

DOI 10.31891/2307-5732-2024-337-3-62
УДК 669.1+669.162: 622.74++628.4

СМІРНОВ ОЛЕКСІЙ

Фізико-технологічний інститут металів та сплавів
<https://orcid.org/0000-0001-5247-3908>
e-mail: stalevoz@i.ua

КУХАР ВОЛОДИМИР

Технічний університет «Метінвест політехніка»
<https://orcid.org/0000-0002-4863-7233>
e-mail: kvy.mariupol@gmail.com

ІНТЕГРОВАНА ПЕРЕРОБКА ВІДХОДІВ МЕТАЛУРГІЙНОГО ТА ВУГЛЕЗБАГАЧУВАЛЬНОГО ВИРОБНИЦТВА З ВИКОРИСТАННЯМ МАЛОГАБАРИТНИХ ДОМЕННИХ ПЕЧЕЙ

У статті розглянуто можливості використання малогабаритних доменних печей для комплексної переробки металургійних та вуглезабагачувальних відходів. Показано, що ці печі дозволяють знизити витрати на виробництво чавуну за рахунок застосування вуглецевмісних окатишів, виготовлених із шламів. Особливістю технології є "холодне" виготовлення окатишів без випалу, що значно скорочує витрати на енергоносії. Комплекс передбачає повну утилізацію доменного газу, який використовується для генерації електроенергії та забезпечення технологічних процесів. Проектна потужність печей дозволяє переробляти до 200 тис. тон металургійних та до 40 тис. тон вуглезабагачувальних відходів щорічно. Основною проблемою залишається нестабільність складу залізцевмісних відходів, що потребує вдосконалення їх підготовки та підвищення стабільності постачання. Це забезпечить стабільну роботу комплексів протягом 15-20 років. Для ефективної роботи необхідне вдосконалення підготовки відходів та стабільність постачання сировини.

Ключові слова: малогабаритні доменні печі, переробка металургійних відходів, вуглецевмісні окатиші, енергоефективні технології, комплексна переробка відходів, утилізація доменного газу.

SMIRNOV OLEKSIY

Physico-Technological Institute of Metals and Alloys
KUKHAR VOLODYMYR
Technical University "Metinvest Polytechnic"

INTEGRATED WASTE PROCESSING OF METALLURGICAL AND COAL BENEFICIATION PRODUCTION USING SMALL BLAST FURNACES

This article examines the application of small blast furnaces (SBFs) for the integrated processing of metallurgical and coal beneficiation wastes. SBFs provide a cost-effective solution for pig iron production by utilizing carbon-containing pellets derived from metallurgical sludge and coal beneficiation residues. A key technological advantage lies in the production of unfired pellets, which eliminates the need for additional fuel consumption and significantly reduces energy costs. The research highlights the complete utilization of blast furnace gas within the complex, using it not only for the ironmaking process but also for electricity generation. This enables the furnace to operate with minimal reliance on external energy sources. The modular design of these furnaces allows for relocation to regions where waste supply is abundant, extending the furnace's operational lifespan. With a processing capacity of up to 200,000 tons of metallurgical waste and 40,000 tons of coal waste annually, these complexes are well-suited for regions with accumulated waste materials. However, the research identifies several challenges, including the variability in the composition of iron-containing wastes, particularly during winter months, which affects furnace performance. Addressing these issues requires the development of more consistent waste preparation processes tailored to the specific region's waste composition. The article concludes that with improved waste management and preparation, SBFs can ensure stable operation and continue to provide sustainable solutions for waste processing in the metallurgical sector for 15...20 years, supporting both cost-efficiency and environmental benefits.

Keywords: small blast furnaces, metallurgical waste processing, carbon-containing pellets, energy-efficient technologies, integrated waste processing, blast furnace gas utilization.

