

DOI: 10.31319/2519-2884.48.2026.2

УДК 669.184

Чернятевич А.Г., д.т.н., професор, ORCID: 0000-0002-4552-4997, e-mail: agchern@ua.fm

Похвалітий А.А., к.т.н., доцент, ORCID: 0000-0001-7887-2843, e-mail: ArtemMSLP@gmail.com

Кондрашенков Д.С., здобувач третього (доктор філософії) рівня вищої освіти,

ORCID: 0009-0006-6643-417X, e-mail: notfeilordima@gmail.com

Вовк А.О., здобувач третього (доктор філософії) рівня вищої освіти,

e-mail: alyonkamaxvovk@gmail.com

Круть А.В., здобувач третього (доктор філософії) рівня вищої освіти,

e-mail: orgrada@dndz.gov.ua

Дніпровський державний технічний університет, м. Кам'янське

Chernyatevych Anatolii, Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of Metallurgy

Pokhvalitii Artem, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of

Metallurgy

Kondrashenkov Dmytro, Postgraduate Student

Vovk Alyona, Postgraduate Student

Kruty Artur, Postgraduate Student

Dniprovsky State Technical University, Kamianske

ОГЛЯД МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ЧАСТКИ БРУХТУ ТА ВІДПРАЦЮВАННЯ РЕЖИМІВ ПОПЕРЕДНЬОГО ПІДГРІВУ БРУХТУ В КИСНЕВОМУ КОНВЕРТЕРІ

У роботі пропонуються та експериментально обґрунтовуються нові внутрішньококонвертерні режими попереднього підігріву металобрухту, засновані на вдуванні пилоугільного палива (ПВП) через паливно-кисневу фурму та комбінованого газо-порошкового струменю (ПВП в транспортуючому газі з додаванням природного газу та кисню), а також у їх системному порівнянні з традиційним режимом підігріву брухту на кусковому вугіллі. Встановлено, що перспективним напрямом підвищення частки металобрухту в кисневому конвертері є розвиток технологій внутрішньококонвертерного підігріву з використанням пилоугільного палива, що забезпечує оптимальний баланс між інтенсивністю нагріву, керованістю процесу та енергоефективністю. У роботі виконано теоретичний аналіз та експериментальне дослідження внутрішньококонвертерних способів попереднього підігріву брухту із використанням паливно-кисневої фурми та додаткового палива: кускового вугілля, природного газу, пилоугільного палива. Показано, що режими, які базуються на спалюванні кускового вугілля та роботі газокисневої фурми, забезпечують підвищення частки брухту за рахунок інтенсивного нагріву верхніх шарів завалки, але характеризуються нерівномірним розподілом температури та локальним оплавленням брухту.

Ключові слова: кисневий конвертер; металобрухт; режими; попередній підігрів; пилоугільне паливо; паливно-киснева фурма.

The paper proposes and experimentally substantiate new internal converter modes of preliminary preheating of scrap metal based on blowing pulverized coal fuel (PCF) through a fuel-oxygen lance and a combined gas-powder jet (PCF in inert gas with the addition of natural gas and oxygen), as well as in their systemic comparison with the traditional mode of preheating with lump coal. It has been established that the promising direction for increasing the proportion of scrap metal in an oxygen converter is the development of in-converter preheating technologies using pulverized coal fuel, which provides an optimal balance between heating intensity, process controllability, and energy efficiency. The paper presents a theoretical analysis and experimental study of in-converter methods of preheating scrap using a fuel-oxygen lance and additional fuels: lump coal, natural gas, and pulverized coal fuel. It is shown that modes based on the combustion of lump coal and the operation of a gas-oxygen lance provide an increase in the scrap content due to the intensive heating of the upper layers of the charge, but are characterized by uneven temperature distribution and local melting of scrap.

Keywords: basic oxygen furnace; scrap; modes; scrap preheating; pulverized coal; oxy-fuel lance.

Постановка проблеми

У структурі світового виробництва сталі домінує тривалий доменно-конвертерний (BF–BOF) маршрут, який характеризується високими питомими витратами палива та значними викидами CO₂. Одним із найбільш ефективних шляхів зниження вуглецевого сліду є збільшення частки брухту у шихті конвертера.

