

Чупринов Є.В., Кассім Д.О., Ляхова І.А., Григор'єва В.Г., Реков Ю.В.

Шляхи вдосконалення технології й обладнання для виробництва агломерату

Chuprynov Ye.V., Kassim D.O., Liakhova I.A., Hryhorieva V.H., Rekov Yu.V.

Ways to improve technology and equipment for sinter production

Анотація. Стаття присвячена комплексному аналізу ключових напрямків удосконалення технологій та обладнання у виробництві агломерату, що є критично важливим для оптимізації металургійних процесів та мінімізації економічних витрат. За результатами семантичного аналізу інформаційних потоків, що визначають інтерес до досліджень у металургії, виділено чотири ключові компоненти: "технологія", "сировина", "обладнання" та "екологія". Автори наголошують на необхідності системного підходу до модернізації агломераційного виробництва з метою створення нових технологій, поліпшення підготовки сировини, розробки обладнання нового покоління та зменшення негативного впливу на навколишнє середовище. У статті детально розглядаються вісім цільових функцій оптимізації процесу агломерації, включаючи питому продуктивність агломашинали, стабільність хімічного складу агломерату (вміст заліза та основності), частку дрібних фракцій, діапазон фракційного складу, міцність на удар та стирання, а також відновлюваність. Проводиться порівняння сучасних показників агломерату з вимогами доменної плавки, виявлені значні розбіжності. Наводяться структуровані заходи, спрямовані на досягнення оптимальних значень кожної з цільових функцій, з урахуванням того, що ці фактори та функції не є адитивними. Підкреслюється, що економізація виробництва агломерату не завжди збігається з економізацією його використання в доменній плавці, зокрема, підвищення міцності агломерату може негативно позначитися на його відновлюваності та економічних показниках. Особлива увага приділяється питанню підвищення відновлюваності агломерату, що є ключовим для зниження витрат коксу в доменному виробництві. Розглядаються технологічні рішення для збільшення продуктивності агломашинали, стабілізації хімічного складу агломерату (шляхом ефективного усереднення шихтових матеріалів та точного дозування), підвищення вмісту заліза (використання високоякісної руди, концентратів, гібридних матеріалів) та оптимізації основності. Окремо висвітлюється значення вузького фракційного складу агломерату для забезпечення стабільного газодинамічного режиму доменної плавки. На основі аналізу представлених даних і світового досвіду (Японія, Бельгія) робиться висновок про те, що інвестиції у підвищення якості агломерату та коксу на початкових етапах виробництва окупаються за рахунок суттєвого зниження витрат коксу та зростання продуктивності доменних печей. Стаття містить конкретні рекомендації щодо реконструкції та розробки нового обладнання для реалізації запропонованих удосконалень.

Ключові слова: виробництво агломерату, інновації, удосконалення технологій, модернізація обладнання, оптимізація.

Abstract. The article is devoted to a comprehensive analysis of key areas for improving technologies and equipment in sinter production, which is critically important for optimizing metallurgical processes and minimizing economic costs. Based on the results of a semantic analysis of information flows that determine interest in research in metallurgy, four key components have been identified: "technology," "raw materials," "equipment," and "ecology." The authors emphasize the need for a systematic approach to the modernization of sintering production in order to create new technologies, improve raw material preparation, develop new-generation equipment, and reduce the negative impact on the environment. The article examines in detail eight target functions for optimizing the sintering process, including the specific productivity of the sintering machine, the stability of the chemical composition of the sinter (iron content and basicity), the proportion of fine fractions, the range of fractional composition, impact and abrasion resistance, and recoverability. A comparison of current sinter indicators with blast furnace smelting requirements is carried out, revealing significant discrepancies. Structured measures aimed at achieving optimal values for each of the target functions are presented, taking into account that these factors and functions are not additive. It is emphasized that economizing on sinter production does not always coincide with economizing on its use in blast furnace smelting; in particular, increasing the strength of sinter can negatively affect its recoverability and economic performance. Particular attention is paid to the issue of increasing the recoverability of sinter, which is key to reducing coke consumption in blast furnace production. Technological solutions are considered to increase the productivity of sintering machines, stabilize the chemical composition of sinter (through effective averaging of charge materials and accurate dosing), increase the iron content (using high-quality ore, concentrates, hybrid materials), and optimize basicity. The importance of a narrow fraction composition of sinter for ensuring a stable gas-dynamic regime of blast furnace smelting is highlighted separately. Based on the analysis of the presented data and world experience (Japan, Belgium), it is concluded that investments in improving the quality of sinter and coke at the initial stages of production pay off due to a significant reduction in coke consumption and an increase in the productivity of blast furnaces. The article contains specific recommendations for the reconstruction and development of new equipment to implement the proposed improvements.

Key words: sinter production, innovation, technology improvement, equipment modernization, optimization.

© Chuprynov Ye.V. - State University of Economics and Technologies, Kryvyi Rih, Ukraine

Kassim D.O. - State University of Economics and Technologies, Kryvyi Rih, Ukraine

Liakhova I.A. - State University of Economics and Technologies, Kryvyi Rih, Ukraine

Hryhorieva V.H. - State University of Economics and Technologies, Kryvyi Rih, Ukraine

Rekov Yu.V. - Technical University "Metinvest Polytechnic", Zaporizhzhia, Ukraine



This is an Open Access article under the CC BY 4.0 license <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Вступ

Сучасний металургійний комплекс стоїть перед низкою серйозних викликів, зумовлених зростаючими вимогами до якості сировини, необхідністю оптимізації виробничих витрат та посиленням екологічних норм [1]. У цьому контексті виробництво агломерату, як ключового компонента шихти доменних печей, набуває стратегічного значення. Ефективність та конкурентоспроможність металургійних підприємств безпосередньо залежать від металургійних властивостей агломерату, що визначають стабільність та продуктивність подальших переділів [2-4]. Семантичний аналіз сучасних інформаційних потоків у галузі підтверджує, що фокус досліджень та розробок зосереджений на комплексній взаємодії технології, сировини, обладнання та екології [5-8]. Це свідчить про глибоке розуміння необхідності системного підходу до вдосконалення агломераційного виробництва.

Однак, незважаючи на постійні зусилля, аналіз показує, що показники якості агломерату, що виробляється на багатьох вітчизняних аглофабриках, часто не відповідають сучасним вимогам доменної плавки, а техніко-економічні показники його виробництва далекі від оптимальних значень [9-10]. Це створює нагальну потребу в інтенсифікації роботи над пошуком та впровадженням інноваційних рішень. Дана стаття має на меті систематизувати та проаналізувати основні напрямки вдосконалення технологій та обладнання у виробництві агломерату. Ми зосередимося на ключових цільових функціях, оптимізація яких дозволить не тільки покращити якісні характеристики кінцевого продукту, а й забезпечити значне зниження виробничих витрат та екологічного навантаження. Розгляд цих аспектів є критично важливим для забезпечення конкурентоспроможності металургійної галузі в умовах мінливого світового ринку.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Семантичний аналіз (контент-аналіз) інформаційних потоків, що визначає інтенсивність зростання інтересу до досліджень і розробок у металургії, показує, що високий інтерес в однокладовому ряді визначається терміном «технологія», у двокладовому – «технологія-сировина», у трискладовому – «технологія-сировина-обладнання», у чотирискладовому (завжди необхідно враховувати й екологічний аспект) – «технологія-сировина-обладнання-екологія».

