



**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**

**Український державний університет  
науки і технологій**

---

Кафедра «Прикладна механіка та матеріалознавство»

*В авторській редакції*

# **ТЕХНОЛОГІЯ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ТА МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО**

Навчально-методичні рекомендації до лабораторних робіт  
з розділу I «Матеріалознавство»

*Електронне видання*

ДНІПРО  
2025

УДК 620.18(076.5)  
Т 38

Упорядник:  
*С. О. Плітченко, І. О. Вакуленко*

## Електронне видання

Схвалено Групою забезпечення якості освітньої програми

133.1.05.24 «Підйомно-транспортні, будівельні та колійні машини»

Протокол № 1 від 14.10.2025

133.1.04.24 «Експлуатація та ремонт техніки Держспецтрансслужби»

Протокол № 6 від 29.10.2025

274.1.03.24 «Технічна експлуатація та сервіс автомобілів»

Протокол № 1 від 10.10.2025

**Т 38** Технологія конструкційних матеріалів та матеріалознавство : навчально-методичні рекомендації до лабораторних робіт з розділу І «Матеріалознавство» / упоряд. С. О. Плітченко, І. О. Вакуленко ; Укр. держ. ун-т науки і технологій. – Електрон. вид. – Дніпро : УДУНТ, 2025. – 44 с.

Навчально-методичні рекомендації призначені для використання студентами денної форми навчання спеціальності G11 «Машинобудування (за спеціалізаціями)» та J8 «Автомобільний транспорт» під час виконання лабораторних робіт з дисципліни «Технологія конструкційних матеріалів та матеріалознавство».

Навчально-методичні рекомендації містять основні теоретичні положення для засвоєння матеріалу, інструкції з техніки безпеки в лабораторії матеріалознавства, опис основного устаткування та обладнання для виконання металографічного аналізу, порядок виконання лабораторних робіт, вимоги до аналізу результатів та оформлення звіту.

Іл. 26. Табл. 8. Бібліогр.: 9 назв.

© Плітченко С. О. та ін., укладання, 2025

© Укр. держ. ун-т науки і технологій, 2025

# ЗМІСТ

ВСТУП .....	4
ЗАГАЛЬНІ ВИМОГИ ПРАВИЛ ТЕХНІЧНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТА ОХОРОНИ ПРАЦІ ПІД ЧАС ВИКОНАННЯ РОБІТ В ЛАБОРАТОРІЇ МАТЕРІАЛОЗНАВСТВА .....	5
ЗАГАЛЬНІ ВИМОГИ ДО СТУДЕНТІВ .....	5
<b>Лабораторна робота № 1</b> Мікроаналіз зразків зі сталі .....	7
<b>Лабораторна робота № 2</b> Побудова бінарної діаграми стану .....	17
<b>Лабораторна робота № 3</b> Гартування сталі .....	23
<b>Лабораторна робота № 4</b> Дослідження мікроструктури чавунів .....	31
БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК .....	38
ДОДАТКИ .....	39

## ВСТУП

Метали та сплави на їх основі на сьогоднішній день, залишаються основними конструкційними матеріалами в галузі машинобудування. За статистикою використання, основна частка припадає на сплави чорних металів (до 90 %).

Широка розповсюдженість сталей обумовлена не тільки кількістю заліза як хімічного елемента, що добувають, але і визначеним співвідношенням між властивостями, що можна отримати при переробці. В порівнянні зі сплавами на основі інших металів, сталі при відносно низькій собівартості, мають достатньо високу твердість, міцність, пластичність. З незначними ускладненнями, сталі піддаються різноманітним за складністю, механічним та хіміко-термічним обробкам, що обумовлює отримання комплексу властивостей для виготовлення чисельних виробів, що застосовуються практично у всіх галузях промислового виробництва.

Дисципліна «Технологія конструкційних матеріалів та матеріалознавство» є обов'язковою складовою освітніх програм «Підйомно-транспортні, будівельні та колійні машини», «Експлуатація та ремонт техніки Держспецтрансслужби» та «Технічна експлуатація та сервіс автомобілів».

Дисципліною передбачається вивчення властивостей, областей застосування, способів одержання конструкційних матеріалів, які застосовуються при виготовленні транспортних засобів і промислових машин.

Методичні рекомендації до виконання лабораторних робіт призначені для підвищення студентами якості засвоєння матеріалу, що викладається. В результаті, студенти отримують джерело, яке стисло і в доступній формі допомагає отримати відповіді при оцінці якості засвоєного матеріалу. Для закріплення теоретичних знань та набуття необхідних практичних навичок, за програмою до розділу 1 «Металознавство», передбачається виконання 4 лабораторних робіт.

У процесі виконання лабораторних робіт студенти отримують практичні навички роботи на обладнанні для виконання металографічного аналізу, визначення твердості та гартування матеріалів, що дасть змогу сформулювати компетентності щодо опису складу, будови та марок матеріалів, передбачення структурних змін залежно від температури й хімічного складу, аналізу ефективності їх застосування в техніці. Студенти навчатимуться встановлювати тип сплаву за структурою, планувати дослідження механічних властивостей і визначати зв'язок між ними та експлуатаційними характеристиками виробів.

## **ЗАГАЛЬНІ ВИМОГИ ПРАВИЛ ТЕХНІЧНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ТА ОХОРОНИ ПРАЦІ ПІД ЧАС ВИКОНАННЯ РОБІТ В ЛАБОРАТОРІЇ МАТЕРІАЛОЗНАВСТВА**

До складу устаткування лабораторії матеріалознавства входять прилади, робота яких заснована на використанні електричної енергії, розчинів різноманітних хімічних речовин, формуванні середовища з підвищеною температурою та ін..

З метою запобігання травматизму дослідника (студента) повинна бути виконана низка вимог у визначеній послідовності:

1. На початку семестрових занять студент зобов'язаний пройти загальний інструктаж з ПТЕ і ПТБ при проведенні робіт на обладнанні лабораторії. Інструктаж фіксують у спеціальному журналі, де студенти, яких інструктують, та викладач, який інструктує, ставлять свої підписи. Студенти, які не пройшли інструктаж, до лабораторних занять не допускаються.

2. Перед початком виконання практичного завдання студент зобов'язаний засвоїти загальні положення правил технічної експлуатації (ПТЕ) і правил техніки безпеки (ПТБ) під час експлуатації лабораторного устаткування.

3. Виконувати завдання дозволяється тільки після отримання дозволу від викладача або лаборанта та ознайомлення з методами та прийомами правильного його виконання.

4. Робити налагодження, увімкнення твердомірів, мікроскопів та інших приладів, необхідних для проведення лабораторних робіт, слід тільки з дозволу та у присутності викладача або лаборанта.

5. У разі виявлення несправності використовуваного устаткування негайно припинити роботу і довести до відома викладача або лаборанта.

6. Під час полірування шліфів нахилити обличчя до полірувального верстата забороняється.

7. Під час проведення гартування зразків зі сталі дозволяється присутність біля муфельної електропечі не більше двох студентів.

8. У випадку появи ознак пошкодження обладнання чи устаткування (шум, дим, запах) чи раптового припинення подачі енергії потрібно негайно зупинити експеримент та вимкнути живлення. Доповісти керівникові та залишатися біля робочого місця, очікуючи на його подальше розпорядження.

Студенти, що не дотримуються вимог техніки безпеки, отримують попередження та повинні повторно опанувати вимоги до проведення експерименту.

### **ЗАГАЛЬНІ ВИМОГИ ДО СТУДЕНТІВ**

Кожна лабораторна робота передбачає обов'язкову самостійну підготовку, яка складається з систематичного використання доступних джерел інформації

таких, як підручники, методичні вказівки, спеціальна література та інтернет-видання. При виконанні кожної лабораторної роботи студенти повинні: з використанням знань самостійної підготовки до роботи, виконати експериментальні завдання у відповідності з методичними вказівками, здійснити аналіз отриманих результатів та сформулювати висновки. Виконану лабораторну роботу потрібно оформити у вигляді звіту за визначеною формою та захистити.

В процесі підготовки до роботи студенти зобов'язані заздалегідь ознайомитися з методичними вказівками, опанувати теоретичну частину та виконати завдання у відповідності вимог до самостійної підготовки. В результаті студенти повинні мати чітке уявлення стосовно мети роботи, її завдань, у визначеній мірі бути ознайомлені з обладнанням і засобами вимірювання, методиками розрахунків та очікуваними результатами. Якість самостійної підготовки студента контролюється викладачем на початку заняття. За недостатнього рівня якості підготовки, студенти до виконання лабораторної роботи не допускаються. Звіт з лабораторної роботи оформлюється за визначеною формою в зошиті, складається з декількох розділів у визначеній послідовності.

*Тема й мета роботи.* Записують тему й стисло формулюють мету роботи.

*Теоретичні відомості.* Стисло розглядається теоретична частина питань, які вивчаються. На початку, визначається сутність понять. За необхідністю, застосовують креслення спрощених схем обладнання для досліджень. Для розуміння теоретичних та отриманих експериментальних залежностей, в необхідній мірі використовуються аналітичні співвідношення. Це дає змогу визначити та зрозуміти причини впливу чинників, що призводять до зміни досліджуваних характеристик.

*Прилади та устаткування.* Студенти ознайомлюються з розташуванням в лабораторії устаткування для проведення досліджень. Отримують відомості стосовно принципу роботи устаткування, приладів для вимірювання характеристик та властивостей металевих матеріалів.

*Хід проведення роботи.* Після ознайомлення з загальним планом виконання роботи, під керівництвом викладача (майстра виробничого навчання) студенти розділяються на групи, що виконують визначену її частину. Після отримання основних навичок роботи з устаткуванням, студенти під наглядом або разом з викладачем, проводять обробку зразків за визначеною методикою. Після завершення досліджень окремою групою студентів, устаткування вимикається. Отримані результати з окремих груп студентів узагальнюються. Данні наводяться у вигляді таблиць (вхідні, експериментальні данні та отримані в результаті розрахунків) або за необхідності, будуються графічні залежності характеристик металевих матеріалів, від визначених чинників впливу. Далі, в зошиті стило робиться запис послідовності виконання роботи.

*Висновок.* При обробці експериментальних даних та формулюванні висновків, визначається фізична суть закономірностей. За можливістю, визначається значення опанованих питань вивчення спеціальних дисциплін за фахом.

## МІКРОАНАЛІЗ ЗРАЗКІВ ЗІ СТАЛІ

**Мета роботи:** навчитися самостійно готувати зразки зі сталі для досліджень їх внутрішньої будови за допомогою металографічного мікроскопу.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі задачі: 1. Ознайомитися з методикою виготовлення об'єкту для дослідження структури металу. 2. Ознайомитись з металомікроскопом та технікою його використання. 3. Навчитися самостійно проводити металографічний аналіз.

### Теоретичні відомості

*Мікроаналіз* – це процес дослідження особливостей внутрішньої будови металевих матеріалів (структури) з використанням металомікроскопу [1]. В якості об'єкту дослідження використовуються спеціально виготовлені непрозорі зразки, що мають назву «мікрошліфи». В широкому розумінні, мікроаналіз дозволяє визначити структуру металевих матеріалів після різноманітних обробок. Вирішення прикладних завдань складається з оцінки кількості неметалевих включень різної природи походження, розміру структурних складових, їх морфології тощо.

*Мікрошліфом* називають зразок металу, що спеціально підготовлений для дослідження структури з використанням металомікроскопу. Поверхня мікрошліфа повинна бути якомога більш плоскою та з мінімальною кількістю механічних ушкоджень при виготовленні.

Мікроаналіз металевих матеріалів складається з наступних етапів:

- виготовлення мікрошліфа;
- оцінка якості поверхні мікрошліфа з використанням мікроскопу;
- хімічна обробка поверхні мікрошліфа травником;
- дослідження структури металу з використанням металомікроскопа.

### Виготовлення мікрошліфа

#### 1. Вирізання зразків.

Зразок вирізають із тієї частини виробу, яка підлягає дослідженню і найбільш точно відображає структуру матеріалу. Вирізання здійснюється механічним способом із застосуванням охолодження, щоб уникнути перегріву та спотворення структури металу. Форма зразка зазвичай відповідає формі виробу (дріт, лист, пластина). Для масивних деталей (рама, вал, зубчасте колесо тощо) заготівку вирізають з окремого елемента, дотримуючись обмежень:

- циліндр – діаметр і висота до 10–15 мм (рис. 1.1, а);
- паралелепіпед – сторони до 10–15 мм (рис. 1.1, б).

Для зразків складної або неправильної форми застосовують заливку в обойму (рис. 1.1, в) зі швидкотверднучою сумішшю (бакеліт, епоксидна смола) або спеціальні струбцини – для тонких дротів чи листів (рис. 1.1, г).

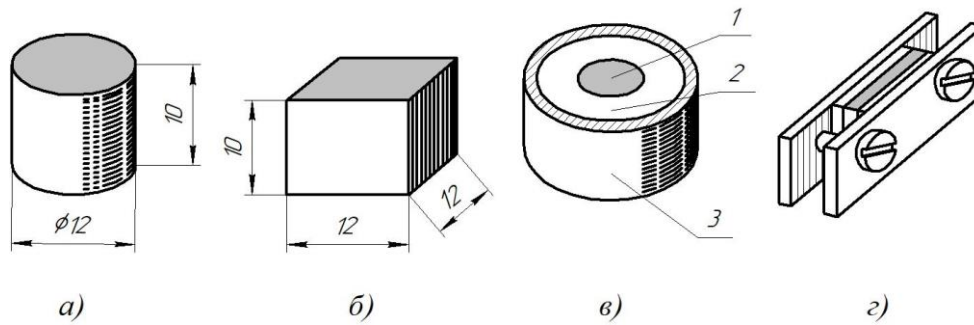


Рис. 1.1. Рекомендовані розміри металографічних зразків (а, б) і пристосування для виготовлення мікрошліфа (в, г):

1 – зразок; 2 – наповнювач; 3 – циліндрична обойма

## 2. Виготовлення плоскої поверхні зразків.

Під час виготовлення зразка необхідно вирівняти поверхню, яка в подальшому буде перетворена у шліф. Одержання плоскої поверхні зазвичай здійснюється обробкою на металорізальних верстатах із використанням різноманітного інструменту. Найчастіше застосовують устаткування з ріжучим інструментом у вигляді абразивних частинок.

## 3. Шліфування поверхні зразків.

Після виготовлення плоскої поверхні зразок піддають шліфуванню вручну або на спеціальних верстатах (рис. 1.2). На обертальних дисках 5 закріплюють шліфувальний папір із зернами абразиву різної дисперсності.



Рис. 1.2. Шліфувально-полірувальний верстат [2]:

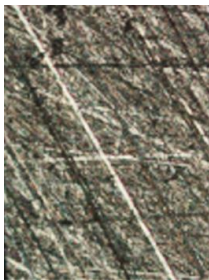
1 – пульт керування; 2 – стіл; 3 – кран для підводу охолоджувача (води); 4 – резервуар з суспензією для полірування; 5 – диски

Зразок притискають поверхнею шліфа до абразивного паперу, починаючи з грубого зерна (125–160 мкм) (таблиця 1.1), – до повного видалення слідів попередньої обробки (рис. 1.3, а). Далі переходять до паперу з дрібнішим зерном, що сприяє зменшенню шорсткості поверхні.

Під час зміни номера паперу зразок очищають і повертають на  $90^\circ$  відносно напрямку переміщення ріжучих елементів попереднього паперу (рис. 1.3, б, в). Температуру контролюють вручну; при перегріві (понад  $50\text{--}60^\circ\text{C}$ ) зразок охолоджують у воді. Для м'яких металів абразивний папір змочують гасом або натирають парафіном.

