

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
АКАДЕМІЯ ІНЖЕНЕРНИХ НАУК УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНА МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ

# ТЕОРІЯ І ПРАКТИКА МЕТАЛУРГІЇ

№2  
(133)  
2022

ЗАГАЛЬНОДЕРЖАВНИЙ НАУКОВО-ТЕХНІЧНИЙ ЖУРНАЛ

Видається з березня 1997 року  
Виходить 6 разів на рік

**Засновники:** Національна металургійна академія України  
Відділення матеріалознавства та металургії  
Академії інженерних наук України

**Видавці:** Національна металургійна академія України  
Відділення матеріалознавства та металургії  
Академії інженерних наук України

Дніпро  
2022

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**НАЦІОНАЛЬНА МЕТАЛУРГІЙНА АКАДЕМІЯ УКРАЇНИ**  
**АКАДЕМІЯ ІНЖЕНЕРНИХ НАУК УКРАЇНИ**

Загальнодержавний  
науково-технічний журнал

**ISSN 1028-2335**

*Випуск 2 (133) 2022р*

Свідоцтво про реєстрацію:  
серія КВ № 21962-11862ПР  
від 23 березня 2016 року

Наказом МІНІСТЕРСТВА ОСВІТИ І  
НАУКИ УКРАЇНИ №157 від  
**09.02.2021 р.** журнал включено до  
категорії «Б» переліку наукових  
фахових видань України, по  
спеціальностям:  
133 – Галузеве машинобудування;  
136 – Металургія;  
161 – Хімічні технології

Формат 60x84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>.  
Ум. друк. арк. 5,12

Адреса редакції та видавця: Національна  
металургійна академія України,  
пр. Гагаріна, 4, м. Дніпро, 49006  
т. (056) 745-41-96;  
Тираж 100 прим.

Засновники:

Центр (відділення) матеріалознавства і металургії Академії  
інженерних наук України

Національна металургійна академія України

**Редакційна колегія**

*Головний редактор*

д.т.н., проф. **Пройдак Ю.С.** (Україна)

*Заступник головного редактора*

д.т.н., проф. **Камкіна Л.В.** (Україна)

д.т.н., проф. Білодіденко С.В.	(Україна)
д.т.н., проф. Волкова О. І.	(Німеччина)
д.т.н., проф. Гнатушенко В.В.	(Україна)
д.т.н., проф. Кнапинський М.Я.	(Польща)
д.т.н., проф. Куцова В.З.	(Україна)
д.т.н., проф. Лежнев С.М.	(Казахстан)
д.т.н., проф. Лялюк В.П.	(Україна)
д.т.н., проф. Малий Є.І.	(Україна)
д.т.н., проф. Медовар Л.Б.	(Україна)
д.т.н., проф. Сігарьов Є.М.	(Україна)
д.т.н., проф. Стовпченко Г.П.	(Україна)
д.т.н., проф. Фролов Я.В.	(Україна)
д.т.н., проф. Шатоха В.І.	(Україна)

Передрук лише за дозволом редакції

При використанні матеріалів посилання на журнал обов'язкове  
**Видавництво не несе відповідальність за зміст матеріалу,  
наданого автором до друку**

Матеріали публікуються на мові оригіналу

За якість перекладу статей на англійську мову редакція відповідальності не несе  
**Редакційна рада залишає за собою право змінювати текст статей,  
не впливаючи на загальний зміст наданого матеріалу**



+38056-745-41-96;

<http://tpm.nmetau.edu.ua>

e-mail: [projdak@metal.nmetau.edu.ua](mailto:projdak@metal.nmetau.edu.ua)

Комп'ютерне верстання О.Г.Безшкуренко

©НМетАУ 2021

MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE  
ACADEMY OF ENGINEERING SCIENCES OF UKRAINE  
NATIONAL METALLURGICAL ACADEMY OF UKRAINE

# THEORY AND PRACTICE OF METALLURGY

#2  
(133)  
2022

GENERAL STATE SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

Issued since March 1997  
Released 6 times a year

*Founders:* National Metallurgical Academy of Ukraine  
Department of Materials Science and Metallurgy  
Of the Academy of Engineering Sciences of Ukraine

*Publishers:* National Metallurgical Academy of Ukraine  
Department of Materials Science and Metallurgy  
Of the Academy of Engineering Sciences of Ukraine

Dnipro  
2022

**MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE  
ACADEMY OF ENGINEERING SCIENCES OF UKRAINE  
NATIONAL METALLURGICAL ACADEMY OF UKRAINE**

National scientific journal

**ISSN 1028-2335**

*Edition 2 (133) 2022 year*

Certificate of registration:

KB № 21962-11862П

23.03.2016

By the order of the MINISTRY OF  
EDUCATION AND SCIENCE OF  
UKRAINE №157 from 09.02.2021,  
the journal is included in category "B"  
of the list of scientific professional  
publications of Ukraine, by  
specialties:

133 - Industry engineering;

136 - Metallurgy;

161 - Chemical technologies

Format 60x84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>.

CPP. 5,12

Editorial address and publisher: National  
Metallurgical Academy of Ukraine, Gagarina,

4, Dnipro 49006

т.(056) 745-41-96;

Copies of 100.

Founders:

Center (Department) of Materials Science and Metallurgy of the  
Academy of Engineering Sciences of Ukraine  
National Metallurgical Academy of Ukraine

**Editorial board**

*Editor in Chief*

D.Tech.Sc., prof. **Proydak Yu** (Ukraine)

*Honorable Editor*

D.Tech.Sc., prof. **Kamkina L.** (Ukraine)

Prof., d.t.s. Bilodidenko S.	(Ukraine)
Prof., d.t.s. Volkova O.	(Germany)
Prof., d.t.s. Gnatushenko V.	(Ukraine)
Prof., d.t.s. Knapinskij M.	(Poland)
Prof., d.t.s. Kutsova V.	(Ukraine)
Prof., d.t.s. Lezhnyev S.	(Kazakhstan)
Prof., d.t.s. Lyalyuk V.	(Ukraine)
Prof., d.t.s. Malij Ye.	(Ukraine)
Prof., d.t.s. Medovar L.	(Ukraine)
Prof., d.t.s. Sigarov Ye	(Ukraine)
Prof., d.t.s. Frolov Ya.	(Ukraine)
Prof., d.t.s. Shatoha V.	(Ukraine)

Reproduction only with permission of the publisher

With reference to the journal is obligatory

Publisher is not responsible for the content of the material,  
by authors for publication

Publikuyutsya materials in the original language

For quality translations of articles on English version is not liable

Editorial Board reserves the right to change the text of the articles without affecting  
the overall content of the material



+38056-745-41-96;

<http://tpm.nmetau.edu.ua>

e-mail:projdak@metal.nmetau.edu.ua

Computer layout by Olexej Bezshkurenko

©NMetAU 2021

Грищенко С.Г.

## Сучасні тенденції розвитку світової та української феросплавної промисловості

*Від редакції: Українська феросплавна наукова школа, яку багато років очолював наш вчитель академік НАНУ М.І. Гасик, продовжує займати одне з провідних місць у світі. Черговим свідченням цього є запрошення одного з багатьох учнів академіка - члена Міжнародного феросплавного комітету, Почесного члена Ради директорів Української асоціації виробників феросплавів, доктора технічних наук, професора С. Г. Грищенко - взяти участь та виступити з доповіддю на науково-практичному семінарі знов утвореної Грузинської асоціації виробників феросплавів, феросплавної сировини та трейдерів феросплавної продукції, який відбувся у Тбілісі 11 листопада 2022 року. Ця стаття підготовлена по матеріалах зазначеної доповіді.*

Зростання обсягу випуску сталі, особливо спеціальних високолегованих марок, тягне за собою необхідність збільшення обсягу виробництва масових феросплавів – хромистих, марганцевих, крем'янистих, а також феросплавів т. зв. "малої групи".

На 1 тону сталі в середньому зараз витрачається близько 20 кг різних феросплавів (без розкислювачів), із цієї кількості на ферохром припадає близько 20%, феросиліцій – 18%, силікомарганець – 22%, феромарганець високовуглецевий – 12%, рафіновані марганцеві сплави – 5%, феронікель – 4%, усі інші – 19%. Але при цьому виплавка спеціальних сталей (20% від світового виробництва) вимагала 35% усіх спожитих феросплавів.

Зрозуміло, що потреба у феросплавах визначається обсягом виплавки сталі. Випуск сталі за підсумками 2021 року зріс на 3,7% порівняно з 2020 роком – до 1,95 млрд. т. Про це свідчить глобальний рейтинг 64 країн – виробників сталі за даними World Steel Association / 1 / .

У першу десятку країн-виробників, за версією WSA, у 2021 році увійшли:

- Китай – 1,03 млрд т (-3% порівняно з 2020 роком);
- Індія – 118,1 млн. т (+17,8%);
- Японія – 96,3 млн. т (+15,8%);
- США – 86 млн. т (+18,3%);
- Росія – 76 млн т (+6,1%);
- Південна Корея – 70,6 млн. т (+5,2%);
- Туреччина – 40,4 млн. т (+12,7%);
- Німеччина – 40,1 млн т (+12,3%);
- Бразилія – 36 млн. т (+14,7%);
- Іран – 28,5 млн. т (-1,8%).

Світове річне виробництво феросплавів становить приблизно 60-65 млн. тон (включаючи розкислювачі та карбід кремнію), за останні 5 років ця цифра зросла приблизно на 8%; без розкислювачів – 43-48 млн. тон.

Як і при виплавці сталі, у виплавці феросплавів лідирує Китай. Його частка у світовому виробництві феросплавів складає більше 78%, або 36 млн. тон, у тому числі частка по хромистих сплавам становить 39%; силікомарганцю – 67%; рафінованих марганцевих сплавів – 53% та високовуглеце-

вого феромарганцю – 48%. Китай є безперечним світовим лідером із виробництва електролітичного металевого марганцю – 1,5 млн. тон або 97% світового рівня. Частка Китаю у світовому обсязі виплавки феросиліцію досягає 66% та металевого кремнію – 64% / 2 / .

Які основні тенденції у світовій феросплавній промисловості слід зазначити?

Насамперед, слід зазначити радикальну зміну у структурі виробництва та споживання феросплавів з розширенням їх сортаменту, що відбувається в останнє десятиліття. Розширення сортаменту феросплавного виробництва стосовно забезпечення потреби сталеплавильної галузі зараз пов'язано, перш за все, з виплавкою феросплавів малотоннажної групи - сплавів нікелю, титану, ніобію, молібдену, ванадію, ферровольфраму та ін. Ці сплави використовуються для комплексного легування та мікролегування не лише спеціальних, а й низьколегованих сталей групи HSLA (від англійської аббревіатури High Strength Low Alloy Steel – високоміцні низьколеговані сталі); їх навіть називають «новою ерою» у виробництві легованих сталей. Все більшого поширення набувають нові марки сталей, де поряд з традиційними елементами - Mn, Si і Cr - включені також до 0,5% Ni, 0,5% Mo, 0,3% Nb і 0,3% V, що зазначається на феросплавних конгресах та конференціях ще починаючи з 2013 року / 3 / .

По-друге, на думку аналітиків, хоча металургійний та феросплавний світ, переважно, подолали наслідки кризи 2008-2009 років, на ринку феросплавів цінового відновлення не відбулося. На відміну від попередніх років можна сказати, що ціни на світовому ринку феросплавної продукції диктує покупець, а не продавець.

По-третє, має місце подальше продовження глобалізаційних процесів, з переходом від вільної конкуренції до домінування, наслідком чого, наприклад, у Європі, стало скорочення провідних гравців на металургійному та феросплавному ринках. Практично згорнулося виробництво феросплавів у Японії та США. У той же час на ринку в останні роки з'явилася низка нових феросплавних компаній у країнах, багатих на сировинні ресурси або дешево

електроенергію – Філіппіни, Індонезія, Гватемала: користуючись підтримкою місцевої влади, ці компанії отримують непогану перспективу для розвитку та входження до пулу світових гравців.

Характерною в цьому плані є ситуація на ринку ніобію. Цей ринок є одним з тих, що найбільш динамічно розвиваються – у найближчі кілька років очікується зростання споживання ніобію для виплавки високоміцних сталей будівельного сортаменту, автомобілебудування, нержавіючих сталей (спільне легування з титаном та хромом), високоміцних труб та сталей для виготовлення спеціального обладнання. Ніобієві сталі належать до вищезгаданої групи HSLA. В даний час цей ринок практично монополізований Бразильською компанією CBMM (84% світового виробництва); решта обсягу виробництва по 7-8% припадає на компанію ANGLO-AMERICAN (Бразилія) та IAMGOLD (Канада). Але вже можна говорити про появу на цьому ринку нової компанії Cradle Resource Ltd, яка є власником найбільшого родовища ніобію Panda Hill у Танзанії і веде прискорене будівництво гірничодобувних та плавильних потужностей / 4 /.

По-четверте й головне в сучасних обставинах – це те, що на обсяги виробництва феросплавів істотно впливає енергетичний чинник. Так, ще у 2014 році на Конференції африканських виробників феросплавів зазначалося, що при виробництві феросплавів у ПАР енергозабезпечення має вирішальне значення у зв'язку з високими тарифами на електроенергію для феросплавних компаній, що існують в Африці / 5 /. До того ж ПАР багато років має серйозні труднощі із забезпеченням промислових підприємств електроенергією, тому було зазначено, що за таких умов виробництво феросплавів у ПАР стає комерційно не вигідним, і країна фактично перетворюється на сировинний придаток Китаю, не витримуючи конкуренції з ним. З цієї ж причини будівництво нових феросплавних потужностей у ПАР, яке раніше планувалося, зараз є економічно недоцільним.

Проте у 2022 році, на жаль, енергокриза вплинула на показники виробництва феросплавів не тільки в Африці, а й у всьому світі. В даний час на більшості регіональних ринків феросплавів, зокрема в Китаї, Індії та США, спостерігається зниження попиту і, як наслідок, коливання цін на всі види металургійної продукції, включно сировину. Китайські заводи збираються скоротити виробництво, підвищення цін на імпортовану марганцеву руду, кокс та коксівне вугілля, ставок на вантажні перевезення, а також слабкий попит на внутрішньому ринку призвели до стрімкого зростання собівартості виробництва марганцевих сплавів у Китаї. Для зміни ситуації спеціальний комітет Асоціації виробників феросплавів країни наприкінці жовтня 2022 року запропонував скоротити виробництво на 50%; із цим погодилися 40 компаній – членів організації. Аналогічні заходи вживалися і у травні 2022-го.

Скорочення виробництва феросплавів у Китаї вплине як на внутрішні, і на глобальні ринки. Зок-

рема, це може призвести до зниження попиту на марганцеву руду, хромитову руду, іншу феросплавну сировину та надлишку пропозиції на світовому ринку і, як наслідок, зниження цін на неї в найближчій перспективі.

Скорочення виробництва феросплавів в КНР спричинить також дефіцит пропозиції на внутрішньому китайському ринку. Тому висока ймовірність зростання внутрішніх цін на феросплави і, як наслідок, цін на найближчих світових ринках, зокрема індійському. Індійські виробники та експортери феросплавної продукції, у свою чергу, якщо виробництво сталі в Китаї залишиться стабільним, матимуть додаткові можливості – китайським металургам доведеться імпортувати феросплави. У той же час, до кінця 2022 року, незважаючи на відсутність попиту, особливо на експортних напрямках, індійські продавці марганцевих сплавів підвищили ціни через низьку маржу і скоротили пропозицію / 2 /.

На європейське виробництво феросплавів, за даними Європейської галузевої феросплавної асоціації Euroalliances, з якою плідно співпрацює Українська асоціація УкрФА, також серйозно впливає глобальна енергокриза, яка почалася ще до повномасштабного вторгнення РФ в Україну / 6 /. До того ж на феросплавний сектор промисловості чинять тиск витрати на викиди вуглецю. Згідно з дослідженням ERCST (Європейський круглий стіл зі зміни клімату та сталого переходу), життєздатність галузі буде під загрозою, якщо вартість дозволів на викиди буде вищою за €86/т (зараз ціна викидів CO<sub>2</sub> досягла €76/т).

Безумовно, на ситуацію на світових ринках феросплавів вплинуло суттєве скорочення виробництва феросплавів в Україні в умовах повномасштабного вторгнення РФ в Україну. Слід зазначити, що навіть в цих надважких умовах, практично в зоні бойових дій, до листопада продовжували працювати Нікопольський та Запорізький заводи феросплавів, якими за 9 місяців 2022 року виплавлено близько 450 тис. тон феросплавної продукції, головним чином феросилікомарганця. На жаль, з 10 листопада зазначені підприємства повністю зупинені.

Відразу після вторгнення РФ в Україну ціни майже на всі феросплави різко зросли, оскільки на різних ринках почалася їхня панічна скуповування. Підвищення цін на феросплави навесні 2022 року до пікових рівнів дещо покращило фінансове становище виробників, навіть на тлі зростання вартості енергії. Однак ця тенденція була недовгою, оскільки кінцеві споживачі змушені були скоротити виробництво.

Так, за даними Euroalliances, енергокриза вже вплинула на виробництво ЄС. З 60 печей для виробництва феросплавів у Європейській економічній зоні (включно з Україною) та 37 печей безпосередньо у країнах ЄС станом на вересень 2022 року було закрито 17, або 28% та 46% відповідно / 6 /.

Нагадаємо, що під час економічної кризи 2008-2009 років, збереженню металургійного, у тому числі феросплавного, виробництва в Україні значно сприяло укладання відповідного Меморандуму між Урядом та власниками підприємств щодо стабілізації тарифів на енергоносії та логістику. До аналогічного способу вирішення кризи для галузі європейські металургійні асоціації прибігли зараз, а саме – до втручання з боку керівних органів ЄС. У відкритому листі у вересні 2022 року, опублікованому Асоціацією виробників кольорових металів «Eurometaux», та підписаному представниками металургійної галузі та сектору виробництва феросплавів, зокрема, пропонується:

- збільшити межі фінансування компаніям у енергоємних галузях;
- враховувати чистий збиток, а не негативну EBITDA;
- продовжити дію тимчасової антикризової програми ЄС принаймні до кінця 2023 року.

Можливістю для галузі стало б і зупинення дії Європейської системи торгівлі викидами (ETS). Тому Європейська асоціація виробників феросплавів Euroalliances також просить Євросоюз обмежити податки та додаткові збори на електроенергію та газ для енергоємних галузей.

В умовах енергетичної кризи значна увага у світовій феросплавній індустрії приділяється проблемі підвищення енергозбереження та енергоефективності, у т.ч. шляхом використання технології когенерації. Залежно від виду печей і вироблених сплавів термін окупності капітальних витрат на когенерацію становить від чотирьох до шести років. Тут також лідирує Китай. Таким обладнанням, наприклад, за проектом китайської компанії Sinosteel Equipment & Engineering Co в різних країнах вже оснащено п'ять печей, що виплавляють високовуглецевий ферохром: три печі потужністю по 37 МВА і дві печі – по 45 МВА.

Як і світові виробники, практично всі підприємства феросплавної галузі України також ведуть системну політику технічного переозброєння та модернізації, метою якої є забезпечення достатньої конкурентоспроможності продукції та розширення її асортименту шляхом підвищення енергоефективності, впровадження новітніх екологічно чистих технологій, переробки та утилізації накопичених раніше відходів виробництва.

Для підвищення енергоефективності проведено роботи з оптимізації конструкції рудовідновлювальних електропечей. Так, на Побузькому феронікелевому комбінаті змінено геометрію та конструкцію рудотермічної печі РТП-1 з переходом на ванну прямокутної форми з підпружиненими стінками та зворотно-арковою подиною.

При реконструкції печей на низці українських підприємств використовується т.зв. «глибоке введення» високої напруги безпосередньо до пічних трансформаторів, побудовані сучасні електрокомпенсаційні установки. Здійснено реконструкцію більшості феросплавних електропечей із встанов-

ленням на них сучасного обладнання для газоочищення та пиловловлення; більша частина уловленого колошникового пилю та шламів повертається (з попередньою агломерацією, окативанням або брикетуванням) для повторного переплаву у спеціалізованих електропечах (дугових або індукційних).

Велике значення у світовій феросплавній промисловості приділяється питанням логістики та інфраструктури. Так для ПАР, і не тільки для цієї країни, можливість розвитку видобутку феросплавної сировини, особливо на родовищах, що знову вводяться в експлуатацію, стримується нерозвинутою інфраструктурою в малообжитих пустельних регіонах, тобто відсутністю мережі транспортних комунікацій і недостатньою для нарощування експорту пропускнуною спроможністю морських портів. Аналогічна ситуація існує і в т. зв. «нових феросплавних» країнах Південно-Східної Азії та Південної Америки. Тому цим країнам поряд з енергетичною програмою потрібні спеціальні урядові програми, спрямовані на вирішення зазначеної проблеми.

Декілька слів про міжнародне співробітництво у феросплавній галузі / 7 /. У 1974 році Південно-Африканський інститут гірничої справи та металургії (SAIMM), Національний інститут металургії ПАР (MINTEK) та Асоціація виробників феросплавів (FAPA) ініціювали проведення 1-го конгресу ІНФАКОН (англійською – INFACON). У результаті угоди між національними феросплавними асоціаціями різних країн, підписаної на цьому конгресі, було започатковано Міжнародний феросплавний комітет (МФК, англійська абревіатура ICFA), головним завданням якого є подальший розвиток системи INFACON, забезпечення високого наукового та технічного рівня доповідей, повідомлень та статей учасників форуму. Постійний секретаріат МФК розміщений в офісі MINTEK – Національного інституту металургії ПАР у Йоганнесбурзі.

Конгреси ІНФАКОН проводяться кожні два-три роки у різних країнах світу, але відповідно до норм Статуту МФК кожен третій/четвертий конгрес традиційно проводиться у ПАР, віддаючи данину його засновникам.

За ці роки Міжнародні конгреси ІНФАКОН стали найбільш авторитетними форумами фахівців феросплавної промисловості, що дозволяють оцінити рівень техніки та технології у процесах феросплавних переділів, визначити перспективні напрямки розвитку галузі в цілому та окремих виробників зокрема, отримати найбільш повну та актуальну технічну та технологічну інформацію, включаючи дані про теорію та практику феросплавного виробництва, новітніх розробках у галузі технологічного обладнання, електропечобудування, шлакопереробки, газоочищення, енергоефективності.

Починаючи з конгресу ІНФАКОН-12, що відбувся у 2010 р. у м. Гельсінкі, представники України, Казахстану та Росії вперше увійшли до складу МФК та брали участь у прийнятті рішень щодо міс-

ця проведення наступних конгресів. На засіданні МФК у червні 2013 р. у м. Алмати у ході конгресу ІНФАКОН-13, за заявкою Української асоціації виробників феросплавів, почесне право проведення конгресу ІНФАКОН-14 у 2015 р. було присуджено Україні, а місцем проведення конгресу затверджено м. Київ. Конкурентами українських феросплавників під час ухвалення цього рішення були феросплавні об'єднання з таких країн, як Китай, Південна Африка та Норвегія.

У конгресі ІНФАКОН-14 у м. Києві взяли участь та представили доповіді 217 фахівців із 30 країн світу. Для делегатів конгресу було організовано 2 технічні тури – на Нікопольський завод феросплавів та Побузький феронікелевий комбінат.

Вже після Конгресу у Києві у 2015 році, пройшли чергові Конгреси ІНФАКОН-15 у Південній Африці у Кейптауні у 2018 році та ІНФАКОН-16 у Тронхеймі у Норвегії у 2021 році; через пандемію останній конгрес пройшов у режимі он-лайн. Там же було ухвалено рішення про проведення чергового конгресу ІНФАКОН-17 у Китаї у 2024 році.

Українська асоціація виробників феросплавів та іншої електрометалургійної продукції УкрФА ство-

рена у 1997 році, представлена у Міжнародному феросплавному комітеті та Міжнародному інституті марганцю. Донедавна ми співпрацювали з Міжнародною спілкою металургів і мали спільну Науково-технічну раду з феросплавів з Росією; зараз ця співпраця скасована. Підписано договори з низкою національних феросплавних асоціацій та федерацій – Європейською, Китайською, Арабською, ПАР та іншими. УкрФА проводить також щорічну науково-технічну конференцію «Ключові проблеми електрометалургії».

Таким чином, феросплавна промисловість України розвивається переважно на основі власної сировинної бази, вирішуючи питання забезпечення феросплавними підприємств металургійної промисловості країни та експортуючи частину виробленої продукції на світові ринки. Реалізуючи розроблені підприємствами програми технічного переозброєння та модернізації, підвищення енергоефективності, ресурсозбереження, розвиваючи міжнародні зв'язки та співпрацю, феросплавна промисловість України продовжуватиме займати одне з провідних місць у світовому феросплавному співтоваристві.

#### ЛІТЕРАТУРА:

1. Сайт World Steel Association. Annual report 2021.  
[https://worldsteel.org/steel-by-topic/statistics/annual-production-steel-data/P1\\_crude\\_steel\\_total\\_pub/CHN/IND](https://worldsteel.org/steel-by-topic/statistics/annual-production-steel-data/P1_crude_steel_total_pub/CHN/IND).
2. Єрмоленко Г. На світовому ринку феросплавів спостерігається зниження попиту. Сайт GMK Center. Листопад 2022 р.
3. Medovar L.B., Grischenko S.G., Stovpchenko G.P. a.o. On Probable Ways of Steelmaking and Ferroalloy Industry Development. // Proceedings of INFACON XIV. The fourteenth international ferroalloys congress. Energy efficiency and environment friendliness are the future of the global ferroalloy industry. May 31-June 4. Kiev. Ukraine, v. 2, v.p. 779-786.
4. Сайт Компании PANDA HILL.  
<https://www.cradleresources.com.au/asx-announcements/panda-hill-niobium-project-presentation/#>.
5. 7-th South African Ferro-alloys Conference. Johannesburg, South Africa.2014. // Presentations «Metal Bulletin».
6. European ferro-alloys industry needs urgent help to survive energy crisis - Euroalliances: LME Week. October 21, 2022.
7. Грищенко С. Г., Гасик М.И., Куцин В.С. и др. Об итогах пятнадцатого Международного ферросплавного конгресса ИНФАКОН-15 (ЮАР, г. Кейптаун, февраль 2018 г.). Металлургическая и горно-рудная промышленность. 2018. № 1. С.11-15.

Поворотній В. В., Толстіков Г. І., Рохманов С. Р., Толстіков І.Г.

## Перспективні конструкції вузлів чотиривалкових робочих клітей «тандем» станів холодної прокатки труб

Povorotny V.V., Tolstikov G.I., Rakhmanov S.R., Tolstikov I. G.

## Prospective structures of four-rolls tandem work cages of cold rolling mill pipe

**Анотація.** Подальший розвиток виробництва холоднокатаних труб пов'язаний із розширенням сортаменту труб, підвищенням якості готової продукції та забезпеченням довговічності робочих елементів станів холодної прокатки труб (ХПТ), що в цілому сприяє підвищенню ефективності роботи обладнання. Одним з основних показників якості труб є нормована поздовжня різностінність, допуск якої може сягати 0,8% товщини стінки. Конкурентоспроможність вітчизняних холоднокатаних труб нерозривно пов'язана із удосконаленням існуючих конструкцій робочих клітей, а також зі створенням принципово нових деталей і вузлів станів ХПТ. У статті представлені перспективні конструкції деталей та вузлів чотиривалкових робочих клітей станів ХПТ, описані їх переваги та вплив на ефективність роботи стану і якість готової продукції.  
СТАН ХПТ, РОБОЧА КЛІТЬ, РОБОЧИЙ ВАЛОК, СТАНИНА, ТРУБА, КАЛІБР.

**Abstract.** Further development of the production of cold-rolled pipes is associated with expanding the range of pipes, improving the quality of finished products and ensuring the durability of the working elements of cold rolling mills (CRM), which generally improves the efficiency of equipment. One of the main indicators of pipe quality is the normalized longitudinal variety, the tolerance of which can reach 0.8% of the wall thickness. The competitiveness of domestic cold-rolled pipes is inextricably linked with the improvement of existing structures of working stands, as well as with the creation of fundamentally new parts and assemblies of CRM.

The article presents promising designs of four-roll working stands of CRM mills, in particular parts and assemblies, describes their advantages and impact on the efficiency of the state and the quality of finished products.  
CRM CONDITION, WORK STAND, WORK ROLL, FRAME, PIPE, CALIBER

**Вступ.** Способом холодної прокатки виготовляють високоякісні труби широкого діапазону розмірів практично з усіх марок сталей і сплавів, що містять титан, нікель, молібден, хром, вольфрам і цирконій [1,2].

Залежно від призначення готових труб в тій або іншій галузі промисловості технологія виробництва диктує велику їх різноманітність за зовнішнім діаметром, матеріалом, товщиною стінки. В свою чергу це створює передумови для модернізації та розробки нового обладнання і конструкцій станів ХПТ, які мають відповідати вимогам сьогодення [3,4].

До основних вузлів станів ХПТ, що визначають їх технічні характеристики і конструктивні особливості, належать робочі кліті, які забезпечують формування геометричних параметрів труби, лінія приводу робочої кліті та валків, поворотно-подавальний механізм [1,3].

**Аналіз літературних даних та постановка проблеми.** Одним з найбільш важливих технологічних параметрів при холодній періодичній прокатці труб є довжина робочої частини калібрів. Теоретичні і експериментальні дослідження показують, що збільшення довжини робочої частини калібрів при інших рівних умовах дозволяє приблизно в такій же мірі збільшити лінійне зміщення ме-

талу за подвійний хід кліті, а отже і продуктивність, а також підвищити разові деформації за період, що дозволить скоротити циклічність дорогого холодного переділу [5].

Ці переваги пов'язані з тим, що при збільшенні довжини робочої частини калібрів зменшуються конусність і необхідна розвалка струмка, знижуються деформації поперечних перерізів за подвійний хід кліті, нерівномірність деформації по периметру, збільшується дрібність деформації. Це покращує схему напружено-деформованого стану металу, що прокатується, підвищує його прокочуємість.

Збільшення довжини робочої частини калібрів можливо за рахунок збільшення діаметру валків при одночасному збільшенні радіуса кривошипа приводного механізму. Однак при цьому значно зростають вага кліті, динамічні навантаження в приводному механізмі і головному приводі стану і зусилля прокатки, так як вага кліті пропорційна кубу, зусилля в шатунах - четвертому ступеню, момент на кривошипному валу – п'ятому ступеню діаметра валків, а тиск металу на валки - пропорційно діаметру валків. Крім того, цей шлях вимагає реконструкції приводної частини стану (збільшення радіусу кривошипа) [6].

У зв'язку з цим більш прийнятним є збільшення

В. В. Поворотній,	
Г. І. Толстіков,	
С. Р. Рохманов,	
І.Г. Толстіков	

довжини робочої частини калібрів шляхом послідовної установки в кліті двох пар валків [7].

Якщо вважати, що при встановленні другої пари валків вага кліті збільшується в два рази, то зусилля в шатунах і момент на кривошипному валу збільшуються у два рази проти збільшення цих параметрів відповідно в 16 і 32 рази у разі збільшення діаметра валків в два рази.

Досвід створення та експлуатації робочої кліті з двома парами валків на станах ХПТ-32 підтвердив можливість і доцільність такої модернізації станів ХПТ інших типорозмірів.

**3. Мета і завдання досліджень.** Метою даної роботи є розробка перспективних конструкцій робочих клітей стану ХПТ-55 типу тандем.

**4. Матеріали та методи досліджень.** Конструкція запропонованої робочої кліті в стані ХПТ – 55, спроектованої при проведенні даної роботи, не-

зважаючи на подвоєння числа валків, дозволила зберегти вагу кліті на колишньому рівні за рахунок зменшення діаметра валків при використанні калібрів кільцевої форми замість полудискової і застосування одностороннього приводу обертання валків із зменшенням довжини валків і кількості приводних шестерен. Така робоча кліть має відстань між парами валків (по осях) 400 мм (Рис. 1). Сумарна довжина робочої частини калібрів  $l_{\Sigma}$  збільшується на цю величину в порівнянні з довжиною при одній парі валків.

