чистоти, з сурмою, бабіти тощо). Марки та технічні умови	ДСТУ ГОСТ 1292	ISO 4383; ГОСТ 1292; ГОСТ 1320; ГОСТ 3778; ГОСТ 22861	Марки, хімічний склад, форма поставки	Вилучення із сировини за спеціальною технологією, плавка, твердіння
	Титанові руди, шихтові матеріали	Титан губчастий (та титанові сплави)	ДСТУ 3079	ГОСТ 17746; ГОСТ 19807	Хімічний склад, форма поставки	Вилучення із сировини за спеціальною

1	2	3	4	5	6	7
						технологією, обробка, плавлення, лиття
	Комплексна руда	Хром (технічні умови та умови постачання)	ДСТУ ГОСТ 5905	ISO 10387; ГОСТ 5905	Хімічний склад, форма поставки	Відновлення у присутності коксу, виділення з ферохрому, охолодження
	Руди, що містять цинк, шихтові матеріали (цинк, мідь, олово, та ін.)	Цинк і цинкові сплави різних призначення та форми постачання (ливарні, у чушках, антифрикційні тощо) – марки, технічні умови	ДСТУ 2774; ДСТУ 2775; ДСТУ 3586; ДСТУ ISO 301	ISO 301; ГОСТ 3640; ГОСТ 17711 ; ГОСТ 19424; ГОСТ 21437; ГОСТ 21438; ГОСТ 25140	Марки, хімічний склад, форма поставки	Вилучення із сировини за спеціальною технологією (випал, металотермія), плавка, лиття
	Шихтові матеріали	Сплави прецизійні (магнітом’які, з високим електричним опором)		ГОСТ 10160; ГОСТ 10994; ГОСТ 12766.3	Хімічний склад, форма поставки	Плавка, лиття, обробка тиском
Вироби з кольорових металів і сплавів	-	Заготовки та напівфабрикати з кольорових металів та їх сплавів. Маркування		ГОСТ 27861	Маркування	Нормування
	-	Матеріали зварювальні. Електроди, дріт та прутки для зварювання алюмінію та його сплавів. Класифікація	ДСТУ EN ISO 18273	ISO 18273; EN ISO 18273	Класифікація	Нормування
	Пруток або дріт з відповідних металів (сплавів)	Кріпильні вироби з кольорових металів	Див. відповідні позиції сталевих	Див. відповідні позиції сталевих	Див. відповідні позиції	Гаряча, тепла або холодна об’ємна

1	2	3	4	5	6	7
		(латунь, алюміній тощо)	кріпильних виробів	кріпильних виробів	сталевих кріпильних виробів	штамповка (висаджування)
	Алюмінієвий виливок або заготовка (катанка)	Алюміній та алюмінієві сплави здеформовані.	ДСТУ ISO 6363-2; ДСТУ Б В.2.6-3	ISO 6363-2; ГОСТ 18482; ГОСТ 22233	Розміри, допуски, склад, механічні властивості	Лиття, деформування
		Алюміній та алюмінієві сплави. Ковкі вироби. Спеціальні вимоги до виробів, призначених для виготовлення обладнання, що працює під тиском	ДСТУ EN	EN 12392	Розміри та форма поперечного перерізу	Ковка
		Прутки з алюмінію і його сплавів		ГОСТ 21488	Стан матеріалу, геометричні параметри та допуски	Обробка тиском (пресування, прокатка, волочіння)
		Катанка алюмінієва		ГОСТ 13836; ГОСТ 20967	Склад матеріалу, діаметр, допуски, якість поверхні, маса 1 м	Пресування, прокатка, волочіння
		Дріт та прутки з алюмінію та алюмінієвих сплавів різного призначення		ГОСТ 14838; ГОСТ 22483	Склад матеріалу, діаметр, допуски,	Волочіння, пресування