## Марки та характеристики абразивного паперу

Марка наждачного паперу, ISO 6344	Розмір зерна, мкм	Марка наждачного паперу, ISO 6344	Розмір зерна, мкм
P90	160...200	P400	28...40
P100	125...160	P600	20...28
P120	100...125	P1000	14...20
P150	80...100	P1200	10...14
P180	63...80	P1500	7...10
P240	50...63	P2000	5...7
P280	40...50	P2500	3...5



а



б



в



г

Рис. 1.3. Поверхня зразку після різних етапів механічної обробки:  
 а – після вирізки; б – після грубого шліфування; в – після тонкого шліфування;  
 г – після полірування

Різка зміна зернистості паперу не допускається – це може призвести до прихованих дефектів, які проявляться під час полірування або травлення.

Процес шліфування завершується обробкою зразка папером із найдрібнішими абразивними зернами (3...5 мкм) (див. рис. 1.3, г).

#### 4. Полірування поверхні зразків.

Після шліфування на поверхні зразка залишаються дрібні риски. Для їх усунення застосовується механічне полірування (рис. 1.4).

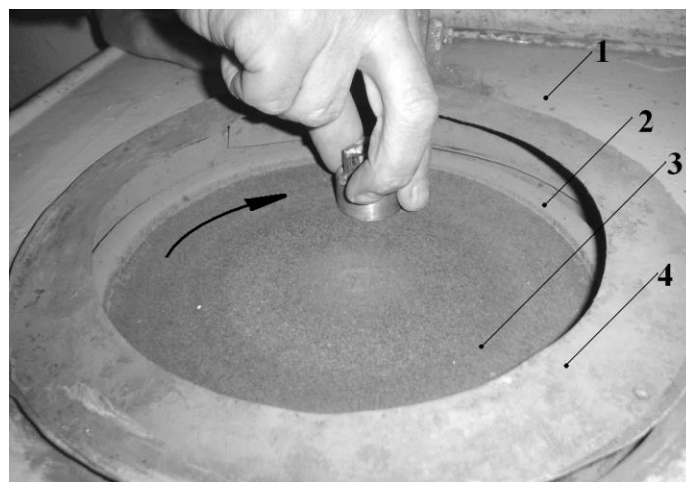


Рис. 1.4. Процес полірування на шліфувально-полірувальному верстаті:  
 1 – стіл верстата; 2 – диск; 3 – тканина з полірувальною речовиною; 4 – захисний кожух

Полірування проводиться на тканині (драп, фетр, сукно) з додаванням полірувальних сумішей – суспензій оксиду алюмінію, хрому або алмазних паст. Полірувальні частинки усувають залишкові дефекти після шліфування.

Якісним результатом полірування є відсутність механічних ушкоджень поверхні металу при спостереженні під мікроскопом (рис. 1.3, з).

Після полірування зразок промивають проточною водою, а потім етиловим спиртом. Висушують за допомогою фільтрувального паперу, прикладаючи його до підготовленої поверхні. Протирання поверхні фільтрувальним папером не рекомендується, щоб запобігти механічним ушкодженням. Для запобігання окисленню зразки зберігають в ексикаторах з хлоридом кальцію.

#### 2.5. Травлення поверхні зразків.

Дзеркальна поверхня зразка, отримана після полірування, не дає змоги дослідити структуру металевого матеріалу. На світлому полі мікрошліфа після полірування можна спостерігати лише механічні ушкодження або окремі фази у вигляді частинок неметалевих включень (сульфіди, оксиди), графіту в сірому чавуні тощо – завдяки їхньому різному забарвленню. Для виявлення мікроструктури поліровану поверхню зразка піддають травленню – обробці хімічними розчинами на основі кислот, лугів або солей, які вибірково розчиняють структурні складові.

Найбільш поширеним універсальним травником для великої кількості сплавів є розчин 2 ... 4 % азотної кислоти ( $HNO_3$ ) в етиловому спирті ( $C_2H_5OH$ ). Для визначення структурних елементів у сталях також застосовують травник розчину 3 ... 4 % пікринової кислоти в етиловому спирті.

Травлення проводять шляхом занурення поверхні шліфа в розчин. Якщо підготовлена площа є великою, застосовують крапельне нанесення розчину або протирання поверхні вовняним тампоном, змоченим реактивом. Внаслідок різного електродного потенціалу фаз окремі ділянки поверхні розчиняються по-різному, утворюючи рельєф, який формує видиму структуру металу.

Сутність процесу виявлення особливостей внутрішньої будови металів і сплавів методом травлення полягає в різному ступені розчинення або забарвлення окремих структурних чи фазових складових, що утворюють визначений сплав.

Різні структурні складові мають різний електродний потенціал. Коли поліровану поверхню сплаву покривають травником (електролітом), структурні або фазові складові з більш високим негативним електродним потенціалом стають «анодом» і починають розчинятися. Інші складові, з порівняно нижчим потенціалом, стають «катодом» і розчиняються менш інтенсивно. Якщо потенціал позитивний, такі ділянки можуть взагалі залишатися незмінними.

У результаті такого нерівномірного витравлювання металевого матеріалу на поверхні мікрошліфа утворюються ділянки з різною глибиною відносно початкової (до травлення) поверхні. Завдяки різному відбиванню світла численними западинами і виступами на поверхні шліфа формується візерунок, який має загальну назву – *структура* металевого матеріалу.

Якість травлення залежить від температури, концентрації та часу дії реактиву. Надто короткий час призводить до недостатнього виявлення структурних складових, а надто тривалий – до перетравлення. Виправити наведені недоліки можна лише повторенням операцій підготовки шліфа.

### Дослідження мікрошліфа

Після травлення мікрошліф досліджують за допомогою металографічного мікроскопа. Зображення формується завдяки різній здатності структурних елементів відбивати світло – це залежить від ступеня їх протравлення.

Для кращого розуміння цього явища розглянемо схему відбивання світла структурними елементами однофазного сплаву (рис. 1.5).

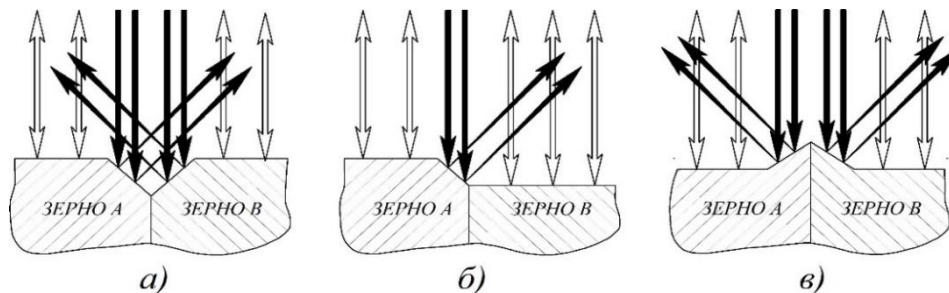


Рис. 1.5. Схема формування зображення від рельєфу поверхні однофазного сплаву

Експериментально встановлено, що межі зерен протравлюються сильніше, ніж їхні внутрішні об'єми. На цій підставі місця розташування меж зерен мають вигляд заглиблень на поверхні шліфа. Після відбивання світлових променів від меж зерен буде спостерігатися більше їх розсіювання (рис. 1.5, а), і на фоні світлих ділянок вони будуть мати вигляд темних ліній з різною формою викривлення. Крім того, площини сусідніх зерен мають різний ступінь затемнення (рис. 1.6).

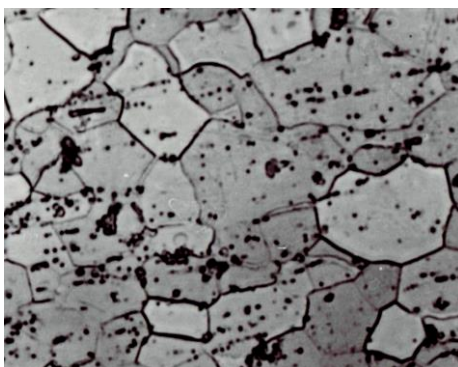


Рис. 1.6. Структура низьковуглецевої сталі після травлення в 4 % розчині  $\text{HNO}_3$  в спирті. Збільшення 200

Це явище пояснюється тим, що сам процес розчинення металу під час травлення заснований на різниці в щільності заповнення атомами кристалографічних площин при формуванні кристалу (зерна). Тобто, в межах одного зерна буде спостерігатися рівномірне затемнення площини. Однак, через різну оріє-

нтацію кристалічних решіток у сусідніх зернах змінюється щільність розташування атомів у площині мікрошліфа, і, як наслідок, різний ступінь затемнення зерен формуватиме загальну картину мікроструктури (рис. 1.6).

Окрім цього, на якість зображення структури визначеного впливу набуває існування локального рельєфу поблизу з межами зерен (див. рис. 1.5, б, в). На підставі цього, межі зерен можуть мати різну товщину та чіткість зображення.

Для багатофазних сплавів механізм формування зображення структури аналогічний до однофазного сплаву.

### Вертикальний металографічний мікроскоп МДМ-7

Мікроскоп МДМ-7 (мікроскоп дослідницький металографічний, типу 7) призначений для аналізу поверхні непрозорих металевих матеріалів у відбитому випромінюванні при збільшеннях від 60 до 1500 разів (рис. 1.7). Складається з трьох основних частин: освітлювача *I*, корпусу *II* і верхньої частини *III*.

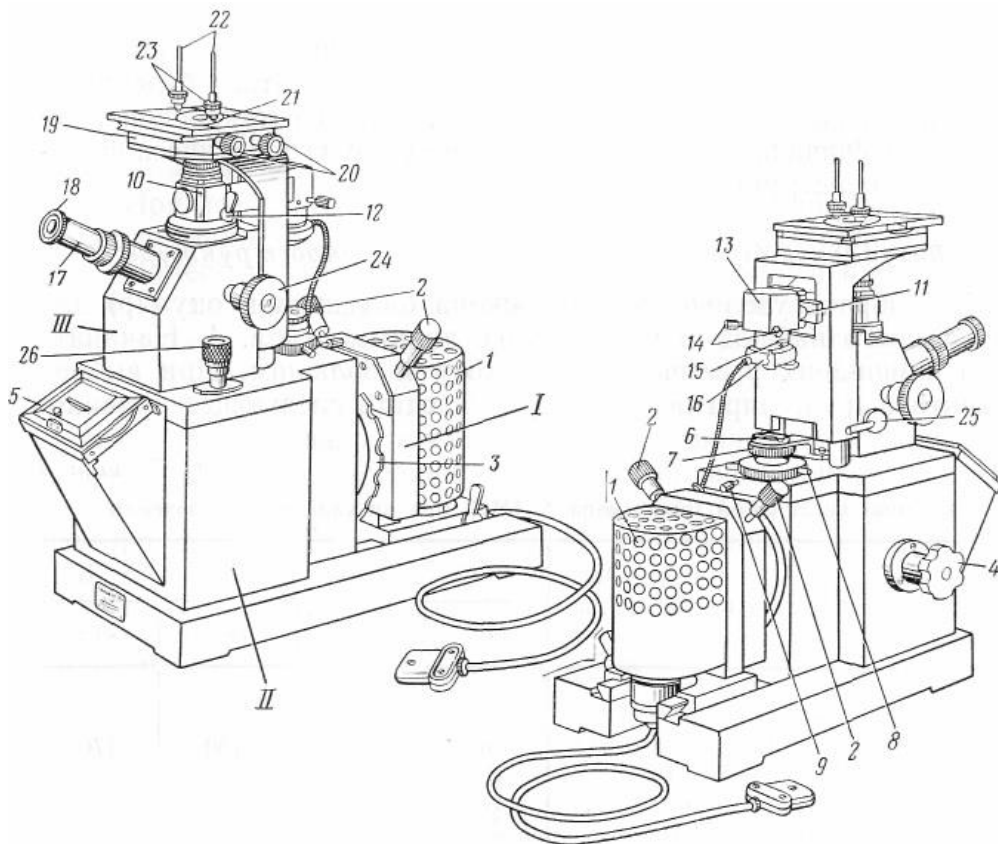


Рис. 1.7. Загальний вигляд мікроскопа МДМ-7

Освітлювач *I* є ліхтарем *I*, всередині якого розташована електрична лампа розжарювання. Гвинти *2* призначені для спрямування світлових променів лампи вздовж оптичної осі колектора.

У корпусі *II* мікроскопа розташовані: диск *3* з набором світлофільтрів; перемикач *4* для зміни режиму роботи (дослідження структури або її фотографування); касета *5* з фотопластинкою; елементи керування апертурною діафрагмою *6, 7*; гвинт *8* для створення косого освітлення; гвинт *9* фіксації повороту апертурної діафрагми.

Верхня частина *III* мікроскопа складається з наступних частин: **10** – місце розташування об'єктива (основна збільшувана оптична система); рамка з лінзами **11** – для аналізу структури в світлому або темному полі; **12** – керування діафрагмою **24** при роботі в темному полі; **13** – місце розташування пентапризми. **14, 15** – керування польовою діафрагмою; фотозатвор **16**; окуляр **18** (допоміжна оптична система збільшення). Предметний столик **19** дозволяє переміщувати зразок у горизонтальній площині завдяки обертанню гвинтів **20**. Елементи **22** і **23** призначені для фіксації зразка на предметному столику. Макрометричний гвинт **24** призначений для грубого, а гвинт **26** – для тонкого переміщення об'єктива в вертикальному напрямку з метою отримання якісного зображення.

### Оптична схема мікроскопа МДМ-7

Джерелом світла в металомікроскопі є електрична лампа **1** (рис. 1.8).

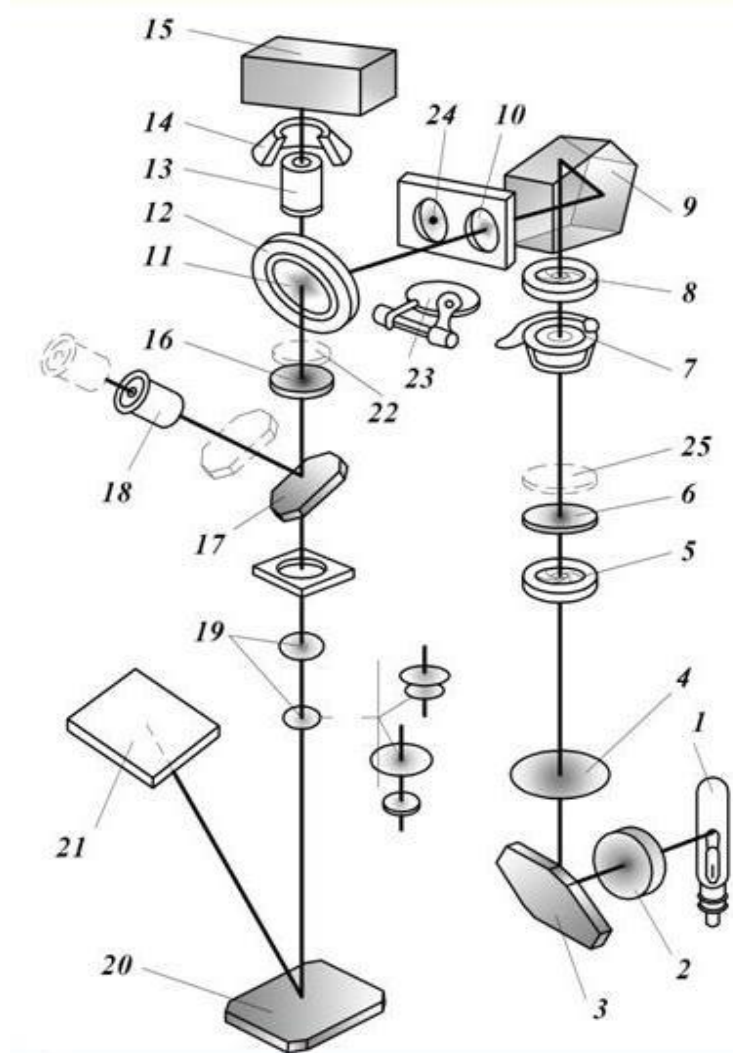


Рис. 1.8. Оптична схема мікроскопа МДМ-7

Світлові промені від електричної лампи **1** проходять через колектор **2** і, відбиваючись від дзеркала **3**, потрапляють на світлофільтр **4**. Далі вони прохо-

дять апертурну діафрагму **5** (для вирізання центральної частини пучка променя), лінзу **6**, фотозатвор **7**, польову діафрагму **8** (для регулювання розміру ділянки кола дослідження структури), заломлюються пентапризмою **9**, проходять через лінзу **10** і потрапляють на відбивну пластину (напівпрозоре дзеркало) **11**. Частина променів проходить крізь цю пластину і губиться, решта – через об'єктив **12** та допоміжні елементи **13** і **14** – потрапляє на мікрошліф **15**.

