

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАУКИ І ТЕХНОЛОГІЙ**  
**КАФЕДРА ЕЛЕКТРОМЕТАЛУРГІЇ ІМ. АКАДЕМІКА М. І. ГАСИКА**  
**ПРИДНІПРОВСЬКИЙ НАУКОВИЙ ЦЕНТР НАН УКРАЇНИ**  
**УКРАЇНСЬКА АСОЦІАЦІЯ ВИРОБНИКІВ ФЕРОСПЛАВІВ ТА ІНШОЇ**  
**ЕЛЕКТРОМЕТАЛУРГІЙНОЇ ПРОДУКЦІЇ**  
**АКАДЕМІЯ НАУК ВИЩОЇ ШКОЛИ УКРАЇНИ**



## *Матеріали*

**Міжнародної науково-практичної конференції**  
**“Інновації в металургії і суміжних стратегічних галузях для енергоефективності**  
**і сталого розвитку”**

***The Proceedings***  
**of the International scientific and practical conference**  
**“Innovation in Metallurgy and Strategical adjacent industries for energy efficient**  
**and sustainable development”**

**присвячена**  
***100-річчю кафедри електрометалургії ім. академіка М. І. Гасика***

**22-23 квітня, 2025**

**ДНІПРО**

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАУКИ І ТЕХНОЛОГІЙ**  
**КАФЕДРА ЕЛЕКТРОМЕТАЛУРГІЇ ІМ. АКАДЕМІКА М. І. ГАСИКА**  
**ПРИДНІПРОВСЬКИЙ НАУКОВИЙ ЦЕНТР НАН УКРАЇНИ**  
**УКРАЇНСЬКА АСОЦІАЦІЯ ВИРОБНИКІВ ФЕРОСПЛАВІВ ТА ІНШОЇ**  
**ЕЛЕКТРОМЕТАЛУРГІЙНОЇ ПРОДУКЦІЇ**  
**АКАДЕМІЯ НАУК ВИЩОЇ ШКОЛИ УКРАЇНИ**



*Матеріали*

**Міжнародної науково-практичної конференції**  
**“Інновації в металургії і суміжних стратегічних галузях для енергоефективності**  
**і сталого розвитку”**

**присвячена**  
**100-річчю кафедри електрометалургії ім. академіка М. І. Гасика**

**22-23 квітня, 2025**

**ДНІПРО**

**MINISTRY OF EDUCATION AND SCIENCE OF UKRAINE**  
**UKRAINIAN STATE UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGIES**  
**DEPARTMENT OF ELECTROMETALLURGY NAMED AFTER**  
**ACADEMICIAN MYKHAILO GASIK**  
**PRYDNIPROVSKYI SCIENTIFIC CENTER OF THE NAS OF UKRAINE**  
**UKRAINIAN ASSOCIATION OF MANUFACTURERS OF FERROALLOYS AND**  
**OTHER ELECTROMETALURGICAL PRODUCTS**  
**ACADEMY OF SCIENCES OF HIGHER EDUCATION OF UKRAINE**



*The Proceedings*  
**of the International scientific and practical conference**  
**“Innovation in Metallurgy and Strategic adjacent industries for energy efficient**  
**and sustainable development”**

**dedicated to the**  
***100th anniversary of the Department of Electrometallurgy named after Academician***  
***Mykhailo Gasik***

**22-23 April 2025**

**DNIPRO**

УДК 669:[005.591.6:620.92](082)

I 66

**Рекомендовано до друку вченою радою Українського державного університету науки і технологій**

(Протокол № 12 від 28.05.2025)

**Рецензенти:**

*Грищенко С. Г.* – голова ради директорів об'єднання “Укркольормет”, проф., д.т.н.

*Камкіна Л. В.* – декан факультету металургійних процесів та хімічних технологій Українського державного університету науки і технологій, проф., д.т.н.