При повній довжині ходу кліті 625 мм і довжині ходу її в періоди подачі і повороту 88 мм довжина робочої частини калібрів при одній парі валків становить:  $625 - 88 = 537$  мм; при двох парах валків  $537 + 400 = 937$  мм, тобто збільшується в 1,75 рази.

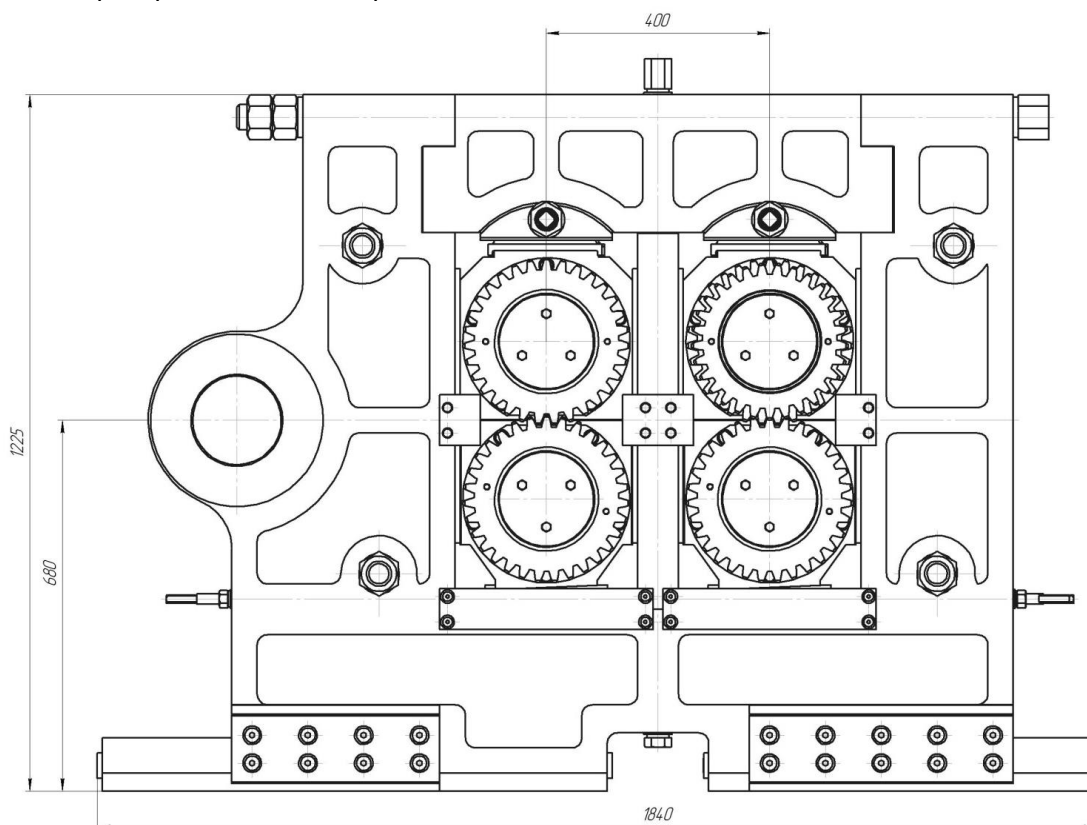


Рисунок 1. Схема робочої кліті типу тандем стану ХПТ-55

Таке збільшення довжини робочої частини калібрів може бути використано для збільшення продуктивності на 40 – 75 % і підвищення точності розмірів труб при одночасному збільшенні деформації заготовки за прохід по діаметру і товщині стінки.

У процесі прокатки перша (вхідна) пара валків зменшує діаметр і товщину стінки заготовки до деяких проміжних значень, а друга (вихідна) доводить їх до розмірів готової труби. Тому середні глибини струмків, а значить і середні радіуси, що катають, першої та другої пар валків неоднакові. Так як дворядна схема прокатки дозволяє здійснювати значну деформацію по діаметру, то різни-

ця катаючих діаметрів, що визначають радіуси провідних шестерень першої та другої пар валків, може досягати значних величин. Тому, щоб уникнути значних осьових зусиль у заготовці і між парами валків, а також надмірного ковзання металу по валкам доцільно на першій і другій парах валків встановлювати приводні шестерні різного діаметра.

Крім того, при досить великих деформаціях і технологічних навантаженнях доцільно здійснювати настройку кутового положення валків кожної пари незалежно один від одного.

Для задоволення цих вимог конструкція запропонованої кліті передбачає індивідуальні приводи

обертання валків кожної пари з незалежним регулюванням кожної приводної рейки вздовж осі прокатки та по висоті.

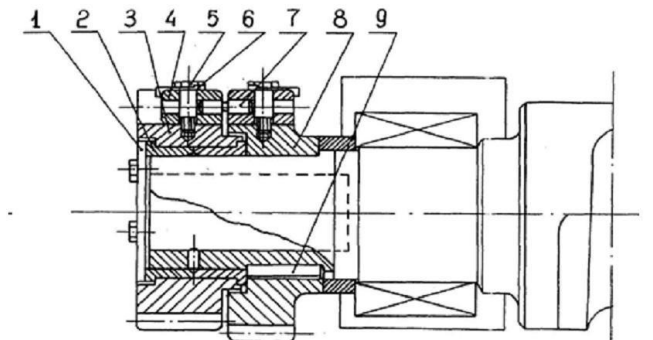
Задля запобігання руйнування деталей робочих клітей, що сприймають енергосилові навантаження в результаті взаємодії розкату та калібрів, робочі кліті станів ХПТ оснащуються запобіжними пристроями, використання яких значною мірою сприяє збереженню деталей робочої кліті і головного приводу стана від поломок [8].

Проте ці пристрої мають істотні недоліки, внаслідок яких, виникає необхідність розробки нових конструктивних вирішень запобіжних пристроїв і вибору місця їх установки з метою підвищення жорсткості робочої кліті, скорочення часу заміни елементів, що зрізаються. Вказаний підхід є одним з шляхів підвищення надійності і довговічності станів ХПТ. [9].

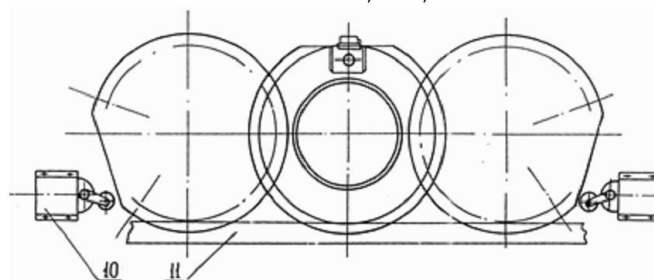
Запропонована конструкція запобіжного пристрою стану ХПТ, встановленого в лінії приво-

ду валків, який захищає деталі кліті від можливих перевантажень і поломок (Рис. 2).

На кінці робочого валка (так, як валок – деталь симетрична, на рисунку 2 зображена одна його половина) насаджені зубчасті шестерні, одна з яких ведуча 3, напесована на втулці 2, яка вільно ковзає по валку, а інша, ведена 8 закріплена на шпонці 9. Для запобігання осьовому переміщенню втулок 2 з напесованою шестернею 3 і веденою шестернею 8 використовується фланець 1. У обох шестернях є гнізда, в яких поміщені касети 4, закріплені в корпусах шестерень за допомогою спеціальних бовтів 5 і стопорних шайб 6. Для передачі зворотньо-поступального руху від приводної шестерні 3, що знаходиться в зачепленні з нерухомою рейкою 11, до робочого валка через ведену шестерню 8, касети 4 зв'язані між собою за допомогою запобіжного пальця 7.



*Хвостовик робочого валка стану ХПТ-55 із запобіжним пристроєм*



*Розташування шестерень робочого валка стану ХПТ-55 у крайніх положеннях*

**Рисунок 2** Валкова установка стану ХПТ – 55 з елементами запобіжного пристрою.

1 – шайба упорна (фланець); 2 – втулка; 3 – ведуча шестерня; 4 – касета; 5 – бовт; 6 – шайба стопорна; 7 – палець; 8 – ведена шестерня; 9 – шпонка; 10 – кінцевий вимикач; 11 – зубчаста рейка

При поломці пальця розривається зв'язок між шестернями 3 і 8, прокатка здійснюється не по примусовому радіусу (як це має місце), а по природному катаючому радіусу. При цьому настає розузгодження між положенням приводної і веденої шестерні, яке приводить до того, що ведена шестерня наїжджає на один із встановлених на початку і в кінці ходу кліті кінцевих вимикачів 10, які при звичайній роботі стану не функціонують (за рахунок наявності експериментально встановлених зазорів між кінцевим вимикачем і поверхнею привідного зубчастого колеса), і відключає стан.

Якщо руйнування запобіжного елемента сталося при робочому ході (хід вперед), шестерні 3 і 8, а з ними деформуючий профіль валка відстає від положення, визначуваного примусовим катаючим радіусом, що деформує радіус профілю, а, отже, і зусилля на робочі валки зменшується.

Необхідно відзначити, що зріз запобіжника (пальця) може статися і при холостому (зворотньому) ході кліті. В цьому випадку деформуючий радіус профілю валка збільшується порівняно з примусовим катаючим радіусом, при цьому можливе збільшення зусилля на валки. Для виключення зрізу

запобіжного елемента при холостому (зворотньому) ході необхідно встановити обмежувач щодо проворота шестерен 3 і 8.

Так, наприклад, конфігурація виступу привідної шестерні 3 і западини синхронізуючої шестерні 8 може бути виконана у вигляді елементів храпової пари, що вирішує поворот тільки в одному напрямі. Установка такого обмежувача може бути здійснена після проведення дослідних прокаток і визначення навантажень в робочій кліті стану ХПТ із запобіжним пристроєм.

Розміри запобіжного елемента вибирають з умови по руйнуванню при зрізі [10] по максимальному руйнівному навантаженню, відомому для кожного типорозміра стану [8].

Задля забезпечення зменшення часу на налаштування нижніх валкових систем станів ХПТ типу тандем, розроблена конструкція натискного пристрою що розташована між нижніми подушками та станиною (Рис. 3).

Під час роботи стану, текстолітові плазуни, на яких розташовується робоча кліть, зношуються, що приводить до зміни положення осі прокатки. Задля повернення осі прокатки на початкове місце необхідно робити ряд заходів, які тягнуть за собою фінансові витрати та витрати часу. Також при налаштуванні нижньої валкової системи необхідно вдаватися до використання додаткових планок та вкладишів, щоб забезпечити необхідне місце валка як по вертикальній складовій так і по осі валка.

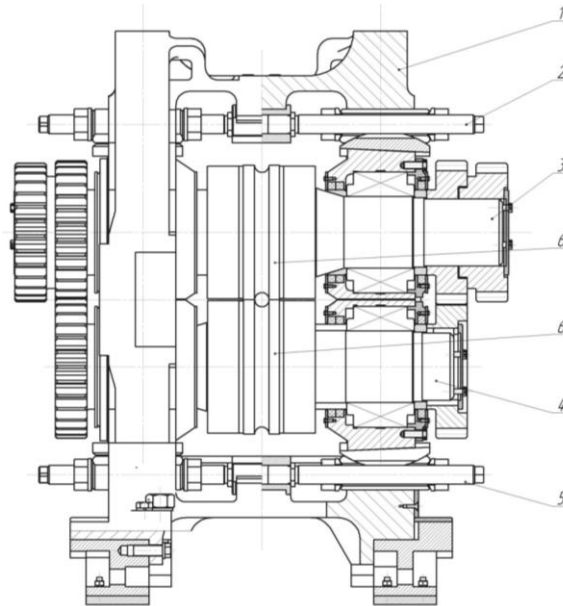


Рисунок 3 Робоча кліть стану ХПТ: 1 – станина, 2 – верхній натискний пристрій, 3 – верхній робочий валок, 4 – нижній робочий валок, 5 – нижній натискний пристрій, 6 – калібр робочого валка.

Запропонований натискний пристрій виконаний у вигляді клинового механізму, що взаємодіє із відповідною нахиленою площиною подушки і нижньою частиною станини, та має хід перпендикулярний осі прокатки [11].

Верхній натискний пристрій 2 послабляють, в результаті чого виникають зазори між верхньою валковою системою 3 та станиною 1. За допомогою нижнього натискного пристрою 5 нижня валкова система 4 встановлюється на необхідний рівень, після чого за допомогою верхнього натискного пристрою 2, вибираються зазори між станиною 1 і верхньою валковою системою 3 таким чином, що робочі калібри 6 стають рівновіддаленими від осі прокатки.

Реалізація на практиці запропонованого рішення призведе до зниження витрат на технічне обслуговування робочої кліті та зниження часу простою обладнання на технічне обслуговування та ремонт.

Під час роботи стану в робочій кліті в системі розкат-валкова система-станина виникають динамічні явища, що призводять до коливальних про-

цесів між робочими калібрами і осередком деформації. Амплітуди коливань з певною частотою накладаються на поверхню труби, що спричиняє поздовжню різностінність на готовому виробі. Особливості відомої конструкції подушок не дозволяють встановити мінімальне зближення калібрів валків, тому що при їх роботі в обкат калібри руйнуються [12].

В роботі [13] представлено перспективну конструкцію робочої кліті стану ХПТ з механізмом регулювання міжвалкового зазору, що складається з ексцентрикових втулок, розташованих в подушках кліті і виконаних з нарізкою черв'ячних зубів для можливості установки зазору за допомогою черв'яка. Після поглибленого дослідження конструкцій робочих клітей наведена конструкція була взята за прототип, на базі якої запропоновано перспективну конструкцію робочої кліті стану ХПТ з лівими та правими подушками, виконаними суцільно [14] (рис.4).

Особливістю даної конструкції валкової системи є те, що кожна верхня подушка виконана разом із відповідною нижньою подушкою у вигляді касе-

ти, що забезпечує підвищення жорсткості всієї валкової системи, причому верхня частина подушки контактує з натискним пристроєм, а в середню її частину вмонтований ексцентричний механізм з черв'ячною передачею для регулювання міжвалкового зазору [14].

Регулювання міжвалкового зазору здійснюють за допомогою черв'ячної передачі, що обертає ексцентрикові втулки, в яких встановлені підшипники. Налаштування зміщення калібрів здійснюють

за допомогою кришок подушки, впливаючи на підшипник і тим самим переміщуючи валок в осьовому напрямку [14]. На основі даної конструкції робочої кліти стану ХПТ розроблена конструкція валкової системи з цільною намотаною подушкою (Рис.4) [15]. Кожна подушка зовні по периметру через грані, що контактують зі станиною, обмотана стрічкою із високоміцного матеріалу із зусиллям натягу, не менше ніж величина зусилля прокатки.

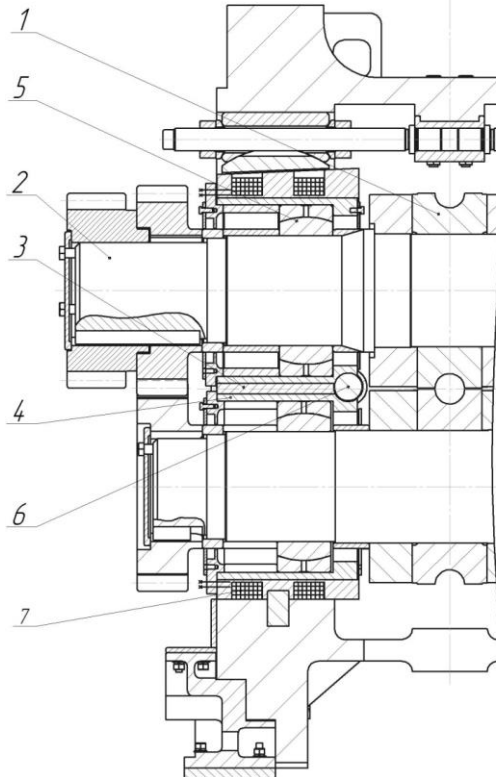


Рисунок 4 Конструкція робочої кліти стану ХПТ з суцільними намотаними подушками: 1 – калібр, 2 – робочий валок, 3 – корпус подушки, 4 – ексцентрикові втулки, 5 – підшипники, 6 – черв'як, 7 – намотка із надміцного матеріалу

За рахунок виконання подушки у вигляді цільної конструкції з попередньою намоткою забезпечується її попередньо напружено-деформований стан, який призводить до виникнення в конструкції подушки напружень, близьких до нуля при максимальній величині зусилля прокатки. Таким чином, при значному перебільшенні величини зусилля прокатки буде виходити з ладу стрічка з надміцного матеріалу при збереженні цілісності подушки та станини. Варто відзначити, що при намотуванні подушки стрічкою з надміцного матеріалу відбувається збільшення жорсткості подушки та валкової системи вцілому, що призводить до зменшення величин амплітудних коливань робочих валків. Дане явище позитивно впливає на поздовжню різностійкість, а в комплексі з можливістю збільшити величину зусилля прокатки сприяє розширенню сортаменту і якості труб за рахунок великого значення величини обтиску. З іншого боку використання розробленої конструкції дозволяє знизити функціональне навантаження станини, що дає

можливість використання в робочій кліті станин полегшених конструкцій без ризику руйнування.

**5. Результати досліджень.** При регулюванні міжвалкового зазору ключем обертають черв'як 6, який приводить у рух ексцентричні втулки 4, які обертаються в корпусі 3, приводячи в рух підшипники 5. Заодно з підшипником переміщуються валки 2 і напесовані на них калібри 1. При відсутності навантаження на робочі валки 2 стрічка 7 створює попередньо напружено-деформований стан корпусу 3, в результаті чого корпус 3 працює на стиснення. В процесі прокатки на корпус 3 діють розтягуючі зусилля, які прикладаються до калібрів і передаються через робочі валки 2, підшипники 5, ексцентрикові втулки 4. За рахунок намотки 7 напруження, що виникають в корпусі 3, наближуються по своєму значенню до нуля, а основне навантаження несе намотана стрічка 7.

Запропонована перспективна конструкція робочої кліти типу тандем стану ХПТ – 55 дозволить збільшити лінійне зміщення при прокатці труб з ву-

глицевої і низьколегованої сталі та сплавів – до 60-70 мм. При кількості подвійних ходів кліті в хвилину  $n = 80-85$  і коефіцієнті використання часу роботи стану 0,85-0,9 цьому відповідає годинна продуктивність 350-365 і 280-300 м. При цьому коефіцієнти витяжки за прохід можуть досягати відповідно 7-8 і 6-7.

Запропонована конструкція запобіжного пристрою дозволяє підвищити жорсткість робочої кліті в 2,5 раза, зменшити час на заміну запобіжних елементів в 8 раз (час на заміну диску існуючого запобіжного пристрою, що зрізається, складає близько 40 хвилин, а час на заміну пальця даного запобіжного пристрою, що зрізається, складає близько 5 хвилин) без додаткового налаштування стану, все це сприяє підвищенню його продуктивності.

#### Висновки

При розробці перспективних конструкцій робочих клітей стану ХПТ-55 типу тандем розроблено

низку пропозицій щодо модернізації існуючих вузлів:

Пропонується конструкція запобіжного пристрою робочої кліті, що виконана у вигляді касет зі зрізними пальцями, розташованими між приводною та синхронізуючою шестернями.

Пропонується конструкція робочої кліті з установкою валків, що має суцільні пари подушок з намоткою із надміцного матеріалу, які дозволяють суттєво збільшувати зусилля прокатки, максимально зближувати калібри робочих валків, не збільшуючи при цьому амплітуди вертикальних коливань робочих валків та не псувати калібри і деталі робочої кліті.

Пропонується конструкція робочої кліті з натискним пристроєм для нижніх пар подушок, що дозволить знизити витрати та заощадити час на проведення технічного обслуговування стану.

#### Бібліографічний опис

1. Кондратов Л.А. Конструкции ремонт и обслуживание станов холодной прокатки труб / Л.А. Кондратов, Ю.Б. Чечулин, Н.Т. Богданов, Н.С. Макаркин // М.: Металлургия 1994 – 352с.
2. Musazadeh, M.H., Mohammad Sharifi, E., Vafaei, R. *et al.* Experimental and Numerical Investigation of VMR and HPTR Pilgering of Zr–1.5%Nb Tubes. *Met. Mater. Int.* (2019). <https://doi.org/10.1007/s12540-019-00438-5>
3. Фролов В.Ф. Холодная пильгерная прокатка труб / В.Ф. Фролов, В.Н. Данченко, Я.В. Фролов // Монография, - Днепропетровск: Пороги, 2005. – 255с.
4. Dai, J., Li, W., Chu, Z. [Microstructure Evolution of Cold Pilgering Stainless Steel Tubes](https://doi.org/10.1155/2020/3678980). *Advances in Materials Science and Engineering Volume 2020*, Article ID 3678980, 8 pages <https://doi.org/10.1155/2020/3678980>
5. Соколовский В. И. Величина относительного смещения сечений рабочего конуса при холодной прокатке труб. – Цветные металлы, 1963, № 4.- с. 77 – 82.
6. Гриншпун М. И. Станы холодной прокатки труб /М. И. Гриншпун, В. И. Соколовский/. //М.: Машиностроение, 1967. – 239 с.
7. Ткаченко А. С. Станина клетки стана холодной прокатки труб /А. С. Ткаченко, А. С. Малкин // Технология и организация производства, 1976, № 1. – с.34 – 47.
8. Станкевич В. А. Холодная прокатка труб /В. А. Станкевич, И. И. Усенко //М.: Металлургия. – 1982, 273 с.
9. Tolstikov G.I. To the question of creation of the working stand cold rolling mill pipe with safety device / G.I. Tolstikov, V.V. Povorotny, S.R. Rakhmanov, S.M. Krishin // *Metallurgical and Mining Industry* №2. – Dnipro, 2017. P. 20-24. (Index Copernicus)
10. Биргер И. А. Расчеты на прочность деталей машин. Справочник / И. А. Биргер, Б. Ф. Шорп// М.: Машиностроение, 1979. – 702 с.
11. Патент на корисну модель № 145683 Україна, МПК В21В21/00. Робоча кліть стану холодної прокатки труб/ С.Р. Рахманов.; В.Ф. Орещенко; С.М. Кришин; В.Т. Вишинський; В.В. Поворотній заявник і власник Національна металургійна академія України. – № u 202005035; заявл. 04.08.2020 опубл. 28.12.2020, Бюл.№24.
12. Оценка возможности прокатки горячекатаных тонких полос на НТЛС 1680 с применением роликовых конических подшипников или подшипников жидкостного трения: Отчет о НИР (заключительный)/НМетАУ. - Договор № 26/2007/1335 от 02.04.2007 г. № RK0107U009714 – Д., 2007. – 67с.
13. Патент на винахід № 117943 Україна, МПК В21В17/00. Спосіб регулювання міжвалкового зазору робочих клітей станів холодної прокатки труб і пристрій для його здійснення/ С.Р. Рахманов, В.Т. Вишинський, О.В. Лисенко, В.М. Кагаловський, В.В. Поворотній; заявник і власник Національна металургійна академія України. – № а 201608215; заявл. 25.07.2016; опубл. 25.10.2018, Бюл.№20.
14. Патент на винахід № 119192 Україна, МПК В21В21/00. Робоча кліть стану холодної прокатки труб/ В.В. Поворотній; С.Р. Рахманов, заявник і власник Національна металургійна академія України. – № а 201708024; заявл. 01.08.2017 опубл. 11.02.2019, Бюл.№3.
15. Патент на корисну модель № 143127 Україна, МПК В21В21/00. Робоча кліть стану холодної прокатки труб/ В.В. Поворотній; С.Р. Рахманов.; В.Т. Вишинський заявник і власник Національна металургійна академія України. – № u 202000939; заявл. 14.02.2020 опубл. 10.07.2020, Бюл.№13.

Ванюков А.А., Ковальов Д.А., Камкіна Л.В., Комар А.С.

## Спiкання залiзорудних обкотишiв iз пiдвищеним вiстом твердого палива Досвiд виробництва.

Vanyukov A.A., Kovalev D.A., Komar A.S.

### Sintering of iron ore pellets with an increased content of solid fuel

Анотація.

В роботі розглянуто питання підвищення продуктивності доменних печей. Одним із способів, поряд зі збільшенням кількості дуття і зменшенням витрати коксу, є використання високоякісної металізованої шихти. Тому обґрунтування можливості широкого використання твердого палива, як джерела теплової енергії, так і відновника оксидів заліза, у виробництві залізорудних обкотишів є актуальним. Завдання дослідження при виробництві обкотишів: підвищення міцності офлюсованих обкотишів, що вміщують тверде паливо фракції 0,08–0,8 мм, покращення їх ступеня металізації та можливість перенесення частини процесу відновлення з доменної печі на стадію спiкання гiбридних згрудкованих шихтових матерiалiв. Наукова новизна:

Вступ

Вiдомо, що найбільш перспективним напрямом розвитку доменного виробництва є покращення якості вихідних шихтових матерiалiв [1]. Від якості приготовленої шихти прямо пропорційно залежать питома витрата коксу, швидкість протікання хiмiчних реакцій та фiзико-хiмiчних перетворень у доменній печі, що істотно впливає на інтенсифікацію доменного технологічного процесу [1, 2]. Останнім часом особлива увага приділяється удосконаленню доменного процесу як на стадії підготовки металургійної сировини, так і безпосередньо при веденні плавки в плавильному агрегаті.

Останніми роками розроблена низка технологій спiкання агломерату, що включають поліпшення якості згрудкованої агломераційної шихти, підвищення кисню в повітрі, попереднє підігрівання шихти до запалювання [3, 4]. У праці [5] установлено, що продуктивність доменної печі різко зростає при сумісному використанні вугільнопорошкового палива з природним газом і високим вмістом кисню в дутті. Дослідженнями [6] установлено, що додавання твердого палива до шихти і використання його у вигляді водно-вугільної суспензії на випалювальних конвеєрних машинах дає змогу знизити питому витрату природного газу, підвищити міцність котунів і зменшити вихід дріб'язку в спеченому продукті.

Вiдомостей про використання у доменному процесі попередньо металізованої залізорудної шихти в періодичних виданнях майже не наводиться, хоча у підручниках [1, 2] відзначається, що одним із ефективних способів підвищення продуктивності доменних печей, поряд зі збільшенням кількості дуття і зменшенням витрати коксу, є використання високоякісної металізованої шихти. Тому можливість широкого використання твердого палива, як джерела теплової енергії, так і відновника оксидів заліза, у виробництві залізорудних котунів постійно перебуває в полі зору спеціалістів. У зв'язку з цим важливо вирішити такі завдання при виробництві котунів, як підвищення міцності офлюсованих котунів, що вміщують тверде паливо фракції 0,08–0,8 мм, покращення їх ступеня металізації та можливість перенесення частини процесу відновлення з доменної печі на стадію спiкання гiбридних згрудкованих шихтових матерiалiв.

#### Процес спiкання залiзорудних котунів i з'ясування їх основних властивостей

Актуальність проведення досліджень у зазначеному напрямі не викликає сумніву, оскільки виготовлення якісних офлюсованих котунів із підвищеним вмістом вуглецю сприятиме підвищенню ступеня їх металізації і подальшому використанню металізованої шихти в доменному процесі, що забезпечить зниження витрати коксу, підвищення інтенсивності роботи і продуктивності плавильного агрегату.

Вивчення процесу спiкання залізорудних котунів із підвищеним вмістом твердого палива і впливу на цей процес деяких факторів становить значний інтерес. Тому в процесі дослідження було з'ясовано роль таких факторів, як основність залізорудних котунів, вміст у них твердого палива і температура спiкання, на показники міцності при ударі й стиранні та ступінь металізації спеченого продукту.

Як основний сировинний матерiал використовували концентрат залісної руди, що був отриманий із використанням флотаційного способу збагачення та мокрої магнітної сепарації і який має такий хiмiчний склад, %: 67,6 Fe; 23,1 FeO; 5,6 SiO<sub>2</sub>; 2,05 MnO; 1,05 CaO; 0,5 MgO; 0,14 S; 0,06 P, при вологості маси 9,8 %. Зазначений концентрат використовували для виготовлення як неофлюсованих, так і офлюсованих котунів з основністю 1,4 і 1,9. Відсотковий хiмiчний склад котунів основністю 1,4 становив: 63,5 Fe; 20,2 FeO; 2,05 MnO; 7,23 CaO; 0,75 MgO; 5,7 SiO<sub>2</sub>; 0,14 S; 0,05 P, при вологості маси 8,8 %, а котунів основністю 1,9: 58,9 Fe; 18,9 FeO; 2,05 MnO; 5,8 SiO<sub>2</sub>; 10,1 CaO; 1,0 MgO; 0,12 S; 0,05 P, при вологості маси 7,8 %.

Котуни випалювали в печі Таммана в кварцовій трубці діаметром 40 мм, через яку продували підігріте повітря в кількості 35 л/хв. Випалювання котунів (після попереднього підігрівання до 573K протягом 5 хв) проводилось за температур 1553, 1573 і 1593K протягом 10 хв їх завантаженням у розігріту кварцову трубку. Після короткої витримки котунів у печі за вказаних температур їх охолоджували сумісно з піччю до 1173 K, а потім видаляли з печі і охолоджували потоком холодного повітря.

Випалені котуни піддавали механічним випробуванням на деформаційне стиснення і стирання із застосуванням стандартних методик дослідження.

З допомогою хімічного і рентгеноструктурного методів аналізу визначали у складі котунів монооксид заліза, фазовий склад та їх ступінь металізації.

Для отримання ступеня металізації котунів близько 35 % до зазначених сумішей, хімічний склад яких наведений вище, додавали пилоподібний кокс фракції 0,08...0,8 мм як відновник оксидів заліза. Котуни для доменного виробництва чавуну, як правило, не містять твердого палива або містять його в кількості 1...2 %, тоді як для прямого отримання заліза за технологією ITmk-3 вміст твердого палива в котунах коливається в межах 20...30 % [1, 3, 6]. Тому в складі котунів дослідної серії вміст твердого палива змінювали в межах 4—12 %.

Використання дисперсного твердого палива в складі котунів дало можливість отримати значною мірою відновлювальну атмосферу замість інтенсивного окиснення котунів у зоні їх нагрівання (випа-

лювання). В інтервалі температур випалювання 1553...1593 К протягом 5 хв відбувається прогрівання котунів, що супроводжується формуванням розплаву, причому в рідкій фазі превалює вже оксид FeO замість Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, як у застосуванні традиційної технології при спіканні котунів без наявності у складі твердого палива. В результаті замість воластоніту (CaSiO<sub>3</sub>) і двокальцієвого силікату (Ca<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>), які мають поля кристалізації в системі CaO·Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·SiO<sub>2</sub>, утворюються олівін (CaFeSiO<sub>4</sub>) і ферити кальцію з широким полем кристалізації в системі CaO·FeO·SiO<sub>2</sub>, що дає можливість різко зменшити рівень внутрішніх напруг і підвищити механічну міцність спеченого продукту.

Змінення міцності котунів різної основності з вмістом твердого палива до 10 %, випалених протягом 10 хв за температур 1553, 1573 і 1593 К, показано на рис. 1.

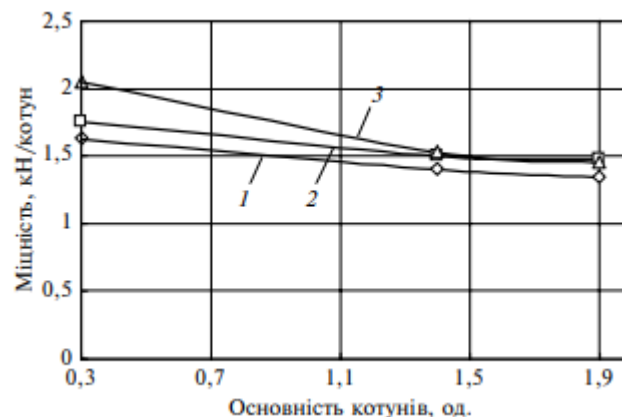


Рис.1 Змінення міцності котунів різної основності з вмістом палива 10 %, випалених протягом 10 хв: 1 — 1553 К; 2 — 1573 К; 3 — 1593 К

Котуни, отримані за цією технологічною схемою, характеризуються достатніми показниками міцності в холодному стані і не руйнуються при відновленні, оскільки вони мають міцні шлакові силікатні зв'язки і значно менший рівень рекристалізації. Наявність у склад котунів оксиду магнію до 1,0 % дає змогу не тільки істотно підняти температуру випалу (до 1593 К), але й розширити температурний інтервал випалу. В процесі зміцнення MgO проникає в решітку магнетиту методом дифузії в твердій фазі, утворюючи сполуку (Mg,Fe)·Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> на межі зерен, і діє як сильна в'язуча речовина між зернами оксидів заліза.