Таким чином, семантичний аналіз з високим ступенем об'єктивності показує, що мінімізація економічних витрат у галузі повинна базуватися на вирішенні комплексної проблеми [11-14]: створення нових технологій для отримання сировини з новими властивостями, її підготовки до рудно-термічних процесів і плавлення, створення обладнання нового покоління для реалізації цих технологій, що мають мінімальний вплив на навколишнє середовище.

Виходячи з вищесказаного, видається можливим сформувати системний перелік технологій виробництва металургійної сировини, що освоюються і є перспективними для впровадження в різних переділах і способах виробництва [15, 16]. У даній статті розглядається тільки виробництво агломерату.

Для оптимізації цільових функцій процесу агломерації, таких як: питома продуктивність агломеративної машини, стабільність хімічного складу агломерату (вміст $Fe_{сер} \geq 59 \pm 0,3 \%$, основність $CaO/SiO_2 \geq 1,8 \pm 0,03$ д. о.), частка дрібної фракції 0-5 мм у готовому продукті ($\leq 2-4 \%$), діапазон фракційного складу 10-40 мм, міцність на удар (+5 мм) $\geq 76,5 \%$ і стиранність (-0,5 мм) $\leq 5-6 \%$ у барабані, відновлюваність більше 0,5 %/хв., необхідно структурувати заходи щодо досягнення оптимальних значень кожної функції окремо. В якості оптимальних у цільових функціях наведено чисельні значення, реально досягнуті на передових металургійних підприємствах Росії, Китаю, Японії, Західної Європи та Північної Америки [17].

Свого часу були розроблені вимоги доменної плавки до металургійних характеристик окискової залізорудної сировини [18], зокрема до агломерату. Порівняння цих вимог з показниками виробленого сьогодні агломерату показує, що агломерат багатьох аглофабрик не відповідає цим вимогам (табл. 1).

Мета і завдання досліджень

Метою дослідження є комплексне вдосконалення технологій та обладнання у виробництві агломерату для підвищення його якості, зниження витрат та мінімізації впливу на довкілля. Для цього необхідно проаналізувати сучасний стан галузі, виявити ключові фактори, що впливають на властивості агломерату, та визначити оптимальні технологічні параметри. Дослідження також включає розробку інноваційних рішень для підготовки шихти, оптимізації процесу спікання та подальшої обробки аглоспека.

Окрім цього, важливим завданням є обґрунтування пропозицій щодо модернізації існуючого та розробки нового обладнання, що дозволить реалізувати ці удосконалення. На завершення буде проведена оцінка економічної та екологічної ефективності запропонованих рішень. Це дозволить підтвердити їхню доцільність для підвищення конкурентоспроможності металургійних підприємств шляхом зниження собівартості продукції та покращення техніко-економічних показників доменної плавки.

Матеріали та методи досліджень

У статті використано семантичний аналіз (контент-аналіз) інформаційних потоків для визначення інтенсивності зростання інтересу до досліджень та розробок у металургії, виділяючи ключові терміни ("технологія", "сировина", "обладнання", "екологія") у одно-, дво-, три- та чотирискладових рядах. Проведене порівняння розроблених вимог доменних печей до металургійних характеристик окискової залізорудної сировини з фактичними показниками

агломерату, що виробляється на сучасних аглофабриках. Проаналізовані промислові проплавки гібридного окускованого матеріалу на доменній печі №2 ВАТ "Дніпровський металургійний завод ім. Петровського", а також експеримент на доменній печі

№6 ПАТ "АрселорМіттал Кривий Ріг" із заміни фракції доломітизованого вапняку. Це підтверджує використання практичних випробувань для перевірки гіпотез та ефективності запропонованих рішень.

Таблиця 1. Сучасні вимоги доменної плавки до металургійних характеристик агломерату та окатишів

Найменування показників	Агломерат	Окатиші
1. В холодному стані		
1.1. Міцність на стиснення, кг/ок (ДСТУ 3206-95)	–	не менше 200
1.2. Вміст в готовій продукції окатишів з міцністю на стиснення більше 200 кг/ок, %	–	не менше 90,0
1.3. Коефіцієнт міцності (+5 мм), % (ДСТУ 3200-95)	не менше 80,0	не менше 95,0
1.4. Коефіцієнт стираності (0-0,5 мм), % (ДСТУ 3200-95)	не більше 4,0	не більше 3,0
1.5. Вміст дріб'язку (0-5 мм) в готовій продукції, %	не більше 6,0	не більше 3,0
1.6. Крупність готової продукції, % класів.	не менше 85,0 % 8-35 мм	не менше 95 % 8-18 мм
2. В процесі відновлення		
Найменування показників	Агломерат	Окатиші
2.1. Показник міцності (+5 мм), % (ДСТУ 3202-95)	не менше 50,0	не менше 80,0
2.2. Показник стираності (0-0,5 мм), % (ДСТУ 3202-95)	не менше 5,0	не менше 5,0
2.3. Усадка шару при відновленні, % (ДСТУ 3205-95)	не більше 20,0	не більше 30,0
2.4. Перепад тиску-відновнику в шарі, Па (ДСТУ 3202-95)	не більше 150	не більше 200
2.5. Фактична ступінь відновлення, % (ДСТУ 3204-95)	не менше 90,0	не менше 90,0
2.6. Відновлюваність при ступені відновлення до 40 %, %/хв (ДСТУ 3204-95)	не менше 0,5	не менше 0,5
2.7. Температури початку і кінця розм'якшення, °С (ДСТУ 3817-98)	не нижче 1050 и 1150	не нижче 960 и 1160
2.8. Температурний інтервал розм'якшення, °С (ДСТУ 3817-98)	не більше 100	не більше 200
3. Стабільність складу		
3.1. Допустимі коливання вмісту заліза, ± %	0,25	0,25
3.2. Допустимі коливання закису заліза, ± %	1,00	0,50
3.3. Допустимі коливання основності, ± д.од.	0,05	0,025

Результати досліджень

На схемах (рис. 1-8) показані структуровані заходи, реалізація яких дозволить якщо не досягти, то наблизитися до оптимальних значень цільових функцій. Фактори, що впливають на оптимізацію цільової функції, не адитивні; цільові функції, що формують поняття «якість агломерату», також не адитивні; тому створення «ідеального» агломерату з максимальними показниками всіх його цільових функцій (властивостей) складне. Остаточне рішення про рівень вимог до чисельних значень цільових функцій може прийматися для кожної конкретної аглофабрики на основі аналізу єдиного параметра «економізація». Можна показати, що захід

з економізації виробництва агломерату шляхом оптимізації його цільових функцій не збігається з економізацією використання цієї сировини в подальшому переділі (у даному випадку – доменній плавці). Наприклад, важливі цільові функції необхідної міцності агломерату в вихідному (холодному) стані (міцність на удар і стирання) можуть бути забезпечені такими технологічними факторами, як кількість твердого палива в шихті, його видом, крупністю, місцем введення і різною його кількістю по висоті шару, висотою шару, що спікається, умовами додаткового нагрівання верхньої частини шару, що спікається, величиною основності агломерату та деякими іншими. Зниження фракції (0-5 мм) в готовій продукції може бути забезпечено шляхом

стабілізації крупності агломерату (руйнуванням спечених неміцних агрегатів) з подальшим відсіванням всіх дрібних фракцій, що повертаються в агломераційний процес. Однак, позитивний ефект від підвищення вихідної (холодної) міцності агломерату негативно позначиться на деяких технологічних (продуктивність агломашини, питома витрати палива та електроенергії) та економічних показниках агломераційного виробництва, а також на поведінці агломерату в процесі плавки в доменній печі.