1	2	3	4	5	6	7
		(для електротехнічних цілей, для холодної висадки тощо)			якість поверхні, маса 1 м	
		Профілі пресовані та катані різного перетину з алюмінію, алюмінієвих і	ДСТУ ISO 6362-2 (у частині алюмінію)	ISO 6362-2; ГОСТ 8618; ГОСТ 13616... 13624;	Розміри та форма поперечного перерізу,	Пресування, прокатка
		магнієвих сплавів. (круглі, кутові, профільні, бульбоподібні тощо)		ГОСТ 13737; ГОСТ 13738; ГОСТ 17575; ГОСТ 17576; ГОСТ 18591; ГОСТ 19657; ГОСТ 21488; ГОСТ 24767; ГОСТ 29296; ГОСТ 29303	теоретична маса 1 м, механічні властивості	
		Алюміній та алюмінієві сплави. Ковкі вироби. Спеціальні вимоги до виробів, призначених для виготовлення обладнання, що працює під тиском	ДСТУ EN	EN 12392	Розміри та форма поперечного перерізу	Деформація різних видів
		Диски алюмінієві литі (ронделі)	ДСТУ 2557		Хімічні та механічні властивості, розміри виробів	Лиття
		Блоки з алюмінієвих сплавів		ГОСТ 21519	Захисне покриття та	Лиття, формовка,

1	2	3	4	5	6	7
					габаритні розміри	нанесення покриття
	Алюмінієвий виливок або сляб	Лист, фольга, стрічка, штаби, бляха та плити алюмінієві	ДСТУ ISO 6361-2; ДСТУ ГОСТ 745; ДСТУ 4481	ISO 6361-2; ГОСТ 618; ГОСТ 745; ГОСТ 1018; ГОСТ 10703; ГОСТ 13726 ГОСТ 17232; ГОСТ 21631; ГОСТ 225905	Матеріал, стан поверхні, вид і розміри при поставці, допуски, теоретична маса, механічні властивості	Прокатка
	Алюмінієвий лист та стрічка	Профілі холоднотягнуті з алюмінію та алюмінієвих сплавів для огороджувальних будівельних конструкцій	ДСТУ Б В.2.6-44		Вид, форма та характерні розміри поперечного перерізу, допуски, теоретична маса 1 м, механічні властивості	Профілювання
	Кругла труба (або суцільна заготовка) з алюмінію та його сплавів	Труби (круглі, квадратні, прямокутні; іригаційні) з алюмінію та алюмінієвих сплавів	ДСТУ ISO 11678	ISO 11678; ГОСТ 18457; ГОСТ 18475; ГОСТ 18482		Прокатка, пресування
	Алюмінієвий лист	Банки алюмінієві цілісні циліндричні для консервів	ДСТУ 4970		Форма, розміри, якість поверхні, покриття	Штамповка, нанесення покриття (за потреби)
		Вироби господарчі з алюмінію та	ДСТУ ISO 13804;	ISO 13804;	Форма, розміри,	

1	2	3	4	5	6	7
		алюмінієвих сплавів (посуд)	РСТ УССР 117; РСТ УССР 1167; РСТ УССР 1832		якість поверхні	
	Заготовка з алюмінієвих сплавів	Світлові опори. Частина 6. Вимоги до алюмінієвих освітлювальних опор	ДСТУ EN 40-6	EN 40-6	Склад матеріалу, форма та розміри	Виготовлення складових, монтаж
		Кріпильні вироби з кольорових металів (латунь, алюміній тощо)	Див. відповідні позиції сталевих кріпильних виробів	Див. відповідні позиції сталевих кріпильних виробів		
	Дріт, пруток з вольфраму	Зварювальні матеріали. Прутки, дріт та наплавлений метал для зварювання нелегованих і дрібнозернистих сталей вольфрамовим електродом в інертних газах.	ДСТУ EN ISO 636	ISO 636; EN ISO 636	Класифікація	Нормування
	Вольфрамовий пруток, дріт	Дріт та прутки вольфрамові різного призначення (для джерел світла, спиралевидних катодів і підігрівачів електронних приладів, пружин напівпровідникових		ГОСТ 18903; ГОСТ 19671	Діаметр, механічні властивості, допуски, якість поверхні, електричні характерити-ки	Волочіння, пресування