Наведена на рис. 2 залежність міцності випалених котунів від температури вказує на той факт, що з підвищенням температури до 1593 К міцність їх зростає незалежно від основності. Проте з підвищенням основності їх міцність дещо знижується. Зниження міцності пояснюється тим, що в міру підвищення температури відбуваються інтенсивне оплавлення силікатних мінералів, частка яких з

ростом основності збільшується, і утворення значної кількості більш крихкого шлакового каркасу. Крім того, наявність у складі котунів дисперсного твердого палива в кількості 4...12 % призводить до збільшення відновного потенціалу, зменшення ступеня окиснення котунів і, як наслідок, до зменшення кількості гематитової зв'язки, міцність якої в інтервалі температур 1473—1493 К досягає максимальних значень [7, 8].

З іншого боку, в міру підвищення температури до 1573 К і вище в результаті інтенсифікації процесу відновлення, видалення кисню і перебудови кристалічної решітки (у зв'язку з дисоціацією залишкового гематиту і утворенням вторинного магнетиту) по зовнішньому периметру котуна збільшується мікропористість, яка послаблює зв'язки між агрегатами кристалів [7, 8].

Підтвердженням такої закономірності щодо змінення міцності котунів різної основності з підвищенням температури випалювання є результати барабанних проб спеченого продукту (рис. 2).

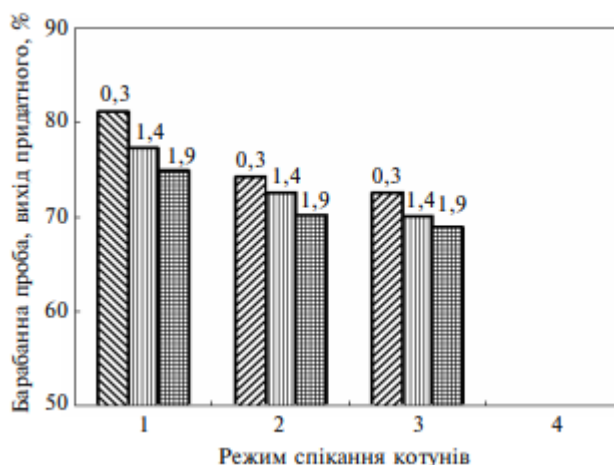


Рис. 2 Результати барабаних проб котунів різної основності, випалених протягом 10 хв: 1 — 1593 К; 2 — 1573 К; 3 — 1553 К

Важливим завданням покращення якості зрудкованого матеріалу для доменного виробництва чавуну, крім підвищення його основності і “холодної” міцності, є збільшення ступеня металізації після його термообробки. Одна з умов вирішення цієї проблеми — це перенесення частини процесу відновлення з доменної печі на стадію спікання металургійної сировини. Для цього до складу зазначених вище котунів додавали 4...12 % пиловидного коксу фракції 0,08...0,8 мм. Використання в доменній печі попередньо металізованої залізородної шихти зі ступенем металізації 30—35 %, за рахунок додаткового введення в склад котунів пиловидного коксу або вугілля, дасть мож-

ливість знизити витрати коксу приблизно на 7 % та збільшити її продуктивність приблизно на 8 % на кожні 10 % металевого заліза в шихті [1]. Наявність твердого палива у складі котунів у сполученому процесі спікання і металізації приведе до зменшення витрати природного газу приблизно в 1,5 разу. Отримання таких шихтових матеріалів з високими металургійними властивостями дасть змогу підвищити ефективність роботи доменного виробництва.

Зміну ступеня металізації офлюсованих і неофлюсованих котунів залежно від вмісту в них твердого палива показано на рис. 3

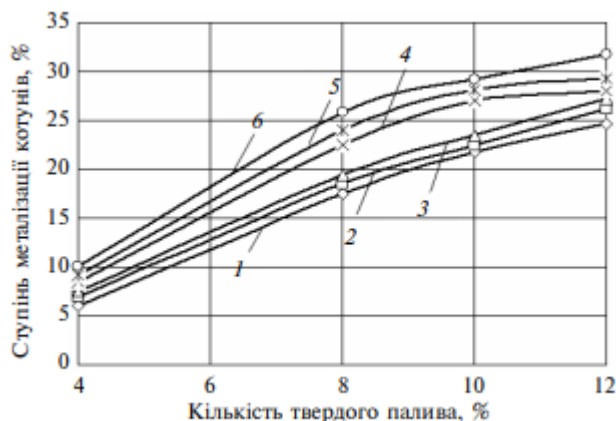


Рис. 3. Зміна ступеня металізації котунів різної основності за температур спікання 1553 і 1593 К залежно від вмісту в них твердого палива: 1 — неофлюсовані котуни, випалені за температури 1553 К; 2 — котуни основністю 1,4, випалені за температури 1553 К; 3 — котуни основністю 1,9, випалені за температури 1553 К; 4 — неофлюсовані котуни, випалені за температури 1593 К; 5 — котуни основністю 1,4, випалені за температури 1593 К; 6 — котуни основністю 1,9, випалені за температури 1593 К

Із рис. 3 видно, що зі збільшенням вмісту твердого палива у складі котунів ступінь металізації спеченого продукту постійно зростає і досягає свого максимуму, економічно вигідного для доменного процесу, за наявності в складі шихти близько 12 % вуглецю. З підвищенням вмісту вапна (CaO) у складі котунів (за однакової кількості твердого палива) їх ступінь металізації також підвищується, хоча значно меншою мірою, ніж при зміні в них

вмісту твердого палива. Так, ступінь металізації неофлюсованих котунів за температури випалу 1593 К і вмісту в них твердого палива 12 % становить 27,5 %, тоді як ступінь металізації офлюсованих котунів (1,9 од.) за тієї ж температури випалу сягає вже 31,5 %. Підвищення ступеня металізації котунів зумовлюється тим, що в інтервалі температур 1553—1593 К з підвищенням їх основності активно відбувається процес утворення рідкої фа-

зи. Причому чим більше вапна у складі котунів, тим більша кількість рідкої фази. З іншого боку, з підвищеннями основності котунів ступінь окиснення спадає [9], оскільки випалювання згрудкованого матеріалу супроводжується утворенням значної кількості рідкої фази, що ускладнює подальший доступ окисника до ядра гранули, а одночасний перебіг процесу дисоціації гематиту сприяє утворенню в центральній зоні котунів переважно магнетитової структури з підвищеним вмістом заліза.

Більш помітна залежність зміни ступеня металізації від температури спікання вказує на той факт, що підвищення температури призводить до збільшення кількості рідкої фази в котунах і до прискорення процесу рідкофазового спікання в них, а також, як наслідок, до зниження ступеня ізотермічного окиснення [9]. Наявність частинок твердого палива в складі котунів сприяє підвищенню вмісту CO в газовій фазі, що супроводжується ростом відновного потенціалу спеченого шару. Підтвердженням такого явища є утворення в центральній зоні гранул магнетитової структури з наявністю в твердом розчині оксиду заліза (FeO) і збільшеної кількості відновленого заліза, тоді як при високотемпературному випалюванні котунів без палива відбувається дисоціація гематиту з утворенням через стадію маггеміту магнетитової структури з високим вмістом оксиду заліза (Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) без наявності включень відновленого заліза.

Ефективність часткової заміни природного газу твердим паливом для випалу залізородних окатишів.

В даний час більшість фабрик огрудкування використовують в якості теплоносія природний газ і рідке паливо. Однак, з огляду на перспективи розвитку енергетики, швидке виснаження запасів нафти і газу в порівнянні з запасами вугілля, слід визнати, що збільшення масштабів використання вугілля дозволить уникнути енергетичної кризи. До теперішнього часу обставини змінилися таким чином, що необхідність економії теплоти при виробництві окатишів стала ще більш актуальною.

Можливі три основних напрямки використання твердого палива для випалу окатишів: шляхом його газифікації повітрям або киснем з отриманням низько і середньокалорійного газу; безпосереднім спалюванням пилоподібного палива в спеціальних виносних топках з отриманням високотемпературних димових газів, а також при спалюванні його в пальниках трубчастих обертових печей; шляхом добавки твердого палива в шихту для огрудкування [10].

Якщо ефективність застосування пиловугільного палива для зниження витрати коксу при виплавці чавуну не викликає сумніву, то заміна природного газу для виробництва залізородних окатишів недостатньо обґрунтована. Перевага на відміну від агломерації при випалюванні окатишів полягає в тому, що в газах, що викидаються в атмосферу не виявлено CO і ціана (CN)<sub>2</sub> [11]. При цьому найважливіше врахувати шкоду навко-

лишньому середовищу, який наноситься агломераційним виробництвом в результаті викидів в атмосферу оксидів сірки, азоту, окису вуглецю і ціану [12].

Спалювання пиловугільного палива здійснюється на теплоелектростанціях, в обертових печах при виробництві цементу, в горні доменної печі та інших теплових агрегатах. Спалювання вугілля в надшаровому просторі обпалювального агрегату стосовно випалу окатишів виконано на дослідній установці в США з використанням бітумінозного і бурого вугілля. Подрібнене вугілля подавали повітряним потоком в пальник трубчастого типу, де забезпечували повне згоряння вугілля. За цією схемою при одному пальнику виплучається максимальна кількість теплової енергії. Однак, для конвеєрних машин схема ускладнюється, де кількість пальників збільшується до 24 штук (ОК - 306), 34 штук (ОК - 552), що потребує перед кожним пальником необхідність встановлення бункера з дозуючим пристроєм.

При використанні цієї системи зола вугілля потрапляє в шар окатишів і виникає ймовірність утворення настилів в обертовій печі і утворення спеченців при випалюванні на конвеєрних машинах. Найбільш прийнятним для цих цілей є вугілля, температура розм'якшення золи якого повинна бути близько 1480°C.

Найбільш перспективним способом використання твердого палива для випалу залізородних окатишів є введення його в шихту для огрудкування. Подача палива в окатиш може здійснюватися накочуванням на поверхню сформованої сирової гранули, розподілом палива рівномірно за обсягом окатишів шляхом окатування рудовугільної шихти.

Виконано значний обсяг досліджень з випалювання залізородних окатишів з використанням твердого палива. Це пов'язано як з різноманіттям видів окатишів, так і палив. Вивчено рудно-паливні окатиші, отримані хіміко-каталітичним методом, двошарові окатиші з різним вмістом вуглецю в зовнішньому і внутрішньому шарах і металізовані окатиші. Зазначені способи виробництва окатишів через складність технології промислового виробництва поширення не отримали.

Стимулом до використання твердого палива при виробництві звичайних доменних окатишів, крім причин вище перерахованих, є все більш значне залучення в процес огрудкування гематитових концентратів [13].

Дослідження по використанню вугілля при виробництві окатишів на випалювальних конвеєрних машинах проведені фірмою Лургі [14]. На конвеєрній машині в Ліберії при введенні в шихту 0,6% вугілля приріст продуктивності отриманий в 15% при незначному збільшенні температури окатишів при розвантаженні [15].

У разі збереження температури нижніх ділянок оброблюваного шару такої ж, як і при звичайному режимі випалу (1100°C), добавка твердого палива призводить до збільшення продуктивності обла-

лювальної машини на 11,2%, при цьому економія природного газу складає 1,64 м<sup>3</sup>/т, а питома витрата тепла скорочується на 171,7 МДж/т. Питома витрата електроенергії зменшується при цьому на 2,6 кВт·г/т додатних окатишів.

Температурно-тимчасові характеристики випалу окатишів такі як рівень температури, тривалість термообробки забезпечують отримання окатишів необхідної якості.

На фабриці для огрудкування фірми «Сідбек-Нормайнс» в Канаді було вироблено 8 млн. т окатишів з добавкою в середньому 0,85% коксика в шихту. Витрата мазуту скоротилась з 21 до 13,5 л/т окатишів. Металургійні властивості окатишів не змінилися. За рахунок різниці у вартості коксика і мазуту економія витрат склала 4,5 млн. доларів на рік.

Одним із способів використання твердого палива для виробництва окатишів є накочування його на поверхню окатишів. При цьому відбувається вирівнювання температури по висоті шару в разі комбінованого обігріву. При введенні в шихту твердого палива можливе отримання вюститно-магнетитових обкотишів. Такі окатиші отримані при вмісті в шихті 2% твердого палива при температурі 1200...1250°C, а одержана вюститно-магнетитова структура забезпечує високі показники при відновлювально-тепловій обробці.

**Дослідження технології виробництва окатишів з добавкою твердого палива в шихту на обпалювальній машині ок324/336**

Випалювальна машина нового покоління ОК - 324/336 з візком 4 м, забезпечена інжекційними

пальниками в зонах випалу і пристроями для подачі газу знизу. Його спалювання в шарі здійснюється за допомогою газоповітрярозподільних пристроїв (ГПРП), змонтованих в дуттевих камерах. Відпрацьований в лабораторних умовах режим комбінованого випалу окатишів був випробуваний, а потім впроваджений у виробництво на фабриці огрудкування ЦГЗК. Сутність технології полягає в тому, що в шихту вводиться тверде паливо, а шар обігривається продуктами горіння природного газу. У базовий і дослідний період фізико-хімічні характеристики концентрату вапняку і бентоніту були практично однаковими. Використовували залізородний концентрат, який мав вміст:

Fe<sub>зат</sub>-65,82-65,5%; SiO<sub>2</sub>-7.9-8.38%; вапняк CaO-50.45-46.2%; CaO + MgO-52.45-52.77%; вугілля: зола-20-22%; вуглець-74-76%.

Подрібнена суміш вапняку і вугілля містила 81,7 - 96,4% фракції менше 0,071 мм і 35 - 39% вуглецю. Суміш дозувалася в шихту в кількості 1% від маси концентрату. Продуктивність млина при подрібненні суміші вапняку і вугілля склала 15 ± 3 т/год. Інша частина вапняку, необхідна для офлюсування окатишів, подрібнювалася спільно з бентонітом.

Таблиця 1  
Характеристика сирих окатишів

Періоди	Масова частка воло- ги, %	Міцність		Вміст класів, %		
		Скидання, раз,	Опір стиску, кг/ок	+18 мм	8 - 18 мм	8 мм
Базовий	10,20	4,2	1,1	10,1	83,8	6,0
Дослідний I	10,05	4,9	1,15	14,3	82,3	6,0
Дослідний II	10,15	4,0	1,0	14,8	82,0	6,4
Дослідний III	10,20	4,20	1,10	12,04	82,03	6,0

Режими роботи чашкових огрудковувачів в базових і дослідних періодах були практично однакові. Продуктивність огрудковувачів коливалася в межах 90...110 т/год. Гранулометричний склад сирих окатишів і їх характеристики міцності в базових і дослідних періодах наведені в таблиці 1. Введення в шихту тонкоздрібненого вугілля 0,7...1% не позначилось на технологічні параметри отримання сирих окатишів.

Режими термообробки обкотишів і параметри роботи обпалювальної машини в базовому і дослідному періодах наведені в таблиці 2. Введення

в шихту твердого палива дозволило збільшити швидкість руху випалювальних візків з 1,8...2,0 до 1,9...2,2 м/хв, при одночасному підвищенні температури в вакуум камері № 15 з 280...350°C до 340...360°C. Додаткова кількість тепла, що виділяється за рахунок згорання в окатишах твердого палива і нагрівання повітря в зоні охолодження, дозволило знизити загальну витрату газу, споживаного обпалювальною машиною, з 3960...4360 м<sup>3</sup>/год до 3470...3710 м<sup>3</sup>/год. Зросла температура теплоносія в перетічними колекторі з 860...870°C до 900...930°C.

Таблиця 2

Показники випалу окатишів на машині ОК-324/336Ц

Параметри режиму	Вміст антрациту в шихті, %		
Продуктивність по сирих окотишам, т/год	255,0	257,0	260,0
Відсів сирих окатишів після укладчика, т/год	30,3	31	30,5
Висота шару сирих окатишів, мм	400	400	400
Витрата, м <sup>3</sup> /год:			
Природного газу	3600	3450	3380
Повітря	4200	4180	4150
Температура під пальниками, °С			
1-2	850	850	850
3-4	1100-1150	1100-1150	1100-1150
5-6	1200-1250	1200-1250	1200-1250
7-8	1200-1250	1200-1250	1200-1250
9-10	1250-1270	1200-1210	1150-1200
11-12	1240-1260	1100-1150	1030-1060
13-14	1100-1150	1030-1040	100-1030
Температура в зонах, °С			
Сушка 2	150-200	150-200	150-200
Підігрів	350-400	350-400	350-400
Охолодження 2	200-250	200-220	180-200
Тиск (+) і вакуум (-) під шаром окатишів, мм вод. ст.			
Камери: № 7	300-350	-(300-350)	-(300-350)
№ 12	310-320	-320	-320
№ 14	260-280	-260	-260
Коллектор прямого перетоку над зонами: підігрів			
Тиск, мм. вод. ст	5-7	5-7	5-7
Температура, °С	860-890	850-880	850-860
Обпал 2			
Тиск, мм. вод. ст.	5-10	5-10	5-10
Температура, °С	860-890	850-880	850-860

У дослідних періодах знизилася кількість обпаленого звороту з 20-30 т/год до 15-20 т/год. При цьому годинна продуктивність обпалювальної машини зросла з 258,6 т/год до 281 т/год, питома витрата газу на випал окатишів знизилася з 16,8 м<sup>3</sup>/т до 12,3...13,1 м<sup>3</sup>/т, а питома витрата електроенергії - з 32,3...37,1 квт год/т до 29,3...33,8 квт год/т окатишів (таблиця 3). Міцність обпалених окатишів і вміст дріб'язку в готовій продукції не змінилися (таблиця 4). Слід зазначити, підвищення вмісту монооксиду заліза з 1,4% до 3,67...4,11%. Деяке зниження міцності пов'язано зі збільшенням пористості обпалених окатишів.

Наведені результати дослідження свідчать, що при роботі на окотишах, що містять тверде паливо зросла температура на перетічному колекторі на 40-70°С. Це є результатом окислення магнетиту в зоні охолодження. Виконаний розрахунок впливу витрати природного газу на температуру продуктів горіння, що входять в зону випалу показує, що збільшення витрат природного газу на кожні 100 м<sup>3</sup>/год підвищує температуру димових газів на 18,8...21,2°С, що знижує витрату природного газу на 212 м<sup>3</sup>/год...372 м<sup>3</sup>/год. По відношенню до от-

риманого зниження витрат природного газу це становить 65,2%, решта природного газу компенсується кількістю теплоти, що виділилася при окисленні вуглецю окатишів киснем теплоносія.

Отримані результати підтверджують справедливості нової теорії, що пояснює економію природного газу при випалюванні окатишів, отриманих з шихти з додавкою твердого палива. Зниження питомої витрати природного газу пояснюється також підвищенням продуктивності обпалювальної машини. Це збільшення склало 8,66%. Відповідно знизилася питома витрата електроенергії на 10%. Відзначимо збіг теоретичних висновків, результатів лабораторних, промислових випробувань і впровадження удосконаленої технології випалу окатишів отриманих з шихти з додавкою твердого палива. Додаткова кількість теплоти, що виділяється в результаті горіння частини твердого палива та внесене повітрям із зони охолодження і окислення обкотишів дозволило знизити загальну витрату природного газу, споживаного обпалювальною машиною з 3960...4360 м<sup>3</sup>/год до 3470...3710 м<sup>3</sup>/год. Зросла температура теплоносія в перетічному колекторі з 860...870°С до

900...930°C. У дослідних періодах знизилася кількість обпаленого звороту з 20...30 т/год до 15...20 т/год.

Таблиця 3  
Характеристика обпалених окатишів

Періоди	Хімічний склад, %					
	Fe <sub>заг</sub>	Fe	CaO	MgO	SiO <sub>2</sub>	S
Базовий	59,8	1,4	5,7	0,75	7,6	
Дослідний I	60,44	3,93	5,24	0,80	7,96	0,04
Дослідний II	59,8	4,11	5,43	1,03	8,31	0,08
Дослідний III	59,9	3,67	5,5	0,84	7,9	0,07
Періоди	Основність, ед.	Вміст дріб'язку, 5 мм, %	Опір стиску, кг/ок	Міцність в барабані, %		Продуктивність машини, т/год
				+5 мм	-0,5 мм	
Базовий	0,80	5,6	227	91,1	8,0	258,6
Дослідний I	0,74	5,2	213	87,9	10,5	281,6
Дослідний II	0,78	5,1	210	89,6	9,30	279,4
Дослідний III	0,80	5,3	217	88,6	10,1	272,0

При цьому годинна продуктивність обпалювальної машини зросла з 258,6 т/год до 281 т/год. Питома витрата природного газу знизилась з 16,8 м<sup>3</sup>/т окатишів до 12,3...13,1 м<sup>3</sup>/т, а з 32,3...37,1 кВт·год/т до 29,3...33,8 кВт·год/т окатишів. Міцність обпалених окатишів і вміст дріб'язку в готовій продукції не змінилась. Слід зазначити підвищення вмісту монооксиду заліза з 1,4% до 3,67...4,11%.

Технологія виробництва частково металізованої сировини для доменної плавки

Проблема виробництва високоякісної сировини для доменних печей все ще залишається актуальною. Його рішення в умовах заміни частини коксу на розпорошене вугільне паливо дозволить поліпшити техніко-економічні показники виплавки доменних печей. Аналіз показує, що виробництво високоякісної залізорудної сировини може бути організовано тільки зі значними змінами в його технології виробництва.

Перспективним напрямком вдосконалення ефективності виплавки доменних печей полягає у використанні частково металізованої сировини в шихті. У цих умовах створюються передумови для зниження енергетичних витрат на виплавку чавуну шляхом перенесення частини процесів відродження від доменної печі до існуючих агрегатів з виробництва огрудкованої сировини, де джерелом тепла і відновлювального газу є дешевше тверде паливо, ніж кокс.

В даний час набули поширення способи виробництва залізорудної сировини зі ступенем металізації понад 90%. Такий продукт виробляють у спеціально розроблених агрегатах шляхом обробки сировини відновлювальними газами CO, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> при температурі до 1100°C, отриманими конверсією газу або газифікацією твердого палива [12]. Застосування такої сировини в доменній шихті дозволяє суттєво підвищити продуктивність печей +(5-6) % та знизити питому витрату коксу відповідно на (5-7) % на кожні 10% ступеня металізації. У той же час слід наголосити, що темпи

зростання продуктивності печей та зниження питомої витрати коксу зі збільшенням ступеня металізації знижуються. Так, зі збільшенням ступеня металізації до 30-40% темп зміни продуктивності та питомої витрати коксу змінюються повільно, а вище цього ступеня – різко падає [16]. Обмеження ступеня металізації доменного сировини до 30-40 % дає можливість його отримання за умов діючих фабрик окускування з використанням існуючого технологічного устаткування і на більш високому температурному рівні процесу з суміщенням технологій зміцнення та відновлення у межах одного агрегату. Вищий температурний рівень процесу металізації дозволяє забезпечити ущільнення гранул шихти за рахунок появи рідких фаз, що у свою чергу виключає значне окиснення свіжовідновленого заліза. У НМетАУ розроблено технологію отримання металізованих окатишів на конвеєрних машинах, що дозволяє у вакуумдутьтовому режимі спікання та комплексному використанні енергії твердого палива отримувати продукт із заданим ступенем металізації та високим вмістом закису заліза. Перехід на агломерацію із нижнім дуттям дозволяє забезпечити процес металізації необхідною кількістю теплоти та відновлювальних газів, що утворюються при спалюванні твердого палива у замкнутому просторі нижній частині шару спікаємої шихти. Пропонований спосіб спалювання твердого палива в замкнутому просторі дозволяє забезпечити при температурі в цій зоні 1300...1350 °C умови для утворення шлакової зв'язки, яка блокує гранули шихти і дозволяє проводити охолодження повітрям без застосування додаткових заходів для захисту від окислення свіжовідновленого заліза. Важливим для здійснення пропонованої технології є застосування як шихти котунів крупністю 9,5...12,5 мм, що виключає за умов роботи з нижнім дуванням перехід шихти у зважений стан із порушенням технології процесу. Послідовність формування шару шихти для отримання частково металізованої си-

ровини з підвищеним вмістом кисню заліза включає укладання на ліжку шару регенерації з твердого палива в кількості, що забезпечує необхідний тепловий рівень нижньої та верхньої частин спекаемого шару в режимі дуття. Підготовка сирих котунів включає введення до їх складу 12% палива крупністю <math><0,1\text{ мм}</math>. Крім того, для створення необхідного теплового рівня процесу у межгранульній простір вводиться тверде паливо крупністю до 10 мм, тривалість горіння якого забезпе-

чує процес зміцнення та відновлення на необхідному рівні. Методика досліджень Оцінку технологічних можливостей отримання частково металізованої сировини в шарі при використанні дутьового режиму проводили на лабораторній установці НМетАУ. Як вихідну сировину використовували залізорудний концентрат ПГЗК, що містить  $\text{Fe}_{\text{зар.}}$  - 64,85%,  $\text{CaO}$  - 0,06%,  $\text{SiO}_2$  - 8,47%. Основність котунів крупністю 9,5...12,5 мм природна.

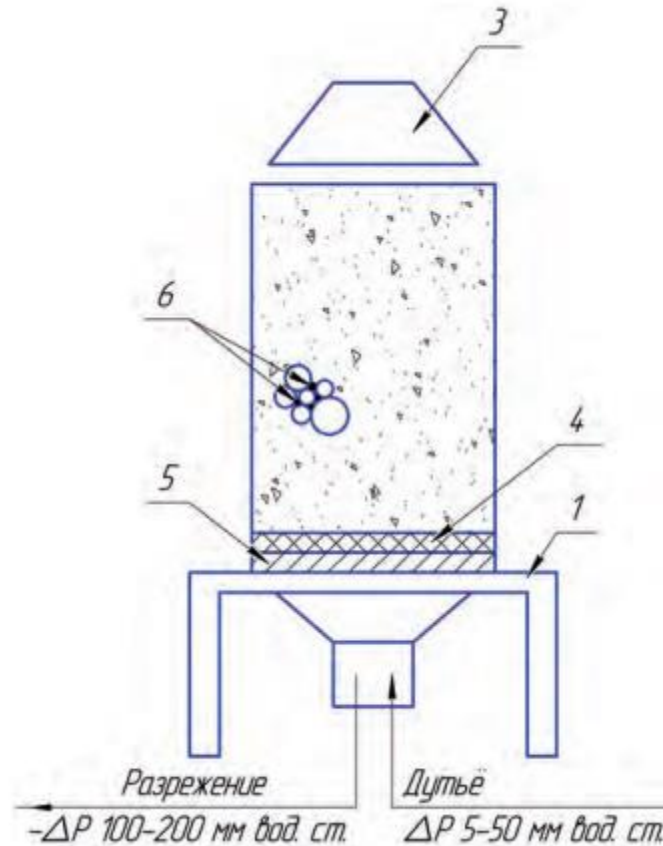


Рис.4. Схема лабораторної установки

На рис. 4 наведена схема лабораторної установки, що складається зі стелі 1, який встановлюється чаша 2 діаметром 200 мм та висотою 300 мм. Запалювання палива 4 шару регенерації покладеного на шар ліжка 5 здійснюється горном 3 режимі прососа гарячих горнових газів при розрідженні 100...200 мм вод. ст. тривалість запалення палива регенераційного шару становила 20 с. Після запалення палива регенераційного шару на нього укладається шар котунів з накатаним на них частинками твердого палива 6. Після завантаження шару шихти здійснюється перехід на режим продування повітря через шар під тиском до 50 мм вод. ст. Контроль температури в шарі здійснюється термопарами, покладеними між поверхнею шару регенерації 4 і шихти, а також над поверхнею шихти у верхній частині шару, що спікається. Перехід на режим дуття супроводжується інтенсивним видаленням вологи у вигляді пари та переміщенням зони спікання знизу вгору. Після видалення вологи шихти із зони спікання

починається виділення монооксиду вуглецю, який спалахує над верхньою частиною спекаемого шару. У міру вигорання палива інтенсивність виділення монооксиду вуглецю знижується, що може бути непрямим показником закінчення процесу.

**Результати досліджень.** Лабораторні дослідження технології отримання частково металізованої сировини показали, що наявність зони горіння палива в нижній частині спекаемого шару позитивно впливає на температурно-тепловий режим, а також сприяє утворенню відновлювальної атмосфери, необхідної для отримання частково металізованої сировини. Характерною особливістю даної технології отримання частково металізованої сировини є наявність по висоті двох зон з різними продуктами металізації: у I зоні – спіки в нижній частині шару, що спікається ( $t = 1300-1350\text{ }^\circ\text{C}$ ); ось II зоні – окатиші у верхній частині шару ( $t = 1100-1150\text{ }^\circ\text{C}$ ). При цьому вміст металевих заліза в котунах становить 10-12%, а в

спеках 20-30%. Ступінь металізації для спеків 30-35% і 20-25% для котунів. Питома продуктивність установки 0,4-0,8 т/м<sup>2</sup> год. Важливим є те, що запропонована технологія металізації дозволяє отримувати продукт, що містить не лише металеве залізо, але і до 40-50% закису заліза.

#### ВИСНОВКИ

Отримані результати підтверджують справедливості нової теорії, що пояснює економію природного газу при випалюванні окатишів, отриманих з шихти з добавкою твердого палива. Зниження питомої витрати природного газу пояснюється також підвищенням продуктивності обпалювальної машини. Це збільшення склало 8,66%. Відповідно знизилася питома витрата електроенергії на 10%. Відзначимо збіг теоретичних висновків, результатів лабораторних, промислових випробувань і впровадження удосконаленої технології випалу окатишів отриманих з шихти з добавкою твердого

палива. Додаткова кількість теплоти, що виділяється в результаті горіння частини твердого палива та внесене повітрям із зони охолодження і окислення обкотишів дозволило знизити загальну витрату природного газу, споживаного обпалювальною машиною з 3960...4360 м<sup>3</sup>/год до 3470...3710 м<sup>3</sup>/год. Зросла температура теплоносія в перетічному колекторі з 860...870°C до 900...930°C. У дослідних періодах знизилася кількість обпаленого звороту з 20...30 т/год до 15...20 т/год. При цьому годинна продуктивність обпалювальної машини зросла з 258,6 т/год до 281 т/год. Питома витрата природного газу знизилась з 16,8 м<sup>3</sup>/т окатишів до 12,3...13,1 м<sup>3</sup>/т, а з 32,3...37,1 кВт·год/т до 29,3...33,8 кВт·год/т окатишів. Міцність обпалених окатишів і вміст дріб'язку в готовій продукції не змінилась. Слід зазначити підвищення вмісту монооксиду заліза з 1,4% до 3,67...4,11%.