У традиційних режимах роботи кисневих конвертерів частка «холодного» брухту зазвичай обмежена ≈10–25 % через дефіцит теплоти для його нагрівання та плавлення [1, 2]. Подальше збільшення частки металобрухту без спеціальних заходів призводить до зниження кінцевої температури сталі, нестабільності ходу плавки та зростання частки позапланових коригувальних продувок.

Тому актуальною науково-практичною задачею є розроблення та вдосконалення технологій попереднього підігріву брухту, які дозволяють підвищити його частку у шихті конвертера без погіршення якості сталі та зниження продуктивності агрегату.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Проблеми щодо підвищення частки перероблюваного брухту в конвертерних плавках розглядаються в роботах вітчизняних та закордонних дослідників [1–9]. Показано, що за рахунок оптимізації параметрів чавуну (температура, вміст Si), ефективного використання конвертерного газу та удосконалення логістики подачі шихти сучасні BF–BOF-комплекси досягають стійкого рівня використання брухту 20–25 %.

Зовнішнє попереднє підігрівання брухту. Окрему групу становлять дослідження, присвячені зовнішньому попередньому підігріву брухту у тунельних і шахтних печах, а також у спеціальних підігрівачах брухту, де використовують відхідні гази або додаткове паливо. Проаналізовано установки для нагріву брухту перед завантаженням у конвертер: тунельні та шахтні печі, конвеєрні сушарки, підігрівачі брухту продуктами згоряння тощо. Такі системи можуть працювати як від газових пальників, так і від утилізації тепла відхідних димових газів металургійних агрегатів [3]. Компанія Nippon Steel розробила систему URSCR для підігріву брухту перед завантаженням у конвертер шляхом пропускання гарячих газів через спеціальний контейнер з брухтом [4]. Показано, що нагрівання брухту до 600–800 °C може підвищити частку брухту в конвертері до 30–40 %, Хоча зовнішні методи й забезпечують значний прогрів шихти, їхні недоліки — висока вартість, складність впровадження, додаткові втрати тепла при транспортуванні розігрітого брухту — стримують широке розповсюдження. [5, 6].

Внутрішньоконвертерні методи підігріву. У роботах [8, 9] розглянуто використання кускового вугілля, природного газу, пилувугільного палива (ПВП) як нагрівальних агентів при підвищених частках брухту. Класичні процеси типу ALCI (ARBED Lance Coal Injection) передбачають вдування ПВП через багатоканальні фурми з одночасною комбінованою продувкою ванни [7]. Показано, що введення ПВП дає змогу суттєво збільшити відсоток перероблюваного брухту у порівнянні з базовими LD-режимами, однак потребує ретельного підбору конструкції фурм та параметрів подачі кисню. У роботі [8] наведені результати досліджень використання пилувугільного палива для попереднього підігріву брухту у порожнині конвертера, що показали принципову можливість інтенсифікації підігріву при прийнятних витратах кисню.

Отже, аналіз літератури показує, що для суттєвого збільшення частки брухту (>25 %) необхідно застосовувати методи попереднього підігріву. Зовнішні системи здатні нагрівати брухт до високих температур, але складні у впровадженні. Внутрішньоконвертерні режими є більш гнучкими та можуть бути реалізовані на існуючих агрегатах, проте потребують оптимізації параметрів і спеціального обладнання (паливно-кисневих фурм). У цьому зв'язку доцільно порівняти різні доступні режими підігріву брухту в конвертері, щоб визначити їх переваги, недоліки та потенціал підвищення енергоефективності плавки.

Формулювання мети дослідження

Метою роботи є теоретичний аналіз та експериментальне порівняння режимів попереднього підігріву металобрухту безпосередньо в порожнині кисневого конвертера з використанням різних видів палива та конструкцій фурм, а також оцінка їх потенціалу щодо збільшення частки брухту у шихті без погіршення технологічних показників плавки.

Виклад основного матеріалу

1. Теоретичні передумови та класифікація способів попереднього підігріву брухту.