Постановка проблеми у загальному вигляді

та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Розвиток металургійних та переробних технологій, особливо міні- та мікродоменних печей, претендує стати ключовим фактором при відновленні післявоєнної промисловості. В умовах значного накопичення металевих брухтів різної консистенції, який залишився після бойових дій, ці технології надають можливість ефективної переробки відходів і повторного використання сировини. Малогабаритні доменні печі є ідеальними для гнучкої переробки як промислового брухту, так і залишків металів, забезпечуючи зниження витрат і енергоефективність в умовах обмежених ресурсів. Протягом останніх тридцяти-сорока років розвиток технологій доменної плавки суттєво вплинув на створення великих і високопродуктивних агрегатів. Як зазначено в роботах [1, 2], у світі збудовано понад 40 доменних печей з корисним об'ємом понад 4000 м³: серед них шість установок в Китаї, Японії, Індії та Європі, а також чотири в країнах пострадянського простору. В результаті цього старіші та менш об'ємні печі на металургійних комбінатах були замінені на сучасніші великі агрегати. Хоча збільшення масштабів виробництва залишається основою понад 70% світового виробництва чавуну і сталі, починаючи з 1990-х років, малогабаритні доменні печі з об'ємом до 1000 м³ почали знову використовуватися у металургії.

Аналіз досліджень та публікацій

Відповідно до прийнятих підходів до визначення доменної печі за розмірами [3, 4], малогабаритні доменні печі діляться на три категорії (табл. 1). Кожна з них зайняла своє місце на ринку. Особливо помітне

збільшення виробництва сталі на міні-металургійних заводах за останні три десятиліття, що сприяло впровадженню інноваційних технологій.

Таблиця 1

Систематизація доменних печей за об'ємом [3, 4]

Вид агрегату та міжнародне скорочене позначення	Корисний об'єм, м ³	Продуктивність, т/добу
Компактна ДП (CBF – Compact Blast Furnace)	500...1000	1000...2000
Мала або міні ДП (МДП) (MBF – Mini Blast Furnace)	100...500	300...1000
Мікро ДП (Micro Blast Furnace)	До 100	Менше 300

До основних результатів цієї політики відносяться:

По-перше, виробництво електросталі було розширено до сортаменту, який раніше випускався лише в кисневих конвертерах, що дозволило замінити їх [5, 6].

По-друге, освоєння випуску тонколистової сталі, зокрема автомобільного листа, сприяло використанню в дугових печах рідкого чавуну, заліза прямого відновлення та інших первинних матеріалів [7].

У цьому контексті печі типу CBF (див. табл. 1) успішно інтегрувалися в виробничі процеси на малих металургійних заводах [8]. Значні капіталовкладення, які раніше були необхідні для традиційних доменних печей, були скорочені завдяки застосуванню модульної конструкції, яка дозволяє зручно розміщувати й з'єднувати їх у загальну технологічну лінію. Це стосується таких компонентів, як повітрянагрівачі, склади для сировини, а також інші важливі вузли та елементи.

Печі серії MBF (див. табл. 1) на сьогодні використовуються в рамках двох стратегій, що передбачають гнучке використання сировини [3, 4]. Перша стратегія орієнтована на виробництво передільного чавуну з кускової руди (агломерату), вміст заліза в якій становить 65,0...66,0%. Також використовуються окатиші та брикети, а для спалювання — деревне вугілля або кам'яновугільний кокс. Найпопулярнішими є печі з об'ємами 135, 150, 215, 300 і 350 м³, які здатні виробляти від 100 до 250 тисяч тон чавуну щорічно. Комплекси, що містять кілька таких печей, можуть забезпечити стабільне й економічне постачання чавуну для міні-металургійних підприємств.

Альтернативна стратегія передбачає використання малогабаритних доменних печей серії MBF для обробки нетрадиційних відходів, не обмежуючись лише металевим брухтом або відходами чорних металів [3, 4]. До таких відходів можна віднести пластикові матеріали, а також шлами, що утворюються у процесах гальванічного виробництва. Упродовж останніх двох десятиліть було досягнуто значного прогресу в технологіях введення дрібнодисперсних матеріалів у доменні печі. Сюди входять, наприклад, пил рукавних фільтрів, колошниковий пил та інші вторинні ресурси, а також використання ільменіту та синтетичних матеріалів, зокрема рутиліту, що містять титан.

Малогабаритні доменні печі, відомі як Micro Blast Furnace (MBF), хоча й мають певні обмеження у продуктивності, мають важливу перевагу — невелику робочу висоту (до 10...12 метрів). Це робить їх придатними для ефективною переробки дрібнодисперсних металургійних відходів, попередньо компактованих у вигляді окатишів або брикетів, а в деяких випадках — агломерату [9, 10]. Для створення стійких брикетів зазвичай використовують такі зв'язувальні матеріали, як цемент, рідке скло (сілкат натрію), меласу та інші сполуки.