1	2	3	4	5	6	7
		приладів та інших деталей приладів)				
		Електроди вольфрамові неплавкі		ГОСТ 23949	Матеріал стрижня, розміри, допуски, якість поверхні	Волочіння, пресування
	Пласка заготовка із силіцію (кремнію)	Пластини із силіцію (кремнію)		СТ СЭВ 4281	Хімічний склад, розміри	Лиття, деформація
	Бішофіт, карноліт, магнезіт	Магній і магнієві сплави. Зливки та виливки з магнієвих сплавів. Технічні умови	ДСТУ ISO 16220	ISO 16220	Склад, форма поставки	Вилучення, обробка, плавлення, лиття
	Магнієві злитки та заготовка	Профілі пресовані та катані різного перетину з алюмінію, алюмінієвих і магнієвих сплавів. (круглі, кутові, профільні, бульбоподібні тощо)	ДСТУ ISO 6362-2 (у частині магнію)	ISO 6362-2; ГОСТ 8618; ГОСТ 13616... 13624; ГОСТ 13737; ГОСТ 13738; ГОСТ 17575; ГОСТ 17576; ГОСТ 18351; ГОСТ 18591; ГОСТ 19657; ГОСТ 21488; ГОСТ 24767; ГОСТ 29296; ГОСТ 29303	Розміри та форма поперечного перерізу, теоретична маса 1 м, механічні властивості	Пресування, прокатка

1	2	3	4	5	6	7
	Магнієва заготовка пласка	Лист, штаби та плити з магнієвих сплавів		ГОСТ 21990; ГОСТ 22635	Характерні форма і розміри поперечного перерізу, хімічний склад	Прокатка
	Трубна магнієва заготовка	Труби пресовані з магнієвих сплавів		ГОСТ 19441	Розміри поперечного перерізу, хімічний склад	Пресування
	Розплав міді та легуючих компонентів	Мідь та мідні сплави. Лігатура. Технічні умови	ДСТУ EN 1981	EN 1981	Хімічний склад, форма постачання	Нормування
		Мідь та мідні сплави. Зливки та виливки	ДСТУ EN 1982	EN 1982; ГОСТ 193	Хімічний склад, форма постачання	Плавка, лиття
	Розплав міді та легуючих компонентів	Мідь та мідні сплави. Вироби мідні литі нездеформовані. Технічні умови	ДСТУ EN 1976	EN 1976	Хімічний склад, форма постачання	Плавка, лиття
	Розплав міді та легуючих компонентів	Латуні та бронзи ливарні в чушках. Технічні умови	ДСТУ 3473; ДСТУ 3474	ISO 431; ДСТУ ГОСТ 193; ГОСТ 614; ГОСТ 1020; ГОСТ 17328	Хімічний склад, форма постачання	Плавка, лиття
	Мідна лита чи кована заготовка	Мідь і мідні сплави. Поковки	ДСТУ EN 12420	EN 12420	Форма перетину та	Ковка, об ємна штамповка

1	2	3	4	5	6	7
					розміри, хімічний склад, маса	
	Мідна заготовка	Профілі з міді та мідних сплавів різного перерізу (круг, квадрат, шестигранник, тощо) та призначення	ДСТУ ISO 431; ДСТУ EN 1977; ДСТУ EN 12166; ДСТУ EN 13602 ДСТУ ГОСТ 193	ГОСТ 4134; ГОСТ 24301	Форма перетину та розміри, хімічний склад, маса 1 м	Деформування, профілювання, термічна обробка, оздоблення
	Пласка заготовка з міді або її сплавів	Лист, фольга, стрічка, штаби та плити з міді та мідних сплавів різного призначення	ДСТУ EN 13599:2013; ДСТУ ГОСТ 1173; ДСТУ ГОСТ 2208; ДСТУ ГОСТ 5187;	EN 13599; ГОСТ 495; ГОСТ 931; ГОСТ 1018; ГОСТ 1048; ГОСТ 1173; ГОСТ 1595; ГОСТ 1761; ГОСТ 1789; ГОСТ 2208; ГОСТ 4442; ГОСТ 4748; ГОСТ 5063; ГОСТ 5187; ГОСТ 5189; ГОСТ 5362; ГОСТ 5638; ГОСТ 15471; ГОСТ 15885; ГОСТ 16358; ГОСТ 19357;	Товщина, допуски, хімічний склад, умови постачання	Листова прокатка, термічна обробка, оздоблення

