

136 МЕТАЛУРГІЯ

УДК 622.781

doi: 10.31498/2225-6733.48.2024.310674

© Чупринов Є.В.¹, Кассім Д.О.², Реков Ю.В.³**ДОСЛІДЖЕННЯ МОЖЛИВОСТІ ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ ОКАТИШІВ
ЗА РАХУНОК КРАЩОГО МЕТОДУ ПІДГОТОВКИ
ДОННОЇ ТА БОРТОВОЇ ПОСТІЛІ**

Проаналізовано методи управління якістю окатишів за рахунок управління донною і бортовою постіллю. Показано, що даний метод може бути ефективним для підвищення властивостей залізорудної продукції, але не використовується в промисловості через недостатню обґрунтованість. Запропонована нова технологія термозміцнення окатишів, яка дозволяє істотно поліпшити їх міцність при відновленні в доменній печі. Проведені дослідження по термозміцненню окатишів в обпалювальній чаші діаметром 300 мм і висотою шару 400 мм. Результати досліджень показали, що питома продуктивність обпалювального агрегату аналогічна технологічним режимам, міцність на стиск обпалених, проте, міцність на удар і стирання при відновленні у придатної фракції обпалених окатишів, отриманих за запропонованою технологією, істотно краще, ніж за прийнятою. Впровадження розробленої технології в промислових умовах в цехах з виробництва окатишів без реконструкції є досить простим і не вимагає суттєвих капіталовкладень.

Ключові слова: залізорудні окатиші, донна і бортова постіль, термозміцнення, міцність, відновлення, доменна піч.

Ye.V. Chuprynov, D.O. Kassim, Yu.V. Rekov. Study of the possibility of improving the quality of pellets through a better method of bottom and side bed preparation. The methods of managing the quality of pellets due to the management of the bottom and side beds are analyzed. A literature review of existing technologies in this area was carried out and it was shown that this issue is not fully resolved in science. Approximate technologies are studied, their advantages and disadvantages are analyzed. In particular, it is shown that the use of existing technology will require additional burning of pellets in another unit, which is technologically impossible and economically impractical. It is shown that this method can be effective for improving the properties of iron ore products, but is not used in industry due to insufficient justification. A new technology of thermal strengthening of pellets is proposed, which allows to significantly improve their strength during recovery in a blast furnace. Conducted studies on thermal strengthening of pellets in a firing bowl with a diameter of 300 mm and a layer height of 400 mm. The results of the research showed that the specific productivity of the firing unit during heat hardening of raw pellets according to the proposed technology is practically similar to the technological regimes adopted in the operating workshops for the production of pellets. The compressive strength of fired pellets according to the proposed technology and accepted in workshops also practically does not differ. However, the impact strength and abrasion resistance during recovery from a suitable fraction of fired pellets obtained by the proposed technology is significantly better than by the accepted one. It has been proven that the developed technology allows to

¹ канд. техн. наук, доцент, Навчально-науковий технологічний інститут Державного університету економіки і технологій, м. Кривий Ріг, ORCID: 0000-0001-8605-3434, itchupa@gmail.com

² д-р техн. наук, професор, Навчально-науковий технологічний інститут Державного університету економіки і технологій, м. Кривий Ріг, ORCID: 0000-0002-1750-1237, kassim@duet.edu.ua

³ канд. техн. наук, доцент, ТОВ «ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «МЕТІНВЕСТ ПОЛІТЕХНІКА», м. Запоріжжя, ORCID: 0009-0006-0318-0168, yuriy.rekov@mipolytech.education

significantly improve the strength characteristics of fired pellets during the recovery process in the blast furnace, which leads to an improvement in the technical and economic performance of the blast furnace. Implementation of the developed technology in industrial conditions in pellet production shops without reconstruction is quite simple and does not require significant capital investments.

Key words: iron ore pellets, bottom and side bedding, heat hardening, strength, recovery, blast furnace.

Постановка проблеми. При виробництві залізорудних окатишів використовують донну і бортову постіль, які здійснюють важливий вплив на технологічний процес термозміцнення. В якості постілі застосовують готові обпалені окатиші у кількості 30-35% від маси готової продукції. Головним недоліком її застосування є те, що обпалені окатиші донної і бортової постілі повторно нагріваються до температури 900-1300°C і їх скляна залізо-силікатна зв'язка рудних зерен, що є джерелом міцності обпалених окатишів при відновленні, розкристалізовується, що призводить до утворення великої кількості дріб'язку після їх завантаження у доменну піч.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Класична технологія термозміцнення сирих окатишів на конвеєрній обпалювальній машині включає виділення на грохоті з охолоджених обпалених окатишів трьох фракцій: 0-5 мм – дріб'язок (обпалений зворот), 5-10 мм – проміжна фракція (готова продукція) і 10-18 або 10-20 мм – обмежувальна фракція (постіль і готова продукція). Частина готових окатишів, яка направляється в донну і бортову постіль, укладається на колосникові решітки певною товщиною (до 100 мм) з готових обпалених окатишів крупністю 10-18 або 10-20 мм, після чого відбувається укладка на постіль безпосередньо сирих окатишів для їх термозміцнення.

