

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

ПЕРЕДМОВА	14
СЕКЦІЯ 1. СУЧАСНА ЕЛЕКТРОМЕТАЛУРГІЯ: ПРОБЛЕМИ ТА РІШЕННЯ	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

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ПЛАВЛЕННЯ ВУГЛЕЦЬКАРБІДОКРЕМНІЄВИХ БРИКЕТІВ В СТАЛЬ-КОВШІ ПРИ ПОЗАПІЧНІЙ ОБРОБЦІ СТАЛІ

Жаданос О.В., к.т.н., доцент кафедри електromеталургії, Український державний університет науки і технологій, просп. Науки 4, Дніпро, 49600, Україна (E-mail: Alexzhad1980@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-9533-9933>),

Дерев'янка І.В., к.т.н., доцент кафедри електromеталургії, Український державний університет науки і технологій, просп. Науки 4, Дніпро, 49600, Україна (E-mail: Ihorsic@meta.ua, <https://orcid.org/0009-0000-9287-9558>)

Шепетяк Є.О. аспірант кафедри електromеталургії, Український державний університет науки і технологій, просп. Науки 4, Дніпро, 49600, Україна (E-mail: Egor4446@i.ua)

Мацишин В.Г. аспірант кафедри електromеталургії, Український державний університет науки і технологій, просп. Науки 4, Дніпро, 49600, Україна (E-mail: Vasiliy.dnepr@gmail.com)

Анотація. Досліджено процес взаємодії вуглецькарбідкремнієвих брикетів з залізовуглецевим розплавом під час позапичної обробки. Виконано розрахунок процесу плавлення цементної зв'язки CSIC-брикетів з використанням чисельних методів. За результатами виконаних досліджень отримана аналітична залежність часу розпаду брикету в залізовуглецевому розплаві від його розмірів, що дозволяє визначати його раціональний розмір при використанні в ковшовій металургії.

RESEARCH ON THE MELTING PROCESS OF CARBON-SILICON CARBIDE BRIQUETTES IN THE LADLE DURING SECONDARY STEELMAKING

Oleksandr Zhadanos, Ph.D, Ass. Prof., Department of electrometallurgy, Ukrainian State University of Science and Technologies, Nauky avenue, 4, Dnipro, 49600, Ukraine, <https://orcid.org/0000-0002-9533-9933>, e-mail: Alexzhad1980@gmail.com

Ihor Derevyanko, Ph.D, Ass. Prof. Department of electrometallurgy, Ukrainian State University of Science and Technologies, Nauky avenue, 4, Dnipro, 49600, Ukraine, <https://orcid.org/0009-0000-9287-9558>, e-mail: Ihorsic@meta.ua

Egor Shepetyak, Ph.D student, Department of electrometallurgy, Ukrainian State University of Science and Technologies, Nauky avenue, 4, Dnipro, 49600, Ukraine, e-mail: Egor4446@i.ua

Vasil Matsyshyn, Ph.D student, Department of electrometallurgy, Ukrainian State University of Science and Technologies, Nauky avenue, 4, Dnipro, 49600, Ukraine, e-mail: Vasiliy.dnepr@gmail.com

Abstract. The interaction process between CSIC-briquettes and iron-carbon melt during secondary steelmaking has been studied. The melting process of CSIC-briquettes' cement binder has been calculated using numerical methods. According to the results of the performed research, the analytical dependence between briquettes' breakdown time in iron-carbon melt and their size

has been obtained. This result allows us to determine the optimal size of briquettes for their use in secondary steelmaking.

Вступ

Під час виплавки сталі в сучасних електрометалургійних комплексах і киснево-конвертерних цехах науглецювання металу до заданого вмісту вуглецю здійснюють у ковші під час випуску розплаву з пічного агрегату або під час обробки на установці «електропіч-ківш». З досвіду вітчизняної та світової сталеплавильної промисловості відомо, що в якості матеріалів для науглецювання використовують антрацити, металургійний коксик, пековий кокс і нафтовий кокс або їхні суміші, вторинні вуглецеві матеріали (бій графітованих електродів, вуглецеві катодні футерування електролізерів тощо). Для науглецювання також використовують вторинні вуглець-карбідокремнієві матеріали у вигляді брикетів на цементній зв'язці [1, 2]. Висока механічна міцність CSiC-брикетів досягається завдяки гідратному твердінню цементу, який за хімічним складом можна віднести до концентраційної області системи CaO-SiO₂-Al₂O₃, що характеризується відносно високою (1550°C) температурою плавлення. Цемент, обволікаючи частинки вуглецю та SiC, запобігає їхньому окисленню на початковому етапі взаємодії з металом, який нерозкислений.