1	2	3	4	5	6	7
				ГОСТ 20707		
	Заготовка та дріт з міді та мідних сплавів	Дріт та прутки з міді та мідних сплавів (латуні, бронзи тощо) різного перерізу та призначення (для електротехнічних цілей, зварювальні; для холодного висаджування, обробляння різанням; для заклепок тощо)	ДСТУ 2776; ДСТУ 4959; ДСТУ EN 1977; ДСТУ EN 12163 ДСТУ EN 12164; ДСТУ EN 12166 ДСТУ EN 13601; ДСТУ EN 13602; ДСТУ ГОСТ 1535; ДСТУ ГОСТ 2060; ДСТУ ГОСТ 5221	EN 12163; EN 12164; EN 12166; EN 13601; EN 13602; EN 1977; ГОСТ 1535; ГОСТ 1628; ГОСТ 2060; ГОСТ 5221; ГОСТ 24301	Розміри перетину, допуски, хімічний склад, умови постачання	Волочіння, пресування, термічна обробка, оздоблення
	Суцільна або трубчаста заготовка з міді та її сплавів	Труби мідні та з мідних сплавів різного перерізу та призначення (круглі, квадратні, профільні, ребристі, загального призначення, капілярні, тонкостінні, для теплообмінників, хвилеводів, електронно-вакуумних приладів тощо)	ДСТУ EN 12168; ДСТУ EN 12451; ДСТУ EN 12452; ДСТУ ГОСТ 617; ДСТУ ГОСТ 10092; ДСТУ 2776	EN 12168; EN 12451; EN 12452; ГОСТ 494; ГОСТ 617; ГОСТ 1208; ГОСТ 2622; ГОСТ 2624; ГОСТ 10092; ГОСТ 11383; ГОСТ 13339; ГОСТ 16774; ГОСТ 17217;	Розміри перетину, допуски, хімічний склад, умови постачання	Прокатка, пресування, волочіння, профілювання, термічна обробка, оздоблення

1	2	3	4	5	6	7
				ГОСТ 20900; ГОСТ 21646; ГОСТ 24301		
	Пласка заготовка з міді та її сплавів	Мідь і мідні сплави. Плити, листи та круги для котлів, посудин, що працюють під тиском, і контейнерів для зберігання гарячої води	ДСТУ EN 1653	EN 1653	Форма і розміри перетинів, механічні властивості	Листова штамповка, оздоблення
	Пруток та дріт з міді та мідних сплавів	Мідь та мідні сплави. Катоди мідні. Технічні умови	ДСТУ EN 1978 ДСТУ ГОСТ 546	ISO EN 1978 ISO 431; ГОСТ 546	Форма і розміри перетинів, якість поверхні, електричні властивості	Процеси обробки тиском, оздоблення
	Дріт мідний	Цвяхи мідні (для суднобудівництва)		ГОСТ 6750	Форма і розміри, кількість одиниць в 1 кг, умови постачання	Холодна об’ємна формовка на цвяхових станках-автоматах
	Лист з відповідних матеріалів	Посуд з мельхіору, нейзильберу, латуні з покриттям (хромовим, нікелевим, срібним, золотим)		ГОСТ 24308; ГОСТ 24320	Форма та розміри виробів, якість поверхні, вид покриття	Листова штамповка, нанесення покриття (за необхідності), оздоблення