#### Перелік використаної літератури

1. Основи металургійного виробництва металів і сплавів / Д.Ф. Чернега, В.С. Богушевський, Ю.Я. Говяньський та ін. — К.: Вища школа, 2006. — 504 с.
2. Воскобойников В.Г., Кудрин В.А., Якушев А.М. Общая металлургия. — 5-е изд., перераб. и доп. — М.: Металлургия, 2002. — 768 с.
3. Оптимизация параметров работы окомкователя агломашины в промышленных условиях / С.В. Кривенко, А.А. Томаш, В.И. Левченко и др. // Металлургическая и горнорудная промышленность. — 2009. — № 9. — С. 101—105.
4. Кривенко С.В., Томаш А.А., Руських В.П. Эффективность спекания подогретой шихты с применением обогащенного кислородом воздуха // Сталь. — 2011. — № 1. — С. 2—6.
5. Исследование некоторых закономерностей процесса окомкования гематитовых концентратов / И.С. Вохлякова, С.И. Поколенко, Р.А. Полуяхтов и др. // Там же. — 2010. — № 9. — С. 30—31.
6. Производительность доменной печи при частичной или полной замене природного газа пылевидным топливом / С.А. Дубровский, А.А. Терновых, Р.А. Полуяхтов и др. // Там же. — 2011. — № 1. — С. 7—10.
7. О применении твердого топлива на обжиговых машинах / С.Н. Евстюгин, В.И. Клейн, В.В. Брагин и др. // Сталь. — 2009. — № 8. — С. 8—11.
8. Бондаренко Б.И., Шаповалов В.А., Гармаш Н.И. Теория и технология безкоксовой металлургии. — К.: Наук. думка, 2003. — 535 с.
9. Юрьев Б.П., Спиринов Н.А. Результаты исследования процессов окисления железорудных окатышей // Сталь. — 2011. — № 5. — С. 9—12.
10. Технология производства офлюсованных железорудных окатышей с вводом в шихту твердого топлива. / В.П. Мовчан, Н.Е. Пугач, О.П. Литвинов и др. // Горный журнал. — 2002. - № 6 — С. 58 — 59.
11. Мовчан В.П. Влияние добавок антрацита в шихту на запыленность газопотоков при обжиге окатышей // Разработка рудных месторождений. Научно-технический сборник. — Выпуск № 79. — Кривой Рог — 2002 — С. 72 — 76.
12. Губін Г. В., Півень В. О. Сучасні промислові способи безкоксової металургії заліза. — Кривий Ріг, 2010. — 331 с.
13. Мовчан В.П. Особенности формирования отходящих газов при агломерации. // Разработка рудных месторождений. Научно-технический сборник (к 80-летию КТУ) — Кривой Рог — 2002 — С. 145 — 148.
14. Hasanak N.A. The manufacture of basic pellets and their behavior in the blast furnace. // Iron mining Proceeding. - 1976 - № 35 — P. 144 — 153.
15. Г.Фон Струве. Новое в развитии процесса Лурги-Драво для производства железорудных окатышей // Aufbereitung Technik. — 1973 — 14. - № 12 — С. 783 — 788.
16. Иващенко В.П., Величко О.Г., Терещенко В.С., Чеченев В.А. Безкоксовая металлургия заліза. — Дніпропетровськ: РВА «Дніпро Вал», 2003. — 338 с.

УДК. 378.147

<https://doi.org/10.34185/tpm.2.2022.04>

Палагута В.І., Лучанінова О.П.

## Актуальні проблеми підготовки майбутніх металургів та магістрів з професійної освіти в умовах сучасної університетської освіти

Palahuta V.I., Luchaninova, O. P.

### Actual problems of training future metallurgists and masters of professional education in the conditions of modern university education

**Мета.** Розкрити практичну цінність науково-педагогічної практики магістрів з професійної освіти для формування певних компетентностей під час проведення цієї практики у бакалаврських групах майбутніх інженерів-металургів та проаналізувати взаємонавчання бакалаврів-металургів і магістрів з професійної освіти для їхньої майбутньої професійної діяльності

**Методологія.** Методи дослідження у вигляді педагогічного експерименту, аналізу експериментального матеріалу, анкет стейкхолдерів, аналізу результатів опитування студентів.

**Результати.** Теоретично обґрунтовано та експериментально підтверджено, що використання сучасних засобів навчання майбутніх металургів є ефективними у процесі розвитку або формування їхніх як професійних, так і загальних компетентностей, сприяють розвитку професіоналізму магістрів із професійної освіти, а також поглибленню знань із металургійних дисциплін, що вирішує проблеми професійної підготовки здобувачів вищої освіти.

**Наукова новизна.** Експериментально доведено, що суттєво підвищується рівень теоретичної професійної підготовки майбутнього інженера-металурга, магістра з професійної освіти у поєднанні з рівнем спрямованості їхніх знань на практичну діяльність.

**Практична значущість** полягає в тому, що у процесі вивчення металургійних дисциплін доцільно застосувати переважно компетентнісний підхід, інтенсивну цифровізацію освітнього процесу, поширене використання інформаційно-комунікаційних технологій, різноманітні засоби контекстної професійної підготовки здобувачів вищої освіти з металургії та професійної освіти, які спрямовані на розвиток особистісних компетентностей здобувачів.

**Ключові слова:** компетентнісний підхід, контекстна професійна підготовка інженерів-металургів та магістрів з професійної освіти, дистанційне навчання, цифровізація освітнього процесу, інформаційно-комунікативні технології (ІКТ).

**Purpose.** To reveal the practical value of the scientific-pedagogical practice of masters in professional education for the formation of certain competencies during the implementation of this practice in bachelor groups of future metallurgical engineers and to analyze the mutual learning of bachelors of metallurgists and masters in professional education for their future professional activities.

**Methodology.** Research methods in the form of a pedagogical experiment, analysis of experimental material, stakeholder questionnaires, analysis of student survey results.

**Findings.** It is theoretically substantiated and experimentally confirmed that the use of modern means of training future metallurgists is effective in the process of developing or forming their professional and general competencies, contributes to the development of the professionalism of masters in professional education, as well as deepening knowledge of metallurgical disciplines, which solves the problems of professional training students of higher education.

**Originality.** It has been experimentally proven that the level of theoretical professional training of a future metallurgical engineer, master of professional education, in combination with the level of orientation of their knowledge to practical activities, increases significantly.

**Practical value.** The practical significance lies in the fact that in the process of studying metallurgical disciplines, it is expedient to apply mainly a competency-based approach, intensive digitization of the educational process, widespread use of information and communication technologies, various means of contextual professional training of students of higher education in metallurgy and professional education, which are aimed at the development of personal competencies acquirers.

**Keywords:** competence approach, contextual professional training of metallurgical engineers and masters in vocational education, distance learning, digitalization of the educational process, information and communication technologies (ICT).

**Вступ.** Університет у сучасному освітньому просторі України сьогодні відіграє важливу роль у формуванні здобувача вищої освіти як компетентної особистості та його професійної підготовки.

Перехід до інформаційного глобалізованого суспільства відбувся завдяки відкриттю Інтернету для громадськості та появі всесвітньої павутини

[1]. Суспільство, де інформація та знання є визначальним фактором розвитку, є «суспільством знань» [2], а інформаційна сфера є його ваговим фактором [3]. Заклади вищої освіти якраз і покликані виконувати суспільне замовлення – готувати студентів до життя й навчити вчитися протягом життя.

Палагута В.І., Лучанінова О.П.	
-----------------------------------	--

®

Сучасна вища освіта представлена університетом нового типу 4.0, який має усі технології трансформації особистості студента в особистість фахівця-професіонала: формування теоретичного і практичного мислення, готовності до вирішення складних завдань професійної діяльності [4]. Таким чином, освіта, придбавши статус четвертого виміру, стає процесом безперервним, як і постійний розвиток молодої людини як особистості.

Сьогодні в освіті спостерігається відносність знань через швидке старіння, відбувається витіснення знань інформацією як основного елемента навчального процесу, що перетворює знання в інформацію про світ [5]. Разом із класичними методами викладання університет нового покоління пропонує нові технології: комп'ютерне моделювання, 3D-друк, самолітаючі дрони, природні інтерфейси, змішана реальність, аналіз великих даних, штучний інтелект та ін. [1]. Це потребує постійного підвищення знань, стажування для викладачів.

Серед світових освітніх трендів провідне місце займає масштабований цифровий університет – реалізатор навчальних програм, який фокусується на гнучкості навчальних платформ [6]. Заклади освіти перейшли на дистанційне навчання, яке передбачає використання комп'ютерних і телекомунікаційних технологій, освітніх платформ, онлайн-курсів, що забезпечують інтерактивну взаємодію викладача та студента на різних етапах навчання та самостійну роботу з матеріалами інформаційної мережі [7].

В умовах пандемії та воєнного часу в Україні змістове наповнення дистанційного навчання набуває зараз нової глибини і практичного значення. Дистанційна освіта викликана, «по-перше, зростаючим впливом комунікаційних технологій на всі аспекти розвитку сучасного суспільства, і, по-друге, необхідністю освітніх організацій якимось чином реагувати на соціальні і особливо особистісні зміни, що відбуваються нині» [8, с. 13]. Дистанційне навчання поступово стає основою сучасного освітнього процесу, в рамках якого перед ЗВО ставляться нові завдання, пов'язані з реалізацією відкритого навчання, застосуванням новітніх педагогічних технологій, які розширюють доступ до різних типів інформації, сприяють поширенню знань, автоматизують процеси контролю і управління процесом навчання [9, с. 164].

Тому, роль дистанційної освіти проявляється в тому, що вона з'єднує у сукупність навчально-методичне забезпечення, організаційно-функціональні структури і комплекс програмно-технічних засобів, які об'єднані в межах освітнього процесу ЗВО з метою професійної підготовки студентів – майбутніх фахівців. Зараз, у вищій професійній освіті й суспільстві в цілому склалася низка суперечностей, зокрема, між:

теоретичною професійною підготовкою майбутнього інженера-металурга, магістра з професійної

освіти і недостатнім рівнем спрямованості знань на практичну діяльність;

компетентнісним підходом до фахової підготовки здобувачів вищої освіти з металургії та професійної освіти і відсутністю засобів контекстної професійної підготовки, спрямованої на розвиток особистісних компетентностей;

інтенсивною цифровізацією освітнього процесу в умовах карантину й воєнного стану та відсутністю науково-методичного обґрунтування методик та технологій професійної підготовки майбутніх інженерів-металургів та магістрів із професійної освіти.

Подані вище суперечності обумовлюють актуальність професійної підготовки названих категорій здобувачів вищої освіти й окреслюють її проблеми.

**Аналіз літературних даних та постановка проблеми.** Підготовка здобувачів вищої освіти в галузі професійної освіти, металургії висвітлюється в працях О. Гури, О. Коваленко, О. Пометун, Т. Суценко (компетентнісний підхід); В. Бессараба, В. Коваль, В. Мосейка (формування професійно важливих якостей особистості майбутніх інженерів різних напрямків підготовки); у працях зарубіжних науковців (цифрова трансформація в освіті і суспільстві) [10].

Вважаємо, що досягти вирішення проблеми якісної підготовки магістрів з професійної освіти можна за рахунок:

- акценту у майбутніх інженерів-металургів та у магістрів з професійної освіти на формуванні загальних та особистісних компетентностей;

- професійної орієнтації на вивченні металургійних дисциплін на основі контекстного підходу;

- перевірки на практиці сучасних технологій формування та розвитку компетентностей майбутніх інженерів-металургів та магістрів з професійної освіти;

- спрямування змісту професійно орієнтованих дисциплін на формування фахової компетентності майбутніх інженерів-металургів під час науково-педагогічної практики магістрів з професійної освіти.

Інженери-металурги – ланка виробництва, яка передусім забезпечує інтеграцію, координацію, цілісність, надійність, безперервність та безпечність виробництва в напрямку досягнення його стратегічно значущих цілей [4]. Що спільного в діяльності інженера-металурга й фахівця з бакалаврською або магістерською професійною освітою? У своїй професійній діяльності вони постійно взаємодіють у системах «людина-машина» (технологія), «людина-людина», «людина-знакова система (інформація).

Професійна підготовка бакалавра за спеціальністю 136 спрямована на конкретний вид діяльності в металургійних процесах. Разом із тим здобувач вищої освіти має розвивати в собі загальні компетентності, на які припадає 50% професійної підготовки (здатність вчитися і оволодівати сучасними знаннями, працювати в команді, застосовувати знання у практичних ситуаціях, навички викорис-

тання інформаційних і комунікаційних технологій (ІКТ) та ін.) [11].

Як уточнює Ю. Мосейко, фахова компетентність майбутнього інженера-металурга (як інтегральної якості особистості) виявляється в його загальній здатності та готовності до інженерної діяльності, що ґрунтується на цілісному комплексі знань, умінь і навичок та досвіді, набутих у процесі навчання й соціалізації та орієнтованих на самостійну й успішну участь у професійній діяльності [12]. Отже, суспільство потребує незалежних, ініці-

ативних та відповідальних членів суспільства, які здатні ефективно взаємодіяти у вирішенні соціальних, виробничих та економічних проблем [13]. Саме такі завдання ставлять перед собою викладачі професійно спрямованих дисциплін.

**Мета дослідження:** Проаналізувати актуальні проблеми підготовки майбутніх бакалаврів-металургів і магістрів з професійної освіти під час науково-педагогічної практики магістрів та окреслити шляхи їх вирішення.

Таблиця 1 – Формування/розвиток компетентностей у майбутніх металургів на прикладі металургійних дисциплін

№ з/п	Дисципліна металургійна	Формування/розвиток компетентностей	Засоби формування/розвитку компетентностей
1	дисципліна «Ресурсозбереження та охорона довкілля»	формування «softskills» майбутніх металургів	засобами кейс-методу
2	дисципліна «Інноваційні технології переробки матеріалів в металургії»	розвиток навичок самостійної роботи студентів із джерелами інформації майбутніх металургів	засобами ІКТ
3	дисципліна «Теорія і технологія виробництва електроферосплавів»	розвиток професійної компетентності майбутніх металургів; формування професійних умінь майбутніх металургів	засобами дистанційного навчання; лекцій з аналізом конкретних ситуацій
4	дисципліна «Теоретичні основи процесів кольорової металургії»	розвиток пізнавальної самостійності майбутніх металургів	
5	дисципліна «Мінерально-сировинна база та підготовка сировини кольорової металургії»	формування інтегральних знань майбутніх металургів	засобами методу проєктів
6	дисципліна «Технологія процесів одержання металів та сплавів»	розвиток інформаційної компетентності майбутніх металургів	засобами інтерактивних методів навчання
7	дисципліна «Основи металургії. Розділ ТМП»	формування у студентів професійних компетенцій	засобами лекцій-дискусій
8	дисципліна «Методи аналізу даних і прогнози технологічних показників металургійних процесів»	формування комунікативної компетентності студентів	засобами бінарної лекції
9	дисципліна «Методи фізико-хімічних досліджень металургійних процесів»	формування знань та умінь майбутніх металургів	засобами бінарної лекції
10	дисципліна «Організація технологій з підвищення якості сталі»	формування загальних компетентностей майбутніх металургів	засобами інтерактивних методів навчання
11	дисципліна «Методи фізико-хімічних досліджень металургійних процесів»	розвиток пізнавальної активності студентів	засобами інтернет-технологій
12	дисципліна «Сучасне науково-дослідницьке устаткування»	формування інтегральної компетентності студентів	засобами дистанційної освіти
13	дисципліна «Технологія процесів одержання металів та сплавів»	розвиток професійної компетентності студентів	засобами інноваційних методів змішаного навчання
14	дисципліна «Контроль якості сировини та матеріалів в металургії»	стимулювання навчальної мотивації студентів	засобами дистанційного навчання

**Завдання дослідження:** Розкрити практичну цінність науково-педагогічної практики у вирішенні проблем професійної підготовки здобувачів вищої освіти та засобів формування або розвитку певних компетентностей та взаємонавчання майбутніх бакалаврів-металургів і магістрів з професійної освіти для майбутньої професійної діяльності у системах «людина-машина» (технологія), «людина-людина», «людина-знакова система (інформація).

**Матеріали та методи дослідження.** У статті використано державні документи, стандарти (Стандарт вищої освіти України перший (бакалаврський) рівень, галузь знань 01 – «Освіта / Педагогіка», спеціальність 015 – «Професійна освіта (за спеціалізаціями)»; Стандарт вищої освіти України для першого (бакалаврського) рівня галузі знань 13 – Механічна інженерія, спеціальності 136 – Металургія. Стандарти з професійної освіти першого (бакалаврського) та другого (магістерського) рівня; методи дослідження у вигляді педагогічного експерименту, аналізу експериментального матеріалу, анкет стейкхолдерів, результати опитування студентів.

**Обговорення результатів.** Викладачі різних дисциплін мають використовувати інноваційний арсенал методів і педагогічних технологій, щоб розвинути у здобувачів вищої освіти загальні компетентності, здібності, уміння самостійно здобувати нові знання та розв'язувати проблеми. Магістри з професійної освіти під час практики можуть стати асистентами викладачів і запропонувати перевірити ефективність того чи іншого методу (технології).

Треба зазначити, що деякі загальні компетентності бакалаврів і магістрів з професійної освіти та бакалаврів, майбутніх інженерів-металургів, спадають: ЗК1=К01 (здатність реалізувати свої права і обов'язки як члена суспільства, усвідомлювати цінності громадянського (вільного демократичного) суспільства та необхідність його сталого розвитку, верховенства права, прав і свобод людини і громадянина в Україні), ЗК3=К07 (здатність вчитися і оволодівати сучасними знаннями), ЗК4=К08 (здатність працювати в команді), ЗК6=К06 (навички використання інформаційних і комунікаційних технологій), ЗК7=К03 (здатність спілкуватися державною мовою як усно, так і письмово), ЗК10=К02 (здатність зберігати та примножувати моральні, культурні, наукові цінності і досягнення суспільства і т.п.) ЗК13=К05 (здатність приймати обґрунтовані рішення), ЗК15=К04 (здатність спілкуватися іноземною мовою) [11; 14]. Отже, професійна підготовка здобувачів цих спеціальностей має багато спільного, є точки перетину, так би мовити, «лише розбіжності певного роду відчують взаємне тяжіння, саме розбіжності, які доповнюють одне одного, а не суперечать одне одному і не виключають одне одного» [15]. У таблиці 1 представлені приклади формування/розвитку різних компетентностей (як загальних, так і професійних) у майбутніх металургів на прикладі металургійних дисциплін.

Багаторічна практика показує, що відбувається професійна підготовка майбутніх інженерів-металургів у широкому спектрі металургійних дисциплін та у тісній взаємодії з підготовкою магістрів із професійного навчання. Головний акцент робиться на активності особистості здобувачів, формуванні загальних компетентностей, які сьогодні все більше затребувані стейкхолдерами. Але треба зазначити, що ще не до кінця вирішеною проблемою є посереднє знання магістрами змісту металургійних дисциплін. Завдяки сучасним педагогічним технологіям можна говорити про певну навчальну модель підготовки студента: студенти працюють над реальними задачами, а не штучними ситуаціями; навчаються не тільки у викладача, але й у процесі аналізу різних проблем, беручи участь у їх обговоренні; працюють із різними базами інформації для вибору й прийняття різноманітних рішень у контексті реальних ситуацій; вчаться мислити критично й брати відповідальність за вибір рішення. Студент стає активним учасником навчально-пізнавальної діяльності, самостійно здобуває знання, співпрацює з викладачем. Саме такі якості визначені як необхідні компетентності сучасного студента в міжнародних кваліфікаційних стандартах [16]. Саме такі моделі підготовки пропонуються під час науково-педагогічної практики магістрів. Останні три роки здобувачі вищої освіти навчаються частіше в умовах змішаної або дистанційної форми навчання. Нижче подаємо деякі теоретико-практичні підходи магістрів до формування певних професійних чи загальних компетентностей бакалаврів, майбутніх металургів, в умовах дистанційного навчання.

Як можна побачити на Рис. 1, процес дистанційного навчання з використанням навчальної платформи Google Classroom включає: синхронне дистанційне навчання, коли викладач і студенти спілкуються онлайн й активно взаємодіють та асинхронне, коли спілкування учасників освітнього процесу офлайн за допомогою обміну електронною інформацією. Треба додати, що спільним у характеристиках дистанційного навчання, які надають йому вітчизняні та зарубіжні науковці, є розуміння його як сутнісно нового підходу, особлива форма організації навчання з абсолютно новими можливостями для розвитку студентів, а саме, – перевагами дистанційного навчального процесу є можливість швидкого опанування різними засобами та інструментами, можливість запровадження на всіх етапах організації роботи дистанційного екстернату (анкетування, реєстрація на навчання, журнали успішності, користування матеріалом, управління часом, приклади навчальних занять з використанням презентацій та відео, створення тематичних атестацій, проведення онлайн консультацій тощо.

В якості наочної ілюстрації наведемо методику застосування засобів дистанційного навчання у процесі вивчення металургійної дисципліни «Сучасне науково-дослідницьке устаткування».

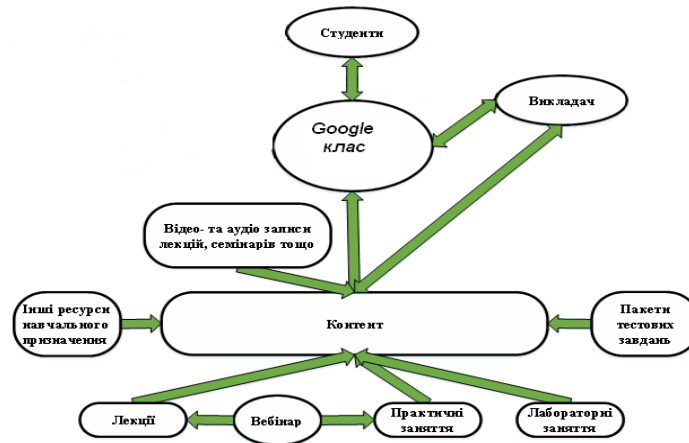


Рисунок1. Структура інформаційно-комунікаційної технології засобів дистанційного навчання ІПБТ із застосуванням Google Classroom.

Таблиця 2.2 – Методика застосування засобів дистанційного навчання у процесі вивчення дисципліни «Сучасне науково-дослідницьке устаткування» на прикладі теми «Технологічні вимірювання та прибори в металургії»

Можливості засобів дистанційного навчання для викладача	Можливості засобів дистанційного навчання для студентів
<b>Лектор викладає основний матеріал:</b> 1. Метрологічні основи технічних вимірювань 2. Вимірювання температури 3. Вимірювання тиску	<b>Студенти виконують завдання:</b> 1. Зробити прямі та непрямі вимірювання фізичних величин. 2. Ознайомитися з аналоговими та цифровими засобами вимірювальної техніки.
<b>Комунікація в Classroom</b> здійснюється через браузер або через мобільні додатки на Android чи iOS за допомогою корпоративного аканту. Сервіс надає можливість публікувати оголошення, а також залишати коментарі до завдань та перевірених робіт. Завдяки чому викладачі та студенти можуть підтримувати зв'язок.	<b>Комунікація в Classroom</b> здійснюється через браузер або через мобільні додатки на Android чи iOS за допомогою корпоративного аканту. Сервіс надає можливість публікувати оголошення, а також залишати коментарі до завдань та перевірених робіт. Завдяки чому викладачі та студенти можуть підтримувати зв'язок.
<b>Розміщення лекцій</b> При відкритті навчального курсу є три вкладки: Потік, Однорупники, Інформація. У вкладці Потік відображаються завдання та дописи створені викладачем. Вкладка Однорупники дає можливість переглянути список студентів, які доєдналися до навчального курсу, та надіслати їм електронний лист.	<b>Користування матеріалом</b> У вкладці Інформація розміщуються матеріали викладача, що потрібні студентам для навчання (лекції, плани семінарських занять, перелік тем рефератів, програми заліків та екзаменів, посилання на відео або навчальні сайти).
<b>Управління часом</b> При створенні завдань викладач вказує термін здачі роботи.	<b>Управління часом</b> Коли студент здає завдання до завершення терміну виконання, на його документі з'являється статус «Перегляд», що дозволяє викладачеві перевірити роботу.
<b>Контроль виконання завдань і оцінювання</b> Форматів перевірки знань кілька: опитування, тест і ін. Можна дати додаткові інструкції в прикріплених файлах, скористатися шаблоном BlankQuiz або створити питання з декількома варіантами відповідей. В інших випадках є опція коментування відповідей студентів. Всі роботи оцінюються за стобальною шкалою.	<b>Виконання контроль знань</b> Усі створені студентами роботи автоматично відправляються викладачу, при цьому зберігаються на Google Диску як у викладача, так і в студента. Усі призначені та виконані завдання, кожен студент може відслідковувати у календарі або на сторінці «Список справ». Це особливо зручно під час проектної роботи, коли кожний учасник команди має індивідуальне завдання.
<b>Результат:</b> переорієнтація на якісно нові педагогічні технології формування інтегральної компетентності; керування навчальною інформаційною діяльністю студента	<b>Результат:</b> студенти мають доступ до навчально-методичних і науково-освітніх електронних інформаційних ресурсів, що сприятиме підвищенню якості знань, навичок, умінь і професійної підготовки студентів; самоорганізація процесу навчання

Застосування технологій дистанційного навчання дали певні результати, що підтверджено успішністю студентів з дисципліни (рис 2).

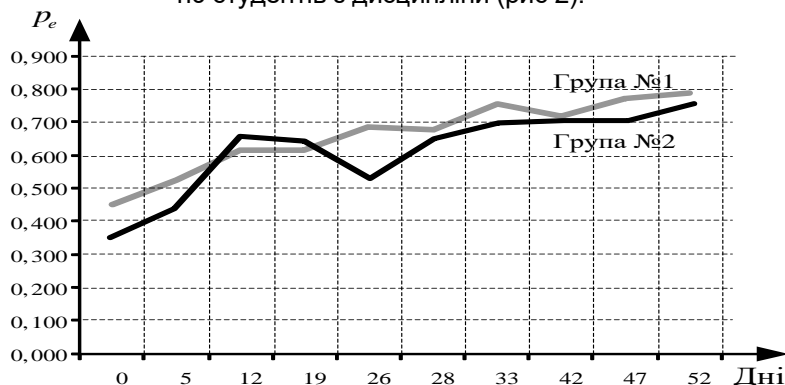


Рисунок 2 – Середнє значення успішності студентів груп № 1 і № 2 за даними тестування

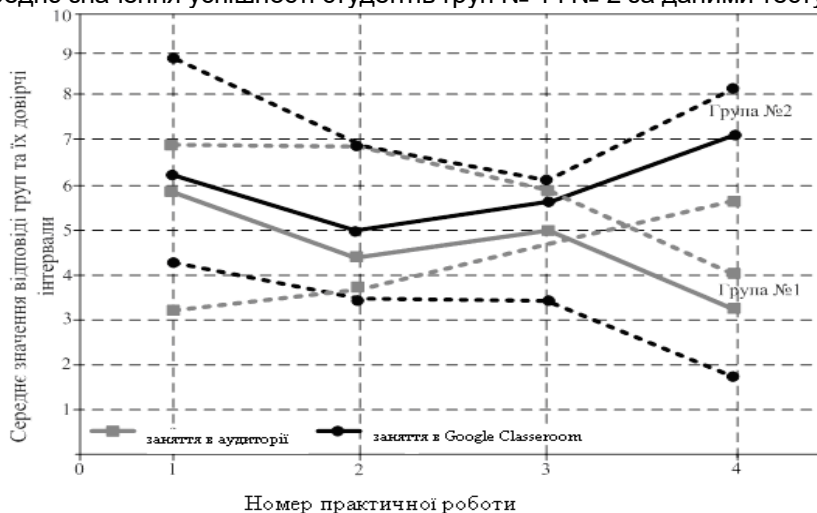


Рисунок 3 – Розподіл відповідей і їх довірчі інтервали при тестуванні студентів

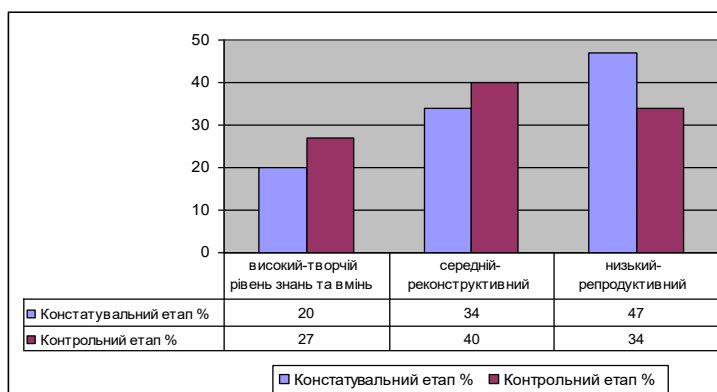


Рисунок 4. Рівень сформованості знань та вмінь у студентів на констатувальному та контрольному етапах експерименту (у %)

У ході наукового пошуку була підтверджена гіпотеза, що процес підготовки майбутніх інженерів-металургів засобами дистанційного навчання сприяє підвищенню якості знань та вмінь студентів. Відбувся процес взаємонавчання, поглиблення компетентностей студентів різних спеціальностей завдяки організованій практиці.

Треба додати, що якість та ефективність процесу освіти багато в чому залежить від здатності

студентів самостійно вдосконалювати знання, що набувають, за допомогою різноманітних засобів та інструментів дистанційного навчання, спрямованість до вдосконалення своїх пізнавальних умінь. Тому необхідною умовою дистанційного навчання є наявність у студентів розвинених навичок інформаційної культури, мотивації до оволодіння інформаційними засобами Web-технологій. А сучасні Web-технології дозволяють використовувати різ-

номанітні електронні видання та ресурси Web-мережі – електронні бази даних, каталоги та фонди бібліотек, архівів тощо, а також дозволяють активно включати в навчальний процес такі інформаційні засоби Web 2.0, як блоги, вікі, спільноти, подкасти, mLearning тощо, що дозволяє істотно підвищити ефективність дистанційного навчання.

Таким чином, подальша цифровізація та інформатизація освітнього процесу є одним з основних пріоритетів у розвитку вищої школи, це якісно новий етап для усієї системи сучасної вищої освіти, котрий уявляє собою перспективний напрямок підвищення ефективності навчального процесу у закладах усіх рівнів освіти, зокрема, вищої школи [17].

Підкреслимо, що технічний університет сьогодні – це гуманітарно-технічний університет, тобто університет єдиної культури людства, тому що в XXI ст. вже відбувається зближення інженерної та гуманітарної діяльності, встановлюються їх нові відносини з навколишнім середовищем, суспільством, людиною, відбувається подальше зближення біології і техніки, живого і неживого, духовного і матеріального. У майбутньому інженерів без серйозної гуманітарної підготовки не обійтись.

#### Висновки:

З'ясовано, що студентоцентроване навчання, принципи доброчесності, відповідальності, сертифіковані програми орієнтовані на розвиток необхідних для професійної діяльності компетентнос-

тей. Подальше упровадження інноваційних педагогічних і цифрових технологій, трансформація освітньої діяльності відповідно до європейських університетів тощо – все це ознаки сучасного університету, який спроможний вирішити проблеми професійної підготовки здобувачів вищої освіти.

Експериментально доведено, що сучасні засоби навчання майбутніх металургів є більш ефективними у процесі формування їхніх як професійних, так і загальних компетентностей. Вони сприяють розвитку професіоналізму магістрів із професійної освіти, а також поглибленню знань із металургійних дисциплін, що, взагалі, вирішує проблеми професійної підготовки здобувачів вищої освіти.

Виявлено, що підвищується рівень теоретичної професійної підготовки майбутнього інженера-металурга, магістра з професійної освіти у поєднанні з рівнем спрямованості їхніх знань на практичну діяльність.

З'ясовано, що у процесі вивчення металургійних дисциплін доцільно застосовувати компетентнісний підхід, інтенсивну цифровізацію освітнього процесу, засоби контекстної професійної підготовки здобувачів вищої освіти з металургії та професійної освіти, спрямовані на розвиток особистісних компетентностей здобувачів.

Подальшого вивчення заслуговують особливості використання інформаційно-комунікаційних технологій, психолого-педагогічні умови підготовки здобувачів вищої освіти з металургії тощо.