**I 66** Інновації в металургії і суміжних стратегічних галузях для енергоефективності і сталого розвитку : матеріали Міжнар. наук.-практ. конф., 22–23 квітня 2025 р. / за заг. ред. Ю. С. Пройдака, О. В. Жаданоса. – Електрон. вид. – Дніпро : УДУНТ, 2025. – 198 с.

У збірнику подано матеріали, що висвітлюють актуальні проблеми розвитку сучасних технологій в металургійному виробництві, на залізничному транспорті, хімічних виробництвах. Значна увага приділена питанням цифрової трансформації, математичному моделюванню, мультидисциплінарним дослідженням.

**ISBN 978-617-8314-05-7(PDF)**

**Recommended for publication by the Academic Council of the Ukrainian State University of Science and Technologies**

(Minutes No. 12 dated May 28, 2025)

**Reviewers:**

*Hryshchenko S. G.* – Chairman of the Board of Directors of the Association "Ukrkolormet", Professor, Doctor of Technical Sciences

*Kamkina L. V.* – Dean of the Faculty of Metallurgical Processes and Chemical Technologies, Ukrainian State University of Science and Technology, Professor, Doctor of Technical Sciences

Innovations in Metallurgy and Related Strategic Industries for Energy Efficiency and Sustainable Development : Proceedings of the International Scientific and Practical Conference, April 22–23, 2025 / edited by Yu. S. Proidak, O. V. Zhadanos. – Electronic edition. – Dnipro : USUST, 2025. – 198 p.

The collection presents materials highlighting current issues in the development of modern technologies in metallurgical production, railway transport, and chemical industries. Significant attention is paid to digital transformation, mathematical modeling, and multidisciplinary research.



Цей твір ліцензовано на умовах Ліцензії Creative Commons

[«Attribution-NonCommercial-ShareAlike» 4.0 International \(CC BY-NC-SA 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

[\(«Із зазначенням авторства – Некомерційна – Поширення на тих самих умовах» 4.0 Міжнародна\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

ISBN 978-617-8314-05-7(PDF)  
DOI 10.15802/978-617-8314-05-7

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

## ЗМІСТ

<b>ПЕРЕДМОВА</b>	14
<b>СЕКЦІЯ 1. СУЧАСНА ЕЛЕКТРОМЕТАЛУРГІЯ: ПРОБЛЕМИ ТА РІШЕННЯ</b>	15
ПРОДУВАННЯ ВАННИ КОНВЕРТЕРА ПРИ РАФІНУВАННІ ФЕРОНІКЕЛЯ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ОДНОСОПЛОВИХ ТА ТРИСОПЛОВИХ ФУРМ Акрєєв В.В., Приходько С.В., Мельник С.О., Овчарук А.М.	15
ОГЛЯД ДОСТУПНИХ ДЖЕРЕЛ МАРГАНЦЕВОЇ СИРОВИНИ ТА ОСОБЛИВОСТЕЙ ВИРОБНИЦТВА МАРГАНЦЕВИХ СПЛАВІВ ПІДПРИЄМСТВАМИ УКРАЇНИ Аносов О.В., Гладких В.А., Рубан А.В., Рябцев О.О.	21
ШЛЯХИ ЗНИЖЕННЯ ЕНЕРГОВИТРАТ ПІД ЧАС ВИПЛАВКИ МАРГАНЦЕВИХ ФЕРОСПЛАВІВ В УМОВАХ АТ НІКОПОЛЬСЬКИЙ ЗАВОДУ ФЕРОСПЛАВІВ Бабуцький В.І., Зінченко О.М.	25
РОЗРОБКА ЕФЕКТИВНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ВИПЛАВКИ СПЛАВІВ МАРГАНЦІУ Величко К.О.	30
ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЕФЕКТИВНОГО НАГРІВУ ЗАЛІЗО-РУДО-ВУГІЛЬНОГО БРИКЕТУ В ІНДУКЦІЙНОМУ ПОЛІ Грек О.С.	35
ІНТЕНСИФІКУЮЧИЙ ВПЛИВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ПОЛЮ НА ПРОЦЕС ВІДНОВЛЕННЯ ОКСИДІВ Гришин О.М., Надточій А.А., Губа Р.М., Хромовський С.А.	40
ВПРОВАДЖЕННЯ НОВИХ ЕКОЛОГІЧНИХ В'ЯЖУЧИХ ДЛЯ ВИРОБНИЦТВА ВУГЛЕГРАФІТОВИХ ВИРОБІВ Дерев'яно І.В., Жаданос О.В., Агєєв О.Г.	46
ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПЛАВЛЕННЯ ВУГЛЕЦЬКАРБІДОКРЕМНІЄВИХ БРИКЕТІВ В СТАЛЬ-КОВШІ ПРИ ПОЗАПІЧНІЙ ОБРОБЦІ СТАЛІ Жаданос О.В., Дерев'яно І.В., Шепетяк Є.О., Мацишин В.Г., Петренко М.С.	49
АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНОЇ ІНТЕГРАЦІЇ ПРОЦЕСІВ БЕЗПЕРЕРВНОГО ЛИТТЯ ТА ПРОКАТКИ У МОДУЛЬНИХ МЕТАЛУРГІЙНИХ СИСТЕМАХ Ціколія А.З., Кононов Д.О.	54
ХАРАКТЕРИСТИКА ВУГЛЕЦЕВИХ ВІДНОВНИКІВ ДЛЯ ВИПЛАВКИ ФЕРОСИЛІЦІУ З ПІДВИЩЕНИМ ВМІСТОМ КРЕМНІЮ Кравченко В.П., Гладких В.А., Рубан А.В., Малий Є.Д.	59

