

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ДНІПРОВСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»



**ТЕХНОЛОГІЧНІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ ДРІБНОЗЕРНИСТИХ  
ТЕРМОЗМІЦНЕНИХ СТАЛЕЙ В КОНСТРУКЦІЯХ КОЖУХІВ  
ДОМЕННИХ ПЕЧЕЙ**

Монографія

Дніпро  
НТУ «ДПУ»  
2024

УДК 669.017.16:620.18

T38

Рекомендовано до видання Вченою радою Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» як монографія (протокол № \_\_\_ від \_\_\_\_\_ 2024).

**Рецензенти:**

**Г.А. Кононенко**, доктор технічних наук, вчений секретар Інституту чорної металургії ім. З.І. Некрасова НАН України

**В.А. Костін**, доктор технічних наук, провідний науковий співробітник Інституту електрозварювання ім. Є.О. Патона Національної академії наук України

**М.Д. Мельничук**, кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри матеріалознавства Луцького національного технічного університету

Автори: Ю.І. Гезенцвей, К.А. Зіборов, Д.В. Лаухін, О.В. Бекетов, С.О. Федоряченко, І.М. Мацюк, Л.М. Дадіверіна, Д.В. Гаркавенко

T38 **Технологічність застосування дрібнозернистих термозміцнених сталей в конструкціях кожухів доменних печей** : монографія [Електронний ресурс] / Ю.І. Гезенцвей, К.А. Зіборов, Д.В. Лаухін, О.В. Бекетов, С.О. Федоряченко, І.М. Мацюк, Л.М. Дадіверіна, Д.В. Гаркавенко; М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка». Електрон. текст. дані. – Дніпро : НТУ «ДП», 2024. – 129 с. – Режим доступу <https://www.nmu.org.ua/ua/> – Назва з екрана.

Розроблено теоретичні засади й запропоновано нові методи виконання науково-практичного завдання, мета якого подовжити цикл безаварійної роботи кожухів доменних печей за рахунок застосування високоміцного товстолистого прокату вітчизняного виробництва. Для цього було розроблено температурно-деформаційні режими прокатки товстого листа, виготовленого із сталі 10Г2ФБЮ, для формування в полігональній структурі аустеніту гетерогенного зародження фериту, що забезпечує формування високодисперсної феріто-перлітної структури, яка при експлуатації в умовах підвищених температур зберігає високий рівень міцності, пластичності та жароміцності товстого листа. Мікроструктура металопрокату товстого листа відрізняється відсутністю перлітної смугастості та більш рівномірним розподілом легуючих елементів по перетину товстого листа. Це дозволило ефективно застосувати даний металопрокат у якості матеріалу для кожухів доменних печей та збільшити цикл їхньої безаварійної експлуатації у 3 рази.

Призначено для наукових співробітників, спеціалістів промисловості, викладачів, аспірантів і здобувачів вищої освіти у технічних вищих навчальних закладах.

Лл. 37. Бібліогр.: 96 назв.

УДК 669.017.16:620.18

© Ю.І. Гезенцвей, К.А. Зіборов, Д.В. Лаухін, О.В. Бекетов, С.О. Федоряченко, І.М. Мацюк, Л.М. Дадіверіна, Д.В. Гаркавенко 2024.

© НТУ «Дніпровська політехніка», 2024.

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	6
1 АНАЛІЗ УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ МАТЕРІАЛІВ ДЛЯ КОНСТРУКЦІЙ КОЖУХА ДОМЕННОЇ ПЕЧІ .....	8
1.1 Проєктування конструкції кожуха доменної печі з урахуванням особливостей технологічного процесу .....	8
1.2 Аналіз доцільності застосування сталей високої міцності в конструктивних елементах кожуха доменної печі .....	10
1.3 Аналіз причин утворення дефектів у конструктивних елементах кожуха доменної печі .....	12
1.4 Вимоги, що висуваються до марок сталей які можуть застосовуватися для реконструкції кожуха доменної печі .....	14
1.5 Технологія виробництва низьколегованих низьковуглецевих сталей .....	16
1.6 Морфологія структурного стану низьковуглецевих низьколегованих сталей .....	20
1.7 Існуючі механізми корегування структурного стану для підвищення комплексу властивостей низьковуглецевих низьколегованих сталей .....	23
1.8 Технологічні схеми виробництва, які забезпечують отримання товстолистового металопрокату з низьковуглецевих низьколегованих сталей з підвищеним рівнем властивостей .....	25
1.9 Контрольована прокатка низьковуглецевих низьколегованих сталей та її різновиди .....	27
1.10 Висновки до глави 1 .....	34
2 МАТЕРІАЛ ТА МЕТОДИКА ПРОВЕДЕННЯ ДОСЛІДЖЕНЬ .....	36
2.1 Обґрунтування вибору матеріалу для проведення досліджень ...	36
2.2 Аналіз технологічних схем контрольованої прокатки на вітчизняних металургійних комбінатах .....	39