Використання зв'язувальних компонентів відкриває можливості для більш комплексної переробки оксидних залізистих відходів разом із відходами вуглебагачення. Цей процес починається з компактування відходів у вуглецевмісні окатиші або брикети [11, 12]. Однією з ключових переваг використання такої порошкової суміші є поступове нагрівання шихти під час її опускання. За температури близько 1000°C у брикетах починає відбуватися процес прямого відновлення заліза завдяки реакції оксидів заліза з відновлювальним газом CO. Це явище, відоме як "самовідновлення", дозволяє розплавити залізо та додаткові металовмісні компоненти в зоні плавлення [13, 14]. Найбільш активна ця реакція при температурі приблизно 1400 °C [15].

Проведені дослідження показують, що малогабаритні доменні печі мають великий потенціал для використання у таких промислових регіонах світу, як Пенсільванія (США), Південний Уельс (Велика Британія), Лотарингія (Франція) і Верхня Сілезія (Польща), де спостерігається значне скупчення металургійних відходів, що можуть бути успішно перероблені.

Формулювання цілей статті

Метою цього дослідження є оцінка ефективності технології використання малогабаритної доменної печі для комплексної переробки відходів, що утворюються у процесах металургійного виробництва та збагачення вугілля.

Виклад основного матеріалу

Дослідження проводилося в умовах комплексу, який використовує шлами з відстійників вуглебагачення (до 20%) і металургійного виробництва (до 80%). Комплекс оснащений доменною піччю малого об'єму з корисним об'ємом 70 м³, що було надано китайським постачальником. Метою комплексу є випуск продукції у вигляді передільного чавуну, гранульованого шлаку та виробництво електроенергії. Технологічна схема комплексу подана на рисунку.

Проектна потужність комплексу передбачає переробку до 200 тис. тон металургійних відходів і до 40 тис. тон відходів вуглезабагачення щорічно. При цьому запланований випуск передільного чавуну становить 100 тис. тон на рік, а гранульованого шлаку — 60 тис. тон.

З урахуванням обсягів накопичених відходів у вищезазначених регіонах, робота комплексу може забезпечити стабільне постачання сировини протягом 15...20 років. Модульна структура комплексу дозволяє швидко та недорого здійснювати його демонтаж, монтаж і переміщення в інші регіони, що значно зменшує витрати на транспортування сировини.

До складу комплексу входять такі ділянки (див. рис. 1):

- ділянка підготовки сировини, рудний двір, склад готової продукції, резервний склад сировини;
- ділянка виробництва безобпалювальних вуглецевмісних окатишів;
- плавильна ділянка з доменною піччю малого об'єму на 70 м³;
- ділянка розливу та грануляції доменного шлаку;
- енергетичний блок.