З точки зору теплового балансу BOF-плавки, збільшення частки брухту супроводжується зростанням витрат теплоти на його нагрівання від температури навколишнього середовища до температури плавлення та перегріву. Відповідно, для збереження кінцевої температури сталі необхідно або підвищити температуру/нагрівальну здатність чавуну, або ввести додаткове паливо.

У даній роботі розглянуто чотири внутрішньоконвертерні режими підігріву:

1. спалювання кускового вугілля, завантаженого на поверхню брухту;
2. використання паливно-кисневої фурми з використанням природного газу та кисню;
3. вдування пиловугільного палива через паливно-кисневу фурму типу «труба в трубі» (носій — повітря), по кільцевому каналу — кисень.
4. утворення комбінованого газо-порошкового струменю (ПВП з транспортуючим газом + природний газ + O_2).

2. Методика проведення експериментів для досліджуваних режимів.

Режим 1 — спалювання кускового вугілля. На шар брухту завантажують газове (кам'яне) вугілля фракції 15—25 мм. Займання здійснюється малою порцією чавуну або факелом природного газу з киснем. На початковому етапі згоряють леткі, надалі — коксовий залишок. Метод простий та не потребує спеціальної арматури, проте характеризується нерівномірним нагрівом: верхні шари брухту перегріваються аж до оплавлення, нижні залишаються мало прогрітими.

Режим 2 — газокисневий пальник. Паливно-киснева фурма подає природний газ та технічний кисень. Формується спрямований факел, який інтенсивно нагріває верхній шар брухту. Переваги — регульованість співвідношення «газ/ O_2 », відносна простота автоматизації. Недоліки — локальний перегрів у зоні дії факела, додаткове теплове навантаження на футерівку, подовження тривалості плавки за рахунок окремої стадії підігріву.

Режим 3 — вдування пиловугільного палива через паливно-кисневу фурму. Фурма складається з центрального каналу для подачі пиловугільного палива у потоці стисненого повітря та кільцевого каналу для подачі O_2 . Після виходу з фурми частинки ПВП швидко запалюються, утворюючи інтенсивний радіаційний факел.

Режим 4 — комбінований газо-порошковий факел. ПВП транспортується в потоці газу (Ar або N_2 , при цьому аргон є хімічно інертним щодо залізвуглецевого розплаву, тоді як застосування азоту може супроводжуватися його частковим розчиненням у метали), до якого додається природний газ, а кисень подається окремо по зовнішньому кільцевому каналу. Така схема дозволяє змістити зону займання вглиб факела, забезпечити глибше проникнення частинок до шару брухту перед запаленням і сформувати довгий стаціонарний факел з високим радіаційним тепловим потоком. Режим є найбільш гнучким з точки зору керування профілем температури, але вимагає складнішої конструкції фурм та додаткових витрат несучого газу.

Експериментальні дослідження проводили на лабораторній моделі кисневого конвертера з імітацією завалки брухту та подачі палива/кисню через відповідну паливно-кисневу фурму [10]. Для кожного із режимів 1—4 відпрацьовували діапазони витрат палива та кисню, що забезпечують прийнятну стабільність горіння.

Оцінювали такі показники:

- час досягнення локального оплавлення поверхні брухту;
- наявність локального плавлення брухту у верхніх шарах;
- орієнтовну рівномірність прогріву завалки за висотою;
- відносну витрату O_2 на одиницю маси палива;
- технологічну зручність керування процесом (стабільність факела, чутливість до зміни витрат тощо).

3. Основні результати та їх обговорення.

У режимі 1 (кускове вугілля, O_2) встановлено, що збільшення тривалості підігріву призводить до інтенсивного оплавлення верхнього шару брухту при недостатньому прогріві нижніх

шарів. Процес є чутливим до нерівномірності розподілу вугілля в завалці, а контроль моменту припинення підігріву потребує постійного візуального нагляду.