	4
2.3 Методика проведення мікроскопічних досліджень та обробка отриманих результатів .....	42
2.4 Методика дослідження тонкої структури .....	45
2.5 Методика визначення мікротвердості структурних складових ...	46
2.6 Аналіз хімічного складу .....	47
2.7 Методика визначення механічних характеристик при різних умовах випробувань .....	48
2.8 Висновки до глави 2 .....	49
<b>3 ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРНОГО СТАНУ СТАЛЕЙ, ЯКІ НАЙЧАСТІШЕ ВИКОРИСТОВУЮТЬСЯ В ЯКОСТІ МАТЕРІАЛУ ДЛЯ КОНСТРУКТИВНИХ ЕЛЕМЕНТІВ КОЖУХІВ ДОМЕННИХ ПЕЧЕЙ ...</b>	<b>51</b>
3.1 Основні технологічні схеми отримання металопрокату з низьковуглецевих низьколегованих сталей .....	51
3.2 Аналіз структурного стану сталей після гарячої прокатки .....	54
3.3 Аналіз структурного стану сталей після контрольованої прокатки .....	59
3.4 Аналіз структурного стану сталей після полігонізаційної контрольованої прокатки .....	66
3.5 Порівняльний аналіз структурного стану по перетину листа з низьковуглецевих низьколегованих сталей після традиційної та полігонізаційної контрольованих прокаток .....	73
3.6 Висновки до глави 3.....	77
<b>4 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ТЕМПЕРАТУРИ НА СТРУКТУРНИЙ СТАН ТА КОМПЛЕКС ВЛАСТИВОСТЕЙ НИЗЬКОВУГЛЕЦЕВИХ НИЗЬКОЛЕГОВАНИХ СТАЛЕЙ .....</b>	<b>79</b>
4.1 Проблеми вогнестійкості сталевих конструкцій .....	79
4.2 Аналіз впливу температури на комплекс властивостей низьковуглецевих низьколегованих сталей .....	80
4.3 Аналіз впливу температури на структурний стан низьковуглецевих низьколегованих сталей .....	83

4.4 Аналіз впливу температури на тонку структуру низьковуглецевих низьколегованих сталей .....	88
4.5 Висновки до глави 4 .....	93
<b>5 ПІДВИЩЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОСТІ КОНСТРУКЦІЙ КОМПЛЕКСУ ДОМЕННИХ ПЕЧЕЙ ШЛЯХОМ ЗАСТОСУВАННЯ ВИСОКОМІЦНИХ ДРІБНОЗЕРНИСТИХ СТАЛЕЙ ТИПУ 10Г2ФБЮ ...</b>	<b>96</b>
5.1 Загальні принципи проектування рамних вузлів .....	96
5.2 Метод оцінки ризиків під час експлуатації кожуха доменної печі	97
5.3 Використання низьковуглецевої низьколегрованої сталі 10Г2ФБЮ при реконструкції кожуха доменної печі .....	99
5.4 Реконструкція пірамідально-призматичного бункера .....	105
5.5 Реконструкція стінової загороди виробничої будівлі з використанням самонесучих стінових касет .....	112
5.6 Висновки до глави 5 .....	114
<b>ВИСНОВКИ .....</b>	<b>116</b>
<b>ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА .....</b>	<b>121</b>

## ВСТУП

У загальній вартості виготовленої та змонтованої будівельної сталевій конструкції вартість металопрокату становить 60-70%, тому застосування технологічних і високоміцних видів прокату та марок сталей зумовлює зниження собівартості конструкцій. Розширення діапазону сталей, що дозволяють підвищувати технологічність сталевих конструкцій стосовно не лише мінімізації ваги, а й оптимізації критеріїв корозійної стійкості та вогнестійкості з ефективним використанням їх у несучих металевих конструкціях різних будівель та споруд є одним із пріоритетних завдань матеріалознавства.

Необхідно відмітити, що сталі, використовувані нині в якості матеріалів для конструкцій комплексів доменних печей, не повною мірою відповідають вимогам, що пред'являються до споруд такого призначення. Товстолистовий металопрокат, вироблюваний вітчизняними металургійними комбінатами, має великий розкид міцністних і пластичних властивостей уподовж, упоперек і по товщині листа. Значення міцністних характеристик уздовж напрямку прокатки в порівнянні з  $Z$  - напрямком можуть відрізнятися в 1,5-2 рази. Анізотропія міцністних і пластичних характеристик є наслідком наявності в структурі металопрокату ферито-перлітної смугастості. Зазначена структурна неоднорідність, в комплексі з формуванням зони осьової ліквідації, підвищує загрозу руйнування конструкції, яка працює під значним температурним впливом, що відбуваються в кожухах доменних печей.