Постановка завдання дослідження

Поряд з вибором вихідного компонентного та гранулометричного складу для отримання брикетів, які застосовуються для науглецювання розплаву в ковші, важливим також є визначення раціональних розмірів брикетів. До розміру брикетів, що використовуються в ковшовій металургії, пред'являються такі вимоги: з одного боку, брикет повинен повністю взаємодіяти з залізовуглецевим розплавом за час випуску металу зі сталеплавильного агрегату, а, з іншого боку, розміри його повинні забезпечити мінімальні втрати за рахунок винесення матеріалу з ковша за рахунок конвективних потоків. Для оптимізації розмірів брикетів у цій роботі проведено теплофізичний аналіз процесів, які відбуваються при взаємодії CSiC-брикетів з металом.

Аналіз процесу плавлення CSiC-брикетів в сталевому розплаві

Процес взаємодії CSiC-брикетів із залізовуглецевим розплавом можна розділити на кілька стадій: заморожування кірочки розплаву на поверхні брикету; плавлення замороженого шару; нагрівання брикету до температури плавлення цементу та інтенсивне стаціонарне плавлення цементної зв'язки, взаємодія вуглецю та SiC з металом [3]. При математичному моделюванні приймаємо припущення, що брикет має форму кулі.

У перший момент початку взаємодії розплаву з брикетом швидкість відведення теплоти від поверхні всередину тіла перевищує швидкість підведення теплоти з розплаву до його поверхні, внаслідок чого метал намерзає на брикеті. Цей процес завершується за рівності зовнішнього $q_{зовн}$ і внутрішнього $q_{внут}$ теплових потоків. Надалі зовнішній тепловий потік перевершує внутрішній, і намерзла кірочка плавиться. Математичний опис цих процесів ґрунтується на диференціальному рівнянні теплопровідності:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial t}{\partial \tau} = a_{\text{бр}} \cdot \left(\frac{\partial^2 t}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial t}{\partial r} \right) \\ (0 < r < r_{\text{ноч}}; \tau > 0) \end{aligned} \right\}; \quad (1)$$

де $a_{\text{бр}}$ – ефективний коефіцієнт температуропровідності брикету; $r_{\text{ноч}}$ – початковий радіус кулі.

Граничні умови матимуть вигляд:

а) на етапах наморожування та подальшого плавлення сталевій кірочки

$$\alpha \cdot (t_{\text{розп}} - t_{\text{нов}}) \pm q_{\text{скр.кір}} \cdot \rho_{\text{кір}} \frac{dx}{d\tau} = -\lambda_{\text{бр-кір}} \cdot \frac{\partial t}{\partial x}, \quad (2)$$

де $\lambda_{\text{бр-кір}}$ – коефіцієнт теплопровідності системи брикет-кірочка; $\rho_{\text{кір}}$ – густина кірочки; $q_{\text{скр.кір}}$ – приховане тепло, що виділяється при наморожуванні або поглинається при плавленні кірочки; α – коефіцієнт тепловіддачі від розплаву до поверхні системи брикет-кірочка; $t_{\text{розп}}$ – температура розплаву; $t_{\text{нов}}$ – температура поверхні системи брикет-кірочка.

б) на етапі безпосереднього плавлення брикету

$$\alpha \cdot (t_{\text{розп}} - t_{\text{нов}}) \pm q_{\text{скр.бр}} \cdot \rho_{\text{бр}} \frac{dx}{d\tau} = -\lambda_{\text{бр}} \cdot \frac{\partial t}{\partial x}, \quad (3)$$

де $\lambda_{\text{бр}}$ – коефіцієнт теплопровідності брикету; $\rho_{\text{бр}} -$ густина кірочки; $q_{\text{скр.бр}}$ – приховане тепло, що поглинається при плавленні брикету.

Одночасно з процесом наморожування та плавлення кірочки відбувається нагрівання брикету до температури плавлення цементної зв'язки. Зв'язка брикету, прогрітого до температури плавлення цементу, починає плавитися з постійною швидкістю, оскільки різниця температур $t_{\text{розп}} - t_{\text{нов}}$ і тепловий потік з об'єму розплаву до поверхні брикету не змінюються. На основі прийнятих припущень, визначимо час повного розплавлення цементної зв'язки брикету в залізовуглецевому розпаві залежно від їх геометричних розмірів. Приймаємо, що температура розплаву в період плавлення зв'язуючого брикету є постійною і дорівнює 1600°C .