#### Бібліографічний опис

1. Nadoleanu, G., Stăiculescu, A. R., & Bran, E. (2022). The Multifaceted Challenges of the Digital Transformation: Creating a Sustainable Society. *Postmodern Openings*, 13 (1Sup1), 300-316. <https://doi.org/10.18662/po/13.1Sup1/428>
2. Палагута В.І. Роль ситуационного познання в сучасному соціально-гуманітарному знанні. *The scientific heritage (Budapest, Hungary)*. 2020. № 48 (48). Р.4, С. 67-72.
3. Ulianova, V., Tkachova, N., Tkachov, S., Gavrysh, I., & Khlbtobina, O. (2022). Changing the Paradigm of Education in Postmodern Times. *Postmodern Openings*, 13(1), 408-419. <https://doi.org/10.18662/po/13.1/404>
4. Коваль В. М. Професіограма майбутнього інженера-металурга в контексті особливостей управління металургійним виробництвом / В. М. Коваль // *Наукові записки [Національного педагогічного університету ім. М. П. Драгоманова]. Серія : Педагогічні та історичні науки*. - 2014. - Вип. 118. - С. 99-110. - Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nzped\\_2014\\_118\\_15](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nzped_2014_118_15)
5. Ulger, K. (2020). A review of the criteria of the prediction of students' creative skills in the visual arts education. *Creativity Studies*, 13(2), 510-531. <https://doi.org/10.3846/cs.2020.11860>
6. Лучанінова О.П. Методологічний концепт освітніх трендів: дистант як адаптивна освіта в умовах суспільних змін. *Адаптивні процеси в освіті : збірник матеріалів (тез доповідей) 1-го Міжнародного наукового форуму*; [за заг. ред. Г. В. Єльнікової, М. Л. Ростки; ред. кол.: Л. О. Ануфрієва, Л. О. Бачієва, З. В. Рябова]. Київ-Харків, 2022, Вип. 1 (4), 296 с. С.74-76.
7. Brammer, S., & Clark, T. (2020). COVID-19 and Management Education: Reflections on Challenges, Opportunities, and Potential Futures. *British Journal of Management*, 31(3), 453-456. <https://dx.doi.org/10.1111%2F1467-8551.12425>
8. Кухаренко В., Сиротенко Н. Дистанційне навчання – педагогічна технологія 21 сторіччя: Матеріали міжн. практ. конф. Інформатизація освіти України: стан, проблеми, перспективи, Херсон, Комп'ютерно-орієнтовані системи навчання. Київ: НПУ ім. Драгоманова, Вип.4, 2001. С.11-15.
9. Бешлей О., Оришук С. Підвищення мотивації студентів в умовах дистанційного навчання. *Актуальні питання гуманітарних наук*. Вип 37, том 1, 2021. С. 164-170. URL: [http://aphn-journal.in.ua/archive/37\\_2021/part\\_1/28.pdf](http://aphn-journal.in.ua/archive/37_2021/part_1/28.pdf)
10. Roine, T., Kaartinen, J., Lamberg, P. Training Simulator for Flotation Process Operators. *Preprints of the 18th IFAC World Congress Milano (Italy) August 28- September 2, 2011*. Pages 12138-12143. URL: [https://www.academia.edu/1106286/Training\\_Simulator\\_for\\_Flotation\\_Process\\_Operators](https://www.academia.edu/1106286/Training_Simulator_for_Flotation_Process_Operators)
11. Стандарт вищої освіти України для першого (бакалаврського) рівня галузі знань 13 – Механічна інженерія, спеціальності 136 – Металургія. URL: [https://osvita.ua/legislation/Vishya\\_osvita/62772/](https://osvita.ua/legislation/Vishya_osvita/62772/)
12. Мосейко Ю. В. Формування фахової компетентності майбутніх інженерів-металургів у процесі вивчення професійно орієнтованих дисциплін : автореф. ... канд. пед. наук, спец.:13.00.04 – теорія і методика професійної освіти / Юрій Вікторович Мосейко. – Запоріжжя, 2010. 23 с.

13. Jandri, P., Knox, J., Besley, T., Ryberg, T., Suoranta, J., & Hayes, S. (2018). Postdigital science and education. *Educational Philosophy and Theory*, 50(10), 893–899. <https://doi.org/10.1080/00131857.2018.1454000>
14. Стандарт вищої освіти України перший (бакалаврський) рівень, галузь знань 01 – «Освіта / Педагогіка», спеціальність 015 – «Професійна освіта (за спеціалізаціями)» <https://mon.gov.ua/storage/app/media/vishcha-osvita/zatverdzeni%20standarty/2021/07/28/015-Profosvita-bakalavrpdf>
15. Durkheim, E. *Über soziale Arbeitsteilung*. Frankfurt am Main, 1998. S. 102.
16. Лучанинова О.П. Зміна виховної парадигми вищої освіти та професіоналізм викладача як умови якості підготовки фахівців. *Управління якістю освіти: досвід та інновації: колективна монографія / під заг. ред. Л.Л. Сушенцевої, Н.В. Житник. – Дніпропетровськ: ІМА-прес, 2014. 462 с. С. 261–289.*
17. Buturlina, O., Dovhal, S., Hryhorov, H., Lysokolenko, T., Palahuta, V. STEM Education in Ukraine in the Context of Sustainable Development. *European Journal of Sustainable Development*. 2021. № 10(1). P.323-338. WOS:000617263600023. DOI: <https://doi.org/10.14207/ejsd.2021.v10n1p323>

### References

1. Nadoleanu, G., Stăiculescu, A. R., & Bran, E. (2022). The Multifaceted Challenges of the Digital Transformation: Creating a Sustainable Society. *Postmodern Openings*, 13 (1Sup1), 300-316. <https://doi.org/10.18662/po/13.1Sup1/428>
2. Palahuta V.I. Rol' situacionnogo poznanija v sovremennom social'no-gumanitarnom znanii. The scientific heritage (Budapest, Hungary). 2020. № 48 (48). R.4, S. 67-72.
3. Ulianova, V., Tkachova, N., Tkachov, S., Gavrysh, I., & Khlitobina, O. (2022). Changing the Paradigm of Education in Postmodern Times. *Postmodern Openings*, 13(1), 408-419. <https://doi.org/10.18662/po/13.1/404>
4. Koval' V. M. Profesiograma majbutn'ogo inzhenera-metalurga v konteksti osobly'vostej upravlinnya metalurgijny'm vy'robny'ctvom / V. M. Koval' // *Naukovizapy'sky` [Nacional'nogopedagogichnogouniversy'tetuiim. M. P. Dragomanova]. Seriya : Pedagogichni ta istory'chni nauky` . - 2014. - Vy'p. 118. - S. 99-110. - Rezhy'm dostupu: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nzped\_2014\_118\_15*
5. Ulger, K. (2020). A review of the criteria of the prediction of students' creative skills in the visual arts education. *Creativity Studies*, 13(2), 510-531. <https://doi.org/10.3846/cs.2020.11860>
6. Luchaninova O.P. Metodologichny'j koncept osvithix trendiv: dy'stant yak adaptivna osvita v umovax suspil'ny'x zmin. *Adaptivni procesy` v osviti : zbirny'k materialiv (tez dopovidej) 1-go Mizhnarodnogo naukovogo forumu: [za zag. red. G. V. Yel'ny'kovoyi, M. L. Rostoky` ; red. kol.: L. O. Anufriyeva, L. O. Bachiyeva, Z. V. Ryabova]. Ky`yiv-Xarkiv, 2022, Vy'p. 1 (4), 296 s. S.74-76.*
7. Brammer, S., & Clark, T. (2020). COVID-19 and Management Education: Reflections on Challenges, Opportunities, and Potential Futures. *British Journal of Management*, 31(3), 453-456. <https://dx.doi.org/10.1111%2F1467-8551.12425>
8. Kuxarenko V., Sy'rotenko N. Dy'stancijne navchannya – pedagogichna texnologiya 21 storichchya: Materialy` mizhn. prakt.konf. *Informaty'zaciya osvity` Ukrayiny` : stan, problemy`, perspekty'vy`, Xerson, Komp'yuterno-oriyentovani sy'stemy` navchannya. Ky`yiv: NPU im. Dragomanova, Vy'p.4, 2001. S.11-15.*
9. Beshlej O., Ory'shuk S. Pidvy'shennya motyvaciyi studentiv v umovax dy'stancijnogo navchannya. Aktual'ni py'tannya gumanitarny'x nauk. *Vy'p 37, tom 1, 2021. S. 164-170. URL: http://aphn-journal.in.ua/archive/37\_2021/part\_1/28.pdf*
10. Roine, T., Kaartinen, J., Lamberg, P. Training Simulator for Flotation Process Operators. Preprints of the 18th IFAC World Congress Milano (Italy) August 28-September 2, 2011. Pages 12138-12143. URL: [https://www.academia.edu/1106286/Training\\_Simulator\\_for\\_Flotation\\_Process\\_Operators](https://www.academia.edu/1106286/Training_Simulator_for_Flotation_Process_Operators)
11. Standart vy'shhoji osvity` Ukrayiny` dlya pershogo (bakalavr'skogo) rivnya galuzi znan` 13 – Mexanichna inzheneriya, special'nosti 136 – Metalurgiya. URL: [https://osvita.ua/legislation/Vishya\\_osvita/62772/](https://osvita.ua/legislation/Vishya_osvita/62772/)
12. Mosejko Yu. V. Formuvannya faxovoyi kompetentnosti majbutnix inzheneriv-metalurgiv u procesi vy'vchennya profesijno oriyentovany'x dy'scyplin : avtoref. ... kand. ped. nauk, specz.:13.00.04 – teoriya i metody'ka profesijnoyi osvity` / Yuriy Viktorovy'ch Mosejko. – Zaporizhzhya, 2010. 23 s.
13. Jandri, P., Knox, J., Besley, T., Ryberg, T., Suoranta, J., & Hayes, S. (2018). Postdigital science and education. *Educational Philosophy and Theory*, 50(10), 893–899. <https://doi.org/10.1080/00131857.2018.1454000>
14. Standart vy'shhoji osvity` Ukrayiny` pershy'j (bakalavr'sky'j) riven`, galuz` znan` 01 – «Osvita / Pedagogika», special'nist` 015 – «Profesijna osvita (za specializacijamy)» <https://mon.gov.ua/storage/app/media/vishcha-osvita/zatverdzeni%20standarty/2021/07/28/015-Profosvita-bakalavrpdf>
15. Durkheim, E. *Über soziale Arbeitsteilung*. Frankfurt am Main, 1998. S. 102.
16. Luchaninova O.P. Zmina vy'xovnoyi parady'gmy` vy'shhoji osvity` ta profesionalizm vy'kladacha yak umovy` yakosti pidgotovky` faxivciv. *Upravlinnya yakistyu osvity` : dosvid ta innovaciyi: kolekty'vna monografiya /pid zag. red. L.L. Sushencevoyi, N.V. Zhy'tny'k. – Dnipropetrovs'k: IMA-pres, 2014. 462 s. S. 261–289.*
17. Buturlina, O., Dovhal, S., Hryhorov, H., Lysokolenko, T., Palahuta, V. STEM Education in Ukraine in the Context of Sustainable Development. *European Journal of Sustainable Development*. 2021. № 10(1). P.323-338. WOS:000617263600023. DOI: <https://doi.org/10.14207/ejsd.2021.v10n1p323>

УДК 620.193.55.001.5

<https://doi.org/10.34185/tpm.2.2022.05>

Карпов В. Ю., Носко О.А., Аюпова Т.А.

## Вплив H-шарів на залізовуглецеві та корозійностійкі сталі та сплави

Karpov V., Nosko O., Aiupova T.

## H-Layers Influence on Iron-Carbon and Corrosion-Resistant Steels and Alloys

### Анотація

*Мета.* Розглядається взаємодія водненасичених шарів (H-шарів) з різними марками залізовуглецевих та корозійностійких сталей та сплавів.

*Методика.* Виявлено помітний вплив H-шарів як на мікроструктуру сталей, так і на їх властивості. Зразки сталей у вигляді пластин поміщалися в установку, де одночасно піддавалися термоциклюванню або у водні, або в аргоні. Далі проводили їхній металографічний аналіз.

*Результати.* Для чистого заліза відзначалося різке збільшення пластичності, більш ніж удвічі. Мікроструктура зразків після ТЦО в аргоні та водні змінилася дуже сильно. Бал зерна змінився з 9 до 1. Було визначено, що виділення водню при охолодженні відбувається при евтектоїдному перетворенні у звичайних вуглецевих сталях. Мікроскопічне вивчення структур сталей показало їхню різку зміну і найчастіше в гірший бік. Дослідження показали, що є можливість керувати процесом навуглецювання - зневуглецювання вуглецевих сталей, їх строчковістю після деформації прокатаної сталі. Вивчення легованих сталей типу X18H9T та 40X13 дало розуміння зміни їх властивостей у процесі ТЦО у водні. Особливо цікавим є факт, що сталь X18H9T практично не змінює своїх властивостей після ТЦО у водні в широкому інтервалі температур та тисків. Інша сталь 40X13 дуже різко змінює свої механічні властивості – стає твердою та крихкою. При виготовленні виробів з цієї сталі неприпустима їх робота при температурі, що циклічно змінюється.

*Наукова новизна.* Основна наукова новизна полягає у детальному дослідженні структури та властивостей ряду сталей, які широко використовуються у промисловості.

*Практична значущість.* Отримані результати дозволяють зробити однозначний висновок, що термоциклювання залізовуглецевих та корозійностійких сталей дуже сильно змінює їх властивості. Це вимагає детального вивчення будь-якої сталі, яка має працювати в подібних умовах.

*Ключові слова:* водень, сталі, корозійностійкі сталі, термоциклювання, фізичні властивості металів.

### Abstract

*Purpose.* The interaction of hydrogen-saturated layers (H-layers) with various grades of iron-carbon and corrosion-resistant steels and alloys is investigated.

*Methodology.* A noticeable effect of H-layers on both the microstructure of steels and their properties has been revealed. Plate-formed steel samples were placed in plant where they were simultaneously processed by thermal cycling either in hydrogen or argon. Next, their metallographic analysis was carried out.

*Results.* For pure iron, the significant increase in plasticity by more than two times was noted. The microstructure of the samples after TCT in argon and hydrogen is changed very intensely. The grain score changed from 9 to 1. It was determined that the hydrogen release during cooling occurs at the eutectoid transformation in conventional carbon steels. Microscopic steel structures study showed their significant change and often for the worse. Experiments have shown the possibility of carburization - decarburization process control of carbon steels, and their banding after deformation of the rolled steel. The study of alloyed Cr18Ni9Ti and 40Cr13 types steels gave an understanding of the change in their properties during the TCT process in hydrogen. Of particular interest is that Cr18Ni9Ti steel practically does not change its properties after TCT in hydrogen in a wide range of temperatures and pressures. 40Cr13 steel is very intensively changes its mechanical properties - it becomes hard and brittle. In the manufacture of products from this steel, their exploitation at a cyclically changing temperature is unacceptable.

*Scientific novelty.* The main scientific novelty is in the detailed study of the structure and properties of a wide range of steels that are widely used in industry.

*Practical value.* The results obtained allow to draw a conclusion that the thermal cycling of iron-carbon and corrosion-resistant steels greatly changes their properties. This requires a detailed study of any steel which should work in such conditions.

*Key words:* hydrogen, steels, corrosion-resistant steels, thermal cycling, physical properties of metals.

### Вступ

Раніше в дослідженнях, коли визначалися умови виникнення H-шарів у залізі, було зроблено висновок, що у Fe-C сплавах H-шар не утворюється, якщо концентрація вуглецю є вищою за 0,2%. Цей висновок було зроблено на підставі відсутності видимої мимовільної деформації зразків Армко-заліза. Після ТЦО незначно змінювався зовнішній вигляд поверхні зразків сталей, але це пов'язували з процесом її зневуглецювання. Проте, детальне вивчення зразків показало, що існують помітні відмінності її мікроструктури від традиційної після відпалу. Це є підставою для подальших досліджень

щодо формування структури та комплексу властивостей залізо-вуглецевих сплавів під дією H-шарів.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Одним з перспективних методів впливу на властивості сталей та сплавів є термоциклічна обробка [1]. На відміну від інших видів обробки, фазові і структурні перетворення при ТЦО відбуваються багатократно при зміні температури нагріву-охолодження. Необхідність багатократного повторення обробки при заданих температурах, як правило, має за мету накопичення змін в структурі металу, які корінним чином мають покращувати властивості та якість матеріалу, що неможливо досягти

за умови проведення одноразової термічної обробки. Характер фазової взаємодії компонентів в системі багато в чому визначає ефективність впливу термоциклічної обробки на зміни структури та властивостей сплавів.

У випадку повної нерозчинності компонентів в твердому стані ТЦО не супроводжується зміною кількості фаз в системі, а структурні зміни в сплавах такої системи під дією термоцикловання можуть бути пов'язаними лише з наслідками мікропластичної деформації і наступної рекристалізації. Мікропластичні деформації викликають зміцнення металу, а рекристалізація підвищує його пластичність.

За умов розчинності компонентів один в одному характер процесів, що відбуваються під час ТЦО змінюється. З'являється можливість дифузійного ділення протяжних часток, а також їх сфероїдизація і коагуляція. При ТЦО сплавів, матриця яких зазнає фазових перетворень (сплави на основі заліза), виникають значні міжфазні напруження при повторних дифузійних перетвореннях, а також градієнти температур між окремими елементами матриці, що призводить до збільшення кількості центрів перетворення, і, як наслідок, до подрібнення зерна. ТЦО чинить суттєвий вплив на структурний стан карбідів: в результаті ТЦО безперервна сітка карбідів пластинчастої будови руйнується; утворюються ізольовані дисперсні карбіди круглої форми, що рівномірно розташовані по об'єму металу [1].

За останні десятиліття підвищився інтерес матеріалознавців до проблеми взаємодії водню з металами, оскільки вміст водню навіть у дуже малих кількостях викликає помітну зміну фізико-хімічних та механічних властивостей металів та сплавів [1, 2].

Виявлене явище виникнення водень насичених метастабільних рухомих зон (Н-шари) у поліморфних металах (Відкриття №313) дало стимул до до-

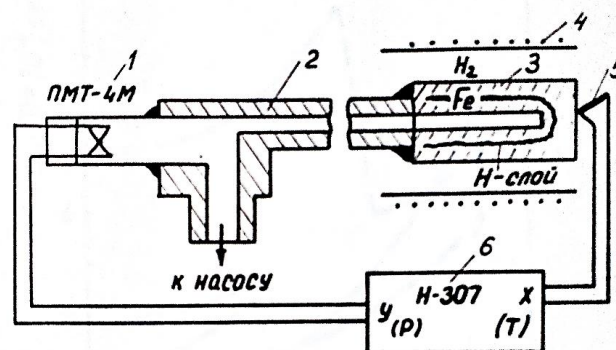
сліджень взаємодії водню з різними металами при циклічній зміні температури металу поблизу критичних точок [3]. Водень насичені зони (Н-шари) є шарами металу на межі двох фаз при поліморфному перетворенні.

За рахунок відмінності в розчинності водню у фазах (для заліза це  $\alpha$ - та  $\gamma$ -фази), ця зона насичується воднем до дуже високих концентрацій (до 10 і більше ат.%). Внаслідок цього властивості металу в Н-шарі наближаються до властивостей в'язкої рідини, що призводить до його мимовільної деформації. Також було з'ясовано, що Н-шари активно взаємодіють із дефектами кристалічної структури металу. При їх русі по металу відбувається захоплення та перенесення дислокацій та вакансій. При цьому спостерігається збільшення дефектності металу в зоні розпаду Н-шару і вона зростає до утворення макропорожнин [4-7].

Виходячи з вищевказаного, доцільним є дослідження впливу Н-шарів на структуроутворення та формування комплексу механічних властивостей сталей – вуглецевих із різним вмістом вуглецю – та легованих корозійностійких, для аналізу і встановлення можливості їхньої експлуатації в умовах термоцикловання в атмосфері водню.

Мета і завдання досліджень

Метою наявного дослідження є встановлення закономірностей впливу термоцикловання в атмосфері водню та Н-шарів, що утворюються, на структуроутворення та формування комплексу механічних властивостей сплавів на основі заліза (Армко заліза, сталей різного складу, в тому числі й корозійностійких) для уточнення доцільності експлуатації різних залізобуглецевих сплавів в зазначених умовах та для розробки нових аспектів та рекомендацій щодо обробок сталей, зокрема протифлокентної та хіміко-термічної обробки при насиченні поверхні вуглецем.



1 – датчик тиску, 2 – трубопровід, 3 – зразок, 4 – піч, 5 – термопара, 6 – потенціометр  
Рисунок 1 – Схема комірочки для дифузійних досліджень при високих температурах

Матеріали та методи дослідження

Для більш глибокого вивчення змін у сталях після ТЦО у водні була виготовлена спеціальна комірочка у вигляді ампули, яка приєднувалася до датчика тиску та вакуумного насосу (рис. 1). Вся конс-

трукція є замкнутою комірочкою постійного об'єму. У комірці створювався вакуум близько 0,01 – 0,05 Па. Всі вимірювання проводилися при нагріванні та охолодженні ампули із заданою швидкістю при необхідному тиску водню. На двох координатний

потенціометр Н307 виводився запис зміни тиску та температура ампули. Попередньо робилося 3 – 4 цикли для стабілізації процесу. Вимірювання проводили за заданих параметрах процесу.

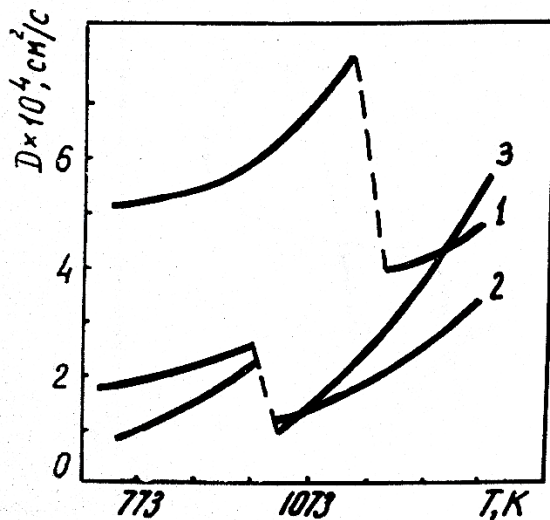
Порівняння запропонованого методу з літературними даними показали їхню хорошу збіжність, що свідчить про коректність методики.

Досліджувалися сплави з вмістом вуглецю 0,23% та 0,7% за методикою дифузійної проникно-

сті водню, яка зарекомендувала себе як одна з найбільш чутливих та що дає кількісні значення.

Результати дослідження та їх обговорення

Раніше проведені дослідження імпульсного виділення водню зі сталями показали хибність цих висновків [6]. Для залізовуглецевих сплавів також характерне утворення Н-шарів (рис. 2, 3) [7-8]. При цьому коефіцієнт дифузії зазнає помітного стрибка у момент  $\gamma - \alpha$  перетворення як у залізі, так і в сталях [9] (рис. 2).



1 – чисте залізо, 2 – сталь (0,23% C), 3 – сталь (0,7 % C)

Рисунок 2 - Залежність коефіцієнта дифузії водню у залізі та його сплавах від температури

Навіть при мінімальних параметрах умов обробки в ампулі спостерігали помітне підвищення тиску водню на 25 - 40% вище, ніж при звичайній стаціонарній температурі, вище і нижче точки поліморфізму. Зі збільшенням швидкості охолодження цей ефект посилюється і сягає величини 90 – 130% при дуже великій інертності датчика тиску – лампи ПМТ-4М, яка встигає зафіксувати істинний підйом тиску (рис.3).

Цікавим є характер зміни механічних властивостей зразків чистого заліза після ТЦО у водні (табл. 1). Видно, що пластичність заліза збільшилася майже вдвічі. Їхні механічні властивості практично вирівнялися по відношенню до зразків циклованих в аргоні, але їх мікроструктури відрізнялися разуче - бал зерна становив 1 і 9 відповідно. Ця інформація підтверджує припущення, що Н-шар очищає метал від дефектів, що покращує його деформованість.

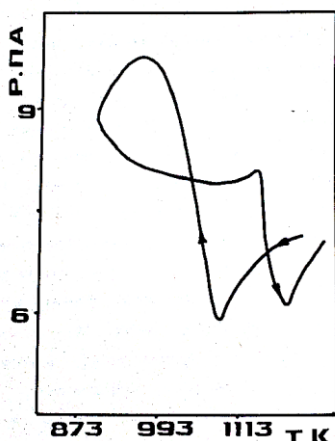


Рисунок 3 - Зміна тиску водню в ампулі з чистого заліза поблизу температури поліморфного перетворення в залізі

Таблиця 1 – Механічні властивості заліза після ТЦО

№	Матеріал	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_B$ , МПа	$\delta_5$ , %	$\psi$ , %	Примітка
1	Чисте залізо	310	410	11,5	18,0	Вихідний зразок
2	Чисте залізо	250	353	36,0	37,0	Після 10 ц.
3	Чисте залізо	216	340	35,3	35,0	Після 50 ц.
4	Чисте залізо	206	340	39,7	37,3	Після 100 ц.
5	Чисте залізо	160	320	46,4	45,3	Після 100 ц. в аргоні
6	Чисте залізо	200	320	33,0	29,0	Ізотермічний відпал
7	Чисте залізо	146	306	44,4	42,0	Дегазований зразок після 100 ц у водні

При подальшому вивченні Н-шару мікроструктурними дослідженнями було піддано зразки всіх випробуваних матеріалів. Щоб з'ясувати характер зміни мікроструктури у чистого Армко-заліза, низьковуглецевої, доєвтектоїдної та заєвтектоїдної сталей були проведені експерименти, в яких усі п'ять зразків термоциклювалися одночасно та за одних умов. Як і зазвичай змінювався тиск водню, швидкості нагріву та охолодження, інтервал температур циклування, число циклів.

Були проведені тонші дослідження залізовуглецевих сплавів із вмістом вуглецю понад 0,2%. Утворення Н-шарів чітко фіксується при евтектоїдному перетворенні. У двофазній ділянці А + Ф вуглецевих сплавів Н-шар не утворюється, він виникає при евтектоїдному перетворенні (рис.4).

Об'єм аустеніту, який бере участь у евтектоїдній реакції, залежить від концентрації вуглецю і це відбивається на величині імпульсу збільшення ти-

ску. При малих швидкостях нагріву та охолодження зразків (порядку 0,1 К/с) криві зміни тиску для низьковуглецевих сплавів однакові. Це говорить про відсутність Н-шару в цих умовах. Збільшення швидкості охолодження до 2-3 К/с призводить до різкого зростання амплітуди імпульсу тиску (на 200-300%).

Це, ймовірно, викликане тим, що при великих швидкостях охолодження градієнт температури перерізу зразка збільшується і викликає "стиснення", зближення фронтів як поліморфного, так і евтектоїдного перетворення, скорочуючи час для дифузійного відтоку водню через двофазну область. Порівнюючи величини імпульсу тиску для сталей із вмістом вуглецю 0,23% і 0,7%, можна побачити, що для сталі зі складом близьким до евтектоїдного, який практично не має двофазної області, реалізуються умови, близькі до умов поліморфного перетворення в чистому залізі (рис.5).

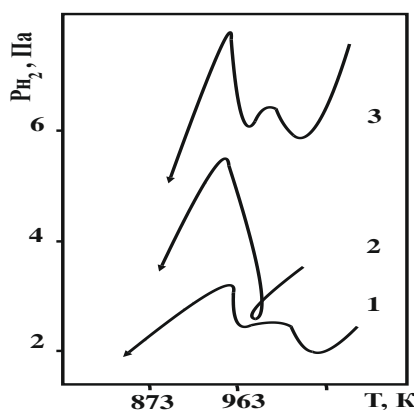


Рисунок 4 - Імпульсна зміна тиску в ампулі зі сталі з 0,23% С при поліморфному  $\gamma - \alpha$  перетворенні: 1 -  $P_H=0,1$  МПа,  $V_{ox}=0,1$  К/с; 2 -  $P_H=0,1$  МПа,  $V_{ox}=3$  К/с; 3 -  $P_H=1$  МПа,  $V_{ox}=0,1$  К/с

Це створює можливість утворення Н-шарів у евтектоїдній та квазіевтектоїдній сталях. Проте, сталі мають істотну відмінність від чистого заліза - наявність вуглецю, здатного взаємодіяти з воднем. Ймовірно, що ця реакція "гасить, послаблює" Н-шар, що не дає йому набрати високу концентрацію водню. Концентрація водню, що набирається, є багато нижчою тієї, що необхідна для зміни фізико-механічних властивостей металу і прояви ефекту мимовільної деформації. На це опосередковано вказує амплітуда імпульсу тиску водню в

ампулі. Для чистого заліза  $\Delta P_H=10$  Па, для сталі Ст 20  $\Delta P_H=3$  Па, для сталі з 0,7% С  $\Delta P_H=1,5$  Па. Добре видно, що концентрація водню в Н-шарі помітно знижується зі зростанням концентрації вуглецю в сталі, що вказує на взаємодію водню Н-шару з феритом перліту.

Ефект імпульсного виділення водню в сталях, близьких до евтектоїдних, пояснює причину флокочутливості цих сталей і показує нові шляхи боротьби з ними з використанням традиційних рішень та методів.

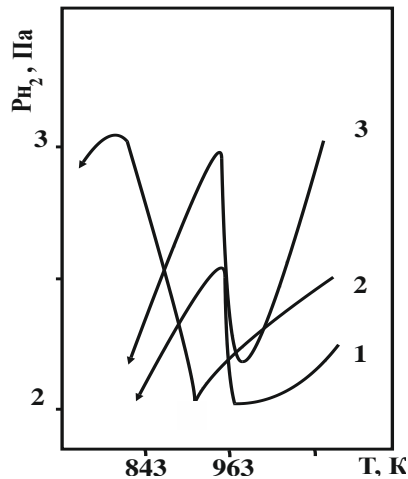


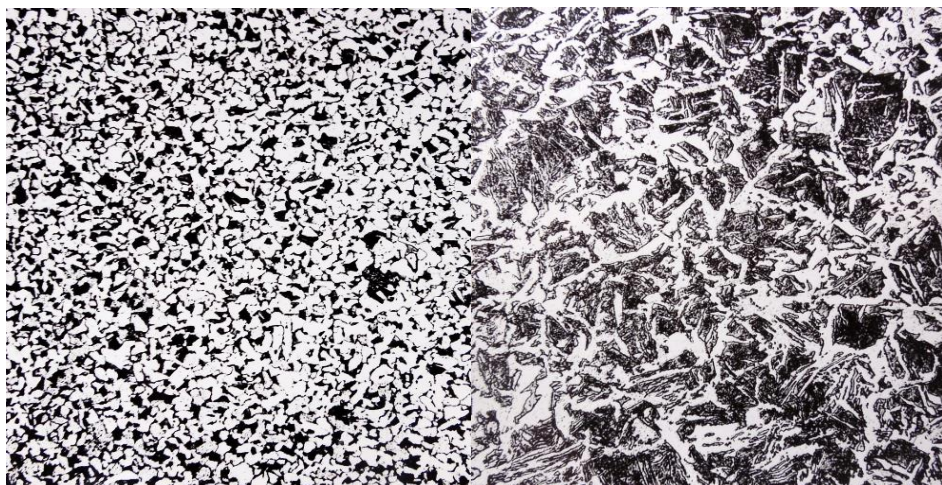
Рисунок 5 - Імпульсна зміна тиску в ампулі зі сталі з 0,7%С при поліморфному  $\gamma - \alpha$  перетворенні: 1 –  $P_H=0,1$  МПа,  $V_{ох}=0,1$  К/с; 2 -  $P_H = 0,1$  МПа,  $V_{ох} = 3$  К/с; 3 -  $P_H = 1$  МПа,  $V_{ох} = 0,1$  К/с

Використовуючи отримані дані про характер і властивості Н-шару, в рамках раніше проведених досліджень щодо визначення природи утворення флокенів та боротьби з ними, можна запропонувати прості, але дієві рекомендації щодо зниження чутливості сталей до флокенів. А саме:

- використовувати спрямовану кристалізацію при охолодженні зливок;
- реалізовувати ізотермічну витримку або уповільнене охолодження злитків і великогабаритних заготовок, виробів в області температур поліморфного та евтектоїдного перетворень;
- охолоджувати зливки та масивні заготовки таким чином, щоб охолодження йшло не з поверхні,

всередину металу, а вздовж осі від одного кінця до іншого.