Робота присвячена вирішенню прикладної задачі – видовження циклу безаварійної роботи кожухів доменних печей за рахунок застосування високоміцного товстолистого прокату вітчизняного виробництва. Задачу вирішено шляхом створення температурно-деформаційних режимів прокатки товстого листа із сталі 10Г2ФБЮ, для формування в полігональній структурі аустеніту гетерогенного зародження фериту, що забезпечує формування високодисперсної ферито-перлітної структури, яка при експлуатації в умовах

підвищених температур зберігає високий рівень міцності, пластичності та жароміцності товстого листа.

У роботі використано сучасні методи дослідження структури, тонкої структури та комплексу властивостей низьковуглецевих низьколегованих сталей, а саме: світлову мікроскопію (оптичний мікроскоп Neophot 20); растрову електронну мікроскопію (скануючий електронний мікроскоп РЕМ-106И); дифракційну електронну мікроскопію (трансмісійний електронний мікроскоп ПЕМ-125К); загальні методи кількісного та напівкількісного металографічного аналізу. Для визначення комплексу механічних властивостей застосовувались традиційні методи статичних та динамічних випробувань та методи випробувань механічних характеристик при підвищених температурах.

## ВИСНОВКИ

У монографії зроблено теоретичне узагальнення і запропоновано нове вирішення актуальної науково-прикладної задачі, щодо подовження циклу безаварійної роботи кожухів доменних печей шляхом удосконалення структурного стану високоміцних низьколегованих сталей, що відображено у висновках:

1. Проведено всебічну оцінку впливу температурно-деформаційних умов формування структурного стану після полігонізаційної контрольованої прокатки на можливість забезпечення видовження безаварійної роботи кожухів доменних печей.

2. Проведений інформаційно-аналітичний огляд показав, що у загальній вартості виготовленої та змонтованої будівельної сталевих конструкції вартість металопрокату становить 60-70%, тому застосування технологічних і високоміцних видів прокату та марок сталей зумовлює зниження собівартості конструкцій. Розширення діапазону сталей, що дозволяють підвищувати технологічність сталевих конструкцій стосовно не лише мінімізації ваги, а й оптимізації критеріїв корозійної стійкості та вогнестійкості з ефективним використанням їх у несучих металевих конструкціях різних будівель та споруд, є одним із пріоритетних завдань матеріалознавства.

3. У роботі виконано обґрунтування вибору матеріалу для конструктивних елементів кожуха доменної печі. За результатами порівняльного аналізу використання в несучих конструкціях каркаса двох різних сталей за класом міцності С245 та С460 показано, що ефективність застосування сталі марки С460 в конструкціях складає майже 34 %.

4. У монографії, для аналізу мікро- та субмікроструктури низьковуглецевих, низько- та мікролегованих сталей використано сучасні методи досліджень, а саме: загальні методи кількісного та напівкількісного металографічного аналізу з застосуванням оптичного мікроскопа Neophot -2; растрову електронну мікроскопію з застосуванням скануючого електронного



мікроскопа РЕМ-106И; дифракційну електронну мікроскопію з застосуванням трансмісійного електронного мікроскопа ЕМ-125К.

5. У роботі було проведено механічні випробування для виявлення та аналізу комплексу властивостей, саме випробування на розтяг та одноосьове випробування на повзучість розтягуванням.

6. При проектуванні конструктивних елементів кожуха доменної печі може стати використання марок сталей із підвищеним рівнем властивостей.

7. Досліджено структурний стан сталей, які найчастіше використовуються в якості матеріалу для конструктивних елементів кожухів доменних печей.

8. Виконано порівняльний аналіз структурного стану по перетину листа з низьковуглецевих низьколегованих сталей після традиційної та полігонізаційної контрольованих прокаток.

9. Аналіз тонкої структури сталей після гарячої прокатки дозволив встановити, що для СтЗсп основними структурними складовими є поліедричний ферит і перліт. Спостерігаються феритні зерна з помірною щільністю дислокацій. Перлітні області складаються з декількох колоній (розміром 3-10 мкм) з різною орієнтацією цементитних пластин. Для сталі 09Г2С зерна фериту мають правильну поліедричну форму. Перліт дисперсний ( $S_0 = 0,2$  мкм) завтовшки до 0,02 мкм; цементит має форму тонких пластин, крупні перлітні колонії разорієнтовані одна відносно іншої.

10. Особливістю структури сталі 10Г2ФБ (технологія виробництва – контрольована прокатка) є наявність перлітної смугастості. Для визначення розподілу перлітної смугастості було виконано комплекс металографічних досліджень. Аналіз результатів металографічних досліджень по перетину листа підтвердив наявність перлітної смугастості по усьому перетину товщини зразків. Товщина та щільність перлітної смугастості збільшилась. Це можливо пояснити наявністю ближче до центру зразка зони осьової ліквіації. При цьому розміри перлітних колоній майже не змінюються від поверхні зразка до його центру.