Після відбивання від поверхні мікрошліфа **15** промені знову проходять через об'єктив **12**, потрапляють на відбивну пластинку **11**, частково губляться, а решта проходить через окуляр **16** (оптична система через яку спостерігається структура).

Для фіксування мікроструктури матове скло **19** замінюється касетою з фотопластинкою. За необхідності проводять додаткові дослідження поверхні мікрошліфа в темному полі або з використанням поляризованого випромінювання, що застосовується для складних металографічних досліджень.

Якість зображення структури визначається сумарним ефектом від низки факторів: величини збільшення, роздільної здатності та досконалості оптики.

Загальне збільшення мікроскопа дорівнює добутку збільшень об'єктива і окуляра.

Роздільна здатність мікроскопа є величиною, що обернено пропорційна мінімальній відстані між розділеними елементами в досліджуваному об'єкті. Обмеження роздільної здатності оптичних систем обумовлене виникненням аберацій (викривлень зображення) та дифракційними явищами.

Аберації сферична та хроматична – є недосконалостями оптичних властивостей лінз. Якість зображення структури, отриманої за допомоги оптичних пристроїв, визначається ступенем усунення цих недоліків.

Сферична аберація полягає в неоднаковому заломлюванні променів краєм і центральною частиною лінзи, що призводить до виходу променів із фокуса  $P$  (рис. 1.9, а).

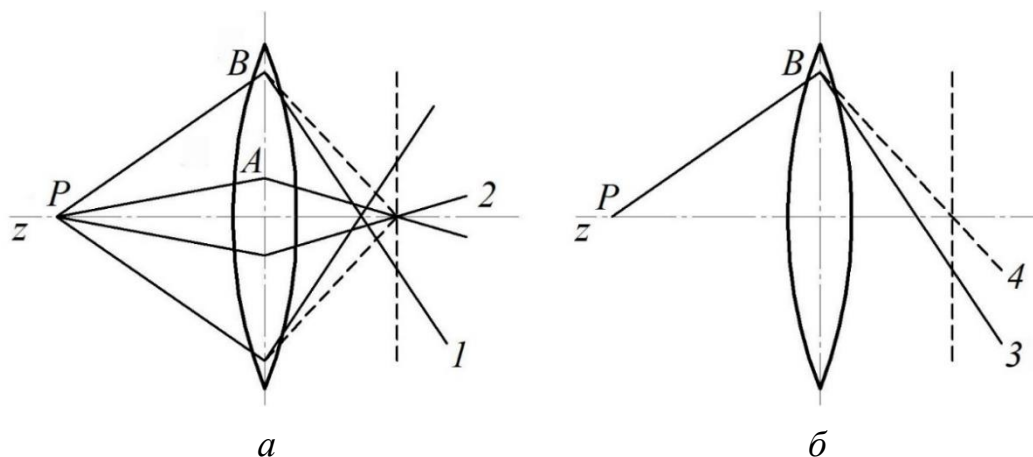


Рис. 1.9. Схема формування сферичної (а) і хроматичної (б) аберацій в звичайній лінзі [1]:

$P$ - $B$  – промені білого світла;  $A$  – центральні промені;  $B$  – крайні промені;  $1$  – зображення від крайніх променів;  $2$  – зображення від центральних променів;  $3$  – зображення від проходження фіолетових променів;  $4$  – зображення від проходження червоних променів

Після проходження променів через лінзу, на її оптичній осі замість одного фокуса формуються два (т. 1 і 2) – зображення стає нечітким. Зменшення сферичної аберачії досягається комбінацією декількох лінз (випуклих та вгнутих), які мають однакову, але протилежно спрямовану сферичну аберачію.

*Хроматична аберачія* (рис. 1.9, б) зумовлена зміною заломлення лінзою променів залежно від їхньої довжини хвилі. При проходженні білого світла через лінзу відбувається його розкладання на складові, і промені різного забарвлення не збігаються в одній точці. У результаті на екрані утворюється кілька різнокольорових зображень фокуса лінзи (рис. 1.10, а), що призводить до нечіткості зображення. Зменшення хроматичної аберачії досягається комбінацією лінз, виготовлених із різних сортів скла з відповідними показниками заломлення.

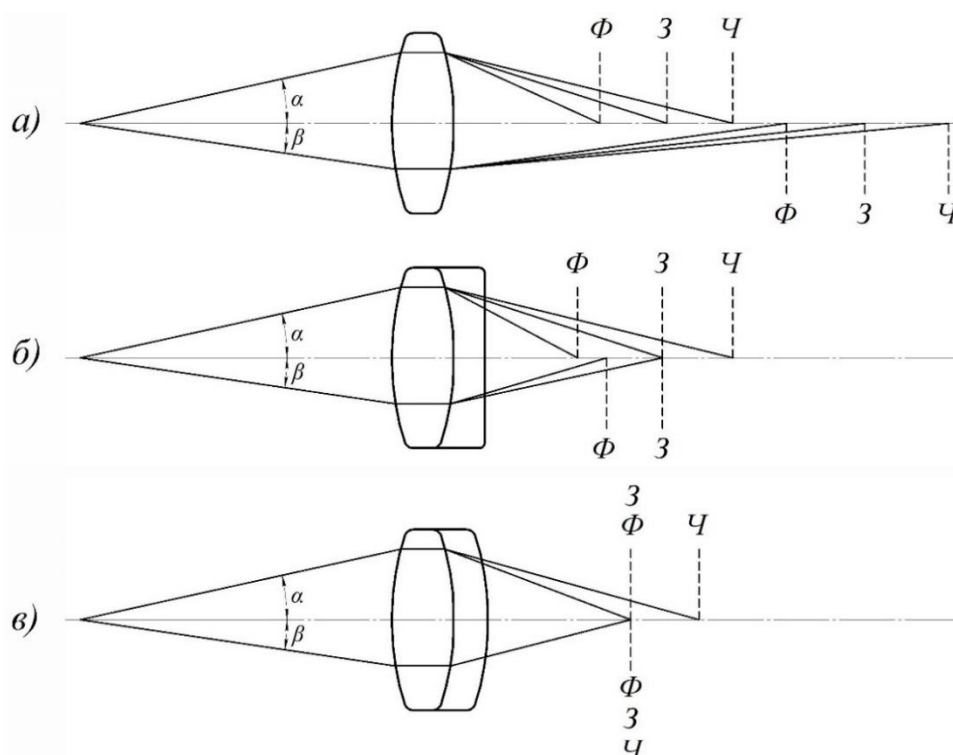


Рис. 1.10. Хроматична аберачія (а) в звичайній лінзі й схеми виправлення сферичної (б) і хроматичної (в) аберачій об'єктивів [1]:

$\alpha$  – косе;  $\beta$  – параксіальне випромінювання;  $\mathbf{ч}$  – червоні;  $\mathbf{ф}$  – фіолетові;  $\mathbf{з}$  – зелені промені

Усі об'єктиви до мікроскопів, залежно від їхніх оптичних властивостей і призначення, поділяють на ахромати та апохромати (рис. 1.10). У ахроматів виправлена сферична аберачія щодо одного кольору – жовто-зеленого спектра, який є найбільш важливим для візуального аналізу структури. Хроматична аберачія в них скоригована для жовто-зеленої та червоної частин спектра (рис. 1.10, б).

*Апохромати* (рис. 1.10, в) відрізняються більш високим рівнем корекції. Хроматична аберачія в них виправлена для всієї видимої частини спектра: червоні, зелені та фіолетові промені сходяться в одному фокусі. Сферична абе-

рація коригується лише для зелених, синіх та фіолетових променів, що є особливо важливим при фотографуванні структури.

### Лабораторне обладнання та матеріали

1. Металографічний мікроскоп МДМ-7.
2. Набір окулярів і об'єктивів до металографічного мікроскопу.
3. Шліфувально-полірувальний верстат.
4. Шліфувальний папір різних номерів, полірувальна тканина та суспензія.
5. Зразки з вуглецевої сталі.
6. Розчин травника.

### Порядок виконання роботи

1. Вибрати зразок із запропонованих викладачем, дізнатись марку сталі.
2. Демонстрація лаборантом етапів виготовлення мікрошліфа.
3. Виконати шліфування поверхні зразка за допомогою абразивного паперу різної зернистості (під контролем лаборанта).
4. Провести полірування робочої поверхні зразка до дзеркального блиску (під контролем лаборанта).
5. Демонстрація викладачем будови металомікроскопу, принципу його роботи та основних прийомів дослідження мікроструктури металів.
6. Встановити зразок на предметний столик металомікроскопу та налаштувати фокус та освітлення для отримання чіткого зображення.
7. Дослідити поліровану поверхню зразка при збільшенні  $\times 100$ . Зафіксувати результати спостережень у протоколі – замалювати чи вклеїти фотознімок.
8. Виконати хімічне травлення полірованої поверхні зразка для виявлення мікроструктури (під контролем лаборанта).
9. Повторити дії, описані в п. 6.
10. Дослідити травлену поверхню зразка при різних збільшеннях ( $\times 100$ ,  $\times 400$ ). Зафіксувати результати спостережень у протоколі – замалювати чи вклеїти фотознімок.
11. Визначити тип структурних елементів мікроструктури (ферит, перліт).
12. Порівняти отримані результати з теоретичними (для даної марки сталі).
13. Оформити звіт згідно з вимогами: включити опис методики, фотознімки, таблиці та висновки.

### Контрольні запитання

1. Пояснити суть металографічного аналізу.
2. Назвати основні етапи виготовлення мікрошліфа.
3. З якою метою застосовуються травники?
4. Пояснити принцип роботи мікроскопу МДМ-7.
5. Призначення світлофільтрів в мікроскопах?
6. Що представляє собою сферична аберация?
7. Що представляє собою хроматична аберация?

## ПОБУДОВА БІНАРНОЇ ДІАГРАМИ СТАНУ

**Мета роботи:** опанувати методику побудови бінарної діаграми стану  $Pb-Sn$ .

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі задачі: 1. Опанувати методику побудови кривих охолодження свинцю, олова та сплавів на їх основі. 2. За аналізом кривих охолодження визначити критичні точки відповідних сплавів. 3. Побудувати діаграму стану сплавів  $Pb-Sn$ .

### Теоретичні відомості

Діаграма стану – це графічне зображення стану сплавів залежно від температури нагрівання і співвідношення компонентів [3, 4]. *Компонентами* називають хімічні елементи, з яких складається різноманіття сплавів на їх основі.

За діаграмою стану визначаються умови розвитку процесів фазових перетворень, що використовують для розробки або удосконалення складу сплавів, з метою отримання потрібної структури та комплексу властивостей. Діаграми стану, окрім хімічних елементів, будуються у вигляді двокомпонентних систем, що утворюють сплави на їх основі. У загальному вигляді, залежно від хімічних властивостей компонентів, діаграми стану поділяють на чотири якісно різні типи. До одного з них належить діаграма стану з обмеженою розчинністю одного компонента в іншому. До цього типу належать сплави на основі свинцю та олова, які використовуються для виконання лабораторної роботи.

Вигляд діаграми стану з обмеженою взаємною розчинністю  $Pb$  і  $Sn$  наведено на рис. 2.1.

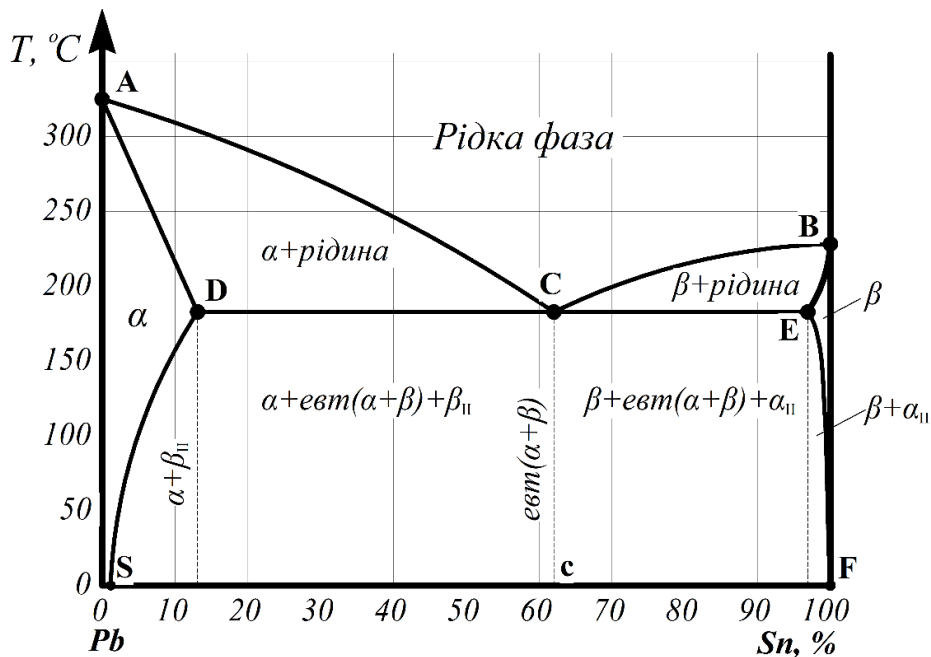


Рис. 2.1. Діаграма стану сплавів « $Pb-Sn$ »

Діаграма стану складається з ліній, які називаються «лініями фазової рівноваги». Вони, своєю чергою, обмежують ділянки існування сплавів із різним агрегатним і фазовим складом. Кожна діаграма стану складається з діаграм фазової рівноваги двох хімічних елементів (*Pb* і *Sn*) – з осями ординат для 100 % *Pb* (т. *A*) та 100 % *Sn* з (т. *B*), а також сплавів на їх основі.

Назви та позначення ліній фазової рівноваги

**ACB** – лінія ліквідус, яка відповідає умовам початку кристалізації під час охолодження та завершення плавлення сплаву при нагріві.

**ADCEB** – лінія солідус, що відповідає умовам завершення кристалізації при охолодженні та початку плавлення при нагріванні сплаву.

**ADS** – лінія зміни межі розчинності олова в свинці.

**BEF** – лінія зміни межі розчинності свинцю в олові.

**DCE** – лінія евтектичного перетворення (температура кристалізації евтектики – 183 °С).

*Критичними точками* діаграми стану називають місця перетину ліній фазової рівноваги. Їхні позначення та назви:

**A** – температура кристалізації та розплавлення свинцю (327 °С);

**B** – температура кристалізації та розплавлення олова (232 °С);

**C** – температура кристалізації (183 °С) сплаву евтектичного складу (62 % *Sn* + 38 % *Pb*);

**D** – максимальна концентрація розчинності олова (13 %) у твердому розчині на основі свинцю при температурі 183 °С;

**E** – максимальна концентрація розчинності свинцю (4 %) у твердому розчині на основі олова при температурі 183 °С.

Назва ділянок діаграми, що відповідають різному стану сплавів

Ділянка, що обмежена лінією **ADS** є областю існування твердого розчину олова в свинці, позначається « **$\alpha$** ». Ділянка, що обмежена лінією **BEF** є областю існування твердого розчину свинцю в олові, позначається « **$\beta$** ».