## ХАРАКТЕРИСТИКА ВУГЛЕЦЕВИХ ВІДНОВНИКІВ ДЛЯ ВИПЛАВКИ ФЕРОСИЛІЦІУ З ПІДВИЩЕНИМ ВМІСТОМ КРЕМНІЮ

*В.П. Кравченко<sup>1</sup>, В.А. Гладких<sup>1</sup>, А.В. Рубан<sup>1</sup>, Є.Д. Малий<sup>1</sup>*

1. Український державний університет науки і технологій, Україна, м. Дніпро, просп. Науки, 4, 49600

**Анотація.** Наведено огляд актуальної ситуація та розглянуто перспективи забезпечення виробників високовідсоткового феросиліцію відновниками. Наведено інформацію про природу та характеристики найбільш поширених і доступних вуглецевмісних матеріалів, що використовуються для виробництва феросплавів. Обрано шляхи подальшої роботи з підбору найбільш раціонального відновника для його використання під час виплавки феросиліцію в умовах феросплавних заводів України.

**Ключові слова:** феросиліцій, вуглець, відновник, вугілля, кокс

## CHARACTERISTICS OF CARBON REDUCING AGENTS FOR SMELTING FERROSILICON WITH HIGH SILICON CONTENT

*V.P. Kravchenko<sup>1</sup>, V.A. Gladkikh<sup>1</sup>, A.V. Ruban<sup>1</sup>, E.D. Maly<sup>1</sup>*

1. Ukrainian State University of Science and Technology, ave. Nauky, 4, Dnipro, Ukraine, 49600

**Abstract.** The current situation is reviewed and the prospects for providing high-percentage ferrosilicon producers with reducing agents are considered. Information is provided on the nature and characteristics of the most common and available carbon-containing materials used for the production of ferroalloys. Ways for further work on selecting the most rational reducing agent for its use during ferrosilicon smelting in the conditions of ferroalloy plants in Ukraine are selected.

**Keywords:** ferrosilicon, carbon, reductor, coal, charcoal, coke

Феросиліцій — сплав кремнію із залізом, який широко використовується в металургії для розкислення та легування під час виробництва майже всіх марок сталі. Феросиліцій виробляють шляхом відновлення кремнію з кварциту вуглецевими відновниками у присутності заліза (вуглецевотермічний спосіб). Головними компонентами шихти для виробництва феросиліцію є: кварцит, вуглецевий відновник та сталева стружка або інший залізовмісний матеріал з мінімальним вмістом вносимої порожньої породи.

