

**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 Акреєв 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

## ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЕФЕКТИВНОГО НАГРІВУ ЗАЛІЗО-РУДО-ВУГІЛЬНОГО БРИКЕТУ В ІНДУКЦІЙНОМУ ПОЛІ

Грек О.С. Дніпровський металургійний інститут Українського університету науки та технологій, м. Дніпро, Україна, [alex.grek.ks@gmail.com](mailto:alex.grek.ks@gmail.com), <https://orcid.org/0009-0001-0153-5416>

**Анотація.** Збільшення екологічного навантаження металургійної галузі спонукає до пошуку нових технологій металургійного виробництва та скорочення викидів парникових газів у існуючих технологічних ланцюгах. Перспективою для «зеленої» металургії є технології прямого твердофазного відновлення заліза з першоджерельних залізородних матеріалів. Запропоновано принципово новий технологічний ланцюг для отримання високоякісної сталі шляхом твердофазного відновлення залізної руди з використанням індукційної печі. Проведено експериментальні дослідження твердофазного відновлення залізо-рудо-вугільного брикету в лабораторних умовах. Наведено результати розрахунку геометричних параметрів металеві складові залізо-рудо-вугільного брикету для умов ефективного процесу нагріву брикетів в умовах індукційного нагріву.

## INVESTIGATION OF PARAMETERS OF EFFECTIVE HEATING OF IRON-ORE-COAL BRIQUETTE IN AN INDUCTION FIELD

Grek O.S. Dnipro Metallurgical Institute of the Ukrainian University of Science and Technology Dnipro, Ukraine, [alex.grek.ks@gmail.com](mailto:alex.grek.ks@gmail.com), <https://orcid.org/0009-0001-0153-5416>

**Abstract.** The growing environmental burden of the steel industry is prompting the search for new steelmaking technologies and a reduction in greenhouse gas emissions in existing production chains. The technologies of direct solid-phase iron reduction from primary iron ore materials are promising for green metallurgy. A fundamentally new technological chain to produce high-quality steel through the solid-phase reduction of iron ore using an induction furnace is proposed. Experimental studies of the solid-phase reduction of iron-ore-coal briquettes in the laboratory were carried out. The results of calculation of the geometrical parameters of the metal component of the iron-ore-coal briquette for the conditions of an effective process of heating briquettes under induction heating are presented.

**Вступ.** Світове виробництво сталі останні 25 років безперервно зростало та у 2025 році становило близько 1,9 млрд. тон [1]. Разом із тим на металургію припадає 20% глобального споживання викопного вугілля та як галузь, металургія відповідальна за 9% глобальної емісії парникових газів [2].

Близько 72% світового виробництва сталі припадає на технологічний маршрут виплавки сталі Доменна Піч - Кисневий Конвертер, 20% сталі виплавляють із металевого брухту в дугових електросталеплавильних (ДЕСП) печах, а 8% сталі виробляють із прямо відновленого заліза (DRI - Directly Reduced Iron) з використанням ДЕСП [3]. Енергетична інтенсивність та викиди вуглецевого газу для різних технологічних шляхів отримання сталі наведено у 2023 році наведені у Таблиці 1.

Таблиця 1.

Емісія CO<sub>2</sub> та енергетичне споживання на виробництво сталі у 2023 році.

	Інтенсивність викидів CO <sub>2</sub> , т/т сталі	Енерговитрати, ГДж/т сталі
ДП - КК	2,32	24,20
Лом - ДЕСП	0,70	10,24
DRI - ДЕСП	1,43	23,19

Порівняно з технологічною послідовністю «Доменна Піч - Кисневий конвертер» виплавка сталі в ДЕСП з металевого брухту дає в 3 рази менше викидів парникових газів і набуває широкого поширення у світі як варіант «зеленої» металургії [3, 4]. Також, через те що у світі зростає потреба у транс регіональному транспортуванні залізної руди, що у 2023 році склало 62,7%, та через обмежений доступ до коксівного вугілля, отримують розвиток технології прямого твердофазного відновлення заліза з першоджерельних матеріалів (Рис. 1).