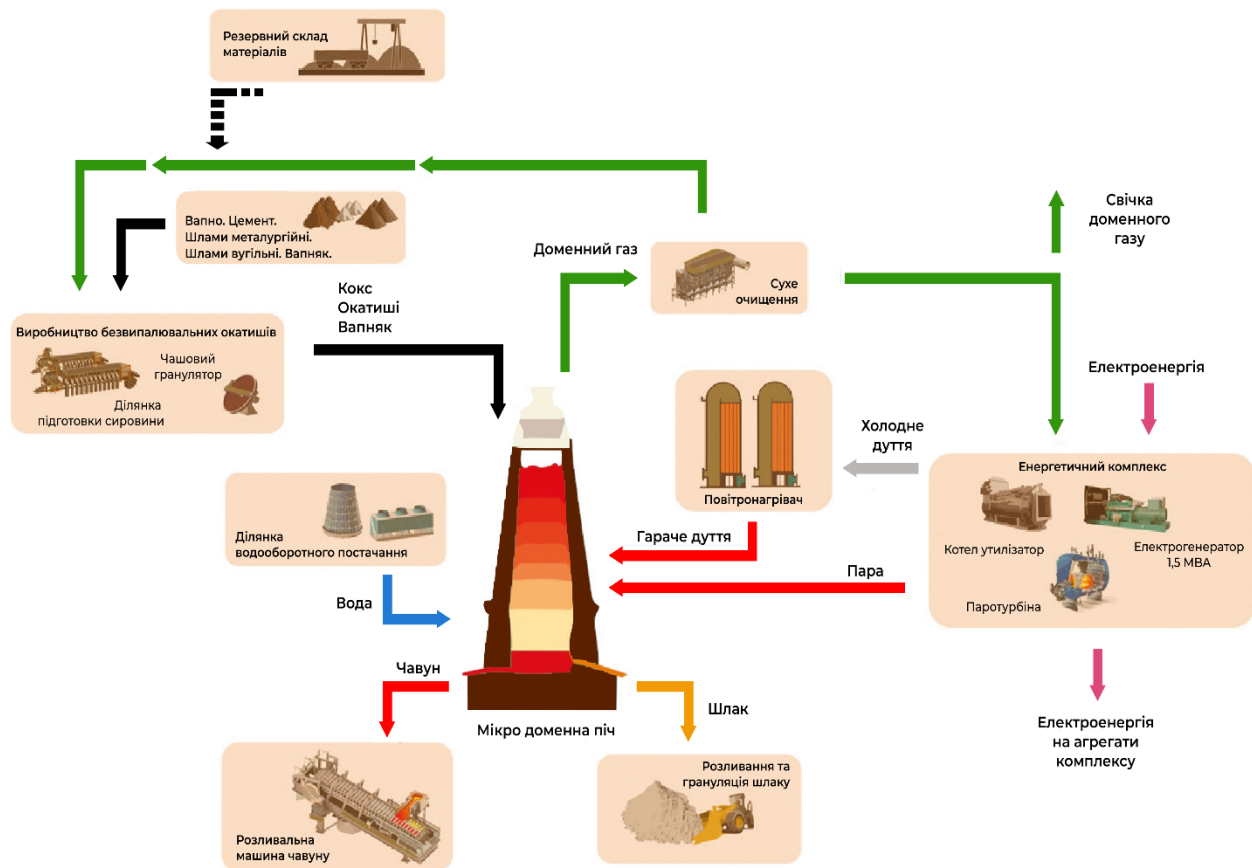


Рис. 1. Технологічна схема комплексу з утилізації шламів вуглезабагачення та металургійного виробництва з використанням малогабаритної доменної печі

Цей комплекс відзначається кількома енергоощадними технологічними особливостями.

По-перше, випуск рідкого чавуну відбувається безпосередньо до машини розливу за допомогою системи жолобів, що усуває необхідність транспортування ківшами.

По-друге, переміщення матеріалів у межах комплексу виконується автомобільним транспортом, зокрема, навантажувачами. Залізничний транспорт використовується лише для доставки вихідної сировини.

По-третє, споживання зовнішніх енергоресурсів або виключено (при використанні природного газу та електроенергії), або мінімізовано (при використанні технічної води для підживлення систем). Наявність енергетичного блоку, що включає котел-утилізатор доменного газу, парову турбіну та електрогенератор потужністю 1,5 МВт із замкнутим циклом водопостачання, дозволяє знизити споживання зовнішньої енергії. Відхідні гази з теплотворною здатністю 3,6...4,6 МДж/м³ використовуються для виробництва електроенергії. Генерована електрика спрямовується на забезпечення роботи всіх механізмів і систем комплексу, освітлення та обігрів будівель. Крім того, продукти згоряння після турбіни використовуються на ділянці сушки вуглецевмісних окатишів.

Впроваджена система замкнутого водопостачання передбачає очищення, охолодження та спеціальну обробку води реагентами, що запобігають утворенню накипу, корозії та біологічному обростанню поверхонь. У нормальних умовах технологічного процесу вода не скидається у водойми, а для підтримання постійного рівня її періодично поповнюють.

Попередні лабораторні випробування технології виробництва вуглецевмісних окатишів проводилися з використанням обладнання: лабораторного дискового подрібнювача ЛДІ-65, ситового аналізатора АСВ-30, лабораторного окатишувача та електричної печі ТК.20.1300.Ш.3Ф. Міцність окатишів перевіряли за допомогою преса ПРГ-1-10.

Випробування показали, що стабільна робота технологічного процесу виготовлення вуглецевмісних окатишів досягалася, коли їх склад відповідав даним табл. 2, з урахуванням специфіки сировини (тип шламу, фракційний склад, вологість тощо).

Подальша експлуатація малогабаритної доменної печі підтвердила ефективність прийнятого рішення. Усереднені за три місяці витрати сировини та енергоносіїв на виробництво 1 тони чавуну наведені в табл. 3.