Вуглецевий відновник є другим після кварциту найважливішим компонентом шихти. Хоча в цьому процесі можуть бути використані різні вуглецеві відновлювальні матеріали, запаси їх обмежені. Основним відновником є кокс, проте використовуються також нафтовий кокс та вугілля. Основним джерелом вуглецю є вугілля. Вугілля може бути використане лише частково безпосередньо як відновник у печах закритого типу із зануреною дугою. Обмеження викликані частково міркуваннями безпеки виробництва та частково у зв'язку з виникаючими природоохоронними проблемами та безпекою працівників на виробництві. Залежно від технологічного процесу вимоги до відновника дуже різні. Вибір найбільш відповідного залежить від різних факторів: вимоги до кінцевого продукту та технології виробництва; собівартості; доступності; впливу на довкілля (наприклад викид шкідливих газів). Матеріали, що виробляються з біомаси, такі як деревне

вугілля, можуть певною мірою замінити викопний вуглець. Вуглецеві матеріали є складними системами з широким діапазоном фізичних та хімічних властивостей. Хімічний склад впливає на реакційну здатність відновника, якість продукту, питоме споживання електроенергії та кількість витраченого відновника. Фізичні властивості впливають на ефективність та продуктивність відновлювального процесу та процесу плавки.

Для вуглецевого відновника важливо:

1. Оптимальне співвідношення реакційної здібності вуглецю та фізичних властивостей для використання у феросплавних печах (фракція, міцність, вміст летких речовин тощо).
2. Прийнятна (відносно невисока) електропровідність.
3. Фракційний склад.
4. Мінімальний вміст шкідливих домішок.
5. Вартість.

Вугілля є надзвичайно складним гетерогенним матеріалом, для якого дуже важко скласти конкретні специфікації. Це порода осадового типу, що утворилася у результаті геологічних процесів. Вона складається з певного типу органічних речовин, які називаються «мацералами». У меншій кількості в цій породі присутні неорганічні речовини – мінерали. Вугілля формується з органічних покладів, більшість яких сформувалося з болотного торфу. Вугілля утворилося шляхом вуглефікації торф'яних відкладень. Процес вуглефікації залежить від температури породи, тиску та часу. Вуглефікація проходить через наступні стадії: лігніти, суб-бітумне вугілля, бітумне вугілля, антрацити. Тобто від низькосортних до високосортних сортів вугілля. Кількість летких матеріалів, кисню та водню зменшується у міру підвищення сорту вугілля, а кількість вуглецю збільшується. Високосортні типи вугілля багаті вуглецем і мають високу енергоємність. Фіксований вуглець (С-нелетучий) є твердим, відмінним від попелу осадом, що залишається після виділення летких речовин у результаті піролітичного розкладання. Кількість летких речовин зменшується з 75% для деревини, до менш ніж 3% для антрациту. У той же час, кількість кисню зменшується з 40% до 2%. Різниця між загальною кількістю вуглецю та «фіксованим» вуглецем дає кількість летких речовин.

Коксування – це процес нагрівання вугілля без повітря для виведення летких речовин. Розрізняються низькотемпературне та високотемпературне коксування. Низькотемпературне проходить при температурі близько 500°C. Таке коксування ще називається напівкоксуванням. Напівкокс все ще містить значну кількість водню. Вихідний газ містить велику кількість гідрокарбонатів та смол, а також невелика кількість вільного водню. Низькотемпературний кокс представляє обмежений інтерес для металургії. Він використовується для виробництва кремнію та феросиліцію. Високотемпературне коксування проводиться за температури вище 1000°C. Для коксування вугілля піддають дробленню, щоб 80-90% складало фракцію 3-мм та менше. Також змішуються кілька типів вугілля, щоб мати можливість контролювати процес його розширення в печі для отримання необхідної якості. Основу складають бітумне вугілля. Майже весь кокс виробляється в коксових батареях, що складаються з великою кількістю печей. Вугільна шихтова суміш нагрівається теплом від стін камери протягом 14-20 годин. Спочатку біля стін камери