Зі зниженням температури розчинність олова в свинці (за лінією **DS**) і свинцю в олові (за лінією **EF**) зменшуються. Внаслідок цього з твердих розчинів виділяються атоми компонента, що додається до розчину. Це сприяє збільшенню кількості відповідної фазової складової, хоча і з іншим співвідношенням компонентів – утворюються вторинні кристали  **$\alpha_{II}$**  і  **$\beta_{II}$** . Одна з причин наведеного явища – зменшення параметру кристалічних решіток відповідних компонентів сплаву при охолодженні.

За діаграмою, сплави класифікують з визначеними назвами: до-, за- і евтектичні сплави. Так, сплав із вмістом 62 % *Sn* і 38 % *Pb* має назву «**евтектика**», оскільки при охолодженні рідина ізотермічно розпадається на суміш з двох твердих фаз –  **$\alpha$** - і  **$\beta$** . Кристалізується евтектика при постійній температурі 183 °С та незмінному співвідношенні фаз.

**Доевтектичним сплавам** (див. рис. 2.1) відповідає ділянка діаграми від т. *S* до т. *c*, по осі абсцис. Такі сплави складаються з первинних кристалів  **$\alpha$** -

твердого розчину, евтектики ( $\alpha + \beta$ ), що формуються при кристалізації з рідкої фази. Додатково формуються вторинні кристали ( $\beta_{II}$ ), які виникають унаслідок збіднення осередків  $\alpha$ -твердого розчину на атоми олова при охолодженні сплаву. Первинні кристали  $\alpha$ -твердого розчину мають змінний хімічний склад, що відповідає лінії  $AD$  на діаграмі стану.

**Заевтектичним сплавам** відповідає ділянка діаграми від т.  $c$  до т.  $F$ , по осі абсцис. Такі сплави складаються з первинних кристалів  $\beta$ -твердого розчину, евтектики ( $\alpha + \beta$ ), що формуються при кристалізації з рідкої фази. Первинні кристали  $\beta$ -твердого розчину мають змінний хімічний склад у відповідності лінії  $CB$ . Додатково формуються вторинні кристали ( $\alpha_{II}$ ), які виникають унаслідок збіднення осередків  $\beta$ -твердого розчину на атоми свинцю при охолодженні сплаву.

### Методика побудови діаграми стану

Діаграми стану будуються за декількома методами, один із них – термічний. Наведений метод буде використано під час виконання лабораторної роботи. Метод заснований на аналізі кривих охолодження хімічних елементів і сплавів на їх основі з метою визначення критичних точок, що відповідають фазовим перетворенням, в залежності від температури та співвідношення компонентів. За розташуванням критичних точок, (з кривих охолодження) у площині та їх з'єднання лініями, будується діаграма стану. Як приклад, розглянемо сплав із 80%  $Pb$  і 20%  $Sn$  та методику побудови кривої охолодження для нього (рис. 2.2)

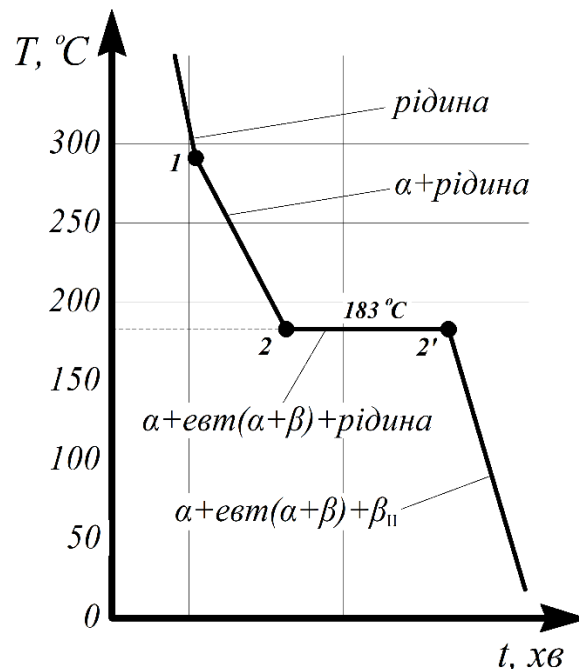


Рис. 2.2. Крива охолодження сплаву 80 %  $Pb$  + 20 %  $Sn$

Крива будується в прямих координатах: температура (вісь ординат) – термін часу (вісь абсцис). Після перегріву сплаву до температур, вищих за температуру завершення плавлення, в процесі охолодження за відповідний термін

часу визначаються значення температури. Парним нанесенням експериментальних значень температури (вісь ординат) проти терміну вимірювання часу (вісь абсцис) визначаються координати точок у площині побудови кривої охолодження. Після з'єднання вказаних точок лініями отримаємо криву охолодження (див. рис. 2.2).

За аналізом кривої охолодження, момент порушення монотонного характеру зниження температури з часом приймається як свідчення про зміну агрегатного або фазового складу сплаву.

На ділянці кривої з надмірним розігрівом рідини зниження температури має монотонний характер з відповідним значенням кутового коефіцієнту. У визначений момент зміна темпу зниження температури відповідатиме початку фазових перетворень (друга ділянка) з іншим значенням кутового коефіцієнту. Цей момент позначаємо  $t_1$ , а відповідна температура –  $295\text{ }^\circ\text{C}$  – буде початком виділення з рідини твердої фази.

Для обраного співвідношення  $Pb$  і  $Sn$  в сплаві, такою фазою буде  $\alpha$ -твердий розчин. На ділянці від  $t_1$  до  $t_2$ , монотонний характер зниження температури свідчить про продовження процесу кристалізації. В момент досягнення  $t_2$  відбувається формування ізотермічної ділянки при температурі  $183\text{ }^\circ\text{C}$ , з терміном тривалості  $t_2 - t_2'$ . На цій ділянці відбувається кристалізація рідини у вигляді формування евтектики. На ділянці за  $t_2'$  продовжується охолодження сплаву в твердому стані.

За аналогічною методикою будуються криві охолодження хімічних елементів (свинцю і олова) і визначеної кількості сплавів на їх основі з різним співвідношенням компонентів. За аналізом кривих охолодження визначаються координати критичних точок досліджуваних сплавів, що складають основу діаграми стану. Після з'єднання критичних точок лініями отримаємо діаграму стану «свинець – олово» (рис. 2.3).

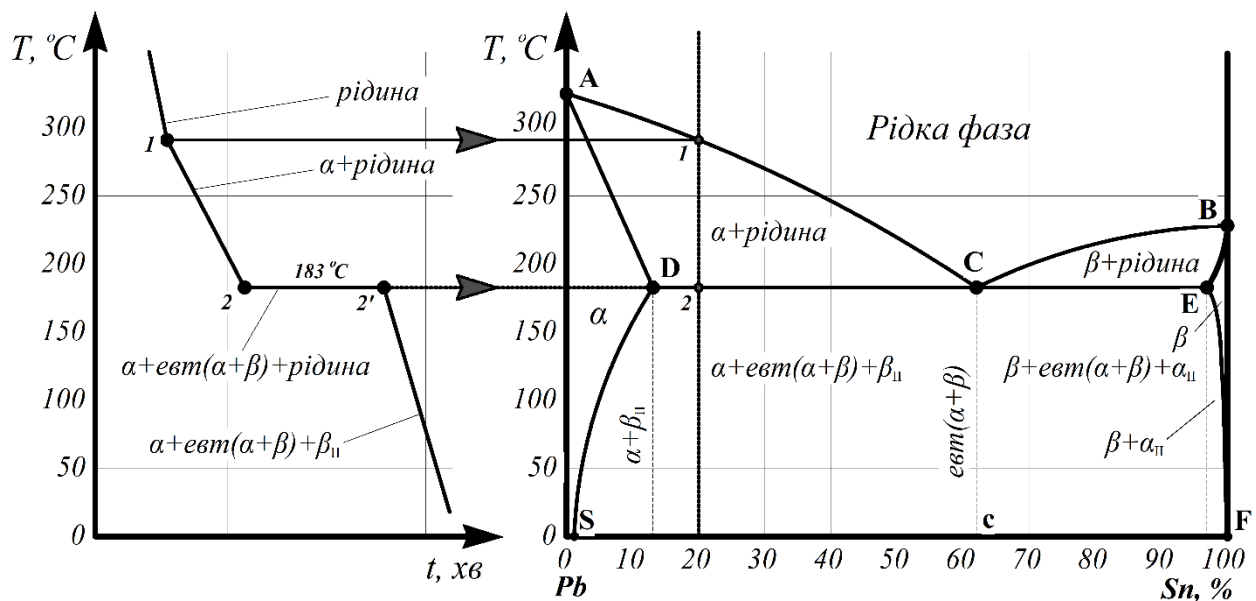


Рис. 2.3. Методика будови діаграми стану сплавів на основі свинцю і олова

Приклад структури сплаву *Pb-Sn* і схематичне зображення фазових складових наведені на рис. 4.

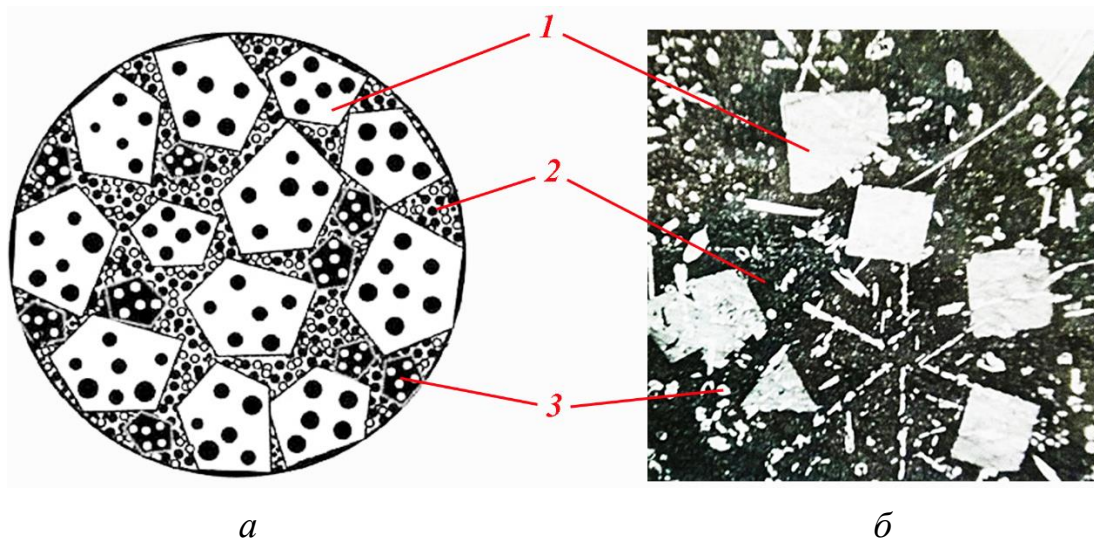


Рис. 4. Схематичне зображення фазових складових (а) та структура сплаву (б) з 17 % *Pb* і 83 % *Sn*:

1 – хімічні сполуки; 2 –  $\alpha$ -твердий розчин; 3 – евтектика

#### Лабораторне обладнання

Нагрів зразків з олова, свинцю та сплаву на їх основі для будови кривих охолодження здійснюють в печах типу СУОЛ (рис. 5).

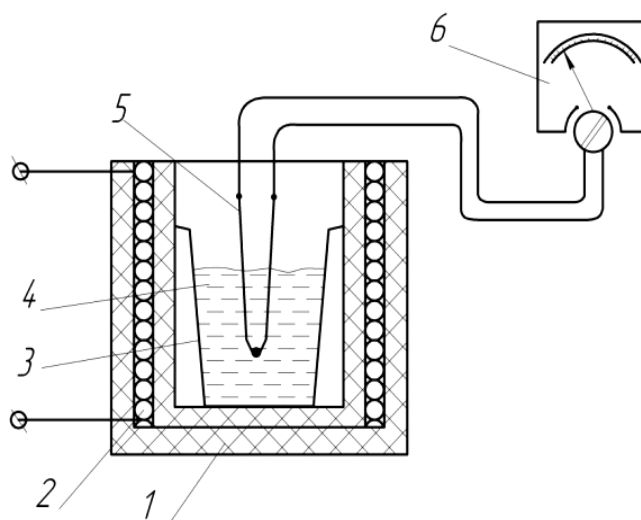


Рис. 5. Схема стану для побудови кривої охолодження:

1 – теплоізоляція печі; 2 – нагрівальний елемент; 3 – тугоплавкий тигель; 4 – розплавлений метал; 5 – термопара; 6 – гальванометр

Розплавлення при нагріві і кристалізація при охолодженні сплавів здійснюється в спеціальному посуді, що має назву «тигель». Виготовляють тиглі з матеріалу, що дозволяє витримувати без ознак руйнування чисельні нагріву до температур, достатніх для розплавлення досліджуваних сплавів.

Температура сплаву вимірюється термопарою хромель-алюмель за показниками гальванометра через визначені проміжки часу. Час вимірюється секундоміром.

#### Порядок виконання роботи

1. Помістити в окремі тиглі зразки, видані викладачем (олово, свинець, евтектика чи інші сплави відповідних компонентів).
2. Розташувати тиглі в електричних печах.
3. Увімкнути печі та розігріти метали і сплави до температур, вищих на 30...50 °С за теоретичні температури плавлення.
4. Вимкнути печі і розташувати тиглі з рідиною на відкритому повітрі для охолодження.
5. Під час охолодження кожної речовини окремо визначати показання гальванометра через рівні проміжки часу (10 або 15 секунд).
6. Процес охолодження продовжувати до температур, які на 30...50 °С нижчі за теоретичну температуру фазових перетворень (критичних точок). Результати досліджень занести до таблиці 1.

Таблиця 1

Результати вимірювань	
Сплав _____	
<i>t, c</i>	<i>T, °C</i>

7. Побудувати графічно, в масштабі, криві охолодження досліджуваних металів і сплавів за даними табл. 1.
8. За аналізом кривих охолодження визначити критичні точки досліджуваних металів і сплавів (т. 1, 2, рис. 2.3).
9. Побудувати діаграму стану *Pb-Sn* за методикою аналізу кривих охолодження (рис. 2.3).
10. Оформити звіт з лабораторної роботи.
11. Сформулювати висновки.

#### Контрольні запитання

1. Що називають «діаграмою стану»?
2. Призначення діаграми стану?
3. Що таке «крива охолодження» і яким чином її будують?
4. Для чого потрібна крива охолодження?
5. З яких ліній складається діаграма стану ?
6. Що представляють собою критичні точки?
7. До яких типів відносяться сплави за діаграмою стану *Pb-Sn*?

## ГАРТУВАННЯ СТАЛІ

**Мета роботи:** дослідження впливу величини температури нагріву сталевих зразків на зміну їх мікроструктури та твердості після гартування.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі задачі: 1. Набуття практичних навичок проведення процесу гартування сталі. 2. Визначення оптимальної температури та витримки при нагріванні сталі для гартування. 3. Опанування методик вимірювання твердості за Брінеллем і Роквеллом. 4. Порівняльний аналіз отриманих мікроструктур і значень твердості.

### Теоретичні відомості

*Термічною обробкою* називають сукупність операцій з нагрівання, витримки та охолодження металевих матеріалів, що супроводжуються визначеною зміною їх внутрішньої будови і комплексу властивостей [3]. За діаграмою стану (рис. 3.1, а) критичне значення температури  $A_1$  (лінія  $PSK$ ) є незалежним від вмісту вуглецю в сталі. Відповідає перетворенню перлиту в аустеніт при нагріві та аустеніту на перліт при охолодженні.