Таблиця 2

Усереднені витрати сировини на виготовлення 1 т вуглецевмісних окатишів

Вид сировини або відходів	Обсяг, т
Залізовмісні відходи (в тому числі пилоподібні)	0,828
Вапно	0,05
Цемент	0,01
Вугілля (шлам вуглезбагачення)	0,11
Каталізатор	0,005

Таблиця 3

Питомі витрати сировини та енергоносіїв, необхідних для отримання 1 т чавуну при роботі малогабаритної доменної печі на вуглецевмісних окатишах

Вид сировини	Обсяг
Вуглецевмісні окатиші, т	2,011
Кокс, т	0,350
Електроенергія, кВт·год	31,0
Вода технічна, м ³	0,23
Коефіцієнт використання корисного об'єму печі	0,3

Попри позитивні результати, виявлені певні недоліки. Потужність з виробництва чавуну, заявлена постачальником обладнання, була завищена: фактичний обсяг виробництва чавуну за рік склав близько 78 тис. тон, що збігається з результатами експертної оцінки у 80 тис. тон [14, 16].

Одним із факторів, що вплинув на продуктивність печі та стабільність плавки, була нестабільність фракційного та хімічного складу залізовмісних відходів. На відміну від стабільних характеристик шламу вуглезбагачення, залізовмісні відходи містили різні фракції зі шлакових відвалів, окалину та пил. Усереднення компонентів перед виготовленням вуглецевмісних окатишів допомогло наблизити їх склад до рекомендованого.

Нестабільність постачання залізовмісних відходів, особливо в холодний період, значно впливала на їхній склад, що створювало проблеми в процесі плавки. Виникали численні затримки через зависання шихти, нестабільний вихід чавуну, підвищені витрати коксу та коливання об'ємів газу, що утворюється. Це призвело до необхідності відмовитися від хаотичного використання різних видів відходів. Також виникла потреба в удосконаленні підготовки залізовмісних відходів перед створенням вуглецевмісних окатишів, з урахуванням стабільності їх постачання на 10...15 років.

Основні енергозберігаючі та екологічні переваги комплексу включають:

- виробництво окатишів для доменної плавки без випалу, що дозволяє значно знизити енерговитрати.
- відмова від використання природного газу під час доменної плавки.
- повна утилізація доменного газу для забезпечення технологічного процесу та вироблення електроенергії, що також може передаватися до зовнішніх мереж для інших споживачів.
- скорочення витрат на кокс у процесі виробництва чавуну.
- оптимізація споживання технічної води завдяки замкнутому циклу водопостачання, що дозволяє скоротити витрати на 50%.
- основною сировиною є шлами, що допомагає зменшити екологічний тиск на регіон.

Висновки з даного дослідження

і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

У рамках дослідження було оцінено можливості використання малогабаритних доменних печей як для металургійного виробництва, так і для обробки відходів. Виявлено, що малогабаритні печі (до 12 м заввишки) ефективні для комплексної переробки металургійних і вуглезбагачувальних відходів, оскільки дозволяють виготовляти окатиші або брикети без випалу. На прикладі комплексу з піччю об'ємом 70 м³ показано, що використання вуглецевмісних окатишів, виготовлених із шламів металургійного виробництва, дозволяє скоротити витрати на виробництво однієї тони чавуну. Однак стабільна робота печі потребує подальшого вдосконалення підготовки залізовмісних відходів для виготовлення окатишів. Перспективи подальших досліджень малогабаритних доменних печей включають оптимізацію процесів переробки різних

типів відходів, зокрема залізовмісних і вуглецевмісних матеріалів, для підвищення енергоефективності та зниження витрат на виробництво чавуну. Особлива увага повинна бути приділена розвитку технологій приготування сировини для більш стабільного використання печей, що дозволить забезпечити довгострокову експлуатацію в умовах зростаючого попиту на екологічні та енергоощадні рішення.