У режимі 2 (газокисневий струмінь O_2 , природний газ) досягнуто більш керованого нагріву, однак характер розподілу температури залишається нерівномірним: зона дії факела перегріввається, тоді як значна частина брухту поза факелом прогріввається повільно. Це обмежує можливість суттєвого підвищення частки перероблюваного брухту без збільшення тривалості плавки.

Режим 3 (ПВП + повітря, O_2) продемонстрував найкращу рівномірність підігріву: поверхня брухту досягає температури 700–800 °С без явного плавлення, тоді як різниця температури між верхнім та нижнім шарами завалки зменшується у порівнянні з режимами 1–2. Завдяки малій крупності частинок, забезпечується висока швидкість тепловіддачі та краща рівномірність нагріву поверхні брухту. Аналізуючи графік на рис. 1, можна зробити висновок, що оптимальне співвідношення « O_2 /ПВП» знаходиться в діапазоні 1,0–1,35 m^3/kg та дозволяє мінімізувати як недопал палива, так і надлишкове окиснення. У цьому режимі час нагріву значно скорочується і вдається уникнути утворення зон локального оплавлення. Перевагами є рівномірність нагріву та висока ефективність використання енергії палива та кисню, що дозволяє підвищити частку брухту понад 25 % без втрати якості плавки. Недоліком залишається велика витрата кисню (хоча на одиницю теплового внеску вона менша, ніж у режимі з кусковим вугіллям, завдяки кращому теплообміну).

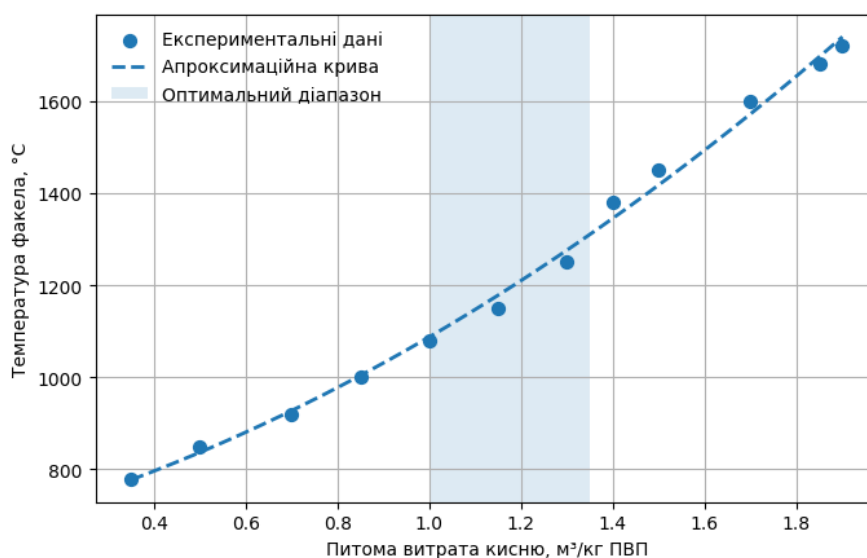


Рис. 1. Вплив питомої витрати кисню на температуру факелу ПВП

Режим 4 (ПВП + несучий газ N_2 або Ar + кисень + природний газ). Синтезує переваги режимів 2 і 3 шляхом одночасної подачі пилу в потоці азоту або аргону, додаванням невеликої кількості природного газу та кисню по кільцевому каналу. Такий носій (азот або аргон) дозволяє відтермінувати займання пилу від природного газу до моменту змішування з киснем, забезпечуючи глибше проникнення факела у шар брухту та, потенційно, ще більшу рівномірність нагріву по висоті. Природний газ виконує роль проміжного полум'я, яке ініціює займання пилових частинок при контакті з киснем, а комбінований факел створює довший і гарячіший полум'яний струмінь. Це дозволяє максимально ефективно прогріти навіть великі шматки брухту та звести до мінімуму втрати теплоти. Такий режим має на меті усунути нерівномірність нагріву поверхні брухту та зменшує загальний час технологічного циклу. Наразі цей режим перебуває на стадії дослідного опрацювання, однак перші досліди вказують на високий потенціал цього підходу.

Нижче (рис. 2) наведено фотофіксацію кожного з досліджуваних режимів попереднього підігріву брухту.