11. Сталь 10Г2ФБЮ після полігонізаційної контрольованої прокатки має ферито-перлітну структуру. При цьому перлітна смугастість розбилася на окремі колонії. Феритна складова містить зерна поліедричного фериту, внутрішні об'єми також розбиті малокутовими границями на окремі субзерна не тільки в приповерхневих шарах, а й в центральній частині листа. При цьому розміри перлітних колоній збільшуються від поверхні зразка до його центру. Необхідно зауважити, що проміжок між роздробленими перлітними колоніями заповнюється більш м'якою фазою – феритом. Подрібнення перлітної смугастості відбувається шляхом збільшення кількості місць зародження феритної складової на стадії деформації аустеніту.

12. Результати дослідження розподілу легуючих елементів по перетину товстих листів, які вироблено за технологічною схемою контрольованої прокатки (сталь 10Г2ФБ) та полігонізаційної контрольованої прокатки (сталь 10Г2ФБЮ) показали, що для сталі 10Г2ФБЮ спостерігається більш рівномірний розподіл легуючих елементів по перетину листа, порівняно з сталлю 10Г2ФБ.

13. Досліджено вплив температури на структурний стан та комплекс властивостей низьковуглецевих низьколегованих сталей.

14. Проведений комплекс досліджень показав, що механічні характеристики розглянутих марок сталей при підвищенні температури до  $+800^{\circ}\text{C}$  різко знижуються. Наприклад, границя плинності для сталі марки 10Г2ФБЮ знизилася в 6,3 рази, а тимчасовий опір розриву – в 7 разів. При цьому більш високе значення границі плинності було зафіксовано у сталі марки 10Г2ФБЮ (73 МПа); менше ніж це значення в 1,6 разу було у сталі марки 09Г2С (63 МПа). Мінімальна границя плинності була зафіксована у сталі марки Ст3сп (37 МПа). Таким чином, випробування зразків із низьковуглецевої високоміцної сталі 10Г2ФБЮ за температури  $+800^{\circ}\text{C}$  підтвердили, що матеріал кожуха доменної печі, виготовлений із зазначеної марки сталі, буде більш вогнестійкий, аніж у разі його виготовлення з інших марок сталей (Ст3сп та 09Г2С).

15. Сумісний аналіз результатів металографічних досліджень впливу підвищення температури на морфологію структурного стану низьковуглецевих низьколегованих сталей показав, що для сталей СтЗсп та 09Г2С при збільшенні температури від 20°C до 600°C відсоткове співвідношення структурних складових не змінюється як і їх геометричний розмір. При збільшенні температури до 800°C геометричний розмір перлітних колоній зменшується, що свідчить про протікання процесів розпаду перліту. Для сталі 10Г2ФБЮ спостерігається аналогічний взаємозв'язок між температурою випробувань та параметрами структурного стану.

16. Проведений комплекс досліджень впливу температури випробувань на параметри структурного стану та комплекс властивостей низьковуглецевих низьколегованих сталей показав, що умовно температури за яких можуть експлуатуватися низьковуглецеві низьколеговані сталі розподіляються на два рівня: температура, нижче якої не спостерігаються значні зміни у структурному стані; температура, за якої в структурному стані відбуваються значні зміни, які призводять до зниження несучої здатності конструкцій. Наявність двох температур пов'язано, як с розвитком дифузійних процесів, так і з спроможністю структури чинити опір впливу температурних напружень (так звана структурна стійкість).

17. Структурна стійкість сталі при підвищенні температури обумовлена процесами, які наближують систему до положення термодинамічної рівноваги порівняно зі станом системи при низьких температурах (структурний стан при кімнатній температурі), а саме: процеси рекристалізації, коагуляції карбонітридної фази. Як наслідок, саме зазначені процеси відіграють найважливішу роль при визначенні спроможності застосування матеріалів при підвищених температурах.

18. Показано доцільність використання низьковуглецевої низьколегованої сталі 10Г2ФБЮ, виробленою за технологічною схемою

полігонізаційної контрольованої прокатки при реконструкції кожуха доменної печі та систем аспірації ливарного двору.

19. Аналіз перевірки можливості використання сталі 10Г2ФБЮ після полігонізаційної контрольованої прокатки у конструкціях кожуха доменної печі шляхом імітаційного моделювання температурного впливу показав, що термічна обробка призвела до формування структурного стану, який характеризується появою окремих дисперсних колоній перліту. Феритна фаза як в приповерхневих шарах так і всередині поперечного перерізу характеризується певною різнозерністістю, яка є наслідком процесів рекристалізації. Таким чином, зазначену марку сталі було використано під час реконструкції кожуха доменної печі (підтверджено актом впровадження).

20. Аналіз можливості використання високоміцних сталей типу 10Г2ФБЮ в конструкціях сталевих бункерів для металургійної промисловості в умовах дії високих технологічних навантажень та низьких температур показали, що при порівнянні варіанта бункера зі сталі класу С255 та сталі 10Г2ФБЮ економія у вазі матеріалу конструкції становила: обшивка – 38,9%; ребра жорсткості – 36%; бункерні балки – 37,8%. Загальна економія металопрокату на одній бункерній ємності становила понад 4 т. Для бункерного відділення сумарна теоретична економія металопрокату перевищує 16 т, що в цінах 2019 р. становить близько 0,5 млн грн.