Література

1. Смірнов О. М. Основи металургії: виробництво чавуну / О. М. Смірнов, А. Ю. Семенко, Ю.П. Скоробагатко, М. С. Горюк. – Одеса: Олді+, 2023. – 192 с.
2. Naito M. Ironmaking Technology for the Last 100 Years: Deployment to Advanced Technologies from Introduction of Technological Know-how, and Evolution to Next-generation Process / M. Naito, K. Takeda, Y. Matsui // *ISIJ International*. – 2015. – Vol. 55, No. 1. – P. 7–35. – DOI: 10.2355/isijinternational.55.7.
3. Engel E. Modern mini and compact blast furnaces: operations-based design considerations / E. Engel, V. van Straaten, R. Vaynshteyn // *Proceedings of the Ironmaking, Iron Ore and Agglomeration Seminars: 45° Ironmaking, 16° Iron Ore, 3° Agglomeration*. – 2015. – Vol. 45, No. 45. – P. 237–245. – DOI: 10.5151/4444-4444-26401.
4. Adilson de Castro J. The Mini Blast Furnace Process: An Efficient Reactor for Green Pig Iron Production Using Charcoal and Hydrogen-Rich Gas: A Study of Cases / J. Adilson de Castro, G.A.d. Medeiros, E.M.d. Oliveira, M.F. de Campos, H. Nogami // *Metals*. – Vol. 10, No. 11, 2020. – pp. 1501. – DOI: 10.3390/met10111501.
5. Yanping B. Steelmaking / B. Yanping, L. Shiqi // *The ECPH Encyclopedia of Mining and Metallurgy*. In: Kuangdi X. (ed.) – Singapore: Springer, 2024. – pp. 2038–2043. – DOI: 10.1007/978-981-99-2086-0_995.
6. What is steel and how is steel made? (2020) // EUROFER [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.eurofer.eu/about-steel/learn-about-steel/what-is-steel-and-how-is-steel-made>.
7. Satyendra. Use of Direct Reduced Iron in Electric Arc Furnace // IspatGuru [Електронний ресурс]. – 2013. – Режим доступу: <https://www.ispatguru.com/use-of-direct-reduced-iron-in-electric-arc-furnace>.
8. Reufer F. Compact blast furnace as a modern alternative for iron-making also in minimills / F. Reufer, M. Gantenberg, R. Bertling, G. Schieber // *Stahl und Eisen*. – 1999. – Vol. 119, № 11. – P. 45–50.
9. Engel E. Modern Mini and Compact Blast Furnaces: Operations-based Design Considerations [Електронний ресурс] / E. Engel // *Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração*. – 2017. – 9 p. – Режим доступу: <https://onemine.org/documents/modern-mini-and-compact-blast-furnaces-operations-based-design-considerations>.
10. Satyendra. Mini Blast Furnace and Iron making // IspatGuru [Електронний ресурс]. – 2016. – Режим доступу: <https://www.ispatguru.com/mini-blast-furnace-and-iron-making>.
11. Кияшко В.Т. Перспективні напрями утилізації відходів гірничо-збагачувального виробництва / В.Т. Кияшко, І.В. Салій, Л.О. Яковенко, Ю.О. Малиновський // *Екологічні науки*. – 2020. – № 4(31). – С. 103–106. – DOI: 10.32846/2306-9716/2020.eco.4-31.15.
12. Ожогін В.В. Спосіб і установка для переробки залізовмісних відходів металургійного виробництва / В.В. Ожогін, І.А. Ковалевський, Л.І. Тарасюк, В.Б. Семакова // *Вісник Приазовського Державного Технічного Університету. Серія: Технічні науки*. – 2020. – Вип. 39. – С. 18–26. – DOI: 10.31498/2225-6733.39.2019.20103.
13. Yongyi Y. Blast Furnace Ironmaking / Y. Yongyi, D. Hegui, W. Keng, Z. Jianliang, X. Kuangdi // *The ECPH Encyclopedia of Mining and Metallurgy*. In: Xu K. (ed.) – Singapore: Springer, 2023. – P. 1–8. – DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-19-0740-1_1006-1.
14. Kardys G. Ironmaking 101 – From Ore to Iron with Blast Furnaces [Електронний ресурс] / G. Kardys // *GlobalSpec*. – 2017. – Режим доступу: <https://insights.globalspec.com/article/6746/ironmaking-101-from-ore-to-iron-with-blast-furnaces>.
15. Li S. Thermodynamic analysis and experimental verification of the direct reduction of iron ores with hydrogen at elevated temperature / H. Gu, A. Huang, Y. Zou, S. Yang, L. Fu // *Journal of Materials Science*. – 2022. – Vol. 57. – P. 20419–20434. – DOI: 10.1007/s10853-022-07855-9.
16. Cavaliere P. Blast Furnace: Most Efficient Technologies for Greenhouse Emissions Abatement / P. Cavaliere // *Clean Ironmaking and Steelmaking Processes*. – Cham: Springer, 2019. – P. 167–273. – DOI: 10.1007/978-3-030-21209-4_4.