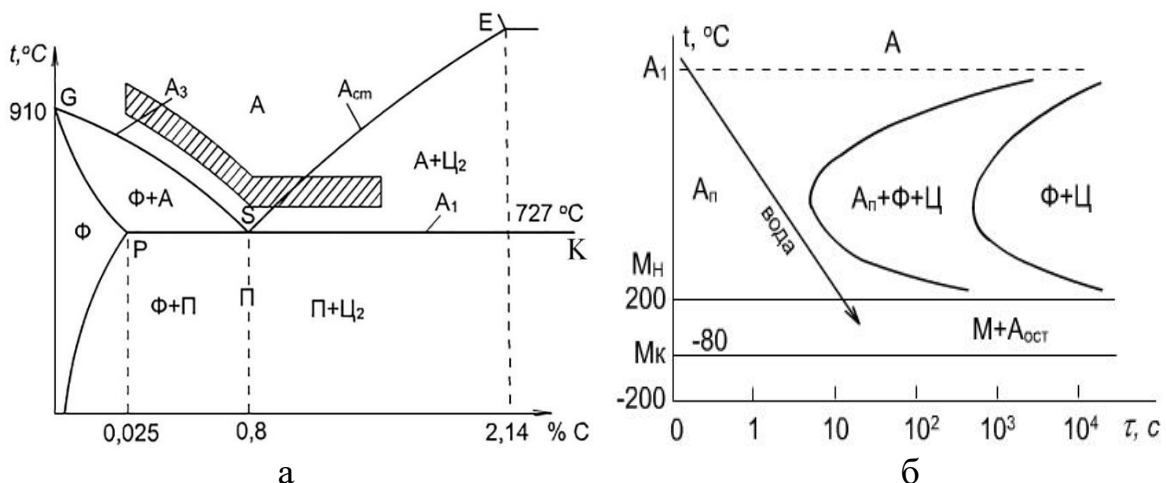


Рис. 3.1. Фрагмент діаграми стану  $Fe-C$  (а) і термокінетична діаграма для евтектоїдної сталі (б)

Значення температури  $A_3$ , навпаки, залежить від вмісту вуглецю в сталі. Геометричне місце вказаних точок утворює лінію  $GS$ . За  $A_3$  визначаються температури закінчення утворення повністю аустенітної структури при нагріванні і початку виділення зерен фериту з аустеніту під час охолодження. Температура  $A_{cm}$  відноситься до заевтектоїдних сталей. Як і  $A_3$ , залежить від вмісту вуглецю. Точки (значення)  $A_{cm}$  утворюють лінію  $SE$ , за якою визначається момент закінчення розчинення цементиту (вторинного) в аустеніті при нагріванні і початку його виділення з аустеніту при охолодженні.

**Гартування** полягає в нагріванні сталі до температури, вищої за критичне

значення, витримці при цій температурі для завершення фазового перетворення (формування аустеніту) і подальшому прискореному охолодженні зі швидкістю, вищою за критичне значення [5]. У загальному виді метою гартування є досягнення максимальної твердості. Однак, за необхідності, гартуванню можуть піддаватися сталі з різним ступенем завершення фазових перетворень. Залежно від температур нагрівання і ступеня завершення фазових перетворень гартування поділяють на повне та неповне.

**Повним гартуванням** називають нагрівання сталей до температур, вищих за  $A_{c3}$  (лінія  $GS$ ) або  $A_{cm}$  (лінія  $SE$ ) (див. рис. 3.1, *a*), витримку при цій температурі для завершення фазових перетворень (формування повністю структури аустеніту і вирівнювання його хімічного складу по об'єму зразка) та наступне охолодження зі швидкістю, вищою за критичне значення. У результаті формується структура вуглецевої сталі, що складається виключно з кристалів пересиченого твердого розчину атомів вуглецю в  $\alpha$ -фериті. За прізвиськом А. Мартенса наведену фазу називають «*мартенсит*».

**Неповним гартуванням** називають обробку, що складається з нагрівання до температур, вищих за лінію  $GSK$  але нижчих за  $A_{c3}$  або  $A_{cm}$ , витримки при цій температурі і наступним охолодженням зі швидкістю, вищою за критичне значення. У результаті формується структура, що складається з двох фаз: зерен фериту і кристалів мартенситу – для доевтектоїдних сталей, або з частинок цементиту і кристалів мартенситу – для заевтектоїдних.

#### Температура нагріву для гартування

Враховуючи, що температура нагрівання є одним із основних параметрів гартування, її визначають за діаграмою стану (див. рис. 3.1, *a*) залежно від вмісту вуглецю. Розрізняють температури «теоретичні», що визначаються за діаграмою стану, і «практичні» – рекомендуються для нагрівання під гартування.

Теоретичні значення критичних температур не відображають термін часу, за який відбуваються фазові перетворення. З метою врахування інертності процесу фазових перетворень при нагріванні й охолодженні сплавів, для практичного застосування використовують відкориговані температури. Для визначення температури для нагрівання теоретичне значення збільшують, а при охолодженні, навпаки, зменшують на визначену величину. Температури критичних точок для різних сталей наведені в додатку 1.

Рекомендований додаток для переходу від теоретичної до реальної температури визначається експериментальним шляхом. Так, для доевтектоїдних сталей повне гартування здійснюється за нагріву до температур:  $T_{II}=A_{c3}+20-30$  °C, а неповного гартування:  $T_H=A_{c1}+20-30$  °C.

Для заевтектоїдних сталей умови повного гартування досягаються нагріванням до температур:  $T_{II}=A_{cm}+20-30$  °C, а неповного гартування:  $T_H=A_{c1}+20-30$  °C. Більш наглядно рекомендовані температури нагрівання для гартування вуглецевих сталей представлені штрихованою ділянкою на рис. 3.1, *a*.

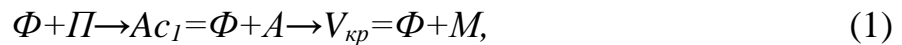
Тривалість витримки при температурі нагрівання повинна бути достатньою для формування потрібного фазового складу перед гартуванням.

Загальний термін складається з тривалості нагрівання зразка до потрібної температури та витримки. На практиці термін витримки в хвилини призначається рівним максимальному розміру зразка в [мм]. Приблизні норми часу нагрівання вуглецевих сталей в електричних печах наведені в додатку 2.

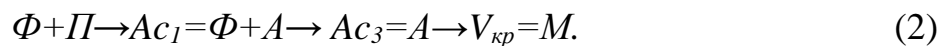
Фазовий склад вуглецевих сталей після нагрівання і гартування

За температур нагріву і умов охолодження, в вуглецевих сталях відбуваються фазові перетворення у визначеній послідовності.

Фазові перетворення в доевтектоїдних сталях після неповного гартування:

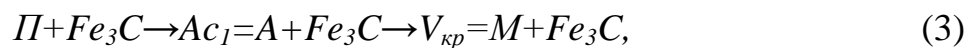


після повного гартування:

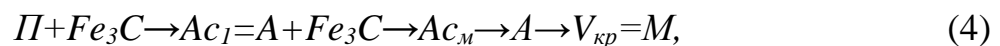


Аналогічні фазові перетворення для заевтектоїдних сталей мають вигляд:

– після нагрівання і неповного гартування:



– після нагрівання і повного гартування:



де  $A_{c1}$  і  $A_{c3}$  – відповідні температури нагріву;  $\Phi$  – ферит;  $\Pi$  – перліт;  $A$  – аустеніт;  $Fe_3C$  – цементит;  $M$  – мартенсит;  $V_{кр}$  – критична швидкість.

Критичною швидкістю вважають мінімальну швидкість охолодження сталі, за якої відсутні ознак дифузійного перетворення аустеніту (утворюється структура мартенситу) [6]. Визначається за аналізом термокінетичної діаграми охолодження визначеної сталі (рис. 3.1, б). Характеристики основних охолоджуючих середовищ для гартування наведені в додатку 3.

Загальні відомості про методики вимірювання твердості

*Твердість* – це міра опору матеріалу зануренню в нього іншого, більш твердого тіла (індентору) [1, 3]. Позначається твердість літерою «Н» з відповідною ознакою щодо методики її визначення. Існує багато методик визначення твердості. При виконанні лабораторної роботи були використані методики за Бринеллем і Роквеллом, з відповідним позначенням твердості – «НВ» і «HR».

**Вимірювання твердості за Бринеллем.** В якості індентора використовується кулька, за величиною занурення якої визначається твердості матеріалу. Позначається твердість символом «НВ» з числом, що відповідає значенню в [кг/мм<sup>2</sup>]. Діаметр кульки визначається товщиною зразка і рівнем його твердості. За методикою індентор піддається постійному навантаженню протягом певного періоду часу. В залежності від діаметра кульки рівень навантаження ( $P$ ) становить 5000, 15000 і 30000 Н для кульок діаметром 2,5, 5 та 10 мм відповідно. Після завершення випробування на поверхні зразка залишається відбиток від індентора (рис. 3.2, а). За його аналізом визначається міра твердості.

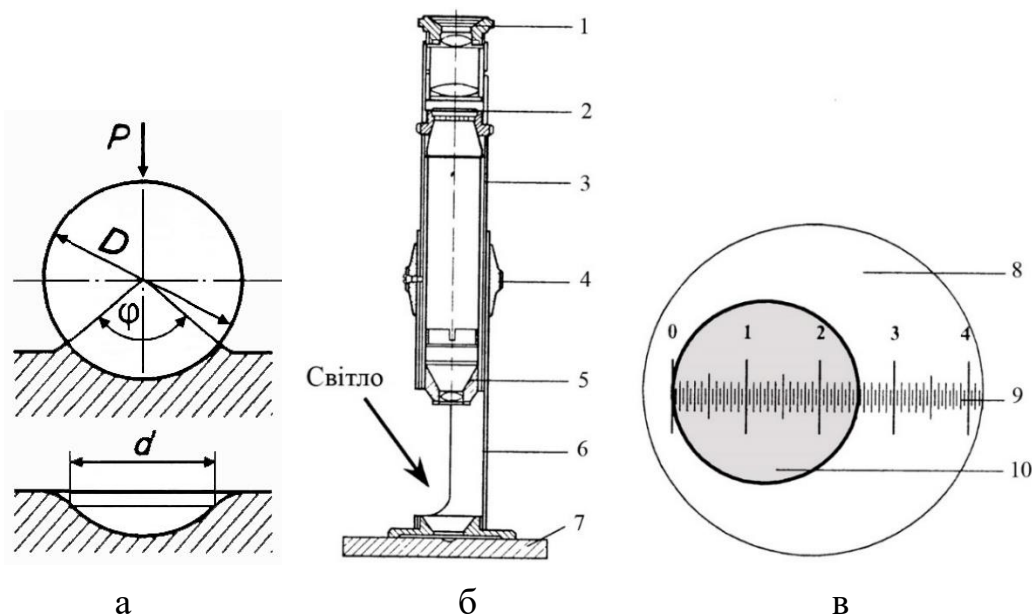


Рис. 3.2. Схема утворення відбитку (а), мікроскоп Бринелля (б) і зображення відбитка під мікроскопом (в):

1 – окуляр; 2 – шкала; 3 – тубус; 4 – регулятор чіткості зображення; 5 – об’єктив; 6 – корпус; 7 – зразок; 8 – поле зору мікроскопа; 9 – шкала з ціною поділки 0.05 мм; 10 – відбиток

В загальному вигляді міра твердості  $HB$  визначається як відношення навантаження  $P$  [кгс] до площі сферичного відбитку  $F$  [мм<sup>2</sup>] (рис. 3.2, а):

$$HB = \frac{P}{F} \quad (5)$$

$$F = \pi D h \quad (6)$$

де  $D$  – діаметр кульки [мм];  $h$  – глибина відбитка [мм].

Методичні ускладнення та підвищений рівень геометричних викривлень за прямого вимірювання  $h$  усуваються використанням співвідношення (7):

$$h = \frac{D - \sqrt{D^2 - d^2}}{2} \quad (7)$$

З урахуванням співвідношень (6) і (7) залежність (5) приймає вигляд:

$$HB = \frac{2P}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})} = \frac{2P}{\pi D^2 \left[ 1 - \sqrt{1 - \left(\frac{d}{D}\right)^2} \right]} \quad (8)$$

Застосування співвідношення (8) дозволяє у досить простій формі визначити значення твердості. Враховуючи, що  $d$  є змінною характеристикою, дані розрахунку  $HB$  за (8) наводяться у вигляді таблиці (додаток 4).

При виконанні лабораторної роботи використовується прес типу ТШ (рис. 3.3) з кулькою діаметром 10 мм і навантаженням 30000 Н.

Методика досліджень складається з визначеної послідовності операцій.

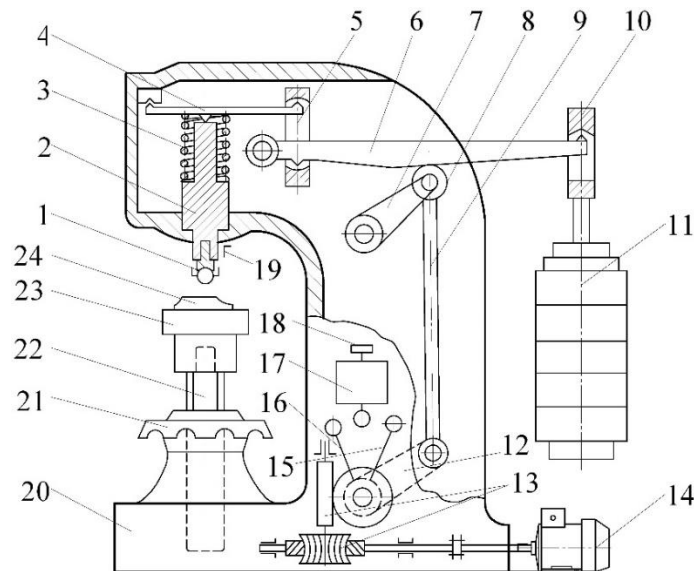


Рис. 3.3. Кінематична схема пресу типу ТШ для вимірювання твердості за Брінеллем:

1 – наконечник з кулькою; 2 – шпindelь; 3 – пружина; 4 – мале коромисло; 5 – опорна скоба; 6 – велике коромисло; 7 – важіль; 8 – опорний ролик; 9 – шток; 10 – опора; 11 – навантаження; 12 – кривошип; 13 – черв'ячний редуктор; 14 – електродвигун; 15, 16 – відповідно нерухомий і рухомий обмежувачі автоматичного перемикача; 17 – перемикач; 18 – кнопка пуску; 19 – обмежувач; 20 – корпус; 21 – маховик; 22 – гвинт; 23 – стіл; 24 – зразок

Так, індентор **1** у вигляді кульки діаметром 10 мм встановлюють у шпindelь пресу **2**. Зразок **24** розташовують на столі **23**. Обертання маховика **21** та гвинта **22**, столик піднімають до контакту зразка з кулькою та подальшим стикуванням пружини **3** до обмежувача **19**. Це навантаження (980 Н) призначене для прибирання люфту в механізмі навантаження та запобігання неконтрольованому зміщенню зразка під час випробувань. За призначенням відноситься до розряду «інструментального».

Основне навантаження прикладається під час вмикання двигуна **14**, який через редуктор **13**, кривошип **12**, шток **9**, опорний ролик **8** опускає коромисло **6**. Коромисло **10** через елементи навантаження **11**, скобу **5** і мале коромисло **4** навантажує шпindelь **2**, що забезпечує втискання індентора у зразок. Час навантаження кульки регулюють розташуванням обмежувачів **16** і **15**, встановлених на валу редуктора. Після завершення терміну навантаження, для розвантаження кульки, перемикач **17** спрямовує обертання двигуна в реверсивному напрямку. Обертання маховика **21** опускають столик та знімають зразок.