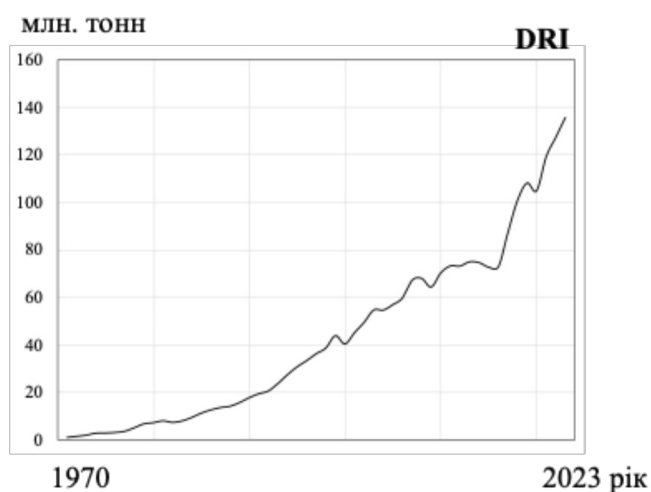


Рис. 1. Світова динаміка виробництва заліза прямого відновлення (DRI) [1].

У 2023 році 99,9% виробництва заліза прямого відновлення реалізовували за чотирма технологіями твердофазного відновлення (Таблиця 2).

Таблиця 2.

Розподіл світового виробництва заліза прямого відновлення за технологіями у 2023 році.

MIDREX	55,8%
HYL/Energiron	12,2%
PERED	2,30%
Вращающаяся рудовосстановительная печь	29,6%
Другие	0,10%

Технології прямого отримання відносно низької питомої продуктивності, порівняно з доменно-конвертерним циклом, мають низку істотних переваг:

- значно нижчі капітальні витрати;
- менші енерговитрати на тону розливої сталі;
- можливість отримання пористого матеріалу для порошкової металургії;
- використання тільки електроенергії;

- не використання коксу;
- зниження викидів парникових газів.

Запропоновано інший технологічний ланцюжок виплавки сталі, що передбачає використання індукційної печі. Відповідно до нього, під час виплавки сталі не застосовують доменну піч, виключають кокс і коксохімічне виробництво, не використовують киснево-конвертерний агрегат або дугову електросталеплавильну піч (Рис. 2. Схема отримання якісної сталі з використанням у технологічному ланцюжку індукційної печі. Рис. 2).

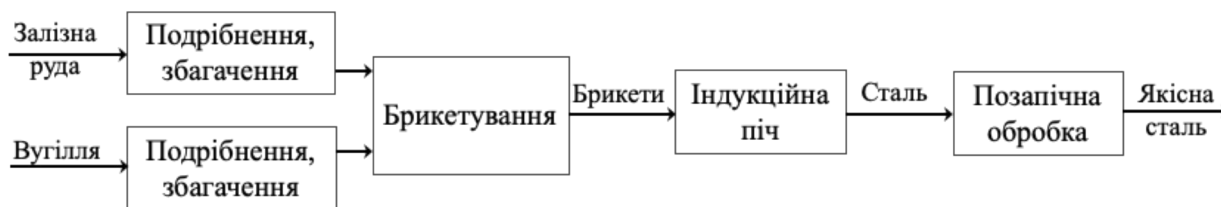


Рис. 2. Схема отримання якісної сталі з використанням у технологічному ланцюжку індукційної печі.

Принциповим у запропонованій технологічній схемі є використання індукційної печі суміщеного металургійного агрегату - печі для твердофазного відновлення і розплавлення продуктів твердофазного відновлення з подальшим рафінуванням.