утворюється пластична зона, а потім вона поширюється на середину. При нагріванні до 350 °С - 500 °С вугілля спочатку проходить стадію часткової плинності. При подальшому нагріванні кашоподібна суміш твердне в кокс. Максимальна температура в центральній частині сягає 1100°С. При цьому майже всі леткі речовини виводяться. У коксі в кінці процесу їх кількість складає 1-2%. Газ насичується воднем та метаном, тоді як вищі вуглеводни та смоли розкладаються під дією високих температур. Також газ містить CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, H<sub>2</sub>S, і NH<sub>3</sub> в незначній кількостях. Після закінчення процесу, кокс виводиться з печі і охолоджується або сухим способом або шляхом «мокрого гасіння». Механічна міцність коксу може змінюватись. Вона залежить від суміші використовуваного вугілля. Шляхом змішування різних видів вугілля досягаються специфічні властивості коксу. Доменне вугілля має бути механічно міцним, а також залишатися міцним після реакції в шахті доменної печі, тобто мати високий показник міцності після реакції (CSR). Для електричних печей із зануреною дугою можна використовувати менш міцний кокс. Більше 90% всього виробленого металургійного коксу використовують у доменних печах для виробництва чавуну і лише певна частка – для феросплавів.

Кокс демонструє широкий діапазон хімічних та фізичних властивостей. Хімічні властивості в основному впливають на реактивність відновника та на його витрату. Ті ж властивості впливають на якість продукту та енергоспоживання під час плавки. Фізичні властивості певною мірою впливають на ефективність та продуктивність роботи печі. Для того, щоб зрозуміти процеси, що проходять при використанні коксу в печі, необхідно розпочати зі складу та петрології вихідного вугілля. Так саме як відбивну здатність вітринітів і склад мацералів можна співвідносити з фізичними та хімічними властивостями вугілля, стабільність та реактивність коксу можна визначити з вивчення вихідного вугілля на мікроскопічному рівні та за технологічними складовими виробництва коксу.

Деревне вугілля має високий електроопір, низьку об'ємну масу і високу CO<sub>2</sub>-реактивність у порівнянні з коксом. Деревне вугілля використовувалося як відновник у дугових печах протягом багатьох років. Особливо це стосується Бразилії. Між коксом та деревним вугіллям є суттєві відмінності. Зазвичай деревне вугілля містить менше фіксованого вуглецю і більш високий вміст летких речовин, а вміст золи відносно невеликий (у порівнянні з коксом). Високий опір деревного вугілля дозволяє печі функціонувати з більшою ефективністю щодо споживання електроенергії. Основним недоліком його є низька механічна міцність та висока вартість. У зв'язку з високими природоохоронними витратами (податки та вартість квот на емісію CO<sub>2</sub>).

Найбільш дешевим, доступним і поширеним відновником для феросплавного виробництва довгий час був коксовий горішок. Коксовий горішок (10-25 мм) - одна з фракцій, що утворюються при подрібненні та розсіві «кокового пирога» під час виробництва металургійного коксу. Він застосовується у всіх процесах, де допускається використання відновника із відносно високою зольністю (10-15% A<sup>C</sup>). Галузеві стандарти на коксовий горішок регламентують лише показники зольності та вміст дрібняка <10 мм. За вмістом сірки, фосфору та виходу летких речовин (V<sup>T</sup>) коксовий горішок повинен відповідати вимогам, передбаченим для цих показників стандартами на доменний кокс. При цьому не враховуються хімічна активність та питомий електроопір, а також низька

інших властивостей. Якість коксового горішка, його електроопір, пористість, хімічна активність можуть сильно коливатися в залежності від застосованого кам'яного вугілля і режиму коксування. Досвід АТ «Запорізький феросплавний завод» (АТ ЗФЗ) свідчить, що результати застосування у технології виплавки феросиліцію коксового горішка різних виробників можуть значно відрізнятися, при цьому стандартні показники якості можуть бути близькими або навіть однаковими. Таким чином, існуючі стандарти, що регламентують якість коксу і вугілля не повною мірою характеризують їх властивості як відновників для виробництва феросплавів.