**ВИКОРИСТАНІ ДЖЕРЕЛА**

1. Johnson J.E., Jr. (1918) *The principles operation and products of the blast furnace*. New York. McGraw-Hill book company. 551p.
2. Gezentsvey E.I., Olevskiy V.I., Volchok D.L., Olevsky O.V. (2021) *Calculation of the improved steel beams of buildings and structures of the mining and metallurgical complex*. Strength of Materials and Theory of Structures, № 106. 54-67 p.
3. Agnes Iringová, Róbert Idunk (2016) *Solution of Fire Protection in Historic Buildings*. Civil and Environmental Engineering 12(2). 84-93 p.
4. Jefferson T.B., Gorham Woods (1962) *Metals and How to Weld Them*. Welding Engineer Publications, INC. 408 p.
5. Eric J. Mittemeijer (2022) *Fundamentals of Materials Science*. Springer Nature Switzerland AG. 737 p.
6. Першаков В. М. (2015) *Проблеми протидії конструкцій прогресуючому обваленню будівель та споруд*. К.: Наукова думка, 256 с.
7. Пахолюк А.П., Пахолюк О.А. (2005) *Основи матеріалознавства і конструкційні матеріали: посібник*. Львів: Світ, 172 с.
8. ДСТУ 8539:2015 Прокат для будівельних сталевих конструкцій. Загальні технічні умови. [Чинний від 2016-07-01]. Вид. офіц. Київ, 2015. 23 с. (Інформація та документація).
9. Tirosh J., Altus E., Yifrach Y. (1992) A new method for evaluating fracture toughness of brittle materials. *International Journal of Fracture*, Volume 58, 211–222 p.
10. Károly Jármai, József Farkas (2013) *Design, Fabrication and Economy of Metal Structures*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 671 p.
11. Ganka Zlateva, Zlatanka Martinova (2008) *Microstructure of Metals and Alloys: An Atlas of Transmission Electron Microscopy Images 1st Edition*. CRC Press. 188 p.
12. Бекетов О.В. (2004) *Особенности процессов структурообразования и разработка параметров усиления стали 10Г2ФБ*. Автореф. дис. на

здобуття наук. ступ. канд. техн. наук по спец. 05.02.01. –  
Матеріалознавство. 20 с.

13. Серета Б.П., Прищип М.Г., Кругляк І.В., Васильченко Т.О. (2012) *Прокатка листів та штаб.* Навчально-методичний посібник. ЗДІА, Запоріжжя, 184с.
14. Laukhin D., Pozniakov V., Beketov O., Rott N., Shchudro A. (2020) *Analysis of the effects of welding conditions on the formation of the structure of welded joints of low-carbon low-alloy steels.* Key Engineering Materials. Vol. 844. 146–154 p.
15. Лаухін Д. В., Бекетов О. В., Тютюрев І. А., Слупська Ю. С., Ротт Н. О., Чашин Д. Ю., Торопченів Г. О., Пико М. О. (2021) *Металографічний аналіз структурного стану низьковуглецевих низьколегованих сталей після автоматичного зварювання під шаром флюсу.* Modern engineering and innovative technologist, Issue № 16, Part 1. 105-113 p.
16. ДБН В.2.6-198:2014. Сталеві конструкції. Норми проектування. [Чинний від 2015-01-01]. Вид. офіц. Київ, 2014. 205 с. (Інформація та документація).
17. ДСТУ 8828:2019. Пожежна безпека. Загальні положення. [Чинний від 2020-01-01]. Вид. офіц. Київ, 2019. 115 с. (Інформація та документація).
18. Станіслав Сідней (2021) *Розробка методики розрахунку розподілу температури у плоских залізобетонних плитах при пожежі «Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація», Том 5 № 2* 83 с.
19. ДБН В.1.1-7:2016. ПОЖЕЖНА БЕЗПЕКА ОБ'ЄКТІВ БУДІВНИЦТВА. Загальні вимоги. [Чинний від 2017-06-01]. Вид. офіц. Київ, 2017. 35 с. (Інформація та документація).
20. Гезенцевей Ю.І. (2020) *Внутрішні критерії оцінки якості конструктивних рішень при проектуванні сталевих будівельних конструкцій.* Промислове будівництво та інженерні споруди. № 4. 40-42 с.
21. Belodedenko S.V, Chechenev V.A. (2015) *Safety protection of blast-furnace*