Далі, для вимірювання діаметра відбитка використовується мікроскоп МПБ-2 (рис. 3.2, б). У корпус **6** мікроскопа вставлений тубус **3** з вмонтованими окуляром **1**, об'єктивом **5** та сіткою зі шкалою **2** для вимірювання діаметра відбитка (рис. 3.2, в). Обертання окуляра **1** і кільця **4** досягають чіткого зображення контуру відбитка. Діаметр відбитка визначається як середньоарифметичне значення від вимірювання у двох перпендикулярних напрямках. За таблицею (див. додаток 1) або за (8) знаходять твердість. Для кожного відбитка вимірювання повторюють не менш як три рази.

**Вимірювання твердості за Роквеллом.** За методикою передбачається використання індентора у вигляді конуса або кульки. За шкалами *A* і *C* використовують індентор у вигляді конуса з кутом при вершині  $120^\circ$  (рис. 3.4, *a*), або сталевій кульки після гартування (шкала *B*) (рис. 3.4, *б*).

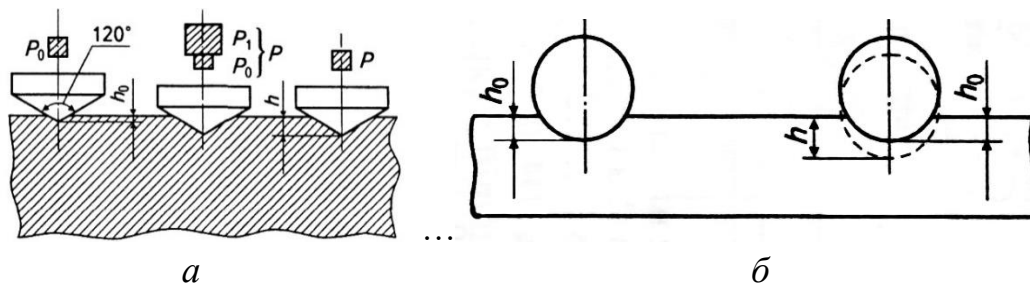


Рис. 3.4. Схема вимірювання твердості за шкалами *A* і *C* (*a*) та *B* (*б*)

В залежності від форми індентора використовується різне навантаження ( $P$ ). За шкалою *A* величина  $P$  дорівнює 600 Н, за *B* –  $P=1000$  Н, за *C* –  $P=1500$  Н, з відповідним позначенням твердості: *HRA*, *HRB*, *HRC*. Додаткові данні щодо вибору параметрів випробувань наведені в додатку 5.

Число твердості за шкалами *A* та *C* визначається співвідношенням:

$$(HRA, HRC) = 100 - \frac{h - h_0}{0,002} \quad (9)$$

а для шкали *B*:

$$(HRB) = 130 - \frac{h - h_0}{0,002} \quad (10)$$

де  $h$  і  $h_0$  – глибина занурення індентора під дією загального і інструментального навантаження (100 Н) відповідно; 0,002 [мм] – глибина занурення індентора за поділкою шкали індикатора.

Для вимірювання твердості за Роквеллом в лабораторії кафедри використовується прилад ТК-2 (рис. 3.5, *a*). Значення твердості визначаються за показниками циферблату на індикаторі (рис. 3.5, *б*). Індикатор складається з двох шкал – чорної та червоної (шкала *C*) та двох стрілок – великої та малої. Циферблат має 100 поділок, кожна з яких відповідає глибині занурення індентора на 0,002 мм. За великою стрілкою визначається твердість, а за малою – попереднє (інструментальне) навантаження.

За методикою вимірювань індентор **2** закріплюють у хвостовику шпинделя **6** гвинтом **3** і вмикають електродвигун **16** (рис. 3.5, *a*). Зразок **1** встановлюють на стіл **21** і плавним обертанням маховика **20** (за годинниковою стрілкою) піднімають до притиснення до індентора з початковим зусиллям 98 Н, що створюється пружиною **5**. Моменту досягнення цього зусилля відповідає положення малої стрілки навпроти червоної точки. При цьому велика стрілка повинна бути розташована якомога ближче до вертикального положення (з можливим відхиленням у різні боки до 5 поділок) (рис. 3.5, *б*). Барабан **19** через тросик **8** обертатиме шкалу до співпадання цифри 0 (чорна шкала) з великою стрілкою.

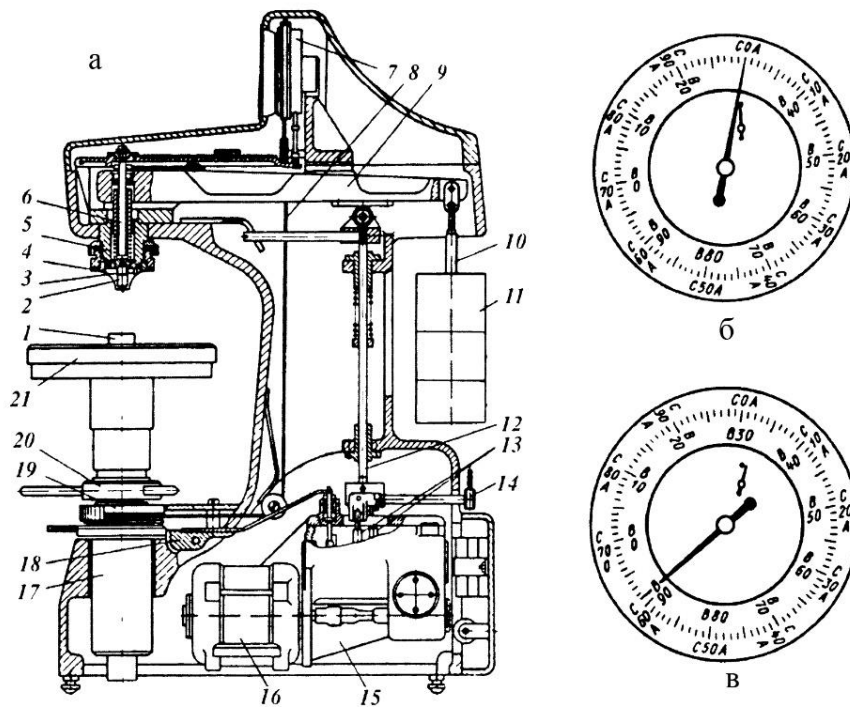


Рис. 3.5. Схема твердоміра ТК-2 (а) та шкали індикатора після прикладення початкового навантаження (б) та після усунення основного навантаження (в):  
 1 – зразок; 2 – індентор; 3 – гвинт кріплення наконечника; 4 – обмежувач; 5 – пружина; 6 – шпindelь; 7 – індикатор; 8 – трос; 9 – вантажний важіль; 10 – опора; 11 – вантаж; 12 – шток; 13 – кулачковий блок; 14 – ручка; 15 – редуктор; 16 – електричний двигун; 17 – гвинт; 18 – перемикач; 19 – барабан; 20 – маховик; 21 – стіл

Основне навантаження індентора здійснюється вимиканням перемикача **18** електропривода (електродвигун **16**, редуктор **15** та блок кулачків **13**). Переміщення штока **12** через важіль **9** і опору **10** забезпечує цикл навантаження-розвантаження індентора. Тривалість циклу складає 4 с, а прискореного – 2 с, регулюється перемикачем **14** відповідно до літер *H* чи *V*. Після закінчення циклу навантаження за великою стрілкою визначається значення твердості в одиницях *HRC* (рис. 3.5, в). Інструментальне навантаження з індентора знімається обертанням маховика **20** проти годинникової стрілки. Число твердості визначається як середнє арифметичне, з не менш як трьох вимірювань. Співвідношення твердості за Роквеллом з іншими методиками наведено в додатку 1.

#### Лабораторне обладнання та матеріали

1. Муфельні печі.
2. Термопари хромель-алюмель та прилад вимірювання температури.
3. Бак з водою для охолодження зразків (гартування).
4. Зразки вуглецевої сталі.
5. Прилади для вимірювання твердості за методиками Бринелля та Роквелла.
6. Кліщі, штангенциркуль, шліфувальний папір, секундомір.
7. Металографічний мікроскоп МДМ-7 з комплектом окулярів і об'єктивів.
8. Устаткування для виготовлення мікрошліфів.

## Порядок виконання роботи

1. Отримати зразки для гартування у лаборанта, дізнатися про марку сталі.
2. Накреслити в масштабі фрагмент діаграми  $Fe-C$  для сталі (рис. 3.1, а).
3. За діаграмою стану і відомим вмістом вуглецю в сталі визначити значення температур  $A_{C1}$  та  $A_{C3}$ . Оцінити відповідність їх значень додатку 1.
4. Дослідити мікроструктуру отриманих зразків сталі (після відпалу) під мікроскопом та схематично зарисувати в звіт.
5. Визначити твердість зразків сталі за методами Брінелля і Роквелла. Результати занести до таблиці 3.1.

Таблиця 3.1

Протокол значень твердості вуглецевої сталі після гартування

№ п/п	Ма- рка сталі	Твердість після відпалу			Температура нагріву для гартування, °C	Час нагріву зразку, хв	Твердість після гартування			
		<i>d</i> , мм	НВ, кг/мм <sup>2</sup>	HRC			<i>d</i> , мм	НВ	HRC	

6. Визначити теоретичні температури повного та неповного гартування сталі.
7. Визначити час витримки зразка в печі (див. додаток 2).
8. Завантажити зразки в попередньо розігріті печі до визначених температур.
9. Після визначеної витримки в печі при температурі, піддіти зразки гартуванню (охолодження в воді).
10. Зачистити поверхню зразків від окалини, виміряти твердість за визначеними методиками. Отримані результати занести до таблиці 1.
11. Дослідити мікроструктуру загартованих зразків під мікроскопом та схематично зобразити її в звіті.
12. Навести у звіті співвідношення щодо структурних перетворень, які відбуваються в досліджуваній сталі при нагріві вище  $A_{C1}$ , і  $A_{C3}$  та наступного гартування (повне і неповне).
13. Побудувати залежність значень твердості зразків від температури нагріву для гартування та зробити висновок до роботи.

### Контрольні запитання

1. Чим відрізняється повне гартування від неповного?
2. Як визначити температуру повного та неповного гартування для сталей з 0,3 та 1,2 % C?
3. Як змінюється твердість зразка з доевтектоїдної сталі при заміні неповного гартування на повне?
4. Як змінюється твердість зразка з заевтектоїдної сталі при заміні неповного гартування на повне?
5. Що являє собою мартенсит?
6. Назвати основні чинники впливу на твердість мартенситу?
7. За діаграмою стану  $Fe-C$  визначити температуру гартування для отримання максимальної твердості мітчику зі сталі У11А.

## ДОСЛІДЖЕННЯ МІКРОСТРУКТУРИ ЧАВУНІВ

**Мета роботи:** отримання практичних навичок з аналізу структурних складових білих та сірих чавунів за допомогою металомікроскопу.

### Теоретичні відомості

#### 1. Загальні відомості про чавуни

Чавунами називають залізовуглецеві сплави, що містять масову частку вуглецю від 2,14 до 6,67 % (рис. 4.1) [1, 4, 5]. В порівнянні зі сталями, чавуни мають більш низьку температуру кристалізації і високі ливарні властивості. Приблизно до трьох чвертей з усіх виливків виготовляється із чавунів. В залежності від високовуглецевої фази, чавуни поділяють на білі та сірі.

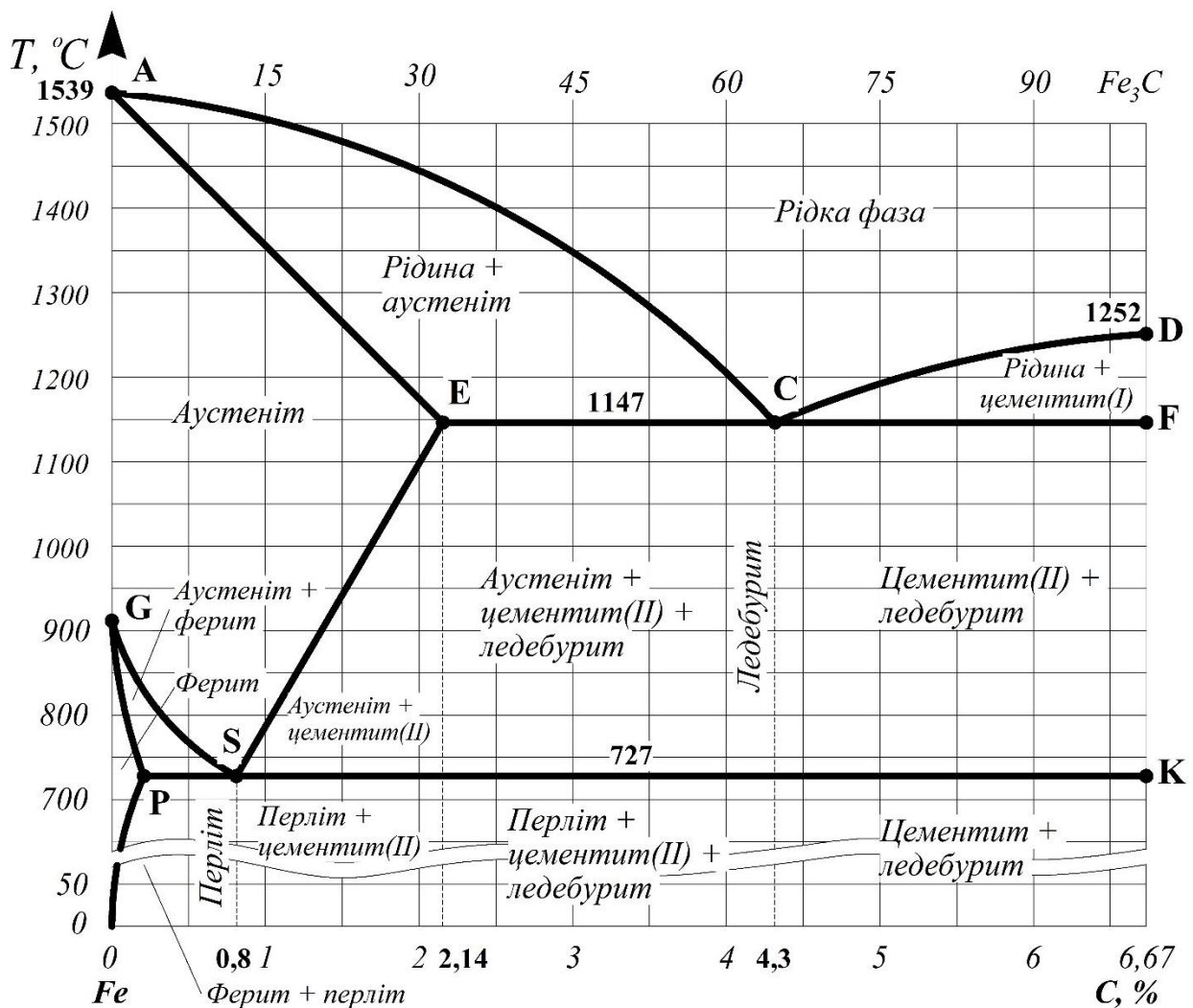


Рис. 4.1. Діаграма стану Fe–C (Fe<sub>3</sub>C)

## Чавуни білі

В білих чавунах високовуглецевою фазою є *цементит* ( $Fe_3C$ ) (див. рис. 4.1).

На поверхні зламу кристали цементиту мають сріблясто-біле забарвлення, що є однією з причин назви чавуну (білий). За вмістом вуглецю та структурою, білі чавуни поділяються на доевтектичні (2,14...4,3 % C), евтектичні (4,3 % C) та заевтектичні (4,3...6,67 % C).