Матеріали, що не мають електропровідних і магнітних властивостей, зокрема оксиди заліза та інші оксиди, не нагріваються в магнітному полі індукційної печі. У зв'язку з цим, для нагріву діелектричної немагнітної шихти (у нашому випадку шихти для твердофазного відновлення) запропоновано проводити опосередкований нагрів, коли металева складова, яка вводиться, нагрівається в магнітному полі індуктора і, своєю чергою, нагріває прилегли до неї матеріали шихти. Такою металевою складовою, що гріє, може слугувати металізована губка (Sponge) або подрібнений металізований окатиш (DRI), металева стружка.

Твердофазне відновлення може проводитися вуглицем, частково вуглицем і воднем або тільки воднем. В останньому випадку, що дуже важливо, реалізується концепція «зеленої» металургії. Так індукційна піч може претендувати на універсальний металургійний агрегат для виплавки сталі.

**Методика дослідження.** Проведені експериментальні дослідження на лабораторній індукційній печі потужністю 5 кВт довели принципову можливість нагріву та відновлення залізо-рудо-вугільних брикетів із вмістом металевої складової у вигляді порошку металізованого заліза (Fe 98%) від 30 до 50%. Результати експериментів та математичного моделювання процесу опубліковано в роботі [5]. Варто зауважити що вміст металевої складової нижче 30% не призводив до бажаних результатів нагріву рудо-вугільної шихти брикету, натомість математичне моделювання демонструвало теоретичну можливість нагріву та відновлення навіть при вмісті металевої складової на рівні 10%.

Було проведено додаткову серію експериментів з використанням металевої складової у формі окатишів діаметром 7-10 мм із вмістом 5-10% від маси залізорудної складової брикету. Така зміна умов експерименту привела до дуже швидкого розігріву та відновлення рудо-вугільної складової. Час нагріву та відновлення брикету скоротився майже в 1,5 рази порівняно з часом відновлення для брикетів із вмістом металевої складової у вигляді порошку на рівні 40-50%.

Проведено математичне моделювання механізмів та умов що впливають на ефективність взаємодії змінного електромагнітного поля індукційної печі та металізованої складової з метою отримання параметрів що дозволять зменшувати вміст металеві складової в залізо-рудо-вугільному брикеті, збільшувати швидкість нагріву та регулювати умови проведенні відновлення рудної складової брикету.

**Результати та їх обговорення.** Матеріал DRI має відносно високий електричний опір у діапазоні від  $10^{-5}$  до  $10^{-6}$  Ом×м, що є вищим за чисте залізо (приблизно  $9,98 \times 10^{-8}$  Ом×м) або вуглецеву сталь  $1,71 \times 10^{-7}$  Ом×м. Це пов'язано з пористістю та неметалевими включеннями в структурі DRI. Відносна магнітна проникність DRI становить 100-500 і з тих самих причин, що й опір, є нижчою, ніж у щільного заліза (96% Fe і 4% Si  $\mu_r = 500-7000$ ). Температуру точки Кюрі для DRI приймають 1008 К, що дещо нижче, ніж у чистого заліза 1043 К [6].

Глибина проникнення змінного магнітного поля вглиб матеріалу, що нагрівається, обернено пропорційна кореню від частоти змінного струму в обмотках індуктора. В Таблиця 3 наведено розрахункові значення товщини скін-шару для матеріалу DRI зі збільшенням частоти змінного струму.

Таблиця 3.

Значення товщини скін-шару ( $\delta$ ) за різної температури і частоти ( $f$ ) змінного струму в обмотках індуктора для матеріалу металевих частинок - DRI.

$f$ , Гц	50	500	5 000	50 000
$\delta$ (при $T = 300$ К), мм	7,12	2,25	0,71	0,23
$\delta$ (при $T = 1008$ К), мм	123,34	39,00	12,33	3,90