- jackets when in operation. Engineering science, Metallurgical and Mining Industry №11. 127-132 p.*
22. Hongwei Li, Xin Li, Xiaojie Liu, Hongyang Li, Xiangping Bu, Shujun Chen, Qing Lyu (2023) *Evaluation and Prediction Models for Blast Furnace Operating Status Based on Big Data Mining. Metals* , 13(7), 1250 p.
  23. Kaporulin V.V, Chernobrivets B.F., Michael Alter, Urbanovich G.I., Emel'yanov V.L. (1989) *Some problems in blast furnace blowing in.* 236-239 p.
  24. Henley EJ, Kumamoto H. (1991) *Probabilistic Risk Assessment: Reliability Engineering, Design, and Analysis.* IEEE Press. 568 p.
  25. Hrechanyi O., Vasilchenko T., Vlasov A., Fedorenko S., Syniavskiy D., Tsehelnii Y. (2022) *Using the "minimum risk" method in the technical diagnosis of metallurgical equipment.*
  26. SKŘÍNSKÝ Jan, VEREŠ Ján, KOLONIČNÝ Jan (2018) *Explosion characteristics of blast furnace gas.* Inžynieria Mineralna 19(1). 131-136 p.
  27. Zuidema P. (1972) *Non-stationary operation of a staggered parallel system of blast furnace stoves.* International Journal of Heat and Mass Transfer. Volume 15, Issue 3, 433-442 p.
  28. Пахолюк А.П., Пахолюк О.А. (2005) *Основи матеріалознавства і конструкційні матеріали: посібник.* Львів: Світ, 172 с.
  29. Assefpour-Dezfuly M., Hugaas V.A., Brownrigg A. (1990) *Fire resistant high strength low alloy steels.* Materials Science and Technology, № 6, 1210–1214 p.
  30. Hezentsvei Y.I., Bannikov Dmytro (2021) *Use of Fine-Grained Heat-Strengthened Steels to Increase the Operation Qualities of Bunker Capacities from Thin-Walled Galvanized Profiles.* Science and Transport Progress Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport 1(91), 84-93 p.
  31. Dheeraj Shankarrao Bhiogade (2023) *Ultra supercritical thermal power plant material advancements: A review.* Journal of Alloys and Metallurgical

- Systems Volume 3, 1-9 p.
32. Bor, A.S. (1991) *Effect of Pearlite Banding on Mechanical Properties of Hot-rolled Steel Plates*. ISIJ International 31(12). 1445-1446 p.
  33. Samuels, L.E. (1992) Factors influencing ferrite/pearlite banding and origin of large pearlite nodules in a hypoeutectoid plate steel. *Materials Science and Technology* 8(9). 777-784 p.
  34. Лаухін Д.В. (2012) *Теоретичні основи формування субструктури, структури і властивостей товстолистового прокату з низьковуглецевих мікролегованих будівельних сталей*: дис. ... док. техн. наук: 05.02.01 / ДВНЗ «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури». Дніпропетровськ, 353 с.
  35. Jonas J.J., Sellars C.M., Tegart, W. J. McG. (1969) *Strength and structure under hot-working conditions*. *Metallurgical Reviews*, Volume 14, Issue 1, 1-24 p.
  36. Sellars C.M., McTegart W.J. (1966) *On the mechanism of hot deformation*. *Acta Metallurgica* Volume 14, Issue 9, 1136-1138 p.
  37. Максименко О.П., Лясота С.М., Романюк Р.Я. (2009) *Теорія процесів прокатного, трубного, ковальсько-штампувального та волочильного виробництва: навчальний посібник*. Дніпродзержинськ. 2005 с.
  38. Висилев Я.Д., Мінаєв О.А. (2009) *Теорія поздовжньої прокатки*. УНІТЕХ, Донецьк. 488с.
  39. Magnus Boåsen, Kristina Lindgren, Martin Öberg, Mattias Thuvander, Jonas Faleskog, Pål Efsing (2022). *Analysis of thermal embrittlement of a low alloy steel weldment using fracture toughness and microstructural investigations*. *Engineering Fracture Mechanics* Volume 262. 17 p.
  40. Лаухін Д.В., Ротт Н.О., Бекетов О.В., Пустовой Д.С., Письменкова Т.О., Бабенко Є.О. (2020) *Дослідження структури і властивостей будівельних сталей після безперервної контрольованої прокатки* – Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього



університету. № 91, 49 – 57 с.