Для низьковуглецевих сталей (вуглецю 0,23%) при термоциклюванні при низьких тисках водню (0,05-0,2 МПа) та невеликій кількості циклів (10-30) в інтервалі температур 1000-1200К характерне утворення дрібнодисперсної структури (рис.6). Збільшення числа циклів до 100 і більше веде до укрупнення зерна. Це найімовірніше пов'язане з процесом знеуглецювання матриці, збільшенням об'ємної частки фериту, який утворює велике зерно. При більш високих тисках водню (2 МПа і вище) та незалежно від кількості термоциклів розмір зерна збільшується і стає практично однаковим (рис.7).



а

б

Рисунок 6 - Мікроструктура сталі (0,23% С) після ТЦО у водні при  $P = 0,1$  МПа, а - 10 циклів, б - 100 циклів,  $\times 100$

В процесі термоциклювання строчковість прокатаних зразків, отримана в результаті попередньої холодної деформації, після 50 циклів (в інтервалі температур 1150 - 1300К) зникає, утворюється рівномірна рівноосна мікроструктура (рис. 8).

При термоциклюванні в інтервалі 1000 - 1200К та ж строчковість сталі зберігається навіть після 100 і більше циклів. Цікаво, що перлітні зерна є дрібнішими, ніж феритні. Це також підтверджує, що при русі Н-шару по феритному зерну в ньому

знижується кількість зародків нової фази, а перліт взаємодіє з Н-шаром. залишається з дефектами, оскільки практично не

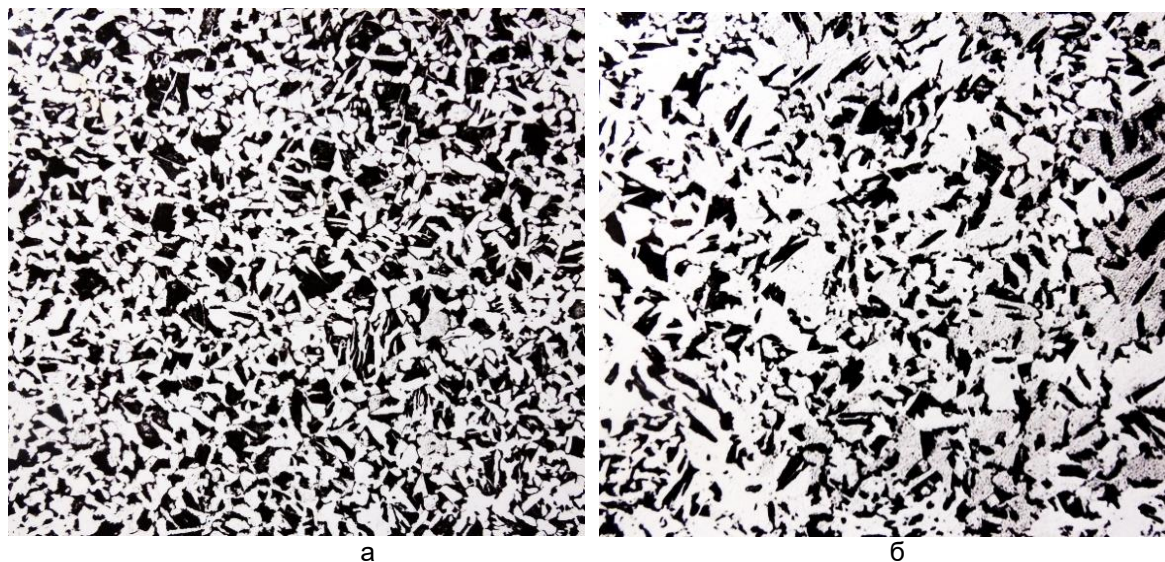


Рисунок 7 - Мікроструктура сталі (0,23% С) після ТЦО у водні при  $P = 4,0$  МПа,  $\times 100$ : а - 10 циклів, б - 100 циклів



Рисунок 8 - Вплив ТЦО у водні на вихідну строчковість сталі (0,23%С),  $\times 100$ : а – 5 циклів, б – 10 циклів

Зниження швидкостей нагріву та охолодження до  $0,5\text{K/s}$  і нижче сприяє інтенсифікації процесу знеуглецювання (рис.9) і, як наслідок, збільшення розміру зерна.

Для доевтектоїдної сталі (0,43%С) інтервал температур циклування на бал зерна впливає не

суттєво. Так при інтервалі циклування  $1000\text{-}1200\text{K}$  розмір зерна відповідає 8 балу, а при інтервалі температур  $1150\text{-}1300\text{K}$  розмір зерна відповідає 9 балу. Інтервал циклування помітно впливає на морфологію перліту.

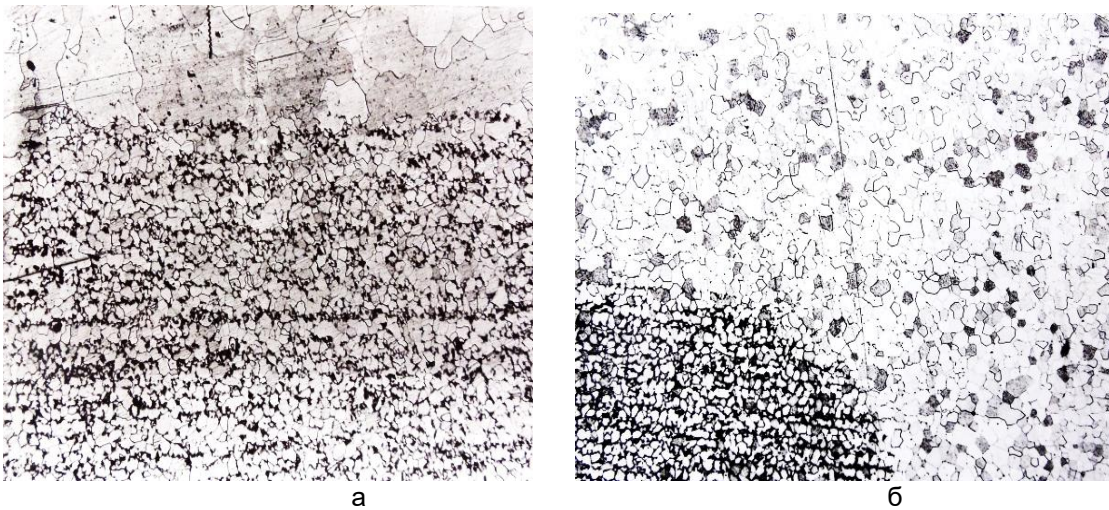


Рисунок 9 - Вплив параметрів ТЦО на процес знеуглецювання сталі (0,23% С), x100: а -  $P_n = 0,1$  МПа,  $V_n/\sigma_n = 1,5$ К/с, б -  $P_n = 0,1$  МПа,  $V_n/\sigma_n = 0,1$ К/с

Після ТЦО у водні та інтервалі температур 1000-1200К мікроструктура зразка складалася із зерен фериту та сфероїдизованого перліту. Після невеликої кількості термоциклів (10 - 20) сфероїдизований перліт став розташовуватися групами. При збільшенні числа циклів до 100 і більше відбувається рівномірний розподіл перліту по всьому об'єму зразка (рис.10). При термоциклуванні в інтервалі температур 1150-1300К незалежно від тиску та кількості циклів мікроструктура зразка скла-

дається з зерен фериту та пластинчастого перліту (рис.11).

Мікроструктура заевтектоїдної сталі (1,3%С) незалежно від параметрів термоциклювання прагне до утворення сфероїдизованого зерна перліту різної дисперсності в міру збільшення числа термоциклів (рис. 12). У цілому зміни мікроструктури залізобуглецевих сплавів при ТЦ у водні близькі по трансформації структури до традиційної термоциклічної обробки сплавів.

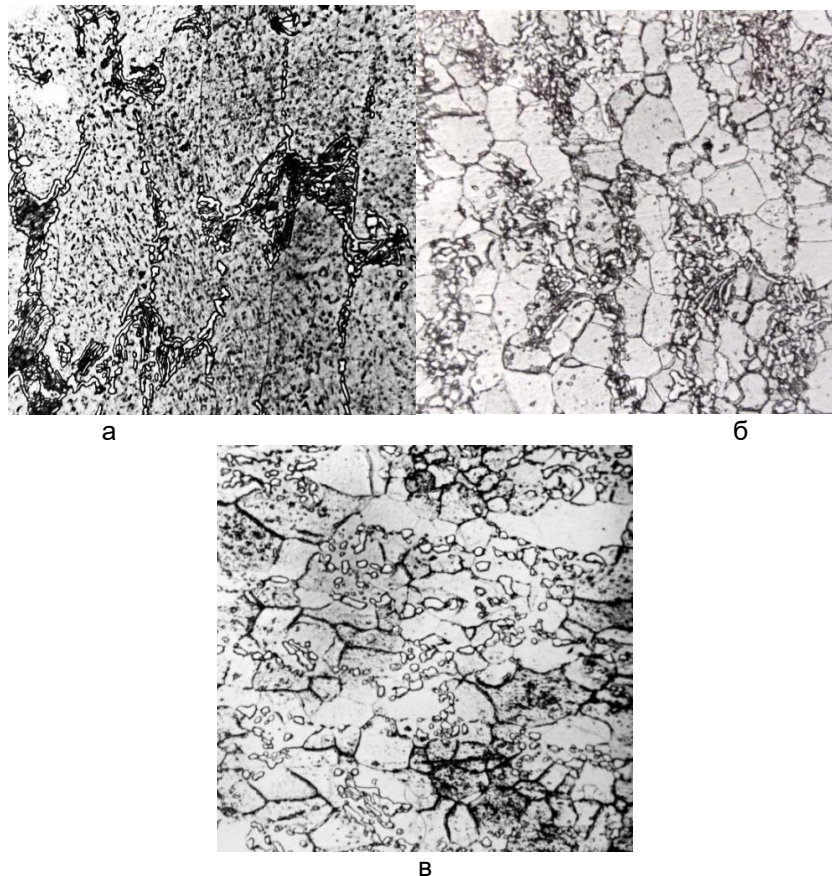


Рисунок 10 - Зміна структури сталі (0,4% С) при ТЦО в інтервалі 1000-1200К, x100: а - вихідна, б - після 10 циклів, в - після 100 циклів

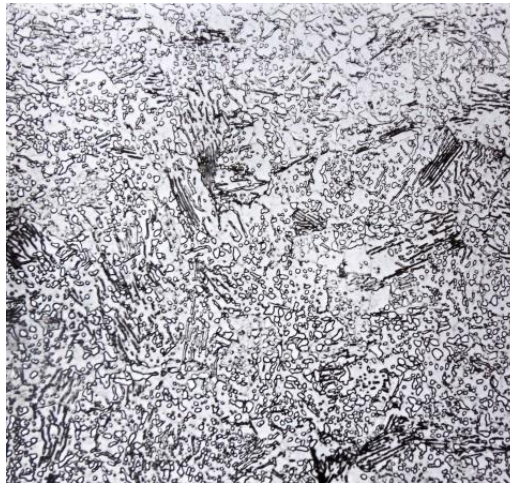


Рисунок 11 - Мікроструктура сталі (0,4%С) після ТЦО в інтервалі температур 1150 – 1300К, x100

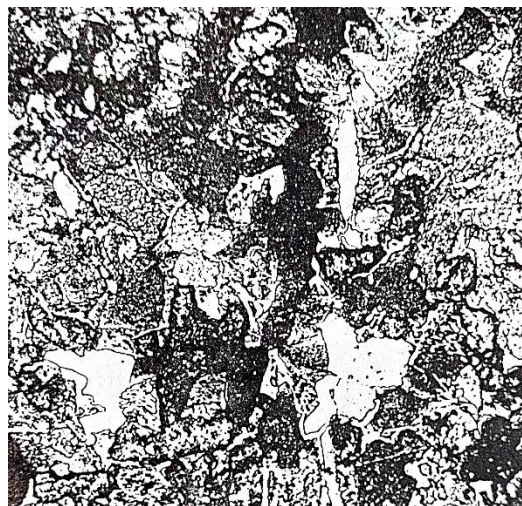


Рисунок 12 - Зміна структури заевтектоїдної сталі (1,3% С) після ТЦО в інтервалі температур 1150 - 1300 К, x100

Відзначено цікавий ефект взаємодії Н-шарів з вуглецем сталей. Відомо, що при нагріванні залізозвуглецевих сплавів в атмосфері водню на їхній поверхні розвивається процес зневуглецювання за рахунок взаємодії водню з вуглецем сплаву. Збільшення тиску водню, зазвичай, призводить до інтенсифікації процесу зневуглецювання. Виявилося, що при термоцикуванні в атмосфері водню цей процес має свої особливості.

Якщо напрямок руху дифузійного потоку вуглецю збігається загалом із напрямком руху Н-шару, то це помітно прискорює процес зневуглецюван-

ня. Якщо ці два потоки йдуть назустріч один одному, процес різко гальмується і зневуглецьований шар має мінімальну товщину (рис.13).

Таким чином, за допомогою ТЦ в атмосфері водню можна контролювати товщину зневуглецьованого шару. Якщо інвертувати цей процес, то, в принципі, можна керувати і товщиною навуглецьованого шару, про що свідчать проведені експерименти.

Добре видно різницю в товщині зневуглецьованого шару у зразках, оброблених за цими режимами (рис. 13).

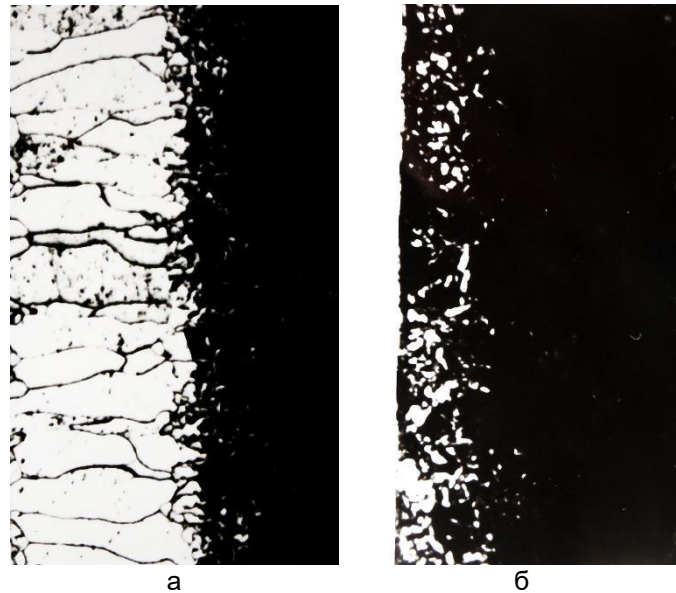


Рисунок 13 - Вид науглецьованого шару зразка заліза за умов різних напрямків руху Н-шару та дифузійного потоку вуглецю: а – в одному напрямку, б – назустріч один одному

Взаємодія Н-шарів з легованими сталями.

Під час численних експериментів з вивчення явища виникнення водненасичених зон - Н-шарів ми неодноразово використовували в якості конструкційного матеріалу корозійностійкі сталі, які традиційно вважаються такими, що зберігають свої властивості при експлуатації у водневмісному середовищі. Тому найчастіше виготовляючи той чи інший вузол для обладнання або досліджень, ми не цікавилися яка саме використовується марка сталі. Проте в ході досліджень було помічено, що деякі вузли помітно змінили свої властивості (зросла їхня твердість і збільшилася крихкість металу). Це стало приводом для уточнення впливу термоциклічної обробки в середовищі водню на основні механічні властивості деяких корозійностійких сталей.

Для досліджень були обрані дві найбільш поширені, але відмінні за класами марки сталей - аустенітна X18H9T та феритомартенситна 40X13. З цих сталей виготовлялися зразки для механічних випробувань, які зазнавали термоциклювання у водні за різних режимів. Після обробки зразки піддавалися випробуванням, а потім досліджувалась їхня мікроструктура.

В результаті досліджень встановлено, що сталі типу X18H9T практично не змінюють своїх механічних властивостей навіть після тривалого термо-

циклювання (більше 500 годин). Спостерігалось незначне (від 7 до 13%) зниження пластичності та межі міцності при ТЦО з великими швидкостями нагріву та охолодження (2-4 К/с) при високих тисках водню (до 5 МПа).

При низьких тисках водню (0,1-0,3 МПа) та малих швидкостях нагріву та охолодження (0,1-0,5К/с) зафіксовано збільшення пластичності (5-7%) при зниженні межі міцності до 20%. Якщо верхня температура термоциклювання не перевищувала 1170К мікроструктура і властивості сталі X18H9T змінювалися незначно (рис.14.). Якщо верхня температура ТЦ підвищувалася до 1300К, спостерігалось інтенсивне зростання зерна (укрупнення в 5-10 разів) (рис.15). Зниження механічних властивостей сталі X18H9T найімовірніше пов'язане з помітним укрупненням зерна та незначною зміною концентрації легуючих елементів (хрому та нікелю) у матриці металу після ТЦО в атмосфері водню. Таке незначне зниження механічних властивостей сталі X18H9T робить її найбільш придатною для експлуатації в атмосфері водню, особливо за циклічних змін температури. Оскільки корпуси експериментальних установок охолоджувалися проточною водою, це не впливало на їх властивості та параметри, як для зразків, підданих ТЦО в печі.

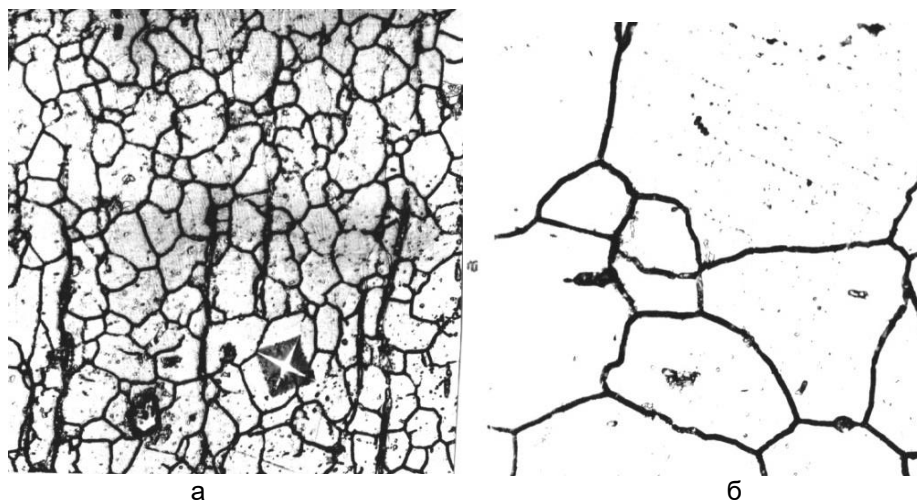


Рисунок 14 - Структура сталі X18H9T, x500: а – вихідна, б – після 100 циклів при  $P_n = 0,1$  МПа інтервал температур 970 – 1170К

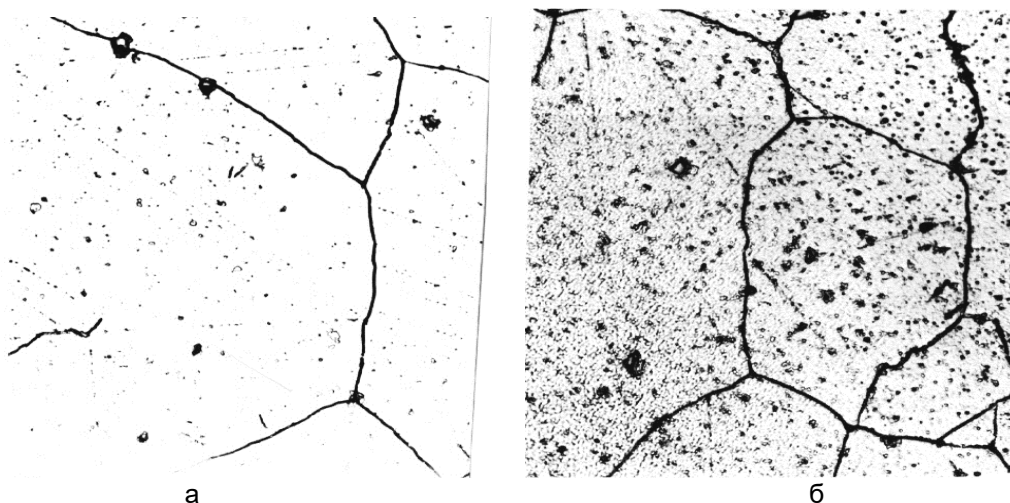


Рисунок 15 - Зростання зерна при ТЦО сталі X18H9T в інтервалі температур 1100 - 1300К, 100: а -  $P_n = 0,1$  МПа, б -  $P_n = 3$  МПа

Інакше змінювалися властивості сталі 40X13 після ТЦО у водні. При досліджених швидкостях нагріву та охолодження (0,5-3 К/с) та тисках водню (0,1-4 МПа) в інтервалі температур термоцикування 1070-1370К спостерігали різке збільшення мікротвердості та загальної твердості сталі при зниженні межі міцності у 3-5 разів. Зразки руйнувалися крихко, без пластичної деформації. В інтервалі ТЦО 970-1170 К та досліджених швидкостях нагріву та охолодження, та тих же тисках водню відзначали зниження вихідної твердості на 15-50% та зниження межі міцності на 3-20%.

Найімовірніше, таке зниження механічних властивостей сталі 40X13 пов'язане з інтенсивним зростанням пластин карбідів. Вихідна структура сталі 40X13 мала дрібнодисперсні карбідні включення.

Це підтверджується металографічними дослідженнями (рис.16). Додатковий аналіз отриманих результатів показує, що високий тиск водню (більше 1МПа) має вирішальний вплив на процес зростання карбідних включень. При низьких тисках водню (менше 0,1МПа) зростання карбідів значно сповільнюється (рис.17.), механічні властивості сталі 40X13 погіршуються в меншому ступені.

Якщо верхня температура термоцикування не перевищувала 1170К, то межа міцності знижувався менш значно - на 3-4,5% при зниженні пластичності на 10-40%. Мікроструктура металу в цьому випадку змінювалася незначно - відзначалося збільшення розміру зерна в 1,5-2 рази (рис.17.). Додатково проведені дослідження Оже-спектрограм показали аналогічні результати.

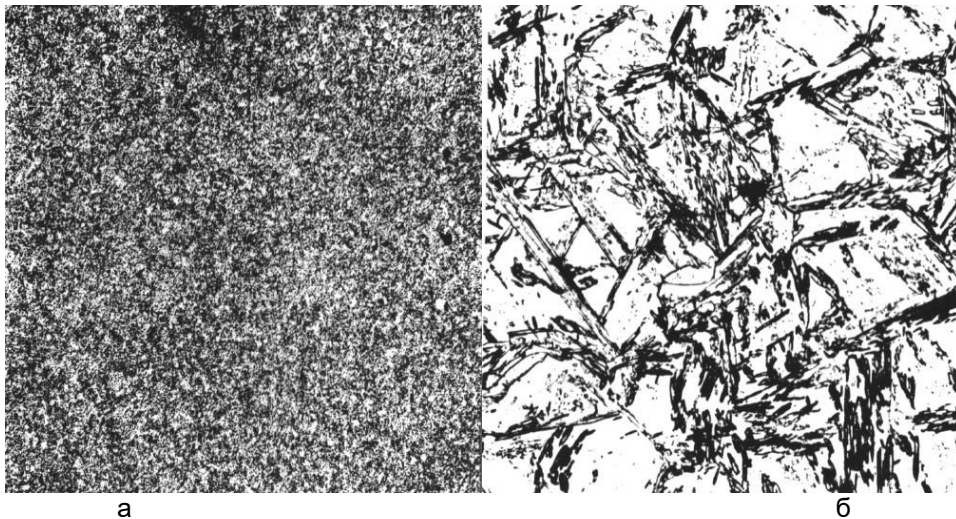


Рисунок 16 - Мікроструктура сталі 40X13, х300: а – вихідна, б – після 300ц

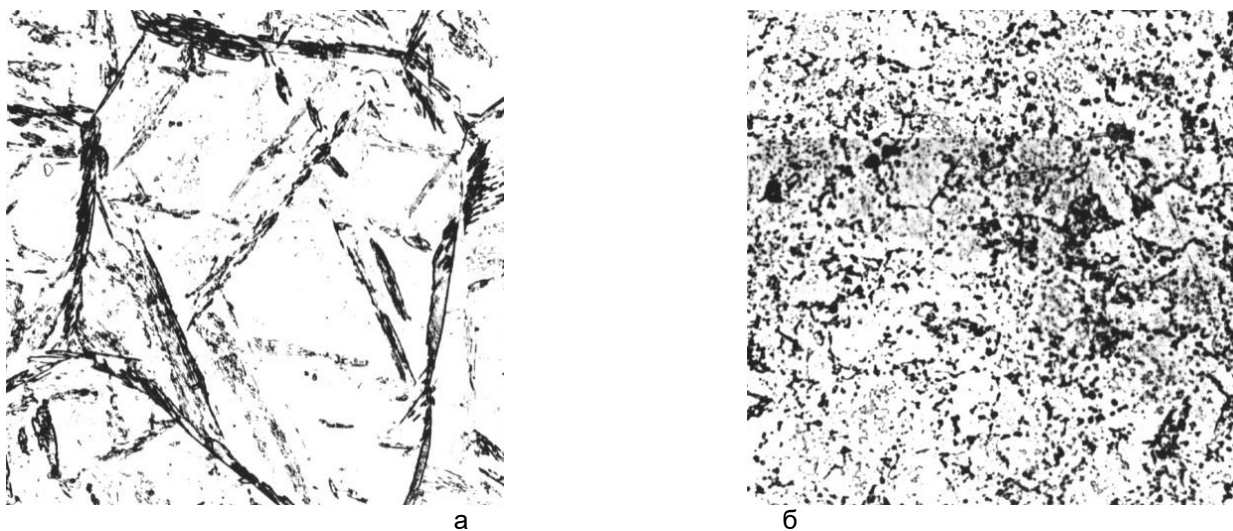


Рисунок 17 - Мікроструктура сталі 40X13 після ТЦО в інтервалі температур: а – 970 – 1170К, б – 1100 – 1300К; х500

Необхідно відзначити, що при термоциклічній обробки сталей типу 40X13 незалежно від атмосфери також стимулює виділення і зростання карбідів, що знижують механічні властивості сталі, такі як межа міцності, та збільшують її крихкість і твердість.

Проведені дослідження дозволяють зробити однозначний висновок - феритомартенситні хромисті сталі типу 40X13 є неприпустимими для використання у водневмісних середовищах, особливо при циклічно змінних температурах їх експлуатації. Щонайбільше це стосується деталей працюючих під знакозмінним навантаженням.

#### Висновки

Встановлено утворення Н-шарів залізвуглецевих сплавів. Визначено, що коефіцієнт дифузії водню зазнає помітного стрибка у момент  $\gamma - \alpha$  перетворення як у залізі, так і в сталях.

Встановлений характер зміни механічних властивостей зразків чистого заліза після ТЦО у водні. Спостерігається майже двократне збільшення

пластичності заліза при незначному зниженні показників міцності. Ця інформація підтверджує припущення, що Н-шар очищає метал від дефектів, що покращує його деформованість.

Встановлене утворення Н-шару при евтектоїдному перетворенні залізвуглецевих сплавів із вмістом вуглецю понад 0,2%, за умов підвищених швидкостей охолодження; на двофазній ділянці  $A + F$  вуглецевих сплавів Н-шар не утворюється.

Встановлений ефект імпульсного виділення водню в сталях, близьких до евтектоїдних, пояснює причину їх флокеночутливості і показує нові шляхи боротьби з нею: спрямована кристалізація при охолодженні зливків; ізотермічна витримка або уповільнене охолодження злитків в області температур поліморфного та евтектоїдного перетворень; охолодження зливків не з поверхні всередину металу, а вздовж осі від одного кінця до іншого.

Результати аналізу мікроструктури свідчать про істотний вплив термоцикування в атмосфері водню в області температур поліморфного та евтектоїдного перетворень на її параметри: зі збільшен-

ням кількості термоциклів спостерігається укрупнення зерна фериту; строчковість прокатаних зразків, отримана в результаті попередньої холодної деформації, після 50 циклів (1150 - 1300K) зникає, а в інтервалі 1000 - 1200K строчковість сталі зберігається. Для доевтектоїдної сталі (0,43%С) інтервал температур циклування на розмір зерна впливає не суттєво, проте помітно впливає на морфологію перліту - спостерігається його сфероїдизація і тим в більшому об'ємі, чим більше термоциклів. Мікроструктура заевтектоїдної сталі (1,3%С) незалежно від параметрів ТЦО прагне до утворення сфероїдизованих зерен перліту різної дисперсності в міру збільшення числа термоциклів.

Встановлений ряд особливостей формування знеуглецьованого/науглецьованого шару при термоциклуванні в атмосфері водню: якщо напрямок руху дифузійного потоку вуглецю збігається із

напрямоком руху Н-шару, це прискорює процес знеуглецьовання. Якщо ці два потоки протилежно спрямовані, процес різко гальмується і знеуглецьований шар має мінімальну товщину. Це дозволяє контролювати товщину знеуглецьованого, а також і науглецьованого шару.

В результаті дослідження взаємодії Н-шарів з корозійно-стійкими сталями аустенітного (X18H9T) та ферит-мартенситного (40X13) класів встановлено, що сталі типу X18H9T практично не змінюють своїх механічних властивостей навіть після тривалого термоциклування (більше 500 годин). Сталь 40X13 при ТЦО в атмосфері водню демонструє зниження міцностних і одночасно пластичних властивостей з підвищенням твердості, що пов'язують з інтенсивним зростанням пластин карбідів, що робить цю сталь непридатною для експлуатації в даних умовах.

### Бібліографічний опис

1. Баранов А. А. Фазовые превращения и термоциклирование металлов / А. А. Баранов. – К.:Наукова думка, 1974. – 231 с.
2. Лазарев Б. Г. О пластической деформации железа при фазовом  $\alpha$ - $\gamma$  переходе / Б. Г. Лазарев, А. И. Судовцев, А. П. Смирнов // Физика металлов и металловедение. – 1959. – Т. VII, вып. I. – С. 122–127
3. Явление возникновения подвижных водородонасыщенных зон при полиморфном превращении металлов // Карпов В.Ю., Шаповалов В.И. // Оpub. - Б.И. – 1986. -№31. –С.1.
4. Карпов В. Ю. Особенности образования водородонасыщенных зон в железе и железоуглеродистых сплавах/ В. Ю. Карпов, А.В. Толстенко// Физика металлов и металловедение, 1990. №7. С. 94-99.
5. Гегузин Я.Е. Влияние направления  $\alpha$  –  $\gamma$  превращения на ползучесть поликристаллического железа./Я.Е. Гегузин, В.И. Кибец, М.И. Чеканов // Физика металлов и металловедение. 1980. т.49,- вып.5, С. 1088 – 1092.
6. Карпов В.Ю. Влияние водорода на реологическое поведение полиморфных металлов/ В.Ю. Карпов// Диссертация на соискание у.с. д.т.н.. Днепропетровск. 1991г. 193 с.
7. Карпов В.Ю. Некоторые физико-механические свойства газаров/ В.Ю. Карпов, А.В. Толстенко и др. // Режим доступа: [http://www.scitnce-bsea.bgita.ru.2013/mashin\\_2013\\_18/karpov](http://www.scitnce-bsea.bgita.ru.2013/mashin_2013_18/karpov).
8. Шаповалов В.И. Легирование водородом/ В.И. Шаповалов // -Днепропетровск. -Журфонд. -2013. -385с.
9. Карпов В.Ю., Носко О.А. Вплив водню на властивості поліморфних металів при їх термоциклуванні поблизу температури поліморфізму / В.Ю.Карпов, О.А.Носко // Теорія і практика металургії. 2018. №6. С. 62-70. <https://doi.org/10.34185/tpm.6.2018.08>

### References

1. Baranov A. A. Fazovye prevrashcheniya y termotsyklirovaniye metallov [Phase transformations and thermal cycling of metals] / A. A. Baranov. K.:Naukova dumka, 1974. 231 s.
2. Lazarev B. H. O plastycheskoi deformatsyy zheleza pry fazovom  $\alpha$ - $\gamma$  perekhode [About plastic deformation of iron during the  $\alpha$ - $\gamma$  phase transition]/ B. H. Lazarev, A. Y. Sudovtsev, A. P. Smyrnov // Fyzyka metallov y metallovedenye. 1959. T. VII, vyp. I. S. 122–127.
3. Iavlenye voznyknoveniya podvyzhnykh vodorodonasyshchennykh zon pry polymorfnom prevrashchenyy metallov [The phenomenon of the occurrence of mobile hydrogen-saturated zones during the polymorphic transformation of metals] // Karpov V.lu., Shapovalov V.Y. // Opub. B.Y. – 1986. №31. S.1.
4. Karpov V. Yu. Osobennosty obrazovaniya vodorodonasyshchennykh zon v zheleze y zhelezouhlerodystykh splavakh [Features of the formation of hydrogen-saturated zones in iron and iron-carbon alloys] / V. Yu. Karpov, A.V. Tolstenko// Fyzyka metallov y metallovedenye, 1990. №7. S. 94-99.
5. Hehuzyn Ya.E. Vliyanye napravleniya  $\alpha$  –  $\gamma$  prevrashcheniya na polzuchest polykrystallycheskoho zheleza [Influence of the direction of  $\alpha$  -  $\gamma$  transformation on the creep of polycrystalline iron.]/Ia.E. Hehuzyn, V.Y. Kybets, M.Y. Chekanov // Fyzyka metallov y metallovedenye. 1980. t.49,- vyp.5, S. 1088 – 1092.