Недоліком класичної технології є те, що в процесі термозміцнення сирих окатишів обпалені окатиші донної і бортової постілі повторно нагріваються до температури 900-1300°C і їх скляна залізо-силікатна зв'язка рудних зерен, що є джерелом міцності обпалених окатишів при відновленні, розкристалізовується [1]. Це тягне за собою істотне зниження міцності обпалених окатишів при відновленні в доменній печі при виплавці чавуну з утворенням великої кількості дріб'язку після їх завантаження у відновлювальний агрегат, що порушує її газодинамічний режим, рівний схід матеріалу та істотно погіршує техніко-економічні показники роботи доменної печі.

Протягом багатьох десятиліть питанню ефективного застосування донної і бортової постілі через призму її рекристалізації не приділялось багато уваги. Досвід авторів та проведений літературний аналіз свідчить про те, що зарубіжні дослідники розглядали постіль в більшій мірі, як частину загального шару окатишів, не виділяючи її в окрему систему, в котрій відбуваються власні газодинамічні та фізико-хімічні процеси. Так, канадські вчені [2] виконали аналіз цілого ряду математичних моделей процесів термозміцнення окатишів із використанням донної і бортової постілі та показали ефективність застосування термокінетичних моделей обпалення на прикладі Канадської залізорудної компанії (ЮСС). Недостатність досліджень в цій області відмічають і в роботі [3], проте, хоч автори і розглядають високотемпературні процеси, що відбуваються в шарі окатишів на обпалювальній машині, головний акцент зроблено на вплив температури дуття, швидкості дуття та реакції окислення на температуру шару та загальні процеси в ньому. Трохи далі пішли дослідники в роботі [4], які на основі аналізу механіки теплообміну, фізико-хімічних змін процесу сушки та попереднього нагрівання окатишів на колосниковій решітці створили математичну модель, яка пройшла перевірку на фабриці з виробництва окатишів підприємства Shougang Mining Company. Модель дозволяє досліджувати газодинамічні параметри шару окатишів і постілі для практичного контролю виробництва та оптимізації дизайну колосників. В роботі [5] показано, що домінуючим механізмом теплообміну при термозміцненні окатишів є конвекція, яка визначається порізністю шару.

Найближче до вирішення цього питання підійшли в СРСР [6]. Авторське свідоцтво описує спосіб обпалення окатишів на конвеєрній машині, що включає укладку на колосникові решітки донної постілі і сирих окатишів діаметром 6-22 мм, їх сушку, обпалення і охолодження; для донної постілі виділяють обпалені окатиші, середній діаметр яких перевищує в 1,08-1,75 рази середній діаметр сирих окатишів. Проте, в промисловості він не був застосований через те, що в обпалених окатишах заявленої крупності (6-22 мм) за мінімальним коефіцієнтом 1,08 (від середнього діаметра

14 мм це 15,12 мм) 69,1% окатишів донної постілі будуть потрапляти в готову продукцію. За максимальним коефіцієнтом діаметр окатишів постілі повинен бути на 2,5 мм більше максимального розміру готових окатишів (від середнього діаметра 14 мм це 24,5 мм), тобто такі окатиші в початкових обпалених окатишах за відомим способом відсутні. В цьому випадку для донної і бортової постілі необхідно буде в окремому агрегаті обпалювати спеціально підготовлені великі окатиші (24,5 мм), що істотно ускладнює і підвищує вартість технології отримання постілі.

Якщо ж врахувати, що в доменній плавці використовують обпалені окатиші з меншим діаметром 5-18 або 5-20 мм (за мінімальним коефіцієнтом, це 12,42 і 13,5 мм), то в готову продукцію потрапить 69 і 67,5% (від їх максимального розміру 18 і 20 мм) обпалених окатишів донної і бортової постілі, які пройшли повторний високотемпературний нагрів, з розкristалізацією залізо-силікатної зв'язки рудних зерен і, відповідно, з низькою міцністю при відновленні, що після завантаження окатишів в доменну піч призведе до порушення її газодинамічного режиму і зниження техніко-економічних показників роботи: зменшення продуктивності доменної печі і збільшення питомої витрати коксу. За максимальним коефіцієнтом – 20,125 і 21,875 мм (перевищення на 2,125 і 1,875 мм від максимального розміру обпалених окатишів) окатиші для донної і бортової постілі в готовій продукції просто відсутні, і постіль необхідно буде також отримувати в окремому агрегаті, що практично неможливо.