1	2	3	4	5	6	7
	Молібденова заготовка	Стрічка молібденова відпалена для глибокого витягування		ГОСТ 25442	Форма та розміри перетину, допуски, хімічний склад, механічні властивості	Прокатка, пресування, волочіння, термічна обробка
	Заготовка та дріт з молібдену	Дріт молібденовий		ГОСТ 18905; ГОСТ 27266	Розміри, допуски, хімічний склад, механічні властивості	Прокатка, волочіння, пресування
	-	Зварювальні матеріали. Дроти та стрічки електродні, дроти та прутки для зварювання плавленням нікелю та нікелевих сплавів. Класифікація	ДСТУ EN ISO 18274	ISO 18274; EN ISO 18274	Класифікація	Нормування
	Заготовка з нікелю та його сплавів	Нікель, сплави нікелеві і мідно-нікелеві, оброблювані тиском		ГОСТ 492		Прокатка, волочіння, пресування, штамповка
	Сортова заготовка з нікелю та його сплавів	Дріт, прутки з нікелю, мідно-нікелевих сплавів (крем'янистих та марганцевих) різного призначення		ГОСТ 1049; ГОСТ 1790; ГОСТ 1791; ГОСТ 2179; ГОСТ 13083	Розміри, допуски, хімічний склад, механічні властивості	Прокатка, волочіння, пресування, термічна обробка, оздоблення

1	2	3	4	5	6	7
	Суцільна або трубчаста заготовка з нікелю та нікелевих сплавів	Труби з нікелю та нікелевих сплавів різного призначення		ГОСТ 13548; ГОСТ 17217; ТУ 14-3-1910-93;	Розміри, допуски, хімічний склад, механічні властивості, якість поверхні, форма постачання	Пресування, прокатка, волочіння
	Плоска заготовка з нікелю та його сплавів	Лист, фольга, стрічка, штаби та плити з нікелю та нікелевих сплавів		ГОСТ 2170; ГОСТ 6235; ГОСТ 15515	Розміри, допуски, хімічний склад, механічні властивості, якість поверхні, форма постачання	Листова прокатка, термічна обробка, оздоблення
	Нікелевий лист	Аноди нікелеві		ГОСТ 2132	Розміри, допуски, хімічний склад, якість поверхні, форма постачання	Листова штамповка, спеціальна обробка
	Пласка олов’яна заготовка	Фольга олов’яна		ГОСТ 18394	Товщина, допуски, хімічний склад, якість	Листова прокатка

1	2	3	4	5	6	7
					поверхні, форма постачання	
	Олов’яно-свинцевий сплав	Вироби з олов’яно-свинцевого сплаву	ДСТУ EN 611-2	EN 611-2	Розміри, допуски, хімічний склад, якість поверхні, форма постачання	Листова штамповка, прокатка, спеціальна обробка
	Холоднодеформо-вана та термічно оброблена заготовка зі сплаву танталу ТВ4	Труби безшовні капілярні зі сплаву на основі танталу ТВ4		ТУ 14-3-1408	Діаметр, товщина стінки, допуски, матеріал, термічна обробка, якість поверхні, механічні властивості	
	-	Зварювальні матеріали. Дроти електродні суцільні, дроти та прутки суцільні для зварювання плавленням титану та його сплавів. Класифікація	ДСТУ EN ISO 24034	ISO 24034; EN ISO 24034	Класифікація	Нормування

1	2	3	4	5	6	7
	Пласка заготовка з титану та його сплавів	Лист та плити титанові та з титанових сплавів		ГОСТ 22178; ГОСТ 23755	Розміри, механічні властивості, допуски, якість поверхні	Листова прокатка
	Заготовка та дріт з титану та титанових сплавів	Дріт та прутки з титану та титанових сплавів різного перетину та призначення		ГОСТ 26492; ГОСТ 27265	Діаметр, механічні властивості, допуски, якість поверхні, механічні властивості	Прокатка, пресування, волочіння. оздоблення
	Трубна заготовка з титанових сплавів	Труби безшовні гарячекатані зі сплавів на основі титану		ГОСТ 21945	Діаметр, товщина стінки, допуски, матеріал, термічна обробка, якість поверхні, механічні властивості	Гаряче деформування (прокатка, пресування)
	Труба-заготовка з титанових сплавів	Труби безшовні холоднодеформовані зі сплавів на основі титану		ГОСТ 22897; ASTM A337; ASTM A338; ANSI B36.19	Діаметр, товщина стінки, допуски,	Холодне деформування (прокатка, волочіння)