References

1. Smirnov, O. M., Semenko, A. Y., Skorobagatko, Y. P., & Goryuk, M. S. (2023). *Osnovy metalurgii: vyrobnytsvo chavyunu* [Basics of Metallurgy: Pig Iron Production]. Odessa: Oldi+.
2. Naito, M., Takeda, K., & Matsui, Y. (2015). Ironmaking technology for the last 100 years: Deployment to advanced technologies from introduction of technological know-how, and evolution to next-generation process. *ISIJ International*, 55(1), 7–35. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.55.7>
3. Engel, E., van Straaten, V., & Vaynshteyn, R. (2015). Modern mini and compact blast furnaces: Operations-based design considerations. In *Proceedings of the Ironmaking, Iron Ore and Agglomeration Seminars: 45° Ironmaking, 16° Iron Ore, 3° Agglomeration* (Vol. 45, No. 45, pp. 237–245). <https://doi.org/10.5151/4444-4444-26401>
4. Adilson de Castro, J., Medeiros, G. A. d., Oliveira, E. M. d., de Campos, M. F., & Nogami, H. (2020). The mini blast furnace process: An efficient reactor for green pig iron production using charcoal and hydrogen-rich gas: A study of cases. *Metals*, 10(11), 1501. <https://doi.org/10.3390/met10111501>

5. Yanping, B., & Shiqi, L. (2024). Steelmaking. In X. Kuangdi (Ed.), *The ECPH Encyclopedia of Mining and Metallurgy* (pp. 2038–2043). Singapore: Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-99-2086-0_995
6. What is steel and how is steel made? (2020). EUROFER. Retrieved from <https://www.eurofer.eu/about-steel/learn-about-steel/what-is-steel-and-how-is-steel-made>
7. Satyendra. (2013). Use of direct reduced iron in electric arc furnace. IspatGuru. Retrieved from <https://www.ispatguru.com/use-of-direct-reduced-iron-in-electric-arc-furnace>
8. Reufer, F., Gantenberg, M., Bertling, R., & Schieber, G. (1999). Compact blast furnace as a modern alternative for iron-making also in minimills. *Stahl und Eisen*, 119(11), 45–50.
9. Engel, E. (2017). Modern mini and compact blast furnaces: Operations-based design considerations [PDF]. Associacao Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineracao. Retrieved from <https://onemine.org/documents/modern-mini-and-compact-blast-furnaces-operations-based-design-considerations>
10. Satyendra. (2016). Mini blast furnace and iron making. IspatGuru. Retrieved from <https://www.ispatguru.com/mini-blast-furnace-and-iron-making>
11. Kiyashko, V. T., Saliy, I. V., Yakovenko, L. O., & Malynovskyi, Y. O. (2020). Prospective directions for the utilization of mining and beneficiation production wastes. *Ekologichni nauky*, 4(31), 103–106. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2020.eco.4-31.15>
12. Ozhogin, V. V., Kovalevskyi, I. A., Tarasyuk, L. I., & Semakova, V. B. (2020). Method and installation for processing iron-containing metallurgical waste. *Visnyk Pryazovskoho Derzhavnogo Tekhnichnoho Universytetu. Tekhnichni nauky*, (39), 18–26. <https://doi.org/10.31498/2225-6733.39.2019.20103>
13. Yongyi, Y., Hegui, D., Keng, W., Jianliang, Z., & Kuangdi, X. (2023). Blast furnace ironmaking. In K. Xu (Ed.), *The ECPH Encyclopedia of Mining and Metallurgy* (pp. 1–8). Singapore: Springer. https://doi.org/10.1007/978-981-19-0740-1_1006-1
14. Kardys, G. (2017). Ironmaking 101 – From ore to iron with blast furnaces. GlobalSpec. Retrieved from <https://insights.globalspec.com/article/6746/ironmaking-101-from-ore-to-iron-with-blast-furnaces>
15. Li, S., Gu, H., Huang, A., Zou, Y., Yang, S., & Fu, L. (2022). Thermodynamic analysis and experimental verification of the direct reduction of iron ores with hydrogen at elevated temperature. *Journal of Materials Science*, 57, 20419–20434. <https://doi.org/10.1007/s10853-022-07855-9>
16. Cavaliere, P. (2019). Blast furnace: Most efficient technologies for greenhouse emissions abatement. In *Clean Ironmaking and Steelmaking Processes* (pp. 167–273). Cham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-21209-4_4