6. Karpov V.Iu. Vliyaniye vodoroda na reolohycheskoe povedenye polymorfnykh metallov [Effect of hydrogen on the polymorphic metals rheological behavior]/ V.Iu. Karpov// Dyssertatsiya na soyskanye u.s. d.t.n.. Dnepropetrovsk. 1991h. 193 s.
7. Karpov V.Iu. Nekotorye fizyko-mekhanycheskiye svoistva hazarov [Particular physical and mechanical gasars properties]/ V.Iu. Karpov, A.V. Tolstenko i dr. // Rezhym dostupa: [http://www.scitnce-bsea.bgita.ru.2013/mashin\\_2013\\_18/karpov](http://www.scitnce-bsea.bgita.ru.2013/mashin_2013_18/karpov).
8. Shapovalov V.Y. Lehyrovanye vodorodom [Doping with hydrogen]/ V.Y. Shapovalov //-Dnepropetrovsk. -Zhurfond. -2013. -385s.
9. Karpov V.Iu., Nosko O.A. Vplyv vodniu na vlastyosti polimorfnykh metaliv pry yikh termotsykliuvanni poblyzu temperatury polimorfizmu [Influence of hydrogen on the properties of polymorphic metals during their thermal cycling near the temperature of the polymorphism]/ V.Iu.Karpov, O.A.Nosko // Teoriia i praktyka metalurhii. 2018. №6. S. 62-70. <https://doi.org/10.34185/tpm.6.2018.08>

УДК 622.785

<https://doi.org/10.34185/tpm.2.2022.06>

Ягольник М.В., Бойко М.М., Фурсов М.О., Єфіменко В.В., Полякова Н.В.,  
Журавльова С.В.

## Дослідження впливу біоматеріалів на процес спікання залізородних матеріалів та якість агломерату

*Yaholnyk M.V., Boyko M.M., Fursov M.O., Efimenko V.V., Polyakova N.V., Zhuravlova S.V.*  
**Study of the influence of biomaterials on the process iron ore sintering and product quality**

**Мета.** Основне надходження енергії на агломераційних процес відбувається за рахунок спалювання коксового дріб'язку, який забезпечує близько 78 % енергії, яка споживається в процесі агломерації. Спалювання коксового дріб'язку в агломераційному процесі також є основним джерелом забруднюючих речовин, таких як  $\text{NO}_x$  і  $\text{SO}_x$ . Енергія біомаси вважається перспективною заміною коксового дріб'язку в агломерації по-перше через її відновлюваність, а по-друге через нижчий вміст S і N. Для зменшення впливу типу біомаси на властивості агломераційного палива, спрощення технології використання біомаси при агломерації можливо виробництво коксового дріб'язку з додаванням в шихту частки біоматеріалів. Метою роботи було визначення впливу на показники агломераційного процесу та якість агломерату заміни частки твердого палива біоматеріалами, які попередньо проходили підготовку. **Методика.** Для дослідження в якості твердого палива використовували промисловий коксовий дріб'язок та коксовий дріб'язок, отриманий при температурі піролізу 850-1100 °C з додаванням 5 - 45 % біоматеріалів. Експерименти проводили на агломераційній установці, яка використовується для спікання шихти з контролем параметрів процесу. Попередньо шихту огрудували у змішувачі-грануляторі барабанного типу. Після випробувань оцінювали питому продуктивність агломераційної установки, швидкість спікання, а також властивості агломерату. **Результати.** Представлені результати дослідження показали, що при використанні коксового дріб'язку, отриманого при температурі 1100 °C з додаванням 5 % біоматеріалів, показники агломераційного процесу та якості продукту відповідають таким, що є при використанні промислового коксу. При використанні коксового дріб'язку, отриманого при температурі 850 °C з додаванням 15 % біоматеріалів спостерігається незначні зміни в параметрах процесу відносно базової технології. Застосування коксового дріб'язку, отриманого з використанням понад 15 % біоматеріалів, викликає зниження продуктивності агломераційної установки та міцності отриманого агломерату. Максимальне падіння спостерігається при використанні коксового дріб'язку з температурою піролізу 850 °C та вмістом біоматеріалів 45%. **Наукова новизна.** Встановлено механізм впливу коксового дріб'язку з додаванням біоматеріалів на формування високотемпературних зон в процесі агломерації та кінцевої структури агломерату. **Практична значущість.** Рекомендується застосування в якості агломераційного палива коксового дріб'язку, отриманого при температурі піролізу 850 °C і вмісті біоматеріалів 15 %. При цьому показники агломераційного процесу та якість агломерату зберігаються на базовому рівні. Застосування коксового дріб'язку, отриманого при температурі піролізу 850 °C дозволить знизити енерговитрати на виробництво палива та зменшить загальний екологічний вплив агломераційного виробництва на довкілля.

**Ключові слова:** залізородний агломерат, коксовий дріб'язок, біоматеріали, екологічний вплив.

**Purpose.** The main input of energy to the sintering process is due to the burning of coke fines. Combustion of coke fines in the sintering process is also a major source of pollutants such as  $\text{NO}_x$  and  $\text{SO}_x$ . Biomass energy is considered a promising replacement for coke fines in sintering due to its renewable nature and lower S and N content. It is possible to produce coke fines with the addition of biomaterials to the charge to reduce the influence of the type of biomass on the properties of fuel and simplifying the technology of using biomass during sintering. The purpose of the work was to determine the impact on the indicators of the agglomeration process and the quality of the agglomerate of replacing the solid fuel with biomaterials. **Methodology.** Industrial coke fines and coke fines obtained at a pyrolysis temperature of 850-1100 °C with the addition of 5 - 45% biomaterials were used for research as solid fuel. The experiments were carried out on a sintering unit with control of the process parameters. Previously, the charge was lumped in a drum-type mixer-granulator. After the tests, the specific productivity of the sintering unit, the sintering rate, and the properties of the agglomerate were evaluated. **Findings.** The results of the study were established that when using coke fines obtained at a temperature of 1100 °C with the addition of 5% biomaterials, the indicators of the agglomeration process and product quality correspond to those of industrial coke. When using coke fines obtained at a temperature of 850 °C with the addition of 15% of biomaterials, there are slight changes in the process parameters relative to the basic technology. The use of coke fines obtained with the use of more than 15% of biomaterials causes a decrease in the productivity of the sintering unit and the strength of the resulting agglomerate. **Originality.** The mechanism of influence of coke fines with the addition of biomaterials on the formation of high-temperature zones during the agglomeration process and the final structure of the agglomerate was established. **Practical value.** It is recommended to use coke fines obtained at a pyrolysis temperature of 850 °C and a biomaterial content of 15% as sintering fuel. The use of coke fines obtained at a pyrolysis temperature of 850 °C will reduce energy costs for fuel production and reduce the overall environmental impact of agglomeration production on the environment.

**Keywords:** iron ore agglomerate, coke fines, biomaterials, environmental impact.

### Вступ

Агломерація залізної руди – складний металургійний процес, який потребує значних витрат тепла, за рахунок спалювання дрібнофракційного твердого палива. Залишаючись найпоширенішим в світі способом підготовки залізородних матеріа-

лів до доменної плавки, агломерація залізних руд є одним з найбільших забруднювачів повітря з усіх металургійних процесів. Для зменшення впливу на довкілля агломераційного процесу можливо використовувати в якості палива біоматеріали. Однак при використанні таких матеріалів виникають тру-

днощі з досягненням необхідних показників процесу та якості готового агломерату.

**Аналіз літературних даних та постановка проблеми**

Агломерація є першим процесом металургійної промисловості, який відіграє важливу роль у процесі виробництва чавуну та сталі, і його енергоспоживання становить значну частку від загальних витрат на виробництво чавуну [1]. Основне надходження енергії на агломераційних процес відбувається за рахунок спалювання коксового дріб'язку, який забезпечує близько 78 % енергії, яка споживається в процесі агломерації [2]. Залежність підприємств чавуну від викопної енергії призводить до викидів у середньому 1,65 - 1,8 тони вуглекислого газу на тонну виробленої рідкої сталі, а викид вуглекислого газу в процесі агломерації становить понад 10 % від загального обсягу викидів сталеплавильної промисловості [3, 4]. Спалювання коксового дріб'язку в агломераційному процесі також є основним джерелом забруднюючих речовин, таких як NO<sub>x</sub> і SO<sub>x</sub>. Викиди NO<sub>x</sub> у процесі агломерації становлять 48 % викидів усієї металургійної промисловості, а SO<sub>x</sub> до 70 % [3].

Основне паливо, що використовується в традиційному процесі агломерації, коксовий дріб'язок – дрібна фракція коксу, яка утворюється в процесі його виробництва, має крупність часток менше 3 мм та є невідновлюваним викопним ресурсом з високим вмістом S і N. Це призводить до проблеми, пов'язаної з високим споживанням енергії в металургійній промисловості та забрудненням повітря. Енергія біомаси вважається перспективною заміною коксового дріб'язку в агломерації поперше через її відновлюваність, а по-друге через нижчий вміст S і N [5, 6]. Біомаса все частіше використовується як джерело енергії для теплових процесів, і наразі вона є третім за величиною природним та відновлювальним джерелом енергії у світі [7]. При використанні біомаси відсутня необхідність змінювати вже наявне обладнання та існуючі процеси для отримати альтернативного коксового дріб'язку для використання процесі агломерації. За допомогою процесу піролізу біомаса перетворюється на вуглецевий продукт зі структурою, властивостями та складом, подібними до коксового дріб'язку.

В Україні та за кордоном проводились експериментальні дослідження впливу на процес агломерації а якість агломерату деревного вугілля, яке використовували для часткової заміни коксового дріб'язку. Результати показують, що використання деревного вугілля замість частини коксового дріб'язку в агломераційному процесі суттєво не впливає на характеристики спікання та якість спекеного продукту, крім того, зменшується викид забруднюючих газів, що утворюються в процесі агломерації [8 - 12]. Однак виробництво деревинного вугілля з біомаси потребує окремих виробничих ліній, крім того в залежності від типу біомаси змінюється властивості деревинного вугілля та коефіцієнти заміни коксового дріб'язку. Тому, для зменшення впливу типу біомаси на властивості палива, спрощення технології використання біомаси при агломерації можливо виробництво коксового дріб'язку з додаванням в шихту частки біоматеріалів.

**Мета і завдання досліджень**

Метою цього дослідження було визначення впливу на показники агломераційного процесу та якість агломерату заміни частки твердого палива біоматеріалами, які попередньо проходили різну підготовку. За результатами дослідження можна зробити висновки щодо ефективності та доцільності того чи іншого виду підготовки біоматеріалів до застосування при агломерації.

**Матеріали та методи дослідження**

Для дослідження в якості твердого палива використовували промисловий коксовий дріб'язок та коксовий дріб'язок, отриманий при температурі піролізу 950-1100 °C з додаванням 5 - 45 % біоматеріалів, а саме – гранул с деревинної біомаси. Методика отримання коксового дріб'язку з додаванням біоматеріалів, склад та особливості отриманого коксового дріб'язку наведені в попередній роботі [12]. Окрім твердого палива для виробництва агломерату використовували залізну руду, залізорудний концентрат, вапно, вапняк.

Хімічний склад шихтових матеріалів наведено в таблицях 1.

Таблиця 1  
Хімічний склад залізної руди та залізорудного концентрату

Матеріал	Вміст, %								
	Fe <sub>заг.</sub>	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	ВПП	Інші оксиди
Залізорудний концентрат	65.88	28.27	62.71	6.44	0.30	0.17	0.26	1.85	-
Залізна руда	57.75	1.76	80.54	12.71	1.60	1.72	0.62	1.82	0.47
Вапняк	0.28	-	0.40	1.50	0.56	48.50	0.92	43.56	-
Вапно	12.66	-	18.09	1.80	26.61	86.80	1.40	-	-

У таблиці 2 наведено склад агломераційної шихти, що відповідає промисловій. Склад шихти був однаковий для всіх спікань, змінювався лише тип палива. Основність шихти становила 1,4.

Експерименти проводили на агломераційній установці (рис. 1), яка використовувалася спікання

шихти з контролем параметрів процесу. Попередньо шихту огрудковували у змішувачі-грануляторі барабанного типу довжиною 0,8 м і діаметром 0,53 м та швидкістю обертання 30 об/хв.

Таблиця 2  
Склад агломераційної шихти

Компонент	Вміст, %	Розмір часток, мм
Залізорудний концентрат	46.75	<0.1
Залізна руда	10.5	0-10
Вапно	1.5	0-3
Вапняк	10.25	0-3
Тверде паливо	6	0-3
Зворот	25	5-10

. Витрата води в усіх дослідах становила 8%. Особливості проведення процесу спікання, методики визначення питомої продуктивності агломераційної установки, швидкості спікання, а також властивостей агломерату детально описані в роботах [12, 13, 14].

#### Результати дослідження

В таблиці 3 представлено зведені результати дослідження – параметри агломераційного процесу та якості отриманого агломерату.

Результати експериментів можна розділити на дві групи. Перша – це використання в агломераті

коксового дріб'язку з вмістом біоматеріалів 5%, який був отриманий при різних максимальних температурах піролізу. Друга група – використання коксового дріб'язку, отриманого при температурі 850 °С з різним вмістом біоматеріалів від 15 до 45 %.

На рисунку 2 показані зміни виходу придатного агломерату, вертикальної швидкості спікання, питомої продуктивності, швидкості фільтрації газу, міцності агломерату та його відновності при використанні в якості палива промислового коксового дріб'язку та коксового дріб'язку з 5 % біоматеріалів, отриманих за різних температур.

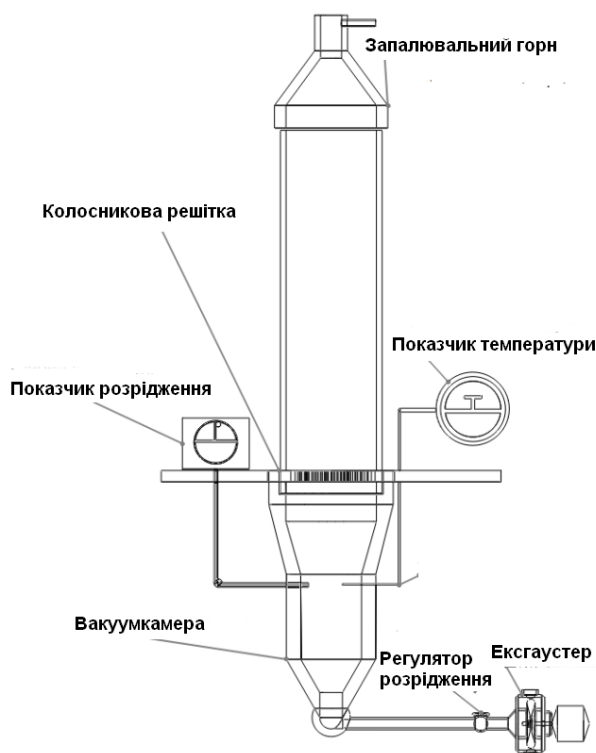


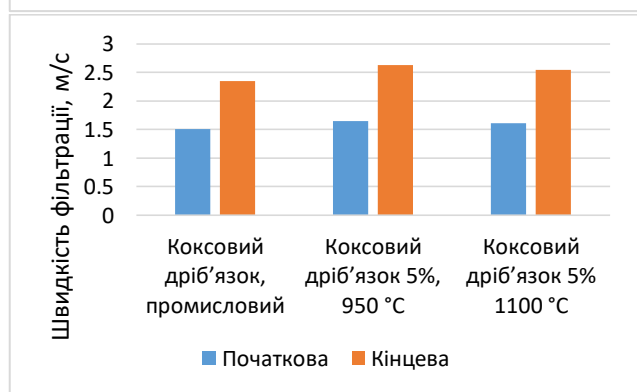
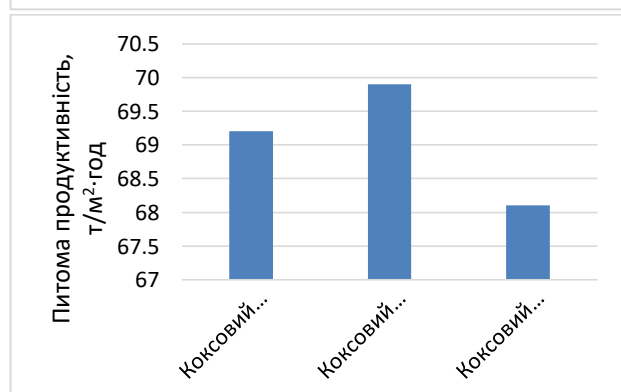
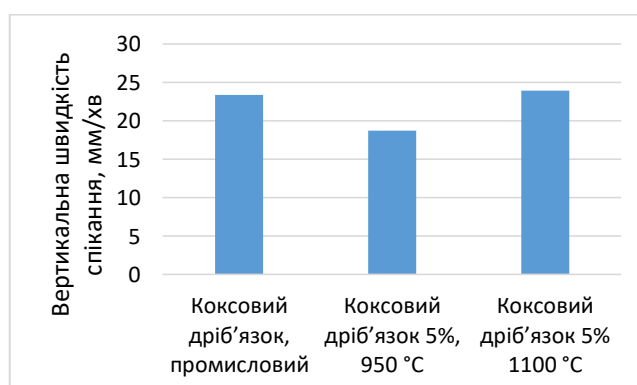
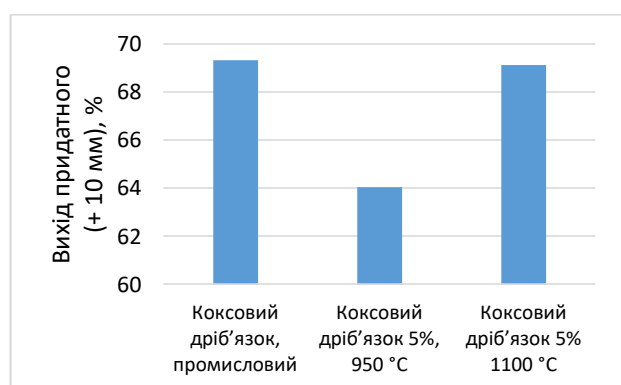
Рис. 1. Схема агломераційної установки

Таблиця 3  
Результати дослідження

Показник	Тип палива (тип, вміст біоматеріалів, температура піролізу)					
	Коксовий дріб'язок, промисловий	Коксовий дріб'язок 5%, 950 °С	Коксовий дріб'язок 5% 1100 °С	Коксовий дріб'язок 15% 850 °С	Коксовий дріб'язок 30% 850 °С	Коксовий дріб'язок 45% 850 °С
Вихід придатного (+ 10 мм), %	69,31	64,04	69,12	68,84	60,09	56,91
Вертикальна швидкість спікання, мм/хв	23,33	18,67	23,92	24,87	25,91	27,05
Питома продуктивність, т/м <sup>2</sup> ·год	1,40	1,04	1,41	1,43	1,31	1,26
Початкова швидкість фільтрації, м/с	1,51	1,65	1,61	1,74	1,84	1,94
Кінцева швидкість фільтрації, м/с	2,35	2,63	2,54	3,00	3,28	3,74
Міцність агломерату на зтирання, % (- 0,5 мм)	2,70	2,91	2,87	3,10	3,05	2,98
Міцність агломерату на удар, % (+ 5 мм)	82,40	80,10	81,20	80,01	72,03	56,70
Відновлюваність агломерату, %	69,20	69,90	68,10	70,30	72,10	77,40

На рисунку 3 показані зміни виходу придатного агломерату, вертикальної швидкості спікання, питомої продуктивності, швидкості фільтрації газу, міцності агломерату та його відновлюваності при

використанні в якості палива коксового дріб'язку з вмістом біоматеріалів 15 - 45 %, отриманих при температурі 850 °С.



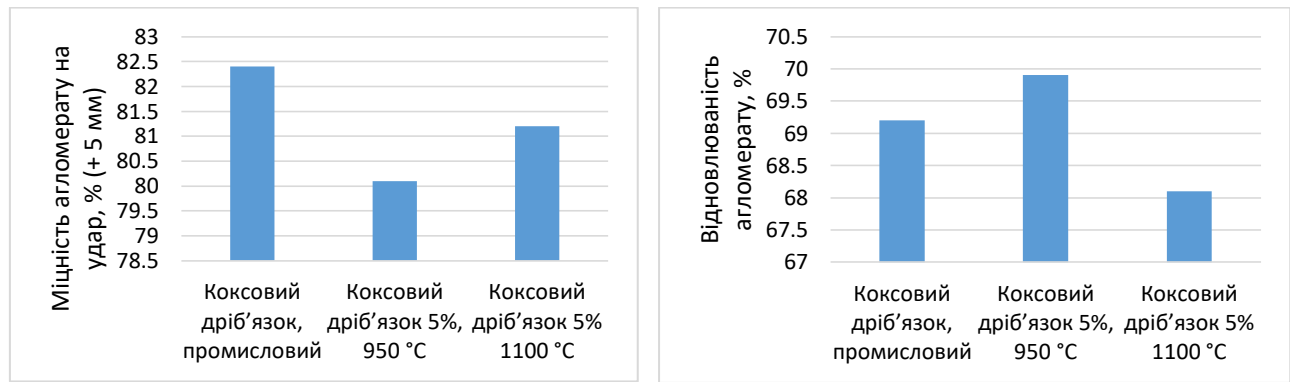


Рис. 3. Зміна основних параметрів агломераційного процесу та якості агломерату при використанні коксового дріб'язку з 5 % біоматеріалів.

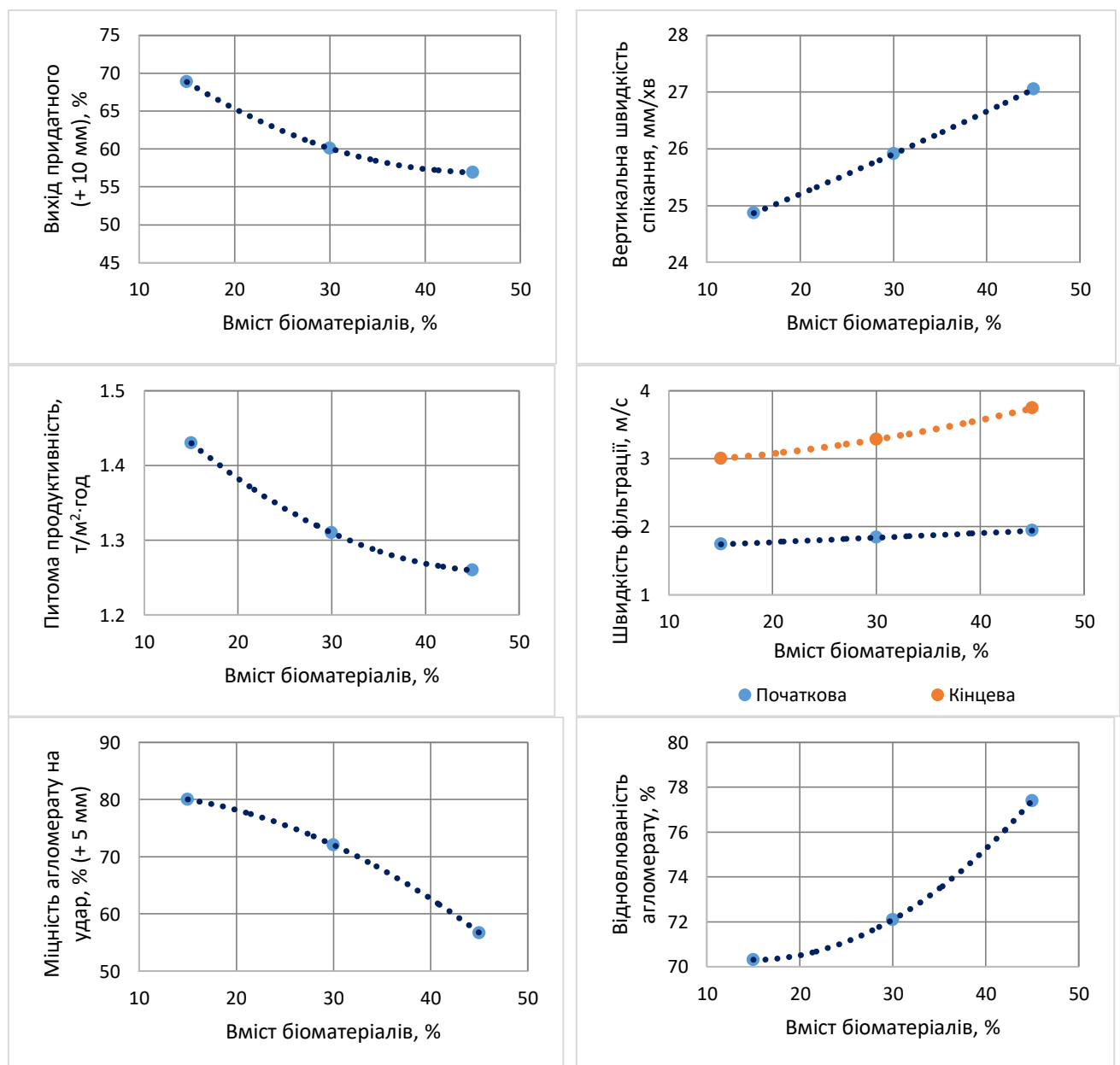


Рис. 3. Зміна основних параметрів агломераційного процесу та якості агломерату при використанні коксового дріб'язку з 15 - 45 % біоматеріалів.

## Обговорення результатів

Проведені дослідження показали, що зі збільшенням температури піролізації при виробництві коксового дріб'язку з додаванням біоматеріалів, спостерігається поліпшення характеристик міцності агломерату. Так, при температурі піролізу 950 °C міцність на удар отриманого агломерату становить 80,1 %, а при температурі піролізації 1100 °C міцність агломерату досягає 81,2 %, що дещо поступається міцності, отриманій при використанні промислового коксового дріб'язку – 82,4 %. Це можна пояснити кращими умовами спікання залізородних матеріалів навколо частинок палива під час його горіння.

З підвищенням температури піролізу в коксовому дріб'язку міститься менша кількість летких речовин, які не згоряють біля частинок палива, питома теплота згорання підвищується. Більша кількість теплоти сприяє утворенню навколо частки міцнішого локального спеку. Слід врахувати, що ця тенденція спостерігалася не тільки для коксового дріб'язку з додаванням біоматеріалів, але і для вугільного коксу при підвищенні температури піролізу.

Аналогічний результат спостерігався зі збільшенням вмісту біоматеріалів у коксовому дріб'язку. При цьому збільшення вмісту біоматеріалів з 15 до 45% різко знижувало міцність агломерату, так як частинки коксовому дріб'язку з великим вмістом біоматеріалів не забезпечували необхідний тепловий рівень у зоні спікання на потрібний період часу. Більш пористий та реакційно активний коксовий дріб'язок з великим вмістом біоматеріалів згорає за менший проміжок часу, ніж необхідно для утворення достатньої кількості розплаву в зоні спікання та просочення ним великих часток залізородних матеріалів. Інтенсивне горіння частки палива сприяє розплавленню прилеглих матеріалів та утворенню великої пори, при цьому розташовані між частками палива залізородні матеріали беруть участь у процесі рідкофазного спікання в незначній мірі.

Як результат швидшого згорання частинок палива, спостерігалось зростання вертикальної швидкості спікання при використанні коксового дріб'язку з біоматеріалами з 23,33 мм/хв базового значення до 27 мм/хв при використанні коксового дріб'язку з 45 % біоматеріалів. У зв'язку з утворенням неміцної пористої структури відбувалося зниження виходу придатного агломерату з 69,31 до 56,91 %, що не дозволяло збільшити продуктивність установки і вона знижувалася з 1,4 т/м<sup>2</sup>·год до 1,26 т/м<sup>2</sup>·год.

Утворення структури з великими каналами в шарі, що спікається при використанні коксового дріб'язку з вмістом біоматеріалів 30 - 45 % підтверджується вимірами швидкості фільтрації газів крізь шар матеріалів на початку і в кінці спікання.

Якщо початкове значення швидкості фільтрації для всіх шихт варіювалося в діапазоні 1,5 - 1,9 м/с, кінцеві значення для більшості шихт становили 2,35 - 2,63 м/с, а при використанні коксового дріб'язку з високим вмістом біоматеріалів становили 3,28 - 3,74 м/с.

Використання коксового дріб'язку з біоматеріалами підвищує відновлюваність отриманих агломератів. Так для дослідів з промисловим коксовим дріб'язком відновлюваність варіювалася в діапазоні 68,2 - 69,2 %, а при використанні коксового дріб'язку з біоматеріалами – 68,1 - 77,4 %. При цьому значне зростання відновлюваності агломератів спостерігалось зі збільшенням частки біоматеріалів у коксовому дріб'язку до 30 – 45 %. Отриманий у таких умовах агломерат мав пухку, сильнопористу структуру, яка позитивно позначалася з його відновлюваності. Однак низька міцність на удар на рівні 56,7 % не дозволяє використовувати отриманий продукт доменної печі.

## Висновки

1. Експериментально вивчено вплив коксового дріб'язку, отриманого при температурах піролізації 850, 950 і 1100 °C з додаванням 5 – 45 % біоматеріалів, на процес агломерації залізородних матеріалів та властивості одержаного агломерату. Встановлено, що при використанні коксового дріб'язку, отриманого при температурі 1100 °C з добавкою 5 % біоматеріалів, показники агломераційного процесу та якості продукту відповідають таким, що є при використанні промислового коксу. При використанні коксового дріб'язку, отриманого при температурі 850 °C з добавкою 15 % біоматеріалів спостерігається зростання питомої продуктивності агломераційної установки. При цьому знижується на 2,39% міцність агломерату на удар і підвищується відновлюваність агломерату на 1,1%.

2. У більшості випадків застосування коксового дріб'язку, отриманого з використанням біоматеріалів, викликає зниження продуктивності агломераційної установки та міцності отриманого агломерату. Максимальне падіння спостерігається при використанні коксового дріб'язку з температурою піролізу 850 °C та вмістом біоматеріалів 45% на 10,2% та 25,7% відповідно.

3. Рекомендується застосування в якості агломераційного палива коксового дріб'язку, отриманого при температурі піролізу 850 °C і вмісті біоматеріалів 15 %. При цьому показники агломераційного процесу та якість агломерату зберігаються на базовому рівню. Застосування коксового дріб'язку, отриманого при температурі піролізу 850 °C дозволить знизити енерговитрати на виробництво палива та зменшить загальний екологічний вплив агломераційного виробництва на довкілля.