Наприклад, підвищення міцності агломерату за рахунок збільшення в складі шихти паливної частини (зростає вміст FeO), призводить до зниження значення цільової функції «відновлюваність сировини». У той же час, чим вища відновлюваність

агломерату, тим вищий ступінь розвитку непрямого відновлення заліза в доменних печах і, відповідно, нижча питома витрата коксу. За даними японських і бельгійських досліджень, збільшення відновлюваності залізорудної сировини на 1 % (абс.) викликає зниження витрати коксу на 4 кг/т чавуну [19, 20]. В даний час японські металурги розглядають застосування агломерату з підвищеною відновлюваністю і коксу з високою реакційною здатністю як один з аспектів розробки доменної плавки нового покоління зі значним зниженням викидів в атмосферу парникових газів [17].

Перша (1) цільова функція – «питома продуктивність» (рис. 1).



Рисунок 1 – Перша цільова функція – «Питома продуктивність»

Продуктивність агломашини безпосередньо залежить від швидкості горіння вуглецю палива в шарі шихти, яка визначається кількістю кисню, що подається в зону горіння, що в свою чергу залежить від газопроникиості шару шихти. У зв'язку з цим дуже велике значення має поліпшення ступеня огрудкування агломашини, яке може бути реалізовано шляхом використання розробленого нового процесу попереднього підпресування шихти [21]. Збільшити швидкість пересування фронту горіння доцільно за рахунок збільшення газопроникиості шару шихти, що спікається, використання високореакційного палива [22] і зволоження повітря над шаром, що спікається, шляхом розпилення води [23]. Присутність водяної пари покращує умови горіння палива в шарі, також зростають газопроникиість шару, середня температура точки закінчення процесу спікання і продуктивність агломашини. Газопроникиість шару, крім оптимального

огрудкування, також залежить від величини температури попереднього підігріву шихти, використання донної постілі, способу укладання шихти, формування рівномірної газопроникиості по ширині і довжині шару, що спікається, висоти шару на спікальних візках агломашини, а також використання ПАР у складі шихти [24]. Використання ПАР і розпилення води над поверхнею агломераційного шару знижує в 2,3-3,0 рази кількість пилу, що викидається в атмосферу [24], а також істотно зменшує викиди парникових газів: майже на два порядки – CO і на порядок – CO₂ [23].

Для забезпечення збільшення цільової функції 1 (питомої продуктивності) необхідна реконструкція та розробка нового обладнання: реконструкція завантажувального пристрою агломашини, розробка підпресувальника шихти, дозатора ПАР і розпилювача води, а також розробка ефективних змішувача шихти з ПАР і огрудкувача шихти з ПАР.

Друга, третя і четверта (2-4) цільові функції – це «стабільний хімічний склад агломерату, вміст заліза, основність» (рис. 2-4).

Якість агломерату визначається його хімічним і гранулометричним складом, а також комплексом металургійних властивостей, що характеризуються такими показниками: міцністю, відновлюваністю, міцністю в процесі відновлення, газопроникністю і усадкою шару в процесі відновлення, температурою початку розм'якшення і плавлення.

Хімічний склад агломерату – одна з найважливіших його характеристик, основними показниками якої є абсолютні величини вмісту заліза і основності. Стабільність хімічного складу агломерату також найчастіше контролюють за коливанням саме цих двох показників. В Японії на заводі фірми «Nippon Koka» у Фукуямі коливання вмісту заліза в суміші між штабелями становлять не більше $\pm 0,05$ %, кремнезему менше $\pm 0,03$ %, а основності аглошихти не більше $\pm 0,03$ д. од. Японські металурги відзначають, що особливо важливим показником якості агломерату є стабільність його основності, за їхніми даними зниження коливання основності з $\pm 0,05$ до $\pm 0,025$ д.о. забезпечує підвищення продуктивності доменних печей на 0,5 % і зменшення питомої витрати коксу на 0,3 % [25].

Одним з основних засобів досягнення стабільного хімічного та мінералогічного складу агломерату (рис. 2) є високоефективне усереднення

кожного шихтового матеріалу в штабелях на відкритому складі. На діючих аглофабриках у штабель разом із залізородними матеріалами закладають добавки, що відрізняються від них за хімічним складом: прокатну окалину, марганцеву руду та ін. без чіткого вагового співвідношення (згідно з розрахунком шихти) між матеріалами. Для виключення негативного впливу цих добавок на однорідність суміші доцільно здійснювати попереднє усереднення кожної з добавок в окремих штабелях, а потім їх дозувати згідно з розрахованим співвідношенням і змішувати, після чого отриману суміш добавок направляти в розхідні бункери шихтового відділення аглофабрики, куди направляються і інші компоненти аглошихти. Для зменшення коливань складу суміші по довжині штабеля необхідно передбачати укладання шарами меншої і однакової товщини. Суворе регламентація послідовності укладання матеріалів, їх кількості і здатності перемішуватися один з одним також є обов'язковими умовами високої однорідності суміші і відповідно якості агломерату. Забір матеріалу зі штабеля і подача його в витратні бункери ділянки шихти повинна здійснюватися роторними забірниками з торця сформованого штабеля, починаючи зверху вниз рівномірно по всьому перетину штабеля, а не одним екскаватором, як це спостерігається в даний час на деяких шихтових дворах аглофабрик.



Рисунок 2 – Друга цільова функція – «Стабільний хімічний склад агломерату»

Істотний вплив на стабільність хімічного складу агломерату має забезпечення високої точності дозування шихтових матеріалів з бункерів і

ефективне їх змішування до однорідності не нижче 96-98 % в шихтовому відділенні аглофабрики (рис. 2). Для вирішення цього завдання необхідно

впроваджувати сучасну комплексну систему контролю та автоматичного управління шихтовим відділенням на базі сучасних ЕОМ, а також високоефективні змішувачі шихти.

Для забезпечення зростання цільової функції 2 необхідна реконструкція та розробка нового обладнання: укладальники та забірники матеріалів, вагові автоматичні дозатори, консольні та трубні віброконвеєри, ефективні змішувачі (Lodge, Eirich та ін.).