Мета статті – дослідження можливості підвищення якості сировини за рахунок удосконалення технології підготовки донної та бортової постілі в цехах з виробництва залізородних окатишів.

Виклад основного матеріалу. Донна постіль використовується для запобігання забивання живого перетину колосникового поля обпалювальних візків сирими окатишами, захисту колосників від перегріву в високотемпературних зонах горна, поліпшення якості готового продукту за рахунок створення раціональної мінімальної різниці температури на границі шар-постіль і верху шару, а також для підвищення ступеня термозміцнення сирих окатишів нижньої частини шару. Бортова постіль використовується для поліпшення якості обпалення сирих окатишів у бортів випалювальних візків, вирівнювання ступеню термозміцнення сирих окатишів по ширині машини і захисту бортів випалювальних візків від перегріву в високотемпературних зонах горна.

Для розробки технологічних рішень з покращення якості залізородних окатишів за рахунок управління донною і бортовою постіллю були проведені наступні дослідження. З підготовленої шихти виготовляли сирі окатиші крупністю, яка забезпечувала отримання окатишів фракції 5-18 або 5-20 мм і виділення з них донної і бортової постілі +18 або +20 мм. Зокрема враховували, що в процесі термозміцнення при максимальній температурі випалу 1300°C ступінь усадки окатишів, в залежності від складу, становить 2-7%. Термозміцнення окатишів здійснювали в обпалювальній чаші [7] діаметром живого перетину 300 мм і висотою шару 400 мм. Висота шару донної і бортової постілі 100 і 70 мм, відповідно.

Результати випробувань наведені в таблиці, з якої видно, що питома продуктивність обпалювального агрегату при термозміцненні сирих окатишів за пропонованою технологією практично аналогічна технологічним режимам, що прийняті в діючих цехах з виробництва окатишів, за винятком використання максимального (1,75) коефіцієнта крупності, при якому питома продуктивність трохи нижче. Аналогічні тенденції стосуються і показника міцності на стиск обпалених окатишів за пропонованою технологією і прийнятою у цехах. А ось міцність на удар і стирання при відновленні у придатної фракції обпалених окатишів, отриманих за пропонованою технологією, істотно краще, ніж за прийнятою, так як вони не проходили повторного високотемпературного нагріву і мають залізоокисну зв'язку рудних зерен.

У окатишах, обпалених по способу, що прийнятий в діючих цехах, в значній частині залізо-силікатна зв'язка розкristалізована, що тягне за собою їх більше руйнування при відновленні. Ступінь відновлення обпалених за розробленим способом окатишів незначно нижчий, ніж за існуючим.

Таким чином, розроблена технологія дозволяє істотно поліпшити характеристики міцності обпалених окатишів в процесі відновлення в доменній печі, що призводить до поліпшення техніко-економічних показників роботи доменної печі.

Таблиця

Порівняння показників якості окатишів, отриманих за діючою та розробленою технологіями

Показники	Діюча техно- логія	Технологія згідно [6]	
		$k_{\min} = 1,08$	$k_{\max} = 1,75$
Питома продуктивність ОКМ, т/м ² ·год	0,96	0,96	0,91
Міцність на стиск окатишів, кг/ок (ДСТУ ISO 4700:2005)	237	233	235
Міцність при відновленні (+6,3 мм), % (ДСТУ ISO 4700:2005)	63,4	62,9	66,7
Стиранність при відновленні (-5) мм, % (ДСТУ ISO 4700:2005)	9,3	9,4	8,7
Ступінь відновлення, % (ДСТУ ISO 7215:2007)	88,5	88,6	86,7

Продовження таблиці

Показники	Розроблена технологія					
	+18 мм			+20 мм		
	18-20 мм	18-22 мм	18-24 мм	20-22 мм	20-24 мм	20-26 мм
Питома продуктивність ОКМ, т/м ² ·год	0,96	0,96	0,95	0,96	0,95	0,87
Міцність на стиск окатишів, кг/ок (ДСТУ ISO 4700:2005)	231	235	236	234	232	238
Міцність при відновленні (+6,3 мм), % (ДСТУ ISO 4700:2005)	85,8	84,1	81,5	83,4	83,7	82,6
Стиранність при відновленні (-5) мм, % (ДСТУ ISO 4700:2005)	4,2	3,9	4,1	3,7	3,8	4,3
Ступінь відновлення, % (ДСТУ ISO 7215:2007)	87,4	88,1	87,2	86,9	86,3	84,2