1	2	3	4	5	6	7
	Стрічка з титану або з титанових сплавів	Труби зварені з титану та титанових сплавів		ГОСТ 24890	матеріал, термічна обробка, якість поверхні, механічні властивості	Формовка за зварювання на трубозварювальному агрегаті
	Пласка заготовка зі свинцю та його сплавів	Лист, фольга, стрічка з покриттям та без нього, штаби та плити зі свинцю та свинцевих сплавів		ГОСТ 9559; ГОСТ 18394	Товщина, механічні властивості, якість поверхні	Листова прокатка, нанесення покриття (за потреби)
	Заготовка зі свинцю	Труби свинцеві		ГОСТ 167	Форма, розміри, допуски, матеріал, властивості	Пресування
	Свинець у рідкому стані	Пломби свинцеві	ДСТУ 2803;	ГОСТ 30269	Спеціальні вимоги	Лиття
		Диски свинцеві литі (ронделі)	ДСТУ 2553			
	Пласка заготовка із цинку та його сплавів	Лист, фольга, стрічка, штаби та плити з цинку та цинкових сплавів різного призначення		СТ СЭВ 2624; ГОСТ 598; ГОСТ 1150; ГОСТ 18326; ГОСТ 18327; ГОСТ 18846	Розміри, допуски, якість поверхні; склад та механічні властивості	Листова прокатка
	Сортова заготовка та дріт з цинку	Дріт цинковий		СТ СЭВ 4821; ГОСТ 13073	Діаметр, матеріал механічні	Прокатка, волочіння, пресування

1	2	3	4	5	6	7
					властивості, допуски	
	Цинк у рідкому стані, цинкові виливки	Диски цинкові (литі, для гальванічних елементів тощо)	ДСТУ 2560;	СТ СЭВ 3845	Спеціальні вимоги	Лиття, штамповка
	Заготовка зі сплавів (у тому числі – прецизійних) з кольорових металів	Прутки, листи, стрічка та дріт з прецизійних сплавів із заданими властивостями (високим електричним опором, заданим температурним коефіцієнтом лінійного розширення, модулем пружності тощо)		ГОСТ 8803; ГОСТ 10533; ГОСТ 12766.1,2,4; ГОСТ 14080… 14082; ГОСТ 14117… 14119	Спеціальні вимоги	Пресування, прокатка, волочіння
	Сортова заготовка, катанка, дріт з відповідних сплавів	Дріт зі сплавів хромель Т, алюмель, копель, манганін, нейзільбер та константан (для термоелектричних перетворювачів та ін.)		ГОСТ 1790; ГОСТ 5220; ГОСТ 5307; ГОСТ 10155	Хімічний склад, діаметр, допуски	Волочіння
Дорогоцінні та коштовні метали та сплави	Мінерали, поліметалеві руди, зола вугілля, відходи виробництва алюмінію тощо	Галій (загальні вимоги)		ГОСТ 13637.0	Спеціальні вимоги	Спеціальні технології
	Родовища	Золото та сплави на його основі (марки, технічні умови)	ДСТУ ГОСТ 6835	ГОСТ 6835; ГОСТ 28058		

1	2	3	4	5	6	7
	Мінерали, відходи виробництва цинку, свинцю та олова	Індій (технічні умови)		ГОСТ 10297		
	-	Іридій. Марки	ДСТУ ГОСТ 13099	ГОСТ 13099	Марки	Нормування
	Відходи переробки сульфідних руд нікелю, срібла та міді	Паладій афінований та паладієві сплави (марки, технічні умови)	ДСТУ ГОСТ 31291	ГОСТ 31291; ГОСТ 13462	Спеціальні вимоги	Спеціальні технології
	Родовища; концентрат металів платинової групи	Платина афінована та платинові сплави (технічні умови)	ДСТУ ГОСТ 31290	ГОСТ 12341; ГОСТ 13498; ГОСТ 31290	Спеціальні вимоги	Спеціальні технології
	-	Родій (марки)	ДСТУ ГОСТ 13098	ГОСТ 13098	Марки	Нормування
	Родовища, мінерали срібла	Срібло та сплави на його основі, срібні припої (марки, технічні умови)	ДСТУ ГОСТ 6836	ГОСТ 6836; ГОСТ 19738; ГОСТ 28595	Марки, склад, умови постачання	Нормування. Спеціальні технології
	Переробка колошникового пилу	Талій (технічні умови)		ГОСТ 18337	Спеціальні вимоги	Спеціальні технології
Вироби з дорогоцінних металів, одержані металургійними методами	Заготовка з іридію	Дріт з іридію та родію. Технічні умови	ДСТУ ГОСТ 19351:2008	ГОСТ 19351-2006	Хімічний склад, діаметр, допуски	Пресування, волочіння
	Пласка заготовка з відповідних металів і сплавів	Стрічка із золота, срібла та їх сплавів різного призначення (технічного, ювелірного тощо)		ГОСТ 7221; ГОСТ 30649	Спеціальні вимоги	Прокатка
		Стрічка з платини, паладію та їх сплавів		ГОСТ 24718	Спеціальні вимоги	