Значна частина закордонних виробників вирішували питання оптимізації відновника шляхом переходу на використання вугілля певних родовищ або у складі сумішей, або навіть до 100% використання. Досить часто використання вугілля обмежене екологічними вимогами чи технологічними особливостями, що мають місце на тому чи іншому підприємстві. Наприклад, закриті печі, високопотужні печі, конструкції газоочищення, особливості систем подачі сировини та ін.

Для «компенсації» недоліків, властивих традиційному коксовому горіху, як відновнику при виробництві феросплавів, українські підприємства також прагнуть застосувати різні вуглецевмісні матеріали. Опрацьовується і можливість додавання у шихту до відновної частини вугілля саме довгопламенної та газової групи місцевих родовищ. Також розглядаються можливості виробництва коксу зі специфічними властивостями, що більш задовольняють вимогам феросплавного виробництва.

Отримання вуглецевих відновників, що відповідають вимогам електротермічних виробництв, є актуальним питанням і досить складною проблемою, для вирішення якої необхідно:

- ~ формування об'єктивних параметрів якісної відновлювальної суміші;
- ~ поглиблений аналіз доступних вуглецевих відновників;
- ~ розробка рекомендацій щодо зміни структури забезпечення вуглецевими матеріалами;
- ~ оцінка ефективності запропонованих заходів.

З урахуванням об'єктивної зміни характеристик коксу, що виробляється, та в умовах постійного зростання ціни електроенергії питання підбору оптимального відновника для виплавки феросиліцію набуває особливої актуальності та вимагає глибшого аналізу.

### **Бібліографічний список**

1. Кравченко В.П, Гладких В.А., Аносов О.В. та ін. Аналіз якості шихтових матеріалів при виробництві висококремнистого феросиліцію // Теорія і практика металургії №3, 2023, С10-14.
2. В.Л. Зубов, М.І. Гасик. Електрометалургія феросиліцію. Дніпропетровськ: Системні технології, 2002. – 704 с.
3. В.Л. Зубов, М.І. Гасик, А.М. Овчарук. Структурні параметри, вуглехімічні та металургійні властивості вуглецевих відновників для виробництва феросплавів. Дніпропетровськ: Національна металургійна академія України, 2011. – 158 с.

4. М.І.Гасик, М.П. Лякішев. Фізикохімія і технологія електроферосплавів. Підручник для ВНЗ. Дніпропетровськ: ДНВП Системні технології, 2005. – 448 с.
5. Production of Manganese Ferroalloys/ S.E. Olsen, M. Tangstad, T. Linstad// © SINTEF and Tapir Academic Press, Trondheim 2007.

Наукове видання

Загальна редакція Ю. С. Пройдака, О. В. Жаданоса

**ІННОВАЦІЇ В МЕТАЛУРГІЇ І СУМІЖНИХ СТРАТЕГІЧНИХ ГАЛУЗЯХ ДЛЯ  
ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ І СТАЛОГО РОЗВИТКУ**

**МАТЕРІАЛИ МІЖНАРОДНОЇ НАУКОВО-ПРАКТИЧНОЇ КОНФЕРЕНЦІЇ**

Електронне видання

Відповідальні за випуск: Пройдак Ю. С., Жаданос О. В.  
Комп'ютерна верстка та дизайн: Жаданос О. В.

*Відповідальність за достовірність інформації, представленої в збірнику,  
несуть автори*

Видавець: Український державний університет науки і технологій  
вул. Лазаряна, 2, ауд. 2216, ауд. 263 (наукова бібліотека)  
м. Дніпро, 49010.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 7709 від 14.12.2022