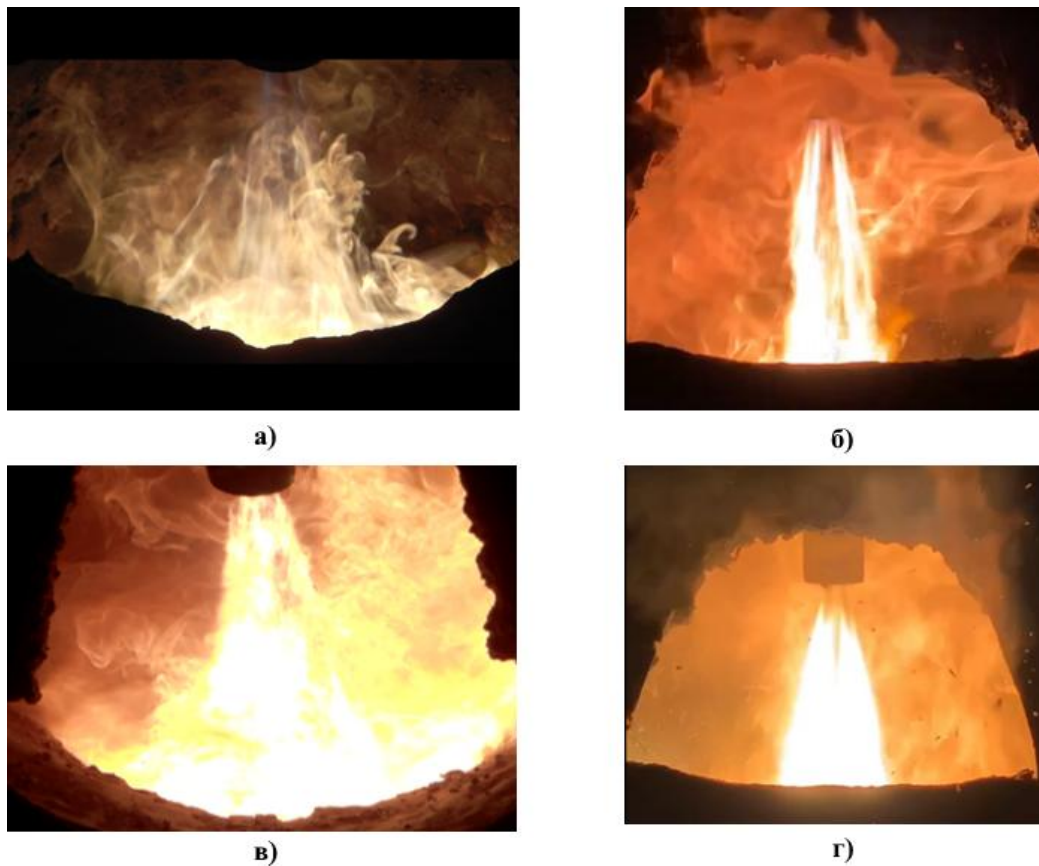


Рис. 2. Кадри режимів попереднього підігріву брухту: а) — режим 1 (підігрів за допомогою кускового вугілля); б) — режим 2 (газокисневий струмінь); в) — режим 3 (за допомогою пиловугільного палива); г) — режим 4 (комбінований режим)

Висновки

Вперше виконано якісну порівняльну оцінку за єдиним комплексом критеріїв (рівномірність нагріву завалки, ризик локального оплавлення брухту, відносні витрати кисню, технологічна керованість процесу) досліджуваних режимів попереднього підігріву брухту.

Збільшення частки металобрухту в шихті кисневого конвертера є ефективним інструментом підвищення ресурсо- та енергоефективності BF–BOF-маршруту, однак обмежується дефіцитом теплоти, що вимагає застосування технологій попереднього підігріву брухту. Серед можливих рішень перспективними є внутрішньоконвертерні режими, які використовують порожнину конвертера як камеру згоряння додаткового палива та можуть бути інтегровані в існуючу систему газоочистки. Режими, що базуються на спалюванні кускового вугілля та використанні газокисневих пальників, технологічно прості, проте забезпечують переважно локальний нагрів верхніх шарів брухту, що обмежує їх потенціал з точки зору суттєвого підвищення частки перероблюваного брухту.