Евтектична кристалізація білого чавуну з вмістом вуглецю 4,3 % відбувається за ізотермічних умов, при температурі 1147 °C. Мікроструктура такого чавуну після завершення кристалізації, складається з стрижнів аустеніту, що розташовані в матриці з цементиту (рис. 4.2, б). Назва евтектики «ледебурит» (Л) прийнята за прізвиськом видатного вченого Ледебура.

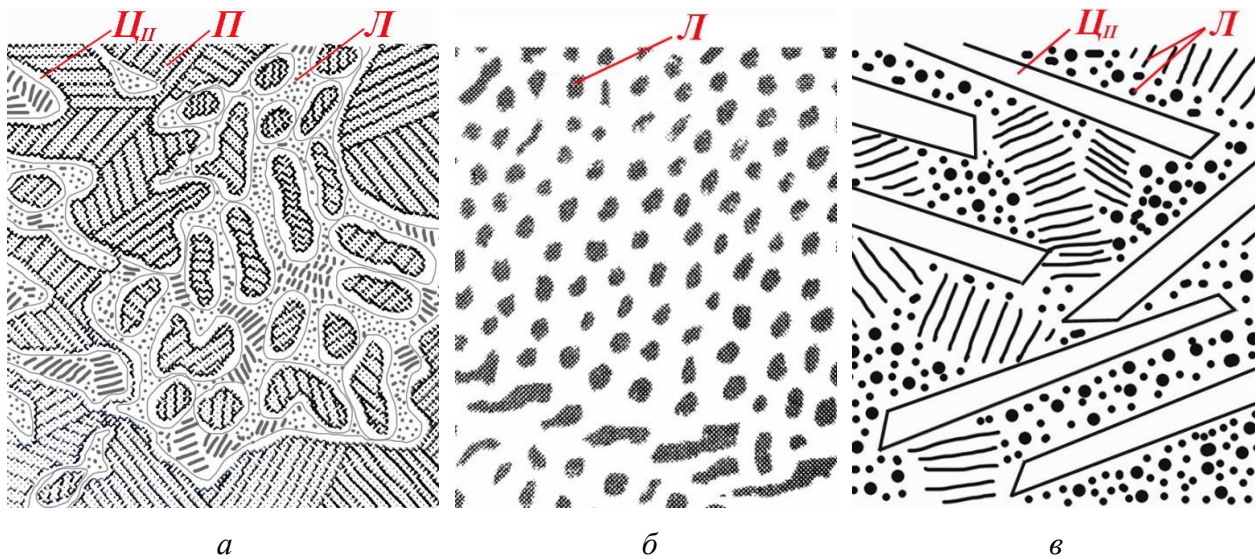


Рис. 4.2. Схематичне зображення структур доевтектичних (а), евтектичних (б) та заевтектичних (в) білих чавунів:

Л – ледебурит; ЦI і ЦII – цементит первинний і вторинний відповідно, П – перліт

Структура доевтектичного чавуну після кристалізації складається з дендритів аустеніту і ледебуриту. За подальшого охолодження чавуну (нижче  $ECF$ , див. рис. 4.1) відбувається додаткове формування навколо аустеніту прошарків з цементиту вторинного (ЦII) (рис. 4.2, а). Обумовлене формування ЦII зменшенням спроможності кристалічної решітки аустеніту розчинювати атоми вуглецю при охолодженні (за лінією  $SE$  діаграми стану). Структура заевтектичного чавуну складається з пластин цементиту первинного (ЦI) (виділення з рідини при кристалізації) і ледебуриту (рис. 4.2, в).

Білий чавун характеризується високою твердістю та крихкістю, що зумовлює його обмежену оброблюваність ріжучим інструментом. Через ці властивості він практично не піддається механічній обробці, що обмежує його використання в машинобудуванні. Водночас білий чавун має високу зносостійкість, завдяки чому його застосовують у виробництві деталей, що працюють в умовах інтенсивного тертя та навантажень. Типовими прикладами таких виробів є прокатні валки, робочі тіла кульових млинів, футеровки дробарок тощо.

## Чавуни сірі

Чавуни сірі утворюються в процесі кристалізації. Виключенням є ковкий чавун, що утворюється за фазових перетворень в твердому стані. Охолодження рідини, для отримання сірого чавуну, відбувається за ізотермічних умов, за температур декілька вищих  $ECF$  (рис. 4.1), або за дуже повільного зниження температури. За таких умов в рідині, замість цементиту (метастабільна високовуглецева фаза) формуються осередки стабільної високовуглецевої фази – *графіту*.

В порівнянні з білим чавуном, в сірому, пропорційно кількості графітових включень, відбувається збільшення ступеня сірого забарвлення структури (поверхні) шліфа, що і обумовлює його назву. Інтервал вмісту вуглецю в сірих чавунах аналогічний вмісту в білих.

Окрім вуглецю, збільшення концентрації кремнію (рис. 4.3, *a*) і зниження швидкості охолодження при кристалізації (рис. 4.3, *б*), сприяють розвитку процесу графітизації в чавунах. В різних частинах одного виливка чавун може мати різну структуру. Чим повільніше швидкість охолодження, тим більший розвиток отримують процеси графітизації, що в свою чергу впливає на металеву основу.

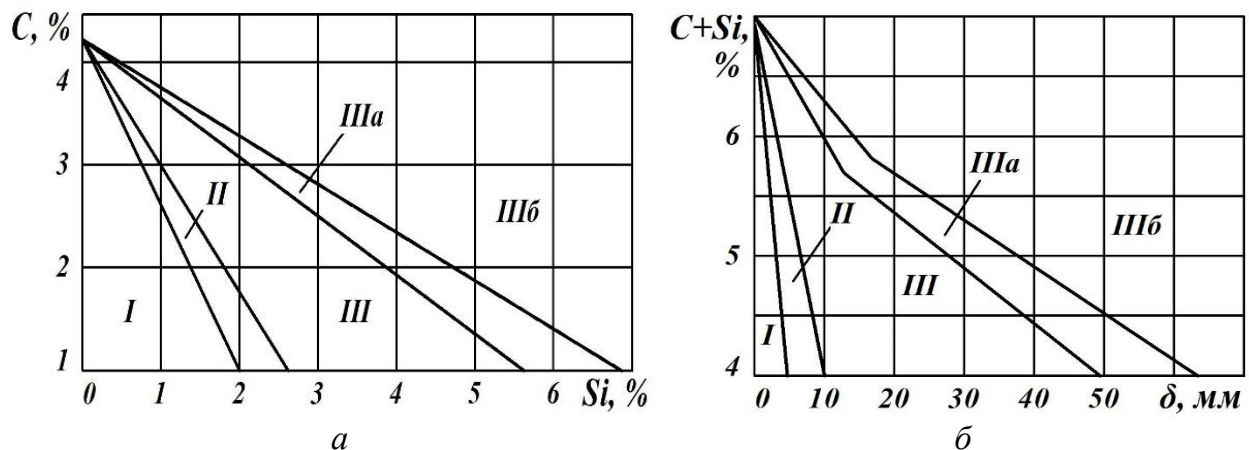


Рис. 4.3. Діаграма залежності структурного стану чавуну від співвідношення концентрації вуглецю і кремнію (*a*) та сумарного ефекту від вмісту вуглецю, кремнію і швидкості охолодження при кристалізації (*б*). Области існування чавунів:

*I* – білого; *II* – половинчастого; *III* – сірого з перлітною матрицею; *IIIa* – сірого з ферито-перлітної суміші; *IIIб* – сірого з феритною матрицею

В тонких частинах виливка, де більша швидкість охолодження (рис. 4.3, *б*), ступінь графітизації нижча, що зазвичай призводить до відбілювання чавуну.

Сірі чавуни класифікують за морфологією включень, з відповідним позначення марки.

Сірі ливарні чавуни [7] (за високого рівня текучості рідини), отримують в результаті кристалізації. Позначають літерами «СЧ» (сірий чавун) і числом, що відповідає величині мінімальної границі міцності під час розтягування, розмірність  $[Н/мм^2]$ : СЧ100, СЧ150, СЧ200 і т.д.

Мікроструктура сірих ливарних чавунів складається з металевої основи і графітних включень у вигляді *викривлених пластин* (рис. 4.4).

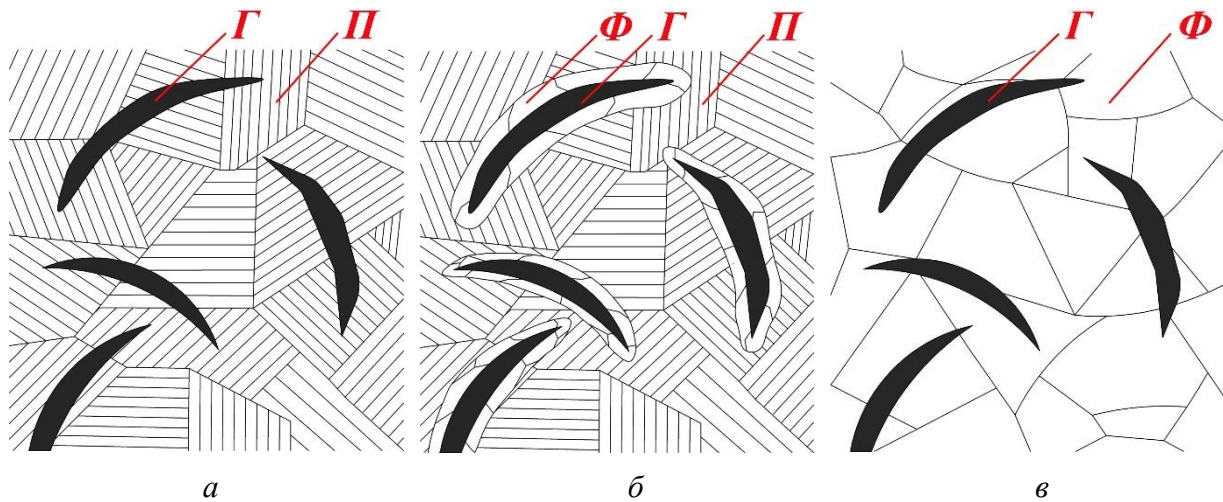


Рис. 4.4. Схематичне зображення структури ливарних чавунів з різною основою: а – перлітна; б – ферито-перлітна, в – феритна

Комплекс механічних властивостей визначається основою чавуну та об'ємною часткою графітових включень. Збільшення їх об'ємної частки, на фоні зростання крихкості, сприяє підвищенню якості оброблюваної поверхні різанням та за необхідністю, антифрикційних властивостей. Нагрів до температур нижчих за *PSK* супроводжується, завдяки деградації пластин цементиту по міжфазній поверхні з графітом, утворенням прошарків зі структурного вільного фериту (рис. 4.4, б).

Пропорційно збільшенню терміну відпалу зменшується об'ємна частка перліту. Процес буде продовжуватися до моменту зникнення останніх решток перлітних колоній. В результаті, буде сформована структура сірого ливарного чавуну на феритній основі (рис. 4.4, в).

Сірий ливарний чавун характеризується надзвичайно низькою пластичністю – його відносне видовження  $\delta$  зазвичай не перевищує 0,5 %. Через це він не придатний для виготовлення деталей, що працюють в умовах розтягувальних або ударних навантажень. Водночас матеріал має добрі ливарні властивості, високу вібро- та шумопоглинаючу здатність, а також достатню міцність на стиск, що робить його ефективним для застосування в конструкціях, де переважають статичні навантаження.

Сірий чавун широко використовується у виробництві корпусів редукторів і насосів, стояків, кришок, маховиків, гільз та поршнів циліндрів, циліндрів парових машин і компресорів, станин верстатів, гальмівних барабанів та інших деталей, які не зазнають значних динамічних впливів.

### **Ковкі чавуни**

*Ковкі чавуни* [8] є різновидом сірих чавунів. В порівнянні з сірими ливарними чавунами зміна форми графітових включень на пластівчасту (рис. 4.5), сприяє покращенню комплексу властивостей.

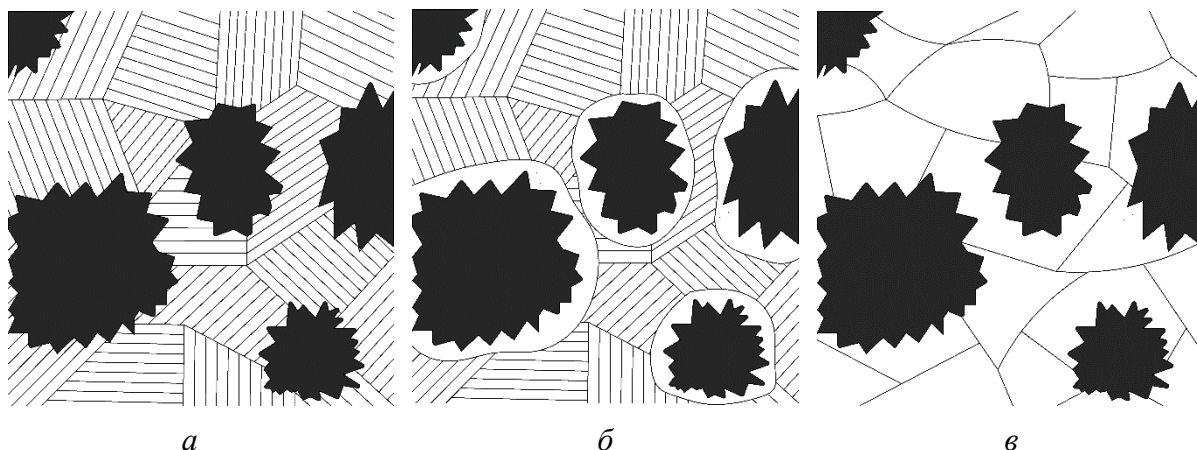


Рис. 4.5. Схематичне зображення структури ковких чавунів з різною основою:  
*a* – перлітна; *б* – ферито-перлітна, *в* – феритна

Структура ковкого чавуну формується завдяки термічній обробці білого чавуну. Виріб або заготівка з білого чавуну, в залежності від формування необхідного структурного стану, піддається термічній обробці – графітуючому відпалу, що поділяється на дві стадії.

На першій стадії термічної обробки (нагрів до температур 950-970 °С, в залежності від маси виробу, сумарна витримка може сягати до декількох десятків годин), відбувається перетворення частинок цементиту первинного (заевтектичний чавун), вторинного та цементиту ледебуриту в графітові включення пластівчастої форми. Основа такого чавуну складається з перлітних колоній (рис. 4.5, *a*).

На другій стадії графітазації, за аналогією з сірим ливарним чавуном, в залежності від терміну витримки, відбувається зміна основи ковкого чавуну (рис. 4.5, *б*, *в*).

Марки ковкого чавуну записуються як «КЧ», з послідовними числами – мінімальної границі міцності під час розтягування [Н/мм<sup>2</sup>] та відносного видовження [%]. Наприклад: КЧ 330-8, КЧ370-12 та ін..

Структура таких чавунів, в порівнянні з сірими ливарними, забезпечує більш високий комплекс властивостей: підвищений опір корозійному розтріскуванню, руйнуванню за умов циклічного навантаження.

Ковкі чавуни знайшли широке застосування в сільськогосподарському, автомобільному та текстильному машинобудуванні завдяки поєднанню високої міцності, ударостійкості та здатності сприймати змінні за напрямом навантаження. Цей матеріал підходить для виготовлення деталей, що працюють у важких умовах зношування, таких як картери редукторів, гаки, скоби, фланці, ступиці коліс, елементи карданних валів, ланцюги та ролики конвеєрів.

Високі ливарні властивості вихідного білого чавуну дозволяють виготовляти виливки з ковкого чавуну складної геометричної форми, що розширює можливості його застосування в конструкціях з підвищеними вимогами до точності форми, міцності та надійності.