41. Sudarsanam S. Babu (2022) *Thermo-Mechanical Processing*. Encyclopedia of Materials: Metals and Alloys, Volume 3, 27-38 p.
42. Pello Uranga, Jose Rodriguez-Ibabe (2020) *Thermomechanical Processing of Steels*. Metals 10(5), 641 p.
43. Kristina Nordén (2007) *Surface and Inner Deformation during Shape Rolling of High Speed Steels*. Royal Institute of Technology School of Industrial Engineering and Management, Stockholm, Sweden. 24 p.
44. Adam Grajca, Mateusz Morawiec, Adam Skowronek (2020) *Heat treatment strategies for hot-rolled medium-Mn sheet steels*. IOP Conference Series Materials Science and Engineering 723(1), 7 p.
45. Abi O. Aghayere, Jason Vigil (2020) *Structural Steel Design 3rd Edition*. Mercury Learning and Information. 900 p.
46. Subramanian N. (2011) *Design of Steel Structures: Theory and Practice 1st Edition*. Oxford University Press. 864 p.
47. Anthony Kelly, Kevin M. Knowles (2012) *Crystallography and Crystal Defects 2nd Edition*. Wiley. 536 p.
48. Anantha Padmanabhan K., Herbert Gleiter (2014) *On the structure of grain/interphase boundaries and interfaces*. Beilstein J. Nanotechnol. 1603-1615 p.
49. Forsyth P.J.E., King R., Chalmers G.B. (1946) *Grain boundaries in metals*. Nature, Volume 158, 875-876 p.
50. Bollmann W. (1970) *Crystal defects and crystalline interfaces*. Berlin, Springer Verlag. 316 p.
51. Dahmen U. (2003) *Phase Transformations, Crystallographic Aspects*. Encyclopedia of Physical Science and Technology Third Edition. 821-853 p.
52. Gottstein G., Shvindlerman L.S. (1993) *Theory of grain boundary motion in the presence of mobile particles*. Acta Metallurgica et Materialia. Volume 41, Issue 11, 3267-3275 p.
53. Paulo Rangel Riosa, Fulvio Siciliano Jrb, Hugo Ricardo Zschommler

- Sandimc, Ronald Lesley Plautd, Angelo Fernando Padilha (2005) *Nucleation and Growth During Recrystallization*. Materials Research 8(3). 225-238 p.
54. Gottstein G., Shvindlerman L.S. (1999) *Grain boundary migration in metals*. Boca Raton etc. CRC Press. 387 p.
55. Lojkowski W., Porowski S. (1993) *Pressure effect on grain boundary dewetting and pre-melting transition in a Fe-6%Si bicrystal*. Joint AIRAPT/APS Conference on High Pressure Science and Technology, Colorado Springs, USA. P. 125-131.
56. Donald E. Sands (1994) *Introduction to Crystallography*. Dover Publications. 192 p.
57. Donald Bloss F. (1971) *Crystallography and crystal chemistry*. Holt, Rinehart and Winston. 545 p.
58. Fei Zhang, Yonggang Zhao, Yuanbiao Tan, Xuanming Ji, Song Xiang (2019) *Study on the Nucleation and Growth of Pearlite Colony and Impact Toughness of Eutectoid Steel*. Metals 9(11). 1133 p.
59. Ning Zhong, Xiaodong Wang, Zhenghong Guo, Yonghua Rong (2011) *Orientation Relationships between Ferrite and Cementite by Edge-to-edge Matching Principle*. Journal of Materials Science & Technology Volume 27, Issue 5, 475-480 p.
60. Бекетов О.В., Сухомлин Г.Д., Лаухін Д.В., Машковська А.В. (2015) *Дослідження поверхневої енергії міжфазних границь під час дифузійного  $\gamma \rightarrow \alpha$  перетворення*. *Металознавство та термічна обробка металів*. Науков. та ін форм. бюл. № 2 (69). С. 24-29.
61. Kral M.V. (2012) *Proeutectoid ferrite and cementite transformations in steels*. Volume 1 in Woodhead Publishing Series in Metals and Surface Engineering, 225-275 p.
62. Zhang M.X., Kelly P.M. (2009) *The morphology and formation mechanism of pearlite in steels*. Materials Characterization 60(6).
63. Холявко В.В. (2015) *Фізичні основи міцності та руйнування: Конспект лекцій*. Київ: Вид-во НТУУ «КПІ». 100 с.

64. Ziman J.M. (1969) *The Physics of Metals, Vol. 1*. Cambridge University Press. 452 p.
65. Lomaeva T.V., Lukin L.L., Maslov L.N., Shavrin O.I., Skvortsov A.N. (2018) *Properties of Structural Steels with Nanoscale Substructure*. Proceedings of the Scientific-Practical Conference "Research and Development - 2016". 385-396 p.
66. <https://scadsoft.com/>
67. Gunter Petzow (1999) *Metallographic etching*. ASM International. 136 p.
68. Weinberg F.(1970) *Tools and Techniques in Physical Metallurgy, Volume 2*. Marcel Dekker. 363 p.
69. Stokes D.J. (2008) *Principles and Practice of Variable Pressure/Environmental Scanning Electron Microscopy*. Chichester: John Wiley & Sons,Ltd. 221 p.
70. Bergner J, Ankersmit K.S. (1966) *Practical Photomicrography*. Focal Press. 228 p.
71. Lee R.J., Spitzig W.A., Kelly J.F., Fisher R.M. (1981) *Quantitative Metallography By Computer-Controlled Scanning Electron Microscopy*. JOM Volume 33, 20-25 p.
72. George L. Kehl (1943) *The Principles of Metallographic Laboratory Practice*. McGraw-Hill, 2nd Edition. 453 p.
73. Hirsch P.B., Howrie A., Nicholson R.B., Pashley D.W. and Whelan M.J. (1965) *Electron microscopy of thin crystals*. London, Butterworths. 549 p.
74. Engel L., & Klingele, H. (2001). *An Atlas of Metal Damage: Surface Examination by Scanning Electron Microscope* (2nd Ed.). Herne, Flender Service. 217 p.
75. Bauer E. (2014). *Surface Microscopy with Low Energy Electrons*. New York, Springer. 496 p.
76. Reed S.J.B. (2010) *Electron Microprobe Analysis and Scanning Electron Microscopy in Geology* 2nd Edition. Cambridge University Press. 212 p.