Вдування пиловугільного палива через паливно-кисневу фурму типу «труба в трубі» забезпечує найбільш сприятливе поєднання швидкості та рівномірності підігріву брухту, дозволяючи нагрівати брухт до 700–800 °С без його локального плавлення та з помірними витратами кисню.

Комбінований газо-порошковий струмінь (ПВП + азот чи аргон + природний газ + O₂) має найбільший потенціал щодо інтенсифікації підігріву та подальшого підвищення частки брухту конвертерної плавки, однак потребує додаткових досліджень, спрямованих на оптимізацію конструкції фурм, параметрів подачі газів та оцінку техніко-економічної доцільності промислового впровадження.

Перспективним напрямом підвищення частки металобрухту в кисневому конвертері є розвиток технологій внутрішньоконвертерного підігріву з використанням пиловугільного палива, що забезпечує оптимальний баланс між інтенсивністю нагріву, керованістю процесу та енергоефективністю.

Список використаної літератури

1. Lytvyniuk Y., Shatokha V., Zajac M. Increased scrap utilization in converter steelmaking // *Millennium Steel*. 2023. P. 29–35.
2. Nagumanov R., Protopopov E., Chernyatevich A. Modeling results for preheating of scrap by means of coal pieces in a converter // *Steel in Translation*. 2011. Vol. 41, No. 4. P. 301–306.
3. Manazzone L. ISMELT — Inteco Scrap MELting Technology evolution // *Proc. Conf. on Electric Steelmaking*. 2021. P. 1–10.
4. New Scrap Preheating System for Electric Arc Furnace (UL-EPC System) // *Nippon Steel Technical Report*. 2002. No. 86. P. 52–58.
5. Xiao P., Jin Y., Zhu L. та ін. Comparative Study of Heat Transfer Simulation and Effects of Different Scrap Steel Preheating Methods // *Metals*. 2024. Vol. 14, No. 8. Article 913
6. Klein H., Liesch I., Iso H., Nakamura K. Scrap ratio increase by coal injection in the BOF // *Steelmaking Proceedings*. 1983. Vol. 68. P. 129–136.
7. Goedert F., Klein H., Henrion R. The ALCI Technology: ARBED Lance Coal Injection // *Fachberichte Hüttenpraxis Metallweiterverarbeitung*. 1986. Vol. 24, No. 4. P. 214–219.
8. Чернятевич А.Г., Похвалітій А.А., Сігарьов Є.М., Чубіна О.А., Кондрашенков Д.С. Використання пиловугільного палива для попереднього підігріву металобрухту // *Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету (технічні науки)*. 2024. Тематичний випуск до 95-річчя кафедри металургії. С. 123–131.
9. Yang H., Feng C., Li Y. et al. Typical Case of Converter Smelting with High Cooling Ratio in Chinese Iron and Steel Enterprises: CO₂ Emission Analysis // *Materials*. 2025. Vol. 18, No. 1. Article 65.
10. А.Г. Чернятевич, Є.М. Сігарьов, Л.С. Молчанов, А.А. Похвалітій, Д.С. Кондрашенков. Установка високотемпературного моделювання нагріву металевих брухту в конвертері // *XIII міжнар. наук.-практ. конф. «Металургія 2024»* (Київ–Харків), 28–30 травня 2024 р.

REVIEW OF METHODS FOR INCREASING THE SCRAP RATIO AND DEVELOPING PRELIMINARY SCRAP PREHEATING MODES IN A BASIC OXYGEN CONVERTER

Abstract

The paper addresses the problem of increasing the scrap ratio in basic oxygen furnace (BOF) steelmaking under conditions of a limited heat balance. While replacing part of hot metal with scrap is an effective way to improve the energy and resource efficiency of the BF–BOF route and to reduce CO₂ emissions, the scrap share in conventional BOF practice is usually restricted to about 10–25 % due to the lack of heat for scrap heating and melting. One of the most promising approaches to compensating this heat deficit is preliminary heating of scrap directly in the converter vessel using auxiliary fuels.