Розрахунок стадій наморожування сталевій кірочки та її розчинення, а також прогрівання брикету є завданням нестационарної теплопровідності з граничними умовами третього роду [4]. При розрахунках приймали, що час циклу обчислень Δt становив 1 с, протягом якого розміри брикетів залишаються постійними.

Аналіз результатів.

Реалізацію представленої математичної моделі проводили на ПЕОМ. Проведені розрахунки показали, що процес плавлення цементної зв'язки та, отже, розпаду брикету залежно від його радіусу становить від 3 до 17 хв (рис. 1).

За результатами виконаних за допомогою розробленої математичної моделі досліджень отримано залежність часу розпаду брикету у сталевій ванні від його розмірів:

$$\tau = 6,61 \cdot r_{\text{бр}} - 7,33. \quad (4)$$

Радіус брикету в залежності від ємності ковша вибирається в кожному конкретному випадку з отриманої залежності [5].

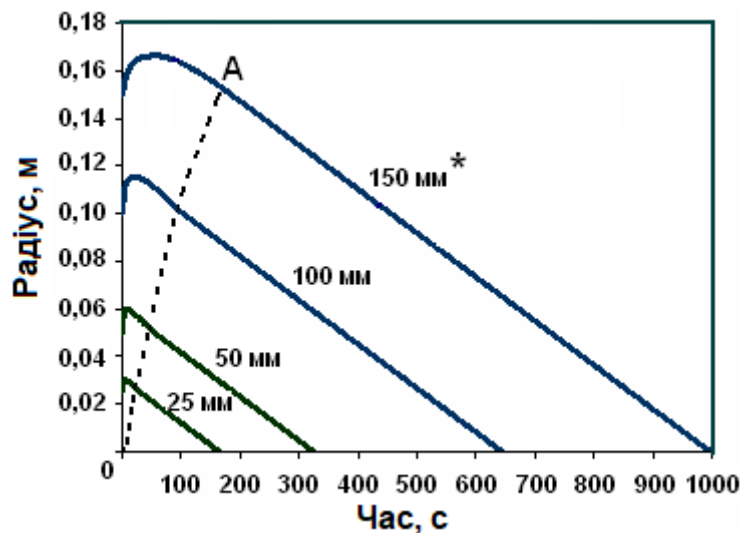


Рис. 1 - Зміна радіусу системи брикет - кірочка в залежності від розмірів брикету та часу перебування брикету в розплаві температурою 1600°C*

Висновки

1. Розроблено теплофізичну модель взаємодії вуглець-карбідокремнієвих брикетів із залізовуглецевим розплавом при ковшевій обробці (легуванні).
2. Розраховано процес плавлення цементної зв'язки CSiC-брикетів з використанням ПЕОМ.
3. Проведені розрахунки показали, що процес плавлення цементної зв'язки та, отже, розпаду брикету залежно від його радіусу (25-150 мм) становить від 3 до 17 хв.
4. Отримано аналітичну залежність часу розпаду брикету в залізовуглецевому розплаві від його розмірів, що дозволяє визначати його раціональний розмір при використанні в ковшовій металургії.

Бібліографічний список

1. Дерев'янко І.В.. Технологія отримання вуглець-карбідокремнієвих брикетів і застосування їх для науглецювання сталевій ванни. Дис. канд. техн. наук. - Дніпропетровськ: НМетАУ, 2007.
2. Advanced technologies for smelting the steel in EAF using the CSiC briquettes / Gasik, M.I.; Ovcharuk, A.N.; Semenov, I.A.; Derevyanko, I.V. // Stal' - 2004. - Issue 4, 2004, Pages 31-36.
3. Меджибозький М.Я. Основи термодинаміки та кінетики сталеплавильних процесів: навч. посібник для вузів/М.Я. Меджибозький – Київ-Донецьк: Вища шк. Головне вид-во, 1979. - 280 с.

*Числа у кривих – вихідний радіус CSiC-брикетів; А – лінія, що розмежовує область заморожування – плавлення металевій кірочки та область плавлення цементної зв'язки

4. Рум'янцев В.Д., Ольшанський В.М. Теплотехніка: Навчальний посібник / Під ред. В.І. Губінського. – Дніпропетровськ: Пороги, 2002. – 325 с.
5. Жаданос А.В. Теплофізична модель взаємодії вуглецевих карбідокремнієвих брикетів з металом-напівпродуктом при позапічній обробці сталі / О.В. Жаданос, І.В. Дерев'янка // *Металургійна теплотехніка: сб. наук. праць Національної металургійної академії України*, 2013 – вип. 4 (19) – Дніпропетровськ: Нова ідеологія – С. 78-81.

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