Забезпечити високий вміст заліза в офлюсованому агломераті на рівні $\geq 59\%$ (цільова функція 3, рис. 3) можливо при використанні в шихті агломератної руди з вмістом заліза не менше 60% , підвищеної частки концентрату і введенням в шихту максимально можливої кількості знемасленої прокатної окалини, тобто матеріалів з підвищеним вмістом заліза. При подачі шламів в аглошихту їх необхідно збагачувати і зневоднювати. Підвищити вміст заліза в агломераті також можливо шляхом виключення з шихти аглоруди. Проблема підвищення частки концентрату в аглошихті пов'язана зі

складнощами його огрудкування, яка успішно може бути вирішена застосуванням спеціальних барабанних, тарілкових або вібраційних огрудкувачів, а також апаратів попереднього підпресування концентрату і/або всієї шихти. Підвищити вміст заліза в агломераті до рівня вимог сучасної доменної плавки [26] можна також шляхом виробництва офлюсованих локальних спеків [27, 28] та виробництва окускованого залізорудної сировини в єдиний гібридний процес. Гібридний окускований залізорудний матеріал дозволить підвищити вміст заліза до $61,9\%$. Промислова проплавка партії гібридного окускованого матеріалу в доменному цеху ВАТ «Дніпровський металургійний завод ім. Петровського» на доменній печі №2 відзначалася стабілізацією ходу печі та поліпшенням техніко-економічних показників плавки: витрата коксу знизилася на $4,0-4,4$ кг/т чавуну, а продуктивність печі підвищилася на $1,1\%$ [29, 30]. Виробництво гібридного окускованого залізорудного матеріалу також задовольняє вимогам цільових функцій 1, 6 і 7 (останні дві розглянуті нижче).



Рисунок 3 – Третя цільова функція – «Високий вміст заліза в агломераті»

Для забезпечення зростання цільової функції 3 необхідна реконструкція та розробка нового обладнання: грохоти тонкого грохочення, підпресувальники, сепаратори сухого магнітного збагачення, гомотенізатори порталні, грохоти сухого грохочення за класом – $(2,5-3,0)$ мм.

Четверта (4) цільова функція – «основність агломерату» (рис. 4) пов'язана з техніко-економічними показниками доменної плавки через показники міцності агломерату, вмісту в ньому дрібної фракції (-5 мм), а також через відмову або необхідність подачі в доменну піч сирого вапняку.

З досліджень [31] відомо, що найменшою міцністю володіє агломерат основністю $1,3-1,4$. За даними [32] міцність офлюсованого агломерату мінімальна в межах зміни його основності від $0,9$ до $1,4$. Ці результати підтверджуються практикою при освоєнні виробництва офлюсованого агломерату різної основності. Так, наприклад, за даними [33], при збільшенні основності агломерату з $0,1$ до $1,25$ вміст фракції $0-5$ мм на заводі «Запоріжсталь» підвищився з $6,0$ до $21,0\%$. При цьому різке зростання вмісту цієї фракції мало місце при збільшенні основності вище $0,8$. Таким чином, існують два

реальних шляхи підвищення міцності агломерату – це виробництво агломерату основністю $\geq 1,6$ або $0,8-0,9$ од. Перший шлях широко використовують на багатьох металургійних заводах за кордоном, однак він вимагає при основності агломерату $\geq 1,6$ використання в шихті доменної плавки неофлюсованих окатишів або кускової залізної руди, а за другим шляхом при основності агломерату $0,8-0,9$ – збільшення витрати сирого вапняку в доменній шихті, що при існуючій крупності завантажуваного в піч вапняку призводить до додаткової витрати коксу на тонну чавуну. Можливий також варіант використання в шихті доменної плавки агломератів двох основностей, але в цьому випадку можуть виникати організаційні труднощі. При використанні в шихті доменної плавки агломерату з основністю $0,8-0,9$ д.о. з метою недопущення збільшення питомої витрати коксу доцільно переходити на технологію

завантаження в доменну піч вапняку фракції $10-25$ ($5-25$) мм замість використовуваного в даний час вапняку крупністю $25-50$ мм. Ця технологія свого часу була випробувана на печах Дніпровського металургійного заводу ім. Петровського [34] і показала, що дрібний вапняк повністю розкладається у верхній зоні теплообміну доменної печі, використовуючи надлишкову теплоту газового потоку в цій зоні. Збільшення витрати вапняку до певної межі не викликає зростання витрати коксу, а використання більш міцного агломерату дозволяє підвищити техніко-економічні показники доменної плавки за рахунок її інтенсифікації та поліпшення використання газу в печі. Цей результат був отриманий і на доменній печі №6 об'ємом 2000 м^3 ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», де також провели експеримент із заміни фракції $25-50$ мм доломітизованого вапняку на фракцію $5-25$ мм [34].

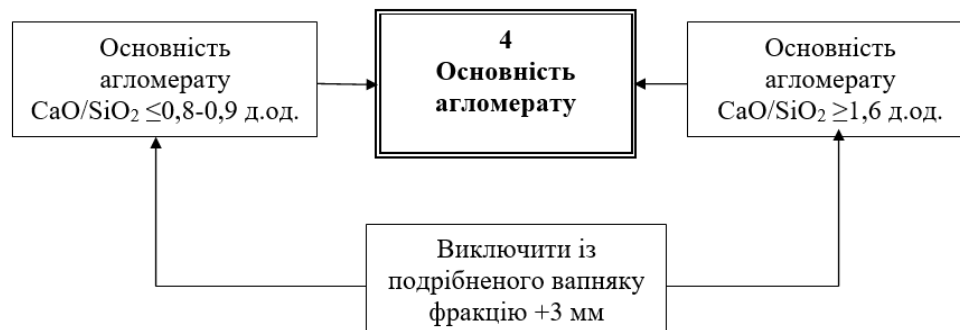


Рисунок 4 – Четверта цільова функція – «Основність агломерату»

Для забезпечення зростання цільової функції 4 необхідна реконструкція та розробка нового обладнання: високоефективні дробарки та грохоти для підготовки вапняку, особливо в умовах високої його вологості.

П'ята (5) цільова функція – «вузький діапазон фракційного складу агломерату» (рис. 5). Для забезпечення оптимального газодинамічного режиму доменної плавки і забезпечення форсування плавки шляхом збільшення витрати дуття, за рахунок зниження верхнього перепаду тиску газу в

доменній печі необхідно подавати в піч агломерат з вузьким діапазоном фракційного складу ($10-40$ мм). Домогтися цього можливо за рахунок організації технології травмування аглоспека на палетах перед розвантаженням з удосконаленням процесу попереднього дроблення гарячого агломерату і з подальшою інтенсифікацією процесу його охолодження шляхом поєднання процесів охолодження, стабілізації та грохочення, а також за рахунок грохочення охолодженого агломерату з додробленням великих фракцій.

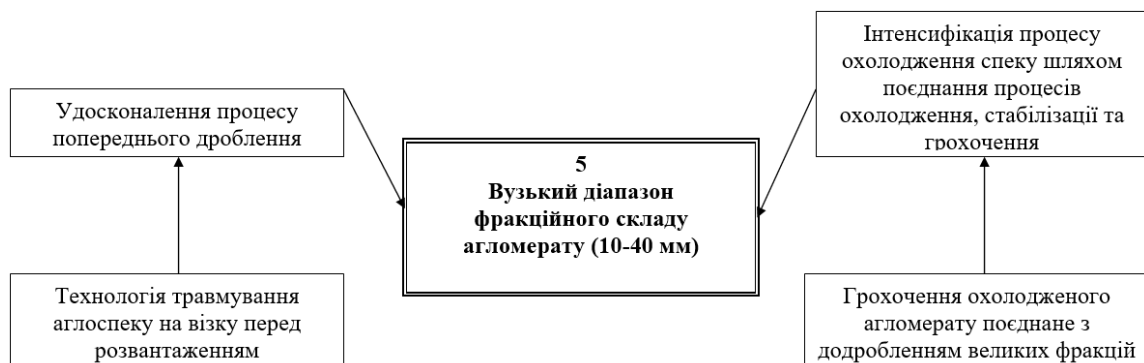


Рисунок 5 – П'ята цільова функція – «Вузький діапазон фракційного складу агломерату»

Для забезпечення виконання цільової функції 5 необхідна реконструкція та розробка нового

обладнання: створення дробарки вибіркового дроблення гарячого спеку, розробка механізму

травмування пирога аглоспека на основі вирівнювання швидкостей механізму і палет аглоленти, розробка охолоджувача – стабілізатора на основі важельно-лінійного механізму, розробка грохоту з дробильним дебаланс-ротором і неоднорідним полем траєкторій.