1	2	3	4	5	6	7
		Стрічка зі срібних припоїв		ГОСТ 19739	Спеціальні вимоги	
		Золото та срібло сусальне		ГОСТ 6902	Спеціальні вимоги	
		Фольга із золота, срібла та їх сплавів		ГОСТ 24552	Спеціальні вимоги	
		Фольга листова з платини, паладію та їх сплавів		ГОСТ 24353	Спеціальні вимоги	
	Заготовка та дріт з паладієво-вольфрамового сплаву	Дріт з паладієво-вольфрамового сплаву		ГОСТ 26469		Пресування, волочіння
	Дріт з дорогоцінних (коштовних) металів і сплавів	Дріт із золота, срібла та їх сплавів		ГОСТ 7222	Спеціальні вимоги	Волочіння
		Дріт з паладію та його сплавів		ГОСТ 18390; ГОСТ 26469	Спеціальні вимоги	
		Дріт з платини, сплавів платини та платинородієвих сплавів різного призначення	ДСТУ ГОСТ 10821	ГОСТ 10821; ГОСТ 21007; ГОСТ 18389	Спеціальні вимоги	
		Дріт зі срібних припоїв		ГОСТ 19746	Спеціальні вимоги	
		Сітка з платинових сплавів (каталізаторна)		ГОСТ 3193	Спеціальні вимоги	Спеціальна технологія
		Вироби золотарські (ювелірні) з коштовних металів	ДСТУ 3527; ДСТУ 3375		Спеціальні вимоги	Спеціальні технології
		Посуд (мельхіоровий, нейзильберовий,		ГОСТ 24320	Спеціальні вимоги	Операції штамповки

1	2	3	4	5	6	7
		латунний) зі срібним або золотим покриттям				(відокремлення, витягування чеканка тощо)
Вироби порошкової металургії		Металургія порошкова. Словник термінів	ДСТУ ISO 3252	ISO 3252	Терміни та визначення	Нормування
		Дроти та прутки порошкові для дугового зварювання нелегованих, високоміцних, нержавких, жароміцних дрібнозернистих сталей у захисному газі чи без захисного газу. Класифікація	ДСТУ EN ISO 14171; ДСТУ ISO 17633; ДСТУ ISO 17634; ДСТУ EN ISO 17632; ДСТУ EN ISO 17633; ДСТУ EN ISO 18276	ISO 14171; ISO 17632; ISO 17633; ISO 17634 ISO 18276; EN 14171; EN ISO 17632; EN ISO 17633; EN ISO 18276	Класифікація	
	Розплав алюмінію	Пудра алюмінієва. Технічні умови		ГОСТ 5494	Хімічний склад, розмір часток	Розпилювання в потоці охолоджувача, подрібнення
	Сталева стрічка, порошок сталі	Металопродукція з порошкової сталі: (швидкорізальної , наплавочної, для позапічного оброблення металургійних розплавів (прутки, стрічка тощо). Загальні технічні умови	ДСТУ 7217; ДСТУ 7304;	ГОСТ 28393 ГОСТ 22366; ГОСТ 26467	Вид продукції та перетину, розміри, хімічний склад, розмір часток вихідного порошку,	Формовка, пресування, спікання, деформування