### Високоміцні (модифіковані) чавуни

Високоміцні чавуни [9] виготовляються як і сірі ливарні, за ливарних технологій. Різниця полягає лише в підготовці рідини перед кристалізацією чавуну. З метою прискорення процесу формування зародків графітових включень при кристалізації, в розплав додається визначена кількість дрібнодисперсних порошків, що мають назву «модифікатор». За умов значно високої температури розплавлення ( в порівнянні з чавуном), вказані частинки модифікатора стають центрами виділення на них, як на підложжі, атомів вуглецю. В подальшому в результаті нашарування атомів вуглецю, формується графітове включення кулястої форми (рис. 4.6), з частинкою модифікатора в центрі.

За ДСТУ 3925-99, високоміцні чавуни маркуються літерами «ВЧ» і двома числами, які подібно КЧ, характеризують аналогічні параметри. Приклади існуючих марок: ВЧ350-22, ВЧ420-12, ВЧ1000-2 та інші.

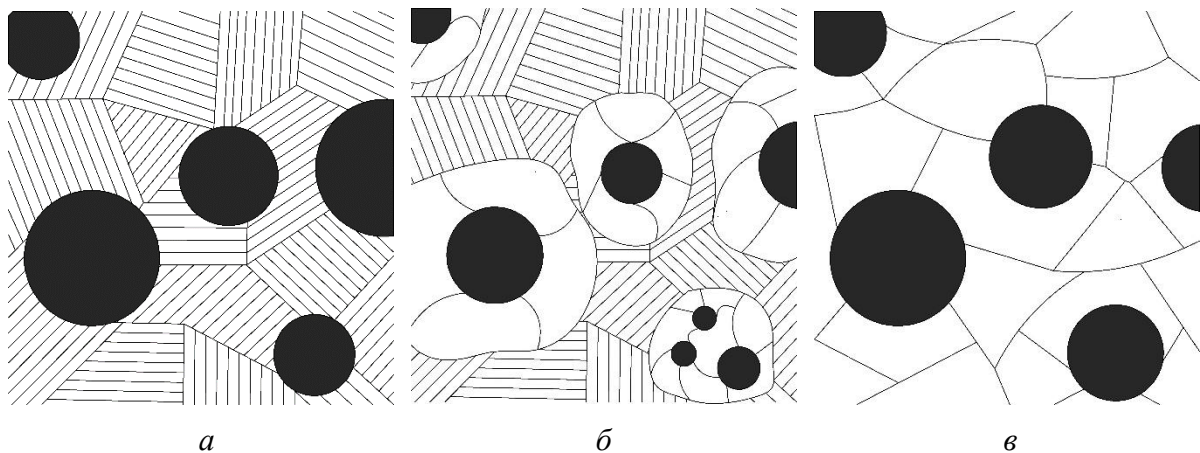


Рис. 6. Схематичне зображення структури високоміцних чавунів з різною основою: а – перлітна; б – ферито-перлітна, в – феритна

Кристалізація високоміцного чавуну починається тільки після завершення виділення вуглецю, що йде на утворення цементиту первинного, вторинного та ледебуриту (в білих чавунах). В результаті формується структура з кульок графіту різної дисперсності в перлітній матриці (рис. 4.6, а).

За необхідністю зменшення об'ємної частки перліту, чавун, подібно СЧ і КЧ, піддається другій стадії графітизації, з відповідними структурними змінами (рис. 4.6, б, в). Така обробка, за рахунок зменшення об'ємної частки перліту, дозволяє змінювати характеристики міцності чавуну. Так, марки з відносно високою межею міцності (ВЧ600-3, ВЧ800-2) мають, практично, повністю перлітну основу (рис. 4.6, а).

Середні значеннями міцності (ВЧ450-10, ВЧ500-7) досягаються завдяки зменшенню кількості перлітної складової (ферито-перлітна основа (рис. 4.6, б). Повна відсутність в структурі чавуну перлітних колоній (феритна основа, рис. 4.6, в) сприяє досягненню мінімального рівня міцності (ВЧ350-22, ВЧ400-15).

Модифіковані чавуни завдяки поєднанню високої міцності, термостійкості та добрих демпфувальних властивостей є ефективним конструкційним матеріалом для виготовлення деталей машин, що працюють в умовах підвищених статичних, ударних і циклічних навантажень, а також за наявності температурних коливань. З нього виготовляють блоки циліндрів та їх головки, випускні колектори, гальмівні диски, колінчаті та розподільчі вали, зубчасті колеса, корпуси турбокомпресорів та інші відповідальні деталі, що працюють в умовах складного навантаження і високих температур.

### Лабораторне обладнання та матеріали

1. Металографічний мікроскоп.
2. Комплект окулярів і об'єктивів до металографічного мікроскопу.
3. Набір мікрошліфів з чавунів.

### Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з теоретичною частиною роботи.
2. Накреслити в масштабі фрагмент діаграми  $Fe-C$  ( $Fe_3C$ ) (рис. 4.1).
3. Накреслити в масштабі діаграми залежності структурного стану чавунів від вмісту  $Si$  та швидкості охолодження (рис. 4.3, *a*, *б*).
4. Визначити форму та вид мікроструктурних складових зразків з білого чавуну за допомогою металографічного мікроскопу. Зобразити структуру у відповідному місці звіту та позначити структурні елементи.
5. Визначити форму та вид мікроструктурних складових зразків з сірого чавуну за допомогою металографічного мікроскопу. Зобразити структуру у відповідному місці звіту та позначити структурні елементи.
6. За отриманими мікроструктурами сірих чавунів визначити приблизний хімічний склад та їх відповідні марки. Оцінити рівень механічних властивостей та можливе застосування на практиці.

### Контрольні запитання

1. За якими ознаками класифікують чавуни?
2. Чим відрізняються білі чавуни від сірих?
3. Яким чином одержують сірі чавуни?
4. За рахунок чого досягається високий рівень механічних властивостей модифікованих чавунів?
5. Де використовують ливарні чавуни?
6. Де використовують модифіковані чавуни?
7. Яку межу міцності має чавун марки ВЧ800-2?
8. Яку межу міцності має чавун марки СЧ150?
9. Перерахуйте структурні перетворення білого чавуну, починаючи від температури плавлення і до кімнатної температури.

## БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. \*Вакуленко І. О. Структурний аналіз в матеріалознавстві. Навч. посібник. – Дніпропетровськ: Маковецький Ю.В., 2010. – 124 с.
2. Struers. Вебсайт. URL: <https://www.struers.com> (дата звернення: 06.08.2025).
3. Технологія конструкційних матеріалів та матеріалознавство (Частина 1) : дистанційний курс / розр. С. О. Плітченко, І. О. Вакуленко, М. А. Грищенко, С. В. Проїдак. URL: <https://lider.diit.edu.ua/course/view.php?id=287> Дата звернення: 15.05.2025 р.
4. \*Мещерякова Т. М. Матеріалознавство : підручник / Т. М. Мещерякова, Р. А. Яцюк, О. А. Кузін, М. О. Кузін. – Дрогобич : Коло, 2015. – 400 с.
5. \*Афтанділянц Є. Г., Зазимко О. В., Лонатько К. Г. Матеріалознавство: Підручник / Є. Г. Афтанділянц, О. В. Зазимко, К. Г. Лопатько. – Херсон: Олді-плюс, Київ: Видавництво Ліра-К, 2013. – 612 с.
6. Vakulenko I.Alex., Vakulenko L., Dal S. at all. Structure evolution in steels of railway wheels at manufacture and operations. Ankara: Nobel Bilimsel Eserler, 2023, – 270 p.
7. ДСТУ 8833:2019. Виливки із сірого чавуну з пластинчастим графітом. Загальні технічні умови. – [Чинний]. – Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2019. – 12 с.
8. ДСТУ EN 1562:2019. Литво. Ковкий чавун. – [Чинний]. – Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2019. – 20 с.
9. ДСТУ EN 1563:2017. Литво. Чавун з кулястим графітом. – [Чинний]. – Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2017. – 28 с.

*Примітка:* \* – Зазначено останнє доступне видання джерела, яке зберігає актуальність змісту.

## Додаток 1

Температури критичних точок при нагріві сталей і їх твердість після гартування

Марка сталі	Масова частка вуглецю, %	Температура, °C		Твердість загартованої сталі, HRC
		Ac <sub>1</sub>	Ac <sub>3</sub>	
Вуглецеві конструкційні сталі				
20	0,17 – 0,24	735	850	34 – 40
25	0,22 – 0,30	735	835	
30	0,27 – 0,35	730	820	42 – 48
35	0,32 – 0,40	730	810	
40	0,37 – 0,45	730	790	48 – 51
45	0,42 – 0,50	730	770	
50	0,47 – 0,55	725	760	54 – 60
55	0,52 – 0,60	725	755	
60	0,57 – 0,65	725	750	60 – 62
Вуглецеві інструментальні сталі				
У7	–	725	765	62 – 64
У8 – У13	–	730	–	63 – 65

## Додаток 2

Норми часу нагріву нелегованих вуглецевих сталей в електричних печах

Температура електропечі, °C	Тривалість нагріву (хв) на 1 мм довжини зразка		
	Циліндр	Квадрат	Пластина
600	1,5	2,2	3,0
800	1,0	1,5	2,0
900	0,8	1,2	1,6
1000	0,4	0,6	0,8

## Додаток 3

Характеристики охолоджуючих середовищ під час гартування

Охолоджуюче середовище	Швидкість охолодження °C/с в інтервалі температур, °C		Охолоджуюче середовище	Швидкість охолодження °C/с в інтервалі температур, °C	
	650...550	300...200		650...550	300...200
Вода: при 18 °C	600	270	10 % - ний розчин NaOH при 18 °C	1200	300
50 °C	100	270	Мінеральне масло	150	30
74 °C	30	200			

## Співставлення значень твердості, що отримані за різних методик\*

Твердість за Брінеллем <i>HB</i> , кгс/мм <sup>2</sup>				Твердість за Роквеллом			Твердість за Віккерсом <i>HV</i> , кгс/мм <sup>2</sup>
Діаметр відбитка, мм	P=3000 кгс	P=1000 кгс	P=750 кгс	<i>HRC</i>	<i>HRA</i>	<i>HRB</i>	
1	2	3	4	5	6	7	8
2,00	946	316	229	–	–	–	–
2,05	893	298	217	–	–	–	–
2,10	875	286	207	–	–	–	–
2,15	817	273	196	–	–	–	–
2,20	782	261	187	72	89	–	1220
2,25	744	248	178	69	87	–	1114
2,30	713	238	170	67	85	–	1021
2,35	683	227	162	65	84	–	940
2,40	652	218	156	63	83	–	867
2,45	627	209	149	61	82	–	803
2,50	600	200	143	59	81	–	746
2,55	578	193	137	58	80	–	694
2,60	555	185	131	56	79	–	649
2,65	532	178	126	54	78	–	606
2,70	512	171	121	52	77	–	587
2,75	495	166	116	51	76	–	551
2,80	477	159	111	49	76	–	534
2,85	460	153	107	48	75	–	502
2,90	444	148	103	47	74	–	474
2,95	430	144	99,5	45	73	–	460
3,00	415	140	96,5	44	73	–	435
3,05	465	134	92,0	43	72	–	423
3,10	387	129	88,0	41	71	–	401
3,15	375	125	85,5	40	71	–	390
3,20	364	121	82,4	39	70	–	380
3,25	351	117	79,5	38	69	–	361
3,30	340	114	76,8	37	69	–	344
3,35	332	111	74,1	36	68	–	335
3,40	321	107	71,6	35	68	–	320

Продовження додатку 4

<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>
3,45	311	104	69,1	34	67	–	312
3,50	302	101	66,8	33	67	–	305
3,55	293	98	–	31	66	–	291
3,60	286	95	–	30	66	–	285
3,65	277	92	–	29	65	–	278
3,70	269	90	–	28	65	–	272
3,75	262	88	–	27	64	–	261
3,80	255	85	–	26	64	–	255
3,85	248	83	–	25	63	–	250
3,90	241	81	–	24	63	100	240
3,95	235	78	–	23	62	99	235
4,00	228	76	–	22	62	98	226
4,05	223	75	–	21	61	97	221
4,10	217	73	–	20	61	97	217
4,15	212	71	–	19	60	96	213
4,20	207	69	–	18	60	95	209
4,25	202	67	–	–	59	94	201
4,30	196	65	–	–	59	93	197
4,35	192	64	–	–	58	92	190
4,40	187	63	–	–	58	91	183
4,45	183	61	–	–	57	89	180
4,50	179	60	–	–	56	88	177
4,55	174	58	–	–	55	87	174
4,60	170	57	–	–	55	86	170
4,65	166	56	–	–	54	85	166
4,70	163	54	–	–	53	84	163
4,75	159	53	–	–	53	83	159
4,80	156	52	–	–	52	82	156
4,85	153	51	–	–	52	81	153
4,90	149	50	–	–	51	80	149
4,95	146	49	–	–	50	79	146
5,00	143	48	–	–	50	78	143
5,05	140	47	–	–	–	77	140

## Продовження додатку 4

1	2	3	4	5	6	7	8
5,10	137	46	–	–	–	75	137
5,15	134	45	–	–	–	74	134
5,20	131	44	–	–	–	73	131
5,25	128	43	–	–	–	73	128
5,30	126	42	–	–	–	72	126
5,35	124	41	–	–	–	70	124
5,40	121	40	–	–	–	68	121
5,45	118	39	–	–	–	67	118
5,50	116	38,5	–	–	–	65	116
5,55	114	38	–	–	–	63	112
5,60	112	37	–	–	–	63	112
5,65	109	36	–	–	–	61	109
5,70	107	35,5	–	–	–	60	107
5,75	105	35	–	–	–	58	105
5,80	103	34	–	–	–	57	103
5,85	101	33,5	–	–	–	56	101
5,90	99	33	–	–	–	55	99
5,95	97	32,5	–	–	–	53	97
6,00	95	32,0	–	–	–	51	95

## Додаток 5

## Умови проведення випробувань за методом Роквелла\*

Шкала	Позначення чи-сла твердості	Індентор	Інтервал вимірювання	Навантаження, Н (кгс)			Відповідна твердість за Брінеллем	Діапазон застосування
				початкове	основне	загальне		
A	HRA	Алмазний конус	70...89	98 (10)	490 (50)	588 (60)	3750 – 7820	Надтверді матеріали, тонкі виробы
B	HRB	Сталева кулька	20...100	98 (10)	833 (90)	981 (100)	1050 – 2400	М'які матеріали (<450 HB)
C	HRC	Алмазний конус	22...69	98 (10)	1373 (140)	1471 (150)	2410 – 6830	Тверді матеріали

Примітка: \* – В додатках 4, 5 значення навантажень (твердості) наведені відповідно в кгс (кгс/мм<sup>2</sup>) з метою полегшення сприйняття фізичної суті вимірювання твердості як сили, прикладеної до площі.



Навчально-методичне видання

**Плітченко** Сергій Олександрович,  
**Вакуленко** Ігор Олексійович

# **ТЕХНОЛОГІЯ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ТА МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО**

Навчально-методичні рекомендації до виконання лабораторних робіт  
з розділу I «Матеріалознавство»

Електронне видання

Зареєстровано НМВ УДУНТ (№ 1.850 від 17.12.2025)

В авторській редакції

Комп'ютерна верстка С. О. Плітченко

Формат 60x84 <sup>1/16</sup>. Ум. друк. арк. 2,56. Обл.-вид. арк. 2,58.  
Зам. № 139

Видавець: Український державний університет науки і технологій  
вул. Лазаряна, 2, ауд. 1201, м. Дніпро, 49010.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 7709 від 14.12.2022

Адреса видавця та дільниці оперативної поліграфії:  
вул. Лазаряна, 2, Дніпро, 49010