Шоста (6) цільова функція – «міцність агломерату» (рис. 6), сьома (7) цільова функція – «вміст в агломераті некондиційних фракцій» (рис. 7) і восьма (8) цільова функція – «відновлюваність» (рис. 8) тісно пов'язані між собою. Так, відомо, що легко-відновлюваний агломерат піддається сильнішому руйнуванню в процесі відновлювально-теплової обробки, а підвищена руйнівність такого агломерату може призвести до неможливості отримання ефекту від високої відновлюваності. Відновлюваність агломерату збільшується із зростанням у ньому кількості легко відновлюваних мінералів і зростанням сумарної поверхні пор, доступних газу-відновнику.

Міцний в процесі відновлення агломерат, що мало руйнується в доменній печі, повинен, крім того, мати високу температуру початку розм'якшення і вузький інтервал між цією температурою і

температурою розплавлення, оскільки висота зони розм'якшення має значний вплив на втрату напору, розподіл і використання газового потоку, а, відповідно, на витрату коксу і продуктивність доменної печі.

У міру збільшення вмісту закису заліза в агломераті кількість гематиту в його структурі зменшується, а кількість залізосилікатної фази збільшується. При цьому підвищується міцність агломерату, як у вихідному стані, так і в процесі його відновлення при одночасному зниженні відновлюваності. За даними японських дослідників, при збільшенні витрати коксової дрібниці в аглошихті на 10 кг/т агломерату вміст закису заліза в ньому зростає на 4 %, міцність при відновленні підвищується на 8 %, а відновлюваність знижується [35]. Для підвищення відновлюваності агломерату доцільно знизити вміст у ньому FeO (збільшення FeO на 1 % зменшує швидкість відновлення агломерату на 0,12 %/хв) і підвищувати вміст гематиту і фериту кальцію. За величиною основності не можна однозначно судити про відновлюваність агломерату. Вплив інших компонентів складу також неоднозначний.



Рисунок 6 – Шоста цільова функція – «Міцність агломерату»

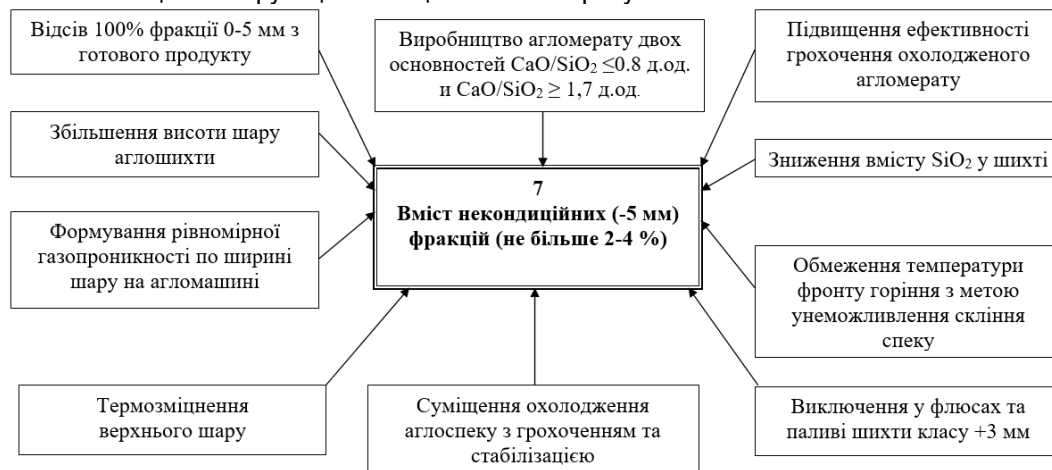


Рисунок 7 – Сьома цільова функція – «Вміст в агломераті некондиційних фракцій»

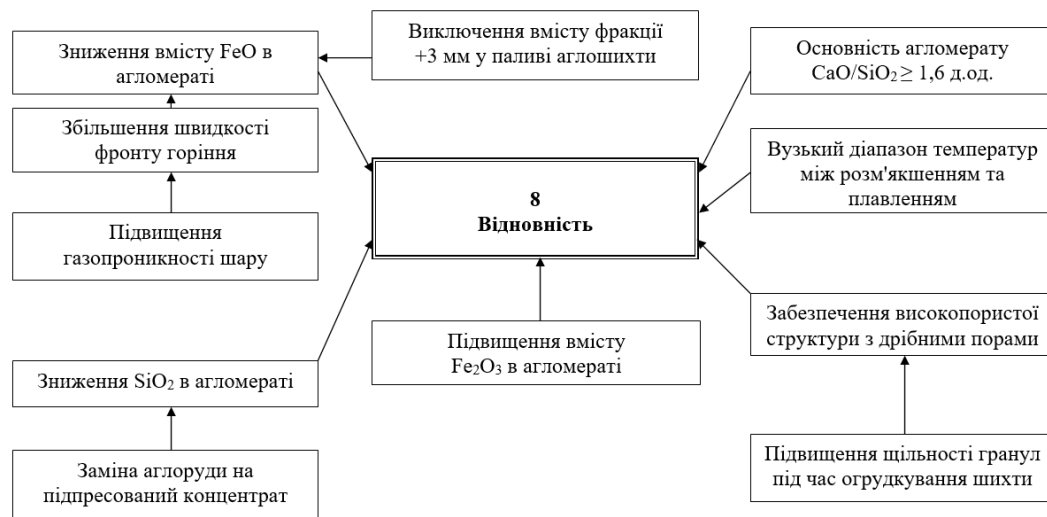


Рисунок 8 – Восьма цільова функція – «Відновлюваність агломерату»

Руйнування агломерату в доменній печі відбувається в результаті зміни структури агломерату в процесі відновлення і одночасного механічного руйнування під дією маси шихти [36]. Найвищий ступінь відновлення мали агломерати з низьким вмістом SiO_2 і FeO, при цьому відновлюваність у зоні кускових матеріалів доменної печі для агломерату з низьким вмістом SiO_2 і FeO також була вищою. У структурі агломерату після відновлення спостерігали велику кількість дрібнодисперсних металевих зерен, що утворилися з гематиту. Вважається, що наявність первинного гематиту в структурі агломерату і збільшення в ній кількості дрібних пор в процесі відновлення сприяють збільшенню його відновлюваності [34]. У структурі агломерату з низьким вмістом SiO_2 і FeO перед відновленням порівняно мало крупнозернистого магнетиту і пластинчастого фериту кальцію, переважають дрібнозернистий сферичний гематит, голчастий ферит кальцію і присутня досить багато дрібних пор, що, мабуть, сприяє збереженню міцності при відновленні [34].