77. Joseph Goldstein (1975) *Practical Scanning Electron Microscopy: Electron and Ion Microprobe Analysis*. Springer. 582 p.
78. Пчелінцев В.О., Дегула А.І. (2012) *Механічні властивості та конструкційна міцність матеріалів: Навч. посіб.* Суми: СумДУ. 247 с.
79. Shackelford J.F., *Introduction to materials science for engineers*, 1985.
80. Mac Lean D. (1962) *Mechanical properties of metals*. Wiley, First Edition. 403 p.
81. Холявко В.В. (2015) *Фізичні основи міцності та руйнування: Конспект лекцій*. Київ: Вид-во НТУУ «КПІ». 100 с.
82. Pei-Hua Hu, Kornel F. Ehmann (2000) *A dynamic model of the rolling process. Part I: homogeneous model*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, Volume 40, Issue 1, 1-19 p.
83. Günter Gottstein (2004) *Physical Foundations of Materials Science*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH. 487 p.
84. Karbasian H., Tekkaya A.E. (2010) *A review on hot stamping*. Journal of Materials Processing Technology Volume 210, Issue 15, 2103-2118 p.
85. Honeycombe R.W.K., Bhadeshia H.K.D.H. (1995) *Steels. Microstructure and properties*. London: Edward Arnold. 323 p.
86. Knight D.J., Palmer A.R (1966) *Planetary hot-mill rolling of continuously-cast steel*. JOM Volume 18, 578–582 p.
87. Гезенцвей Ю.І., Большаков В.І. (2021) *Дослідження впливу підвищення температури на структурний стан низьковуглецевих низьколегованих сталей*. Український журнал будівництва та архітектури. № 2 (002). С. 36-42.
88. Simms W.I. (2012) *Fire resistance design of steel structures*. SCI Publication P375. 104 p.
89. Sabar D. Hutagalung (2012) *Materials Science and Technology*. Croatia, InTech. 336 p.
90. James Shackelford (2014) *Introduction to Materials Science for Engineers 8th Edition*. Pearson. 696 p.

91. AFM Monowar Hossain, N. Kumar (2021) *Microstructural and Plastic Deformation Study of a Multi-Phase Advanced High-Strength Steel*. AISTech 2021 – Proceedings of the Iron & Steel Technology Conference. Nashville, Tenn., USA. 1010-1017 p.
92. Squires G. L., *Practical Physics*, Cambridge University Press, 1985. 212 p.
93. Mehran Kardar, *Statistical Physics of Fields*, Cambridge University Press, 2007. 359/
94. Hezentsvei Y.I., Bannikov D.O. (2021) *Use of Fine-Grained Heat-Strengthened Steels to Increase the Operation Qualities of Bunker Capacities from Thin-Walled Galvanized Profiles*. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. № 1 (91). с. 84-93.
95. Гезенцвей Ю.І., Банников Д.О. (2020) *Проектування пірамідально-призматичних бункерів зі сталей підвищеної міцності*. Матеріали 80-ї міжнародної науково-практичної конференції «Проблеми та перспективи розвитку залізничного транспорту». Дніпро. с. 10-15/
96. Hezentsvei Yukhym, Bannikov Dmytro. (2020) *Effectivenesses evaluation of steel strength improvemet for pyramidal-prismatic bunkers*, EUREKA, Tallinn, Eesti. Vol. 2 (27). 78-86 p.

Наукове видання

**Гезенцевей Юхим Ісаакович**  
**Зіборов Кирило Альбертович**  
**Лаухін Дмитро Вячеславович**  
**Бекетов Олександр Вадимович**  
**Федоряченко Сергій Олександрович**  
**Мацюк Ірина Миколаївна**  
**Дадіверіна Лілія Миколаївна**  
**Гаркавенко Дмитро Васильович**

**ТЕХНОЛОГІЧНІСТЬ ЗАСТОСУВАННЯ ДРІБНОЗЕРНИСТИХ  
ТЕРМОЗМІЩЕНИХ СТАЛЕЙ В КОНСТРУКЦІЯХ КОЖУХІВ  
ДОМЕННИХ ПЕЧЕЙ**

Монографія

Видано в редакції авторів

Підписано до видання \_\_\_\_ 2024.  
Електронний ресурс. Авт. арк 9,3.

Підготовлено до видання  
в Національному технічному університеті  
«Дніпровська політехніка»  
Свідоцтво несення до Державного реєстру ДК № 1842 від 11.06.2004.  
49005, м. Дніпро, просп. Д. Яворницького, 19.