1	2	3	4	5	6	7
					механічні властивості	
	Дріт зі сталі, порошок або стрічка міді (алюмінію)	Дріт біметалевий (сталемідний, сталеалюмінієвий)		ГОСТ 3822; ГОСТ 4775		Накатка порошку металу волочіння
	Суміш порошків відповідних металів	Спечені металеві матеріали. Технічні умови	ДСТУ ISO 5755	ISO 5755:2012	Спеціальні вимоги	Спікання, пресування
	Порошки вольфраму та карбіду кремнію	Пластини опорні змінні твердосплавні (вольфрам-кобальтові) різної форми (багатогранні, ромбічні, паралелограмні, тощо). Конструкція та розміри	ДСТУ ГОСТ 19073 …19081; ДСТУ ГОСТ 19083; ДСТУ ГОСТ 20312; ДСТУ ГОСТ 20771	ГОСТ 19073… 19081; ГОСТ 19083; ГОСТ 20312; ГОСТ 20771	Хімічний склад, форма, розміри виробу і часток	Спікання, пресування
		Вироби для ріжучого інструменту з твердих спечених сплавів. Технічні умови		ГОСТ 4872-75		
	Суміш порошків металів	Сплави тверді спечені безвольфрамові. Марки		ГОСТ 26530	Спеціальні вимоги	Спікання, пресування
	Розчин солей міді	Порошок мідний електролітичний. Технічні умови	ДСТУ ГОСТ 4960	ГОСТ 4960	Параметри обробки електроліту, характеристики порошку	Електролітичне вилучення
	Іридій у рідкому стані	Іридієвий порошок		ГОСТ 12338	Розмір часток, хімічний склад	Розпилювання в потоці охолоджувача

1	2	3	4	5	6	7
	Суміш порошків карбіду металів	Вироби карбід-кремнієві різного призначення		ГОСТ 10153; ГОСТ 26327		
		(термостійкі, шліфувальні тощо)				
	Кобальт у рідкому стані	Кобальтовий порошок		ГОСТ 9721		
	Нікель у рідкому стані	Нікелевий порошок		ГОСТ 9722; ГОСТ 14086		
	Олово у рідкому стані	Олов'яний порошок		ГОСТ 9723		
	Осмій у рідкому стані	Осмієвий порошок		ГОСТ 12339		
	Паладій у рідкому стані	Паладій у порошку		ГОСТ 14836		
	Платина у рідкому стані	Платина у порошку		ГОСТ 14837		
	Родій у рідкому стані	Родій у порошку		ГОСТ 12342		
	Рутеній у рідкому стані	Рутенієвий порошок		ГОСТ 12343		
	Цинк у рідкому стані	Порошок цинковий		ГОСТ 12601		
Примітки: маркування стандартів зарубіжних країн (окрім ISO, EN, ГОСТ) – див. джерело: Технічне регулювання та контроль на підприємстві / А.М. Должанський та ін.; за заг. ред. А. М. Должанського. Дніпро : «Свідлер А.Л.», 2021. 523 с.						

Навчальне видання

Должанський Анатолій Михайлович, Максакова Оксана Сергіївна,
Чорноіваненко Катерина Олександрівна, Аюпова Тетяна Анатоліївна,
Полякова Наталія Володимирівна, Бондаренко Оксана Анатоліївна,
Ломов Ілля Миколайович

Технічне регулювання та контроль на підприємстві

Том 2. Технології та дефекти продукції металургії

Підручник

Відповідальний редактор А. М. Должанський
Комп'ютерна верстка О. С. Максакова
Дизайн обкладинки Т. А. Аюпова

Підписано до друку 06.04.2023. Формат 60x84 1/8. Папір друк.
Ум. друк. арк. 73,47. Облік.-видав. арк. 53,18. Наклад 300 прим. Зам. № 0604/4.

Видавець «Свідлер А.Л.»
а/с 2493, м. Дніпро, 49041, тел. +38 (067) 635-78-83
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру суб'єктів видавничої справи видавничої справи: Серія ДК № 3876 від 10.09.2010 р.
https:/www.garant-sv.com.ua
Надруковано в типографії видавництва «Свідлер А.Л.»