На ДП № 2 заводу фірми «Nippon Steel» в Муро-рані, завдяки зменшенню вмісту в агломераті SiO_2 , досягли поліпшення показника високотемпературного відновлення. Таким чином встановили, що основність агломерату повинна бути в інтервалі 1,6-2,0, і що доцільно підвищувати в ньому вміст загального заліза і знижувати вміст Al_2O_3 . Підвищення загальної пористості агломерату сприяло підвищенню його відновлюваності. Також відзначено вплив на відновлюваність розподілу пор за розмірами і мінералогічного складу агломерату. На наступному етапі досліджень провели промислові випробування агломерату зі зниженою витратою на 1 т агломерату коксової дрібниці з метою зменшення вмісту в ньому FeO. В результаті випробувань при збереженні міцності агломерату підвищилася його відновлюваність, а в доменній печі було знижено питому витрату коксу до 324 кг/т чавуну при

збільшенні питомої продуктивності печі до 2,3 т/(добу·м³) [37].

При інтенсивній роботі доменних печей підвищення відновлюваності залізородної сировини не повинно супроводжуватися істотним зниженням її міцності в початковому стані і при відновленні. Це можливо досягти при вдосконаленні технології агломерації (спікання високоосновного агломерату у високому шарі, регулювання розподілу палива в аглошарах, термообробка спеку, подвійне дроблення і подвійне грохочення агломерату, оптимальний хімічний і мінералогічний склад та інші заходи).

Для забезпечення зростання цільових функцій 6-8 необхідна реконструкція та розробка нового обладнання: модернізація огрудувачів (грануляторів), реконструкція лотка-гладилки, розробка завантажувального пристрою аглошихти, розробка механізму травмування аглоспека на палетах з вирівнюванням швидкості палет і механізму травмування аглоспека, розробка грохота охолодженого агломерату, поєднаного з дробаркою великих фракцій, розробка обладнання для термообробки спека, розробка грохота пересівання звороту за класом -(2,5-3 мм), зміна конструкції сит грохотів з підвищенням їх апертури, грохоти тонкого грохочення або серію машин на стадії доведення концентрату в збагачувальному переділі, імовірнісні грохоти палива і вапна.

Висновки

Таким чином, показано, що вироблений на вітчизняних аглофабриках агломерат не відповідає вимогам доменної плавки до його металургійних характеристик, а техніко-економічні показники його виробництва далекі від оптимальних значень. Дослідниками і виробниками розроблені і, в більшості випадків, випробувані в промислових умовах технологічні заходи та обладнання, що дозволяють поліпшити техніко-економічні показники виробництва агломерату і його металургійні характеристики.

Для того, щоб успішно конкурувати, металургійним підприємствам в сучасних умовах необхідно знижувати собівартість продукції, що випускається, перш за все, за рахунок вдосконалення і впровадження у виробництво нових технологічних процесів і обладнання, зниження витрат паливно-енергетичних ресурсів на виробництво основних видів продукції.

Технологія доменної плавки в даний час вимагає, перш за все, випереджаючого підвищення якості коксу і агломерату. Додаткові витрати на це на коксохімічних і агломераційних підприємствах з лишком окупляться в доменному виробництві за рахунок зниження витрати коксу.

Перелік посилань

1. Exner, H.E., Arzt, E. (1990). Sintering Processes. In: Sōmiya, S., Moriyo-shi, Y. (eds) Sintering Key Papers. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-009-0741-6_10.
2. Pahlevaninezhad, M., Emanmi, M.D., Panjepour, M. The effects of kinetic parameters on combustion characteristics in a sintering bed. *Energy*. 2014. Vol. 73. P. 160-176.
3. Ramos, M.V., Kasai, E. Numerical Simulation Model of the Iron Ore Sintering Process Directly Describing the Agglomeration Phenomenon of Granules in the Packed Bed. *The Iron and Steel Institute of Japan*. 2000, Vol. 40. No.5. P. 448-454.
4. Huang, X.X.; Fan, X.H.; Chen, X.L.; Zhao, X.Z.; Gan, M. Optimisation model of fuel distribution in materials bed of iron ore sintering process. *Ironmaking & Steelmaking*. 2018. Vol. 46. P. 1-7.
5. Influencing factor of sinter body strength and its effects on iron ore sintering indexes / G.-I. Zhang et al. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*. 2015. Vol. 22, no. 6. P. 553–561. URL: <https://doi.org/10.1007/s12613-015-1107-x>.
6. Effect of the catalyzing combustion of coke breeze on the energy saving in sinter process / D.-q. Zhu et al. *Journal of Central South University of Technology*. 2001. Vol. 8, no. 4. P. 234–238. URL: <https://doi.org/10.1007/s11771-001-0061-0>.
7. Combustion Rate of Coke in Quasi-particle at Iron Ore Sintering Process / K.-i. Ohno et al. *Tetsu-to-Hagane*. 2015. Vol. 101, no. 3. P. 184–189. URL: <https://doi.org/10.2355/tetsutohagane.101.184>.
8. Modelling the effect of sinter machine speed on bed temperature and coke combustion characteristics in iron ore sintering process / R. Seenivasan et al. *Ironmaking & Steelmaking*. 2021. Vol. 48, no. 6. P. 637–648. URL: <https://doi.org/10.1080/03019233.2021.1889893>.
9. Последние разработки в рамках средне- и долгосрочных проектов по сокращению выброса углекислого газа в аглодоменном производстве / К. Такеда, Т. Аньяшики, Т. Сато и др. // *Новости черной металлургии за рубежом*. – 2012. – №6. – С. 30-37.
10. Использование в составе агломерационной шихты гранулированного сырья, содержащего отходы коксохимического производства / В.П. Русских, В.Б. Семаков, Д.Е. Шапиро-Никитин и др. // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2014. – №3. – С. 8-12.
11. Blast Furnace Ironmaking Process Monitoring With Time-Constrained Global and Local Nonlinear Analytic Stationary Subspace Analysis / S. Lou et al. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2023. P. 1–14. URL: <https://doi.org/10.1109/tii.2023.3300414>.
12. Knowledge-Guided Data-Driven Decision-Making for Key Operational Variables in Sintering Processes / Y. Fang et al. *IECON 2023- 49th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Singapore, Singapore, 16–19 October 2023*. 2023. URL: <https://doi.org/10.1109/iecon51785.2023.10312256>.
13. Multi-objective optimization method of blast furnace operation performance indicators based on data and knowledge / D. Yan et al. 2023 35th Chinese Control and Decision Conference (CCDC), Yichang, China, 20–22 May 2023. 2023. URL: <https://doi.org/10.1109/ccdc58219.2023.10327629>.
14. Spatio-Temporal Graph Attention Network for Soft Sensor Modeling of Suspended Magnetization Roasting Process / Y. Yang et al. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2023. P. 1. URL: <https://doi.org/10.1109/tim.2023.3334374>.
15. Zhang X., Kano M., Matsuzaki S. A comparative study of deep and shallow predictive techniques for hot metal temperature prediction in blast furnace ironmaking. *Computers & Chemical Engineering*. 2019. Vol. 130. P. 106575. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2019.106575>.
16. Zhou H., Zhang H., Yang C. Hybrid-Model-Based Intelligent Optimization of Ironmaking Process. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2020. Vol. 67, no. 3. P. 2469–2479. URL: <https://doi.org/10.1109/tie.2019.2903770>.
17. Fernández-González D., Piñuela-Noval J., Verdeja L. F. Iron Ore Agglomeration Technologies. *Iron Ores and Iron Oxide Materials*. 2018. URL: <https://doi.org/10.5772/intechopen.72546>.
18. Итоговый документ V-го Международного конгресса доменщиков “Производство чугуна на рубеже столетий”. – Днепропетровск-Кривой Рог, 7-12 июня 1999. – 9 с.
19. Combustion behavior of granulated coke breeze in iron ore sintering / L. Xiong et al. *Powder Technology*. 2018. Vol. 340. P. 131–138. URL: <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.09.010>.
20. Kowalewski M., Współczesne metody przygotowania wsadu wielkopiecowego. – *Wiadomości hutnicze*. – 1978. – №8-9. – S. 277-282.
21. Засельский В.И., Пополов Д.В. Повышение качества агломерата и производительности агломашины путем подпрессовки шихты // *Бюллетень Черная металлургия ОАО “Черметинформация”*. – 2010. – №5. – С. 34-36.
22. Lovel R. R., Vining K. R., Dell'amico M. The Influence of Fuel Reactivity on Iron Ore Sintering. *The Iron and Steel Institute of Japan International*. 2009. Vol. 49, no. 2. P. 195–202. URL: <https://doi.org/10.2355/isijinternational.49.195/>