This study provided to perform a theoretical and experimental comparison of in-converter scrap preheating modes based on different fuels and oxy-fuel lance designs and to evaluate their potential to increase the scrap ratio without deterioration of technological performance. Four modes are analyzed: lump coal charged on top of the scrap, an oxy-fuel natural-gas lance, pulverized coal (PC) injection through a dual-flow oxy-fuel lance (air carrier), and a combined gas–powder flame (PC in inert gas with additional natural gas and oxygen).

Experiments on a laboratory converter model showed that lump coal and oxy-fuel lance modes mainly intensify heating of the upper scrap layers and are prone to non-uniform temperature fields and

local scrap melting, which limits their practical potential. PC injection through a dual-flow oxy-fuel lance provides the most favourable combination of heating rate and uniformity, enabling scrap surface temperatures of about 700–800 °C without visible melting and with moderate oxygen consumption. The combined gas–powder flame demonstrates the highest potential for further process intensification and higher scrap ratios, but requires additional research focused on lance design, gas flow control and techno-economic assessment for industrial implementation.

References

- [1] Lytvyniuk, Y., Shatokha, V., Zajac, M. (2023). Increased Scrap Utilization in Converter Steelmaking. *Millennium Steel*, 29–35.
- [2] Nagumanov, R., Protopopov, E., Chernyatevich, A. (2011). Modeling Results for Preheating of Scrap by Means of Coal Pieces in a Converter. *Steel in Translation*, 41(4), 301–306.
- [3] Manazzone, L. (2021). ISMELT — Inteco Scrap Melting Technology Evolution. *Proceedings of the Conference on Electric Steelmaking*, 1–10.
- [4] New Scrap Preheating System for Electric Arc Furnace (UL-EPC System). (2002). *Nippon Steel Technical Report*, No. 86, 52–58.
- [5] Xiao, P., Jin, Y., Zhu, L. [et al.] (2024). Comparative Study of Heat Transfer Simulation and Effects of Different Scrap Steel Preheating Methods. *Metals*, 14(8), Article 913.
- [6] Klein, H., Liesch, I., Iso, H., Nakamura, K. (1983). Scrap Ratio Increase by Coal Injection in the BOF. *Steelmaking Proceedings*, Vol. 68, 129–136.
- [7] Goedert, F., Klein, H., Henrion, R. (1986). The ALCI Technology: ARBED Lance Coal Injection. *Fachberichte Hüttenpraxis Metallweiterverarbeitung*, 24(4), 214–219.
- [8] Chernyatevich, A.G., Pokhvalityy, A.A., Sigarev, E.M., Chubina, O.A., Kondrashenkov, D.S. (2024). Vykorystannya pylovuhil'noho palyva dlya poperedn'oho pidihrivu metalobrukhtu [Use of pulverized coal fuel for preliminary heating of scrap metal]. *Collection of scholarly papers of Dniprovsk State Technical University (Technical Sciences), Special issue dedicated to the 95th anniversary of the Department of Metallurgy*, 123–131. [in Ukrainian].
- [9] Yang, H., Feng, C., Li, Y. [et al.] (2025). Typical Case of Converter Smelting with High Cooling Ratio in Chinese Iron and Steel Enterprises: CO₂ Emission Analysis. *Materials*, 18(1), Article 65.
- [10] Chernyatevich, A.G., Sigarev, E.M., Molchanov, L.S., Pokhvalityy, A.A., Kondrashenkov, D.S. (2024). Ustanovka vysokotemperaturnoho modelyuvannya nahrivu metalobrukhtu v konverteri [High-temperature modeling facility for scrap metal heating in a converter]. *Proceedings of the XIII International Scientific and Practical Conference “Metallurgy–2024” (Kyiv–Kharkiv, Ukraine), May 28–30, 2024*. [in Ukrainian].

Надійшла до редколегії 15.01.2026

Прийнята після рецензування 19.02.2026

Опублікована 26.03.2026