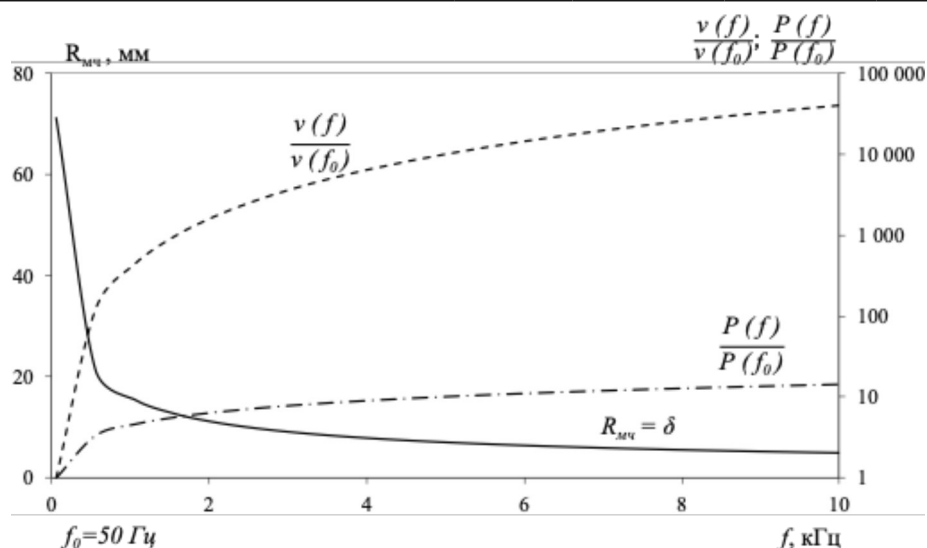


Рис. 3. Залежність радіуса металеві частинки  $R_{Mч}$ , відносної зміни швидкості нагріву частинки  $v(f)/v(f_0)$  і теплової потужності частинки  $P(f)/P(f_0)$  від частоти змінного струму індуктора за умови  $R_{Mч} = \delta$  для матеріалу частинки - DRI.

Приймаючи  $R_{Mч} = \delta$  як оптимальні умови для нагріву металеві сфери, проведено розрахунки радіусу металеві частинки, що дадуть змогу проводити ефективний індукційний нагрів у діапазоні робочих частот від 50 Гц до 10 кГц, а також зміни швидкості

та одиничної потужності металеві частинки під впливом змінного магнітного поля за  $R_{\text{мч}} = \delta$  та  $\mu_r = 1$  залежно від частоти змінного струму в індукторі печі. Результати розрахунку представлені на Рис. 3.

### **Висновки:**

1. Проведено експериментальне дослідження нагріву та відновлення залізо-рудовугільних брикетів із вмістом металеві складові менше 10% від маси рудо-вугільної частини брикету та встановлено збільшення швидкості нагріву при збільшенні геометричного розміру частинок металеві складові брикету.
2. Встановлено взаємний вплив параметрів матеріалу що нагрівається (розмір, форма та електромагнітні властивості) та частоти електромагнітного поля індукційної печі.
3. Проведено розрахунок діаметрів сферичних металізованих частинок у відповідності до частоти змінного струму в індукторі печі а також зміну теплової потужності та швидкості нагріву металеві складові залізо-рудовугільного брикету.

### **Бібліографічний список**

1. World Steel in Figures 2024. Brussels, Belgium: World Steel Association, 2024.
2. Iron and steel technology roadmap. Paris, France: IEA, 2020.
3. Sustainability performance of the steel industry 2003-2023. Brussels, Belgium: World Steel Association, 2024.
4. Madias J. Electric Arc Furnace. *Ironmaking and Steelmaking Processes*. Springer, 2016. С. 267–281.
5. Velychko O., Grek O., Grishin O., Velychko K. PHYSICOCHEMICAL CHARACTERISTICS OF SOLID-PHASE REDUCTION OF PELLETS (BRIQUETTES) UNDER INDUCTION HEATING. *Voprosy Khimii i Khimicheskoi Tekhnologii*. 2024. № 3. С. 37–45.
6. Lide D. R., Baysinger G., Chemistry S., Berger L. I., Goldberg R. N., Kehiaian H. V., Kuchitsu K., Rosenblatt G., Avenue M., Roth D. L., Library M., Zwillinger D. CRC Handbook of Chemistry and Physics.

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