## Бібліографічний опис

1. Gan, M.; Fan, X.; Ji, Z.; Chen, X.; Jiang, T.; Li, G.; Yu, Z. Influence of Modified Biomass Fuel on Iron Ore Sintering. *Dry. Roasting Calcining Miner.* 2015, Vol. 30, pp. 241 – 248. doi:10.1002/9781119093329
2. Hu, J.; Wu, M.; Chen, X.; Du, S.; Cao, W.; She, J. Hybrid modeling and online optimization strategy for improving carbon efficiency in iron ore sintering process. *Inf. Sci.* 2019, № 483, pp. 232 – 246. doi:10.1016/j.ins.2019.01.027
3. Bartocci, P.; Wang, L.; Skreiberg, Ø.; Liberti, F.; Bidini, G.; Fantozzi, F. Biocarbon Production and Use as a Fuel. *Biofuels Biorefin.* 2019, Vol. 9, pp. 295 – 324. doi:10.1007/978-981-13-3768-0\_10
4. Ooi, T.C.; Thompson, D.; Anderson, D.R.; Fisher, R.; Fray, T.; Zandi, M. The effect of charcoal combustion on iron-ore sintering performance and emission of persistent organic pollutants. *Combust. Flame.* 2011, № 158, pp. 979 – 987. doi:10.1016/j.combustflame.2011.01.020
5. Demirbaş, A. Biomass resource facilities and biomass conversion processing for fuels and chemicals. *Energy Convers. Manag.* 2001, № 42, pp. 1357 – 1378. doi:10.1016/S0196-8904(00)00137-0
6. Xie, H.; Li, R.; Yu, Z.; Wang, Z.; Yu, Q.; Qin, Q. Combined steam/dry reforming of bio-oil for H<sub>2</sub>/CO syngas production with blast furnace slag as heat carrier. *Energy.* 2020, № 200, pp. 117 – 481. doi:10.1016/j.energy.2020.117481
7. Kalisz, S.; Ciukaj, S.; Mroczek, K.; Tymoszuik, M.; Wejkowski, R.; Pronobis, M.; Kubiczek, H. Full-scale study on halloysite freside additive in 230 t/h pulverized coal utility boiler. *Energy.* 2015, Vol. 92, pp. 33 – 39. doi:10.1016/j.energy.2015.03.062
8. Ooi, T.C.; Aries, E.; Ewan, B.C.; Thompson, D.; Anderson, D.R.; Fisher, R.; Tognarelli, D. The study of sunflower seed husks as a fuel in the iron ore sintering process. *Miner. Eng.* 2007, Vol. 21, pp. 167–177. doi:10.1016/j.mineng.2007.09.005
9. Lovel, R.; Vining, K.; Dell'Amico, M. Iron ore sintering with charcoal. *Miner. Process. Extr. Metall.* 2007, Vol. 116, pp. 85–92. doi:10.1179/174328507X163887
10. Liu, C.; Zhang, Y.; Zhao, K.; Xing, H.; Kang, Y. Modified biomass fuel instead of coke for iron ore sintering. *Ironmak. Steelmak.* 2020, Vol. 47, pp. 188–194. doi:10.1080/03019233.2018.1507070
11. Liu, C.; Zhang, Y.; Zhao, K.; Xing, H.; Kang, Y. Effect of biomass on reaction performance of sintering fuel. *Energy Mater.* 2019, Vol. 54, pp. 3262–3272. doi:10.1007/s10853-018-3061-2
12. Kieush, L., Hrubak, A., Koveria, A., Boyko, M., Yaholnyk, M., Molchanov, L., & Moklyak, V. Influence of biocoke on iron ore sintering performance and strength properties of sinter. *Mining of Mineral Deposits.* 2022, Vol. 16(2), pp. 55-63. doi:10.33271/mining16.02.055
13. Kieush, L., Koveria, A., Zhu, Z.Q., Boyko, M., Sova, A., & Yefimenko, V. . Application of biomass pellets for iron ore sintering. *Materials Science Forum.* 2021, Vol. 1045, pp. 17-31. doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.1045.17
14. Kieush, L., Koveria, A., Boyko, M., Hrubyak, A., Sova, A., & Yefimenko, V. Walnut shells as a potential fuel for iron ore sintering. *Materials Science Forum,* Vol. 2021, 1045, pp. 127-140. doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.1045.127

## References

1. Gan, M.; Fan, X.; Ji, Z.; Chen, X.; Jiang, T.; Li, G.; Yu, Z. Influence of Modified Biomass Fuel on Iron Ore Sintering. *Dry. Roasting Calcining Miner.* 2015, Vol. 30, pp. 241 – 248. doi:10.1002/9781119093329
2. Hu, J.; Wu, M.; Chen, X.; Du, S.; Cao, W.; She, J. Hybrid modeling and online optimization strategy for improving carbon efficiency in iron ore sintering process. *Inf. Sci.* 2019, № 483, pp. 232 – 246. doi:10.1016/j.ins.2019.01.027
3. Bartocci, P.; Wang, L.; Skreiberg, Ø.; Liberti, F.; Bidini, G.; Fantozzi, F. Biocarbon Production and Use as a Fuel. *Biofuels Biorefin.* 2019, Vol. 9, pp. 295 – 324. doi:10.1007/978-981-13-3768-0\_10
4. Ooi, T.C.; Thompson, D.; Anderson, D.R.; Fisher, R.; Fray, T.; Zandi, M. The effect of charcoal combustion on iron-ore sintering performance and emission of persistent organic pollutants. *Combust. Flame.* 2011, № 158, pp. 979 – 987. doi:10.1016/j.combustflame.2011.01.020
5. Demirbaş, A. Biomass resource facilities and biomass conversion processing for fuels and chemicals. *Energy Convers. Manag.* 2001, № 42, pp. 1357 – 1378. doi:10.1016/S0196-8904(00)00137-0
6. Xie, H.; Li, R.; Yu, Z.; Wang, Z.; Yu, Q.; Qin, Q. Combined steam/dry reforming of bio-oil for H<sub>2</sub>/CO syngas production with blast furnace slag as heat carrier. *Energy.* 2020, № 200, pp. 117 – 481. doi:10.1016/j.energy.2020.117481
7. Kalisz, S.; Ciukaj, S.; Mroczek, K.; Tymoszuik, M.; Wejkowski, R.; Pronobis, M.; Kubiczek, H. Full-scale study on halloysite freside additive in 230 t/h pulverized coal utility boiler. *Energy.* 2015, Vol. 92, pp. 33 – 39. doi:10.1016/j.energy.2015.03.062

8. Ooi, T.C.; Aries, E.; Ewan, B.C.; Thompson, D.; Anderson, D.R.; Fisher, R.; Tognarelli, D. The study of sunflower seed husks as a fuel in the iron ore sintering process. *Miner. Eng.* 2007, Vol. 21, pp. 167–177. doi:10.1016/j.mineng.2007.09.005
9. Lovel, R.; Vining, K.; Dell'Amico, M. Iron ore sintering with charcoal. *Miner. Process. Extr. Metall.* 2007, Vol. 116, pp. 85–92. doi:10.1179/174328507X163887
10. Liu, C.; Zhang, Y.; Zhao, K.; Xing, H.; Kang, Y. Modified biomass fuel instead of coke for iron ore sintering. *Ironmak. Steelmak.* 2020, Vol. 47, pp. 188–194. doi:10.1080/03019233.2018.1507070
11. Liu, C.; Zhang, Y.; Zhao, K.; Xing, H.; Kang, Y. Effect of biomass on reaction performance of sintering fuel. *Energy Mater.* 2019, Vol. 54, pp. 3262–3272. doi:10.1007/s10853-018-3061-2
12. Kieush, L., Hrubciak, A., Koveria, A., Boyko, M., Yaholnyk, M., Molchanov, L., & Moklyak, V. Influence of biocoke on iron ore sintering performance and strength properties of sinter. *Mining of Mineral Deposits.* 2022, Vol. 16(2), pp. 55-63. doi:10.33271/mining16.02.055
13. Kieush, L., Koveria, A., Zhu, Z.Q., Boyko, M., Sova, A., & Yefimenko, V. . Application of biomass pellets for iron ore sintering. *Materials Science Forum.* 2021, Vol. 1045, pp. 17-31. doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.1045.17
14. Kieush, L., Koveria, A., Boyko, M., Hrubyak, A., Sova, A., & Yefimenko, V. Walnut shells as a potential fuel for iron ore sintering. *Materials Science Forum,* Vol. 2021, 1045, pp. 127-140. doi:10.4028/www.scientific.net/MSF.1045.127

**Філоненко Н.Ю., Бабаченко О. І., Кононенко Г. А., Волчук В.М.**  
**ВПЛИВ КОМПЛЕКСНОГО МІКРОЛЕГУВАННЯ**  
**АЛЮМІНІЄМ, ТИТАНОМ ТА АЗОТОМ НА СТРУКТУРНИЙ**  
**СКЛАД ТА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ВУГЛЕЦЕВИХ**  
**СТАЛЕЙ**

**Filonenko N.Yu., Babachenko O.I., Kononenko G.A., Volchuk V.M.**  
**THE INFLUENCE OF COMPLEX MICROALLOYING WITH**  
**ALUMINUM, TITANIUM AND NITROGEN ON THE**  
**STRUCTURAL COMPOSITION AND MECHANICAL**  
**PROPERTIES OF CARBON STEELS**

**Анотація.** Леговані та мікролеговані сталі мають широке застосування в промисловості завдяки високому комплексу механічних властивостей. Відомо, що легуючі елементи чинять вплив на фазові перетворення та формування надлишкових фаз в сталях. Наразі, недостатньо літературних даних щодо впливу мікролегування комплексами алюмінію, титан та азот; алюмінію та азот на структурний стан та механічні властивості сталей. Метою даної роботи було дослідження впливу мікролегування комплексами алюмінію, титан та азот; алюмінію та азот на формування структурних складових та механічні властивості сталі. В роботі проведено дослідження структурних елементів, механічних властивостей та виконано порівняльний аналіз для двох дослідних сталей – марки К (з підвищеним вмістом кремнію, марганцю, мікролегованої ванадієм) та сталі марки К зі зменшеним вмістом ванадію, мікролегованої алюмінієм, титаном та азотом (К1); алюмінієм та азотом (К2). Для визначення структурного стану сталей використовували мікροструктурний та рентгеноструктурний аналізи. Крім цього, в роботі були визначені механічні характеристики сталей. Отримані в даній роботі результати показали, що зменшення вмісту ванадію в сталі та комплексне мікролегування алюмінієм, титаном та азотом; алюмінієм та азотом сприяє утворенню структури з більш дрібними зернами та збільшенню об'ємної частки перліту. Встановлено, що додаткове мікролегування сталі комплексом алюмінію, титан та азот призводить до зменшення вмісту марганцю та кремнію в фериті та збільшення вмісту кремнію в цементиті, що можна пояснити зменшенням розчинності вуглецю, марганцю та кремнію в структурних складових. Крім цього, в структурі сталі спостерігали утворення включень, які були розташовані як по границям, так і в тілі зерен перліту. Встановлено, що в сталі К2, показники міцності та твердості вищі на 10-15% у порівнянні з показниками для сталі К1 та на 15–17 %, ніж сталі марки К.

**Ключові слова:** комплексне мікролегування сталі алюмінієм, титаном та азотом, включення, оксиди, нітриди, карбонітриди, властивості сталі.

**Annotation.** Alloyed and microalloyed steels are widely used in industry due to a high complex of mechanical properties. It is known that alloying elements influence phase transformations and the formation of excess phases in steels. Currently, there is insufficient literature data on the effect of microalloying with aluminum, titanium and nitrogen complexes; aluminum and nitrogen on the structural state and mechanical properties of steels. The purpose of this work was to study the effect of microalloying aluminum, titanium and nitrogen complexes; aluminum and nitrogen on the formation of structural components and mechanical properties of steel. In the work, a study of structural elements, mechanical properties, and a comparative analysis was performed for two experimental steels - grade K (with increased content of silicon, manganese, microalloyed with vanadium) and steel grade K with reduced content of vanadium, microalloyed with aluminum, titanium, and nitrogen (K1); aluminum and nitrogen (K2). To determine the structural state of steels, microstructural and X-ray structural analyzes were used. In addition, the work determined the mechanical characteristics of steels. The results obtained in this work showed that reducing the content of vanadium in steel and complex microalloying with aluminum, titanium and nitrogen; aluminum and nitrogen contributes to the formation of a structure with smaller grains and an increase in the volume fraction of pearlite. It was established that additional microalloying of steel with a complex of aluminum, titanium and nitrogen leads to a decrease in the content of manganese and silicon in ferrite and an increase in the content of silicon in cementite, which can be explained by a decrease in the solubility of carbon, manganese and silicon in structural components. In addition, the formation of inclusions was observed in the steel structure, which were located both along the boundaries and in the body of the pearlite grains. It was established that in steel K2, the strength and hardness indicators are higher by 10-15% compared to the indicators for steel K1 and by 15-17% than steel grade K.

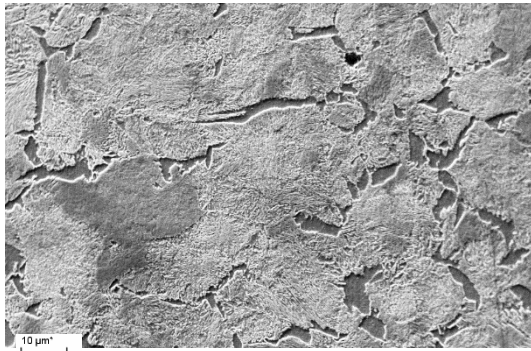
**Keywords:** complex microalloying of steel with aluminum, titanium and nitrogen, inclusions, oxides, nitrides, carbonitrides, properties of steel.

**Вступ.** Леговані та мікролеговані сталі мають широке застосування в промисловості завдяки високому комплексу механічних властивостей. Відомо, що легуючі елементи чинять вплив на фазові перетворення та формування надлишкових фаз в

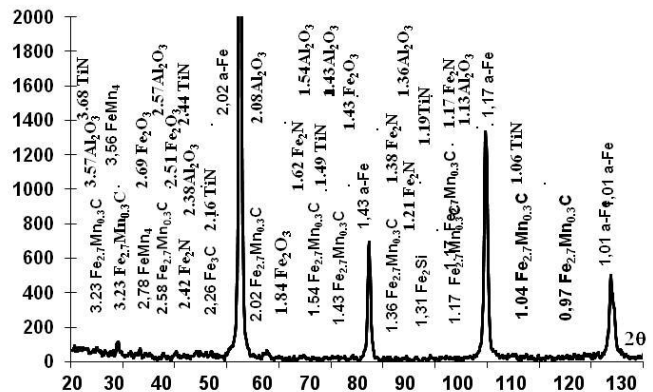
сталях. Легуючі елементи можна умовно поділити на (де)стабілізуючі карбіди та ферит при формуванні перліту [1]. До карбідоутворюючих елементів можна віднести Mn, Ti, V, Cr та Mo [2, 3], тоді як не карбідоутворюючі елементи (Si, Al, Ni та



Ферит сталі марки К за результатами мікрорентгеноспектрального аналізу містив заліза до 90 % (ат.), марганцю до 0,1 % (ат.), кремнію до 0,7 % (ат.) та вуглецю до 4,5 % (ат.). В структурі сплаву були виявлені високодисперсні включення, об'ємна частка яких склала близько 2 %. Як відомо, при легуванні залізних сплавів марганцем та кремнієм чистих карбідів марганцю та кремнію не існує, а утворюються складні карбіди [7–8]. У даному сплаві були виявлені карбіди  $Fe_{2,7}Mn_{0,3}C$ ,  $Fe_{0,25}Mn_{1,4}C_{0,6}$  та  $Fe_9SiC_{0,4}$  (рис. 1, б).



Imp/s



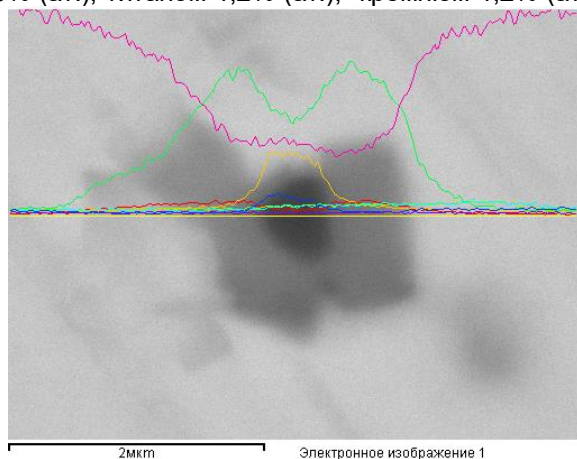
а

б

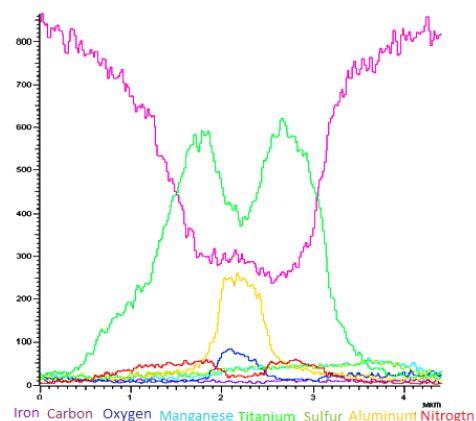
Рис. 2 Мікроструктура (а,  $\times 1000$ ) та дифрактограма (б) сталі марки K1

В сталі K1 по границях зерен спостерігали утворення сітки фериту, розмір зерна 6–7 номеру. Проведені в даній роботі мікрорентгеноспектральні дослідження поверхні зразків показали, що ферит може містити заліза до 90 % (ат.), до 0,5–0,9 % (ат.) марганцю, 0,1–0,16 % (ат.) кремнію, а титану до 1,0 % (ат.). Таким чином, додаткове мікролегування сталі призводить до зменшення вмісту кремнію та збільшення вмісту марганцю в фериті (рис. 2, б). Цементит перліту був легований марганцем до 2,0% (ат.), титаном 1,2% (ат.), кремнієм 1,2% (ат.)

та алюмінієм 0,4 % (ат.). Таким чином, додаткове мікролегування сталі комплексом алюміній, титан та азот призводить до зменшення вмісту марганцю та кремнію в фериті та збільшення вмісту кремнію в цементиті, що позитивно впливає на механічні властивості сталі K1, що можна пояснити зменшенням розчинності вуглецю, марганцю та кремнію в структурних складових та впливом титану [10–11]. Крім того, в структурі сталі K1 були виявлені окремі багаточарові включення, які мали розмір 1,5...2 мкм (рис. 3, а).



а



б

Рис. 3 Мікроструктура багаточарового включення (а) та спектрограма (б) сталі марки K+

В центрі багаточарових включень розташована фаза  $Al(TiFe)_2O_3$ , яка оточена карбонітридом  $(Ti_{0,3}Fe_{0,2})(N_{0,3}C_{0,2})$ . Окрім цього, в сталі були вияв-

лені нітриди –  $FeTiN$ ,  $Ti_2FeN$ , які були леговані марганцем до 4,0% (ат.), кремнієм 0,5 % (ат.), титаном до 5,0 % (ат.), алюмінієм до 4,0 % (ат.),



Табл. 2

Механічні властивості дослідних сталей після гарячої пластичної деформації (ГПД) і термічної обробки (ТО)

Умовне позначення злитку	Границя плинності, МПа	Границя міцності, МПа	Відносне звуження, %	Відносне подовження, %	Ударна в'язкість, КСУ, Дж/см <sup>2</sup>	Твердість, НВ
Після ГПД						
марка К	397,2	793,2	32,7	11,1	39,5	207
К1	394,7	802,6	32,5	19,6	32,5	209
К2	393,5	806,1	32,6	19,1	34,6	210
Після ГПД і ТО						
марка К	617,7	993,3	50,1	18,4	46,7	299
К1	637,2	998,3	19,7	11,1	51,9	306
К2	698,0	1148,3	40,2	15,4	53,2	348

З табл. 2 видно, що мікролегування сталі К алюмінієм, титаном та азотом; алюмінієм та азотом має позитивний вплив на показники в'язкості та пластичності. Встановлено, що у сталі К2 показники міцності та твердості будуть вищі на 10–15 % у порівнянні з показниками для сталі К1 та на 15–17 %, ніж сталі марки К

**Висновки.** 1. Зменшення вмісту ванадію в сталі та комплексне мікролегування алюмінієм, титаном та азотом призводить до утворення більш дрібнозернистої структури, зменшенню розмірів зерна та збільшенню об'ємної частки перліту, у порівнянні зі сталлю марки К.

2. В структурі мікролегованих сталей К1 та К2 спостерігали утворення оксидів, нітридів та карбонітридів, які були розташовані квазірівномірно відносно зерна.

3. Використання комплексного мікролегування сталі К призводить збільшення показників ударної в'язкості та пластичності, за рахунок зменшення розмірів зерна, дисперсності включень. В сталі К2, показники міцності та на 10-15% у порівнянні з показниками для сталі К1 та на 15–17 %, ніж сталі марки К.

#### Бібліографічний опис

1. Y. Tu, L. Huang, Q. Zhang, X. Zhou, J. Jiang Effect of Si on the partitioning of Mn between cementite and ferrite, *Materials Science and Technology* 2018. – Volume 34, Issue 7. – p. 780-785, DOI: 10.1080/02670836.2017.1407558.
2. C. Zhu, X. Xiong, A. Cerezo, et. al. Ultramicroscopy 107(9), 5 (2007) (DOI: 10.1016/j.ultramic.2007.02.033).
3. G. Miyamoto, K. O. J, Hono, et al. Effect of partitioning of Mn and Si on the growth kinetics of cementite in tempered Fe–0.6 mass% C martensite *Acta Mater.* 55(15), 11 (2007) (DOI: [10.1016/j.actamat.2007.05.023](https://doi.org/10.1016/j.actamat.2007.05.023)).
4. Cias A., Chemical Reactions During Sintering of Fe-Cr-Mn-Si-Ni-Mo-C Steels with Special Reference to Processing in Semi-closed Containers, *Science of Sintering*, Vol. 47, No. 1, 2015, pp. 61–69. DOI: 10.2298/SOS1501061C.
5. Z. Zhu, Y. Liang, J. Zou, Modeling and Composition Design of Low-Alloy Steel's Mechanical Properties Based on Neural Networks and Genetic Algorithms *Materials* 13(23), (2020) 5316(23); (DOI: [10.3390/ma13235316](https://doi.org/10.3390/ma13235316) [5]. S. Curtze, V.-T. Kuokkala, A. Oikari, J. Talonen, H. Hänninen, *Acta Materialia* 59, 9 (2011) (DOI:10.1016/j.actamat.2010.10.037).
6. Filonenko N. Yu. Influence of the contents of chemical elements and the procedure of deformation and heat treatment on the formation of phase composition of wheel steel / N. Yu. Filonenko, A. I. Babachenko, G. A. Kononenko, O.A. Safronova // *Materials Science*. – 2022. – Vol 58, № 2. – P. 190–195. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-022-00648-0>.
7. O. V. Akymov, S. M. Nury, *Vostochno-Evropeyskiy zhurnal peredovik tekhnolohiyi.* 6/11(78), 5 (2015) (DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.56370>).
8. Y.Y. Tu, Z.G. Mao, Q. Zhang, et.al. Atomistic interaction between silicon and manganese in pearlitic steel: Combined atom probe tomography and first-principle calculations *Mater Lett.* 134(84), 5 (2014) (DOI [10.1016/j.matlet.2014.07.057](https://doi.org/10.1016/j.matlet.2014.07.057)).
9. P. Glowacz, M. Tenerowicz-Żaba, M. Sułowski, J. Konstanty, *Sintered Fe-Mn-Si-C Steels* NDT Days II(3), 6 2019.
10. Filonenko N. Solubility of Carbon, Manganese and Silicon in  $\gamma$ -Iron of Fe-Mn-Si-C alloys. / N. Filonenko, O. Babachenko, G. Kononenko, K. Domina // *Physics And Chemistry of Solid State*. – 2020. – V.21, (3). – P. 525-529. DOI: 10.15330/pcss.21.3.525-529.
11. Filonenko Nataliia Yu. Investigation of the structural composition of Fe-Mn-Si-Ti-Al-N-C alloys and the solubility of elements in  $\alpha$ -iron / Nataliia Yu. Filonenko, Olexander I. Babachenko, Hanna A.

Kononenko, Alexander S. Baskevich // East European Journal of Physics. – 2021. – 4. – С. 120-123.  
DOI: 10.26565/4334-2021-4-14.

#### References

1. Y. Tu, L. Huang, Q. Zhang, X. Zhou, J. Jiang Effect of Si on the partitioning of Mn between cementite and ferrite, *Materials Science and Technology* 2018. – Volume 34, Issue 7. – p. 780-785, DOI: 10.1080/02670836.2017.1407558.
2. C. Zhu, X. Xiong, A. Cerezo, et. al. Ultramicroscopy 107(9), 5 (2007) (DOI: 10.1016/j.ultramic.2007.02.033).
3. G. Miyamoto, K. O. J. Hono, et al. Effect of partitioning of Mn and Si on the growth kinetics of cementite in tempered Fe–0.6 mass% C martensite *Acta Mater.* 55(15), 11 (2007) (DOI: [10.1016/j.actamat.2007.05.023](https://doi.org/10.1016/j.actamat.2007.05.023)).
4. Ciaś A., Chemical Reactions During Sintering of Fe-Cr-Mn-Si-Ni-Mo-C Steels with Special Reference to Processing in Semi-closed Containers, *Science of Sintering*, Vol. 47, No. 1, 2015, pp. 61–69. DOI: 10.2298/SOS1501061C.
5. Z. Zhu, Y. Liang, J. Zou, Modeling and Composition Design of Low-Alloy Steel's Mechanical Properties Based on Neural Networks and Genetic Algorithms *Materials* 13(23), (2020) 5316(23); (DOI: [10.3390/ma13235316](https://doi.org/10.3390/ma13235316)) [5]. S. Curtze, V.-T. Kuokkala, A. Oikari, J. Talonen, H. Hänninen, *Acta Materialia* 59, 9 (2011) (DOI:10.1016/j.actamat.2010.10.037).
6. Filonenko N. Yu. Influence of the contents of chemical elements and the procedure of deformation and heat treatment on the formation of phase composition of wheel steel / N. Yu. Filonenko, A. I. Babachenko, G. A. Kononenko, O.A. Safronova // *Materials Science*. – 2022. – Vol 58, № 2. – P. 190–195. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11003-022-00648-0>.
7. O. V. Akymov, S. M. Nury, *Vostochno-Evropskiy zhurnal peredovik tekhnolohiyi*. 6/11(78), 5 (2015) (DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.56370>).
8. Y.Y. Tu, Z.G. Mao, Q. Zhang, et.al. Atomistic interaction between silicon and manganese in pearlitic steel: Combined atom probe tomography and first-principle calculations *Mater Lett.* 134(84), 5 (2014) (DOI [10.1016/j.matlet.2014.07.057](https://doi.org/10.1016/j.matlet.2014.07.057)).
9. P. Głowacz, M. Tenerowicz-Żaba, M. Sułowski, J. Konstany, *Sintered Fe-Mn-Si-C Steels NDT Days II*(3), 6 2019.
10. Filonenko N. Solubility of Carbon, Manganese and Silicon in  $\gamma$ -Iron of Fe-Mn-Si-C alloys. / N. Filonenko, O. Babachenko, G. Kononenko, K. Domina // *Physics And Chemistry of Solid State*. – 2020. – V.21, (3). – P. 525-529. DOI: 10.15330/pcss.21.3.525-529.
11. Filonenko Nataliia Yu. Investigation of the structural composition of Fe-Mn-Si-Ti-Al-N-C alloys and the solubility of elements in  $\alpha$ -iron / Nataliia Yu. Filonenko, Olexander I. Babachenko, Hanna A. Kononenko, Alexander S. Baskevich // *East European Journal of Physics*. – 2021. – 4. – С. 120-123. DOI: 10.26565/4334-2021-4-14.

## ЗМІСТ

ГРИЩЕНКО С.Г.

СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ РОЗВИТКУ СВІТОВОЇ ТА УКРАЇНСЬКОЇ ФЕРОСПЛАВНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ..... 5

ПОВОРОТНИЙ В. В., ТОЛСТІКОВ Г. І., РОХМАНОВ С. Р., ТОЛСТІКОВ І.Г.

ПЕРСПЕКТИВНІ КОНСТРУКЦІЇ ВУЗЛІВ ЧОТИРИВАЛКОВИХ РОБОЧИХ КЛІТЕЙ «ТАНДЕМ» СТАНІВ ХОЛОДНОЇ ПРОКАТКИ ТРУБ ..... 9

ВАНЮКОВ А.А., КОВАЛЬОВ Д.А., КАМКІНА Л.В., КОМАР А.С.

СПІКАННЯ ЗАЛІЗОРУДНИХ ОБКОТИШІВ ІЗ ПІДВИЩЕНИМ ВМІСТОМ ТВЕРДОГО ПАЛИВА ДОСВІД ВИРОБНИЦТВА..... 15

ПАЛАГУТА В.І., ЛУЧАНІНОВА О.П.

АКТУАЛЬНІ ПРОБЛЕМИ ПІДГОТОВКИ МАЙБУТНІХ МЕТАЛУРГІВ ТА МАГІСТРІВ З ПРОФЕСІЙНОЇ ОСВІТИ В УМОВАХ СУЧАСНОЇ УНІВЕРСИТЕТСЬКОЇ ОСВІТИ ..... 24

КАРПОВ В. Ю., НОСКО О.А., АЮПОВА Т.А.

ВПЛИВ Н-ШАРІВ НА ЗАЛІЗОВУГЛЕЦЕВІ ТА КОРОЗІЙНОСТІЙКІ СТАЛІ ТА СПЛАВИ ..... 32

ЯГОЛЬНИК М.В., БОЙКО М.М., ФУРСОВ М.О., ЄФІМЕНКО В.В., ПОЛЯКОВА Н.В., ЖУРАВЛЬОВА С.В.

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ БІОМАТЕРІАЛІВ НА ПРОЦЕС СПІКАННЯ ЗАЛІЗОРУДНИХ МАТЕРІАЛІВ ТА ЯКІСТЬ АГЛОМЕРАТУ ..... 45

ФІЛОНЕНКО Н.Ю., БАБАЧЕНКО О. І., КОНОНЕНКО Г. А., ВОЛЧУК В.М.

ВПЛИВ КОМПЛЕКСНОГО МІКРОЛЕГУВАННЯ АЛЮМІНІЄМ, ТИТАНОМ ТА АЗОТОМ НА СТРУКТУРНИЙ СКЛАД ТА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ВУГЛЕЦЕВИХ СТАЛЕЙ ..... 53

ЗМІСТ ..... 59

CONTENT..... 60

## CONTENT

POVOROTNY V.V., TOLSTIKOV G.I., RAKHMANOV S.R., TOLSTIKOV I. G. PROSPECTIVE STRUCTURES OF FOUR-ROLLS TANDEM WORK CAGES OF COLD ROLLING MILL PIPE .....	9
VANYUKOV A.A., KOVALEV D.A., KOMAR A.S. SINTERING OF IRON ORE PELLETS WITH AN INCREASED CONTENT OF SOLID FUEL .....	15
PALAHUTA V.I., LUCHANINOVA, O. P. ACTUAL PROBLEMS OF TRAINING FUTURE METALLURGISTS AND MASTERS OF PROFESSIONAL EDUCATION IN THE CONDITIONS OF MODERN UNIVERSITY EDUCATION .....	24
KARPOV V., NOSKO O., AIUPOVA T. H-LAYERS INFLUENCE ON IRON-CARBON AND CORROSION-RESISTANT STEELS AND ALLOYS .....	32
YAHOLNYK M.V., BOYKO M.M., FURSOV M.O., EFIMENKO V.V., POLYAKOVA N.V., ZHURAVLOVA S.V. STUDY OF THE INFLUENCE OF BIOMATERIALS ON THE PROCESS IRON ORE SINTERING AND PRODUCT QUALITY .....	45
FILONENKO N.YU., BABACHENKO O.I., KONONENKO G.A., VOLCHUK V.M. THE INFLUENCE OF COMPLEX MICROALLOYING WITH ALUMINUM, TITANIUM AND NITROGEN ON THE STRUCTURAL COMPOSITION AND MECHANICAL PROPERTIES OF CARBON STEELS .....	53
ЗМІСТ .....	59
CONTENT .....	60