23. Datta S.S., Das B.K., Balaji S.A., Das A. Process improvement in sintering by bed humidification. AISTech – Iron and Steel Technology Conference Proceedings. 2006, vol. 1, pp. 207-213.
24. Minimization methods for emissions generated from sinter strands: a review / N. Menad et al. Journal of Cleaner Production. 2006. Vol. 14, no. 8. P. 740–747. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2004.03.005>.
25. Mousa E. Modern blast furnace ironmaking technology: potentials to meet the demand of high hot metal production and lower energy consumption. Metallurgical and Materials Engineering. 2019. Vol. 25, no. 2. P. 69–104. URL: <https://doi.org/10.30544/414>.
26. He K., Wang L. A review of energy use and energy-efficient technologies for the iron and steel industry. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2017. Vol. 70. P. 1022–1039. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.007>.
27. Improved Iron-Ore Sinter for Blast Furnaces / F.M. Zhuravlev, V.P. Lyalyuk, D.A. Kassim, I.A. Lyakhova, E.V. Chuprinov // Steel in Translation. – 2015. – №4. – P. 270-274.
28. Technology of receiving fluxed iron material for blast furnace with the raised content of iron, combining the best metallurgical characteristics of sinter and pellets / Chuprinov Ye. V., Zhuravlev F. M., Rekov Yu.V., Kassim D. O., Liakhova I. A. // In «Findings of modern engineering research and developments : Scientific monograph». Riga, Latvia : «Baltija Publishing», 2022. 554 p. (pp. 480-495). <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-207-4-18>
29. Анализ работы доменных печей ОАО ДМЗ им. Петровского на железорудной шихте различного состава / В.А. Петренко, В.В. Бочка, В.В. Котов и др. // Металл и литьё Украины. – 2003. – № 5. – С. 25.
30. Сулименко С.Е., Игнатов Н.В., Пугач Н.Е. Новая технология производства гибридного окускованного железорудного сырья // Металл и литьё Украины. – 2003. – № 5. – С. 31.
31. Bika D. G., Gentzler M., Michaels J. N. Mechanical properties of agglomerates. Powder Technology. 2001. Vol. 117, no. 1-2. P. 98–112. URL: [https://doi.org/10.1016/s0032-5910\(01\)00318-7](https://doi.org/10.1016/s0032-5910(01)00318-7).
32. Comparison of the Mineralogy of Iron Ore Sinters Using a Range of Techniques / T. Honeyands et al. Minerals. 2019. Vol. 9, no. 6. P. 333. URL: <https://doi.org/10.3390/min9060333>.
33. Saveliev S. G., Kondratenko M. M. Investigation of the influence of lime content in the charge and its quality on the sintering process of iron ore raw materials. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2023. Vol. 1254, no. 1. P. 012001. URL: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1254/1/012001>.
34. Possibility of Increasing the Efficiency of Blast Furnace Smelting Depending on the Operating Conditions of Blast Furnaces / V.P. Lyaluk, A.K. Tarakanov, E.V. Chuprinov, F.M. Zhuravlev, D.A. Kassim, E.E. Donskov // Steel in Translation. – 2021. – №11. – P. 795-804. <https://doi.org/10.3103/S0967091221110085>.
35. Lu L., Ishiyama O. Recent advances in iron ore sintering. Mineral Processing and Extractive Metallurgy. 2016. Vol. 125, no. 3. P. 132–139. URL: <https://doi.org/10.1080/03719553.2016.1165500>.
36. Study on the interaction behaviour between lump and sinter under the condition of oxygen blast furnace / L. Chen et al. Ironmaking & Steelmaking. 2016. Vol. 43, no. 6. P. 458–464. URL: <https://doi.org/10.1080/03019233.2015.1104074>.
37. Quality improvement of sintered ores in relation to blast furnace operation / K. Higuchi, Y. Takamoto, T. Orimoto et al. // Shinnittetsu Giho. – 2006. – №384. – С. 33-37.

References

1. Exner, H. E., Arzt, E. (1990). *Sintering Processes. Sintering Key Papers. Springer, Dordrecht*. https://doi.org/10.1007/978-94-009-0741-6_10.
2. Pahlevaninezhad, M., Emanmi, M. D. & Panjepour, M. (2014). The effects of kinetic parameters on combustion characteristics in a sintering bed. Energy, 73, 160-176.
3. Ramos, M. V., & Kasai, E. (2000). Numerical Simulation Model of the Iron Ore Sintering Process Directly Describing the Agglomeration Phenomenon of Granules in the Packed Bed. The Iron and Steel Institute of Japan, 40(5), 448-454.
4. Huang, X. X., Fan, X. H., Chen, X. L., Zhao, X. Z., & Gan, M. (2018). Optimisation model of fuel distribution in materials bed of iron ore sintering process. Ironmaking & Steelmaking, 46, 1-7.
5. Zhang, G.-I. et al. (2015). Influencing factor of sinter body strength and its effects on iron ore sin-tering indexes. *International Journal of Minerals, Metallurgy, and Materials*, 22(6), 553-561. <https://doi.org/10.1007/s12613-015-1107-x>.
6. Zhu D.-q. et al. (2001). Effect of the catalyzing combustion of coke breeze on the energy saving in sinter process. *Journal of Central South University of Technology*, 8(4), 234-238. <https://doi.org/10.1007/s11771-001-0061-0>.
7. Ohno, K.-i. et al. Combustion Rate of Coke in Quasi-particle at Iron Ore Sintering Process. *Tetsu-to-Hagane*, 101(3), 184-189. <https://doi.org/10.2355/tetsutohagane.101.184>.
8. Seenivasan, R. et al. (2021). Modelling the effect of sinter machine speed on bed temperature and coke combustion characteristics in iron ore sintering process. *Ironmaking & Steelmaking*, 48(6), 637-648. <https://doi.org/10.1080/03019233.2021.1889893>.
9. Takeda, K., Anyashiki, T. et al. (2012). Novosti chernoj metallurgii za rubezhom, 6, 30-37.
10. Russkih, V. P. Semakov, V. B. Shapiro-Nikitin, D. E. et al. (2014). Ispolzovanie v sostave aglomeracionnoj shipty granulirovannogo syrya, sodержashhego othody koksohimicheskogo proizvodstva. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost*, 3, 8-12.
11. Lou, S. et al. (2023). Blast Furnace Ironmaking Process Monitoring With Time-Constrained Global and Local Nonlinear Analytic Stationary Subspace Analysis. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 1-14. <https://doi.org/10.1109/tii.2023.3300414>.
12. Fang, Y. et al. (16–19 October 2023). Knowledge-Guided Data-Driven Decision-Making for Key Operational Variables in Sintering Processes. IECON, 49th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Singapore, Singapore. <https://doi.org/10.1109/iecon51785.2023.10312256>.
13. Yan, D. et al. (20–22 May 2023). Multi-objective optimization method of blast furnace operation performance indicators based on data and knowledge, 35th Chinese Control and Decision Conference (CCDC), Yichang, China., <https://doi.org/10.1109/ccdc58219.2023.10327629>.

14. Yang, Y. et al. (2023). Spatio-Temporal Graph Attention Network for Soft Sensor Modeling of Suspended Magnetization Roasting Process. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, P. 1. URL: <https://doi.org/10.1109/tim.2023.3334374>.
15. Zhang, X., Kano, M., & Matsuzaki, S. A (2019). comparative study of deep and shallow predictive techniques for hot metal temperature prediction in blast furnace ironmaking. *Computers & Chemical Engineering*, 130, 106575. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2019.106575>.
16. Zhou, H., Zhang, H., & Yang, C. (2020). Hybrid-Model-Based Intelligent Optimization of Ironmaking Process. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 67(3), 2469-2479. <https://doi.org/10.1109/tie.2019.2903770>.
17. Fernández-González, D., Piñuela-Noval, J., & Verdeja, L. F. Iron Ore Agglomeration Technologies. *Iron Ores and Iron Oxide Materials*. 2018. <https://doi.org/10.5772/intechopen.72546>.
18. (7-12 iyunya 1999). Itogovyj dokument V-go Mezhdunarodnogo kongressa domenshikov "Proizvodstvo chuguna na rubezhe stoletij". 9 p
19. Xiong, L. (2018). Combustion behavior of granulated coke breeze in iron ore sintering. *Powder Technology*, 340, 131-138. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2018.09.010>.
20. Kowalewski, M. (1978). Wspolczesne metody przygotowania wsadu wielkopiecowego. *Wiadomości hutnicze*, (8-9), 277-282.
21. Zaselskij, V. I., & Popolov, D. V. (2010). Povyshenie kachestva aglomerata i proizvoditelnosti aglomashiny putem podpressovki shihty. *Bulletin Chernaya metallurgiya OAO "Chermetinformaciya"*, (5), 34-36.
22. Lovel, R. R., Vining, K. R., & Dell'amico, M. (2009). The Influence of Fuel Reactivity on Iron Ore Sintering. *The Iron and Steel Institute of Japan International*, 49(2), 195-202. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.49.195/>
23. Datta, S. S., Das, B. K., Balaji, S. A., & Das A. (2006). Process improvement in sintering by bed humidification. *AISTech – Iron and Steel Technology Conference Proceedings*, 1, 207-213.
24. Menad, N. et al. (2006). Minimization methods for emissions generated from sinter strands: a review. *Journal of Cleaner Production*, 14(8), 740-747. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2004.03.005>.
25. Mousa, E. (2019). Modern blast furnace ironmaking technology: potentials to meet the demand of high hot metal production and lower energy consumption. *Metallurgical and Materials Engineering*, 25(2), 69–104. <https://doi.org/10.30544/414>.
26. He, K., Wang, L. (2017). A review of energy use and energy-efficient technologies for the iron and steel industry. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 70, 1022-1039. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.007>.
27. Zhuravlev, F. M. Lyalyuk, V. P. Kassim, D. A. Lyakhova, I. A., & Chuprinov, E. V. (2015). Improved Iron-Ore Sinter for Blast Furnaces. *Steel in Translation*, (4), 270-274.
28. Chuprynov, Ye. V., Zhuravlev, F. M., Rekov, Yu. V., Kassim, D. O., & Liakhova, I. A. (2022). *Technology of receiving fluxed iron material for blast furnace with the raised content of iron, combining the best metallurgical characteristics of sinter and pellets. Findings of modern engineering research and developments*. Scientific monograph. 'Baltija Publishing. <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-207-4-18>.
29. Petrenko, V. A. Bochka, V. V. & Kotov, V. V. (2003) Petrovskogo na zhelezorudnoj shihtie razlichnogo sostava. *Metall i lityo Ukrainy*, (5), 25.
30. Sulimenko, S. E., Ignatov, N. V., & Pugach, N. E. (2003). Novaya tehnologiya proizvodstva gibridnogo okuskovanogo zhelezorudnogo syrya. *Metall i lityo Ukrainy*, (5), 31.
31. Bika, D. G., Gentzler, M., & Michaels, J. N. (2001). Mechanical properties of agglomerates. *Powder Technology*, 117(1-2), 98-112. [https://doi.org/10.1016/s0032-5910\(01\)00318-7](https://doi.org/10.1016/s0032-5910(01)00318-7).
32. Honeyands, T. et al. (2019). Comparison of the Mineralogy of Iron Ore Sinters Using a Range of Techniques Minerals. 9(6), 333. <https://doi.org/10.3390/min9060333>.
33. Saveliev, S. G., & Kondratenko, M. M. (2023). Investigation of the influence of lime content in the charge and its quality on the sintering process of iron ore raw materials. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 1254(1). 012001. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1254/1/012001>.
34. Lyaluk, V. P., Tarakanov, A. K., Chuprinov, E. V., Zhuravlev, F. M., Kassim, E. E., & Donskov D. A. (2021). Possibility of Increasing the Efficiency of Blast Furnace Smelting Depending on the Operating Conditions of Blast Furnaces. *Steel in Translation*, 11, 795-804. <https://doi.org/10.3103/S0967091221110085>.
35. Lu, L., & Ishiyama, O. (2016). Recent advances in iron ore sintering. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*, 125(3), 132-139. <https://doi.org/10.1080/03719553.2016.1165500>.
36. Chen, L. et al (2016). Study on the interaction behaviour between lump and sinter under the condition of oxygen blast furnace. *Ironmaking & Steelmaking*, 43(6), 458-464. <https://doi.org/10.1080/03019233.2015.1104074>.
37. Higuchi, K., Takamoto, Y., & Orimoto T. et al. (2006). Quality improvement of sintered ores in relation to blast furnace operation. *Shinnittetsu Giho*, 384, 33-37.

Надіслано до редакції / Received: 26.02.2025

Прийнято до друку / Accepted: 30.05.2025