Впровадження розробленої технології в промислових умовах в цехах з виробництва окатишів без реконструкції є досить простим і не вимагає суттєвих капіталовкладень. Необхідно тільки змінити величину отворів деяких зон існуючих грохотів. Виходячи з виробництва максимального розміру придатної фракції обпалених окатишів (18 або 20 мм) і певної експериментальної величини її зменшення за рахунок усадки (зазвичай в діапазоні 2-7 % або, відповідно, для кожного максимального розміру обпалених окатишів 0,4-1,5 або 0,5-1,7 мм вихідного діаметра сирих окатишів в процесі їх термозміцнення), визначають розмір максимального діаметра сирих окатишів, щоб максимальний діаметр обпалених окатишів був на 2-4 мм більше максимального діаметра придатної фракції. Таким чином, максимальний діаметр сирих окатишів повинен бути, з урахуванням максимального діаметра придатної фракції обпалених окатишів і діапазону величини усадки, відповідно, 22,5-23,5 або 24,5-25,7 мм. Після термозміцнення з обпалених окатишів виділяють послідовно на грохоті наступні фракції: 0-5 мм – дріб'язок у зворот; 5-18 або 5-20 мм – придатна фракція готової продукції; +18 або +20 мм – донна і бортова постіль.

Висновки

1. Проаналізовані технологічні рішення по вдосконаленню процесу термозміцнення залізрудних окатишів за рахунок управління донною та бортовою постіллю. Визначено, що потенціал цього механізму в промисловості повністю не реалізований через відсутність відповідних досліджень.

2. Проведені лабораторні спікання для відпрацювання нової технології, яка передбачає використання у якості донної та бортової постілі тільки обпалених окатишів діаметром на 2-4 мм більше діаметру, що обмежує максимальний діаметр придатної фракції обпалених окатишів.

3. Аналіз характеристик процесу термозміцнення та якості отриманих залізородних окатишів показав, що при застосуванні нової технології питома продуктивність обпалювального агрегату не змінюється, залишається стабільним показник міцності на стиск обпалених окатишів, але відбувається збільшення міцності на удар і стирання при відновленні, що позитивно відображається на роботі доменної печі.

Перелік використаних джерел:

1. Теория и технология подготовки шихтовых материалов для доменной и бездоменной металлургии железа: учебник / Ф. М. Журавлев и др. Кривой Рог : Издатель Чернявский Д.А., 2020. 663 с.
2. Cross M., Blot P. Optimizing the operation of straight-grate iron-ore pellet induration systems using process models. *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*. 1999. Vol. 30. Pp. 803-813. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11663-999-0042-5>.
3. Feng J.-X., Xie Z.-Y., Chen Y.-M. Temperature distribution of iron ore pellet bed in grate. *Journal of Iron and Steel Research International*. 2012. Vol. 19. Pp. 7-11. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1006-706X\(12\)60052-1](https://doi.org/10.1016/S1006-706X(12)60052-1).
4. Development and application of thermal mathematical model of iron ore pellet bed in grate / J.-X. Feng et al. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*. 2011. Vol. 16. Pp. 312-315. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12204-011-1150-3>.
5. Ljung A.-L., Lundström T. S., Tano K. Simulation of heat transfer and fluid flow in a porous bed of iron ore pellets during up-draught drying. *Proceedings of the Fifth International Conference on CFD in the Process Industries*, Melbourne, Australia, 13-15 December 2006. Pp. 1-6.
6. Способ обжига окатышей на конвейерной машине: а.с. 1010144 СССР: МПК: С22В 1/20. № 3332634/22-02; заявл. 23.07.81; опубл. 07.04.83, Бюл. № 13. 4 с.
7. Офлюсовані локальні спеки – огрудкована залізородна моносировина для сучасної доменної плавки / Є.В. Чупринов та ін. *Вісник Приазовського державного технічного університету. Серія: Технічні науки*. 2020. № 41. С. 60-70. DOI: <https://doi.org/10.31498/2225-6733.41.2020.226183>.

References:

1. F.M. Zhuravlev, V.P. Lyalyuk, N.I. Stupnik, V.S. Morkun, E.V. Chuprinov, and D.A. Kassim, *Teoriya y tekhnolohiya podhotovky shykhtovykh materyalov dlia domennoi y bezdomennoi metallurhyy zheleza: uchebnyk* [Theory and technology of preparation of charge materials for blast furnace and blast furnace metallurgy of iron: textbook]. Kryvyj Rih, Ukraine: Yzdatel Cherniavskiy D.A. Publ., 2020. (Rus.)
2. M. Cross, and P. Blot, «Optimizing the operation of straight-grate iron-ore pellet induration systems using process models», *Metallurgical and Materials Transactions B: Process Metallurgy and Materials Processing Science*, vol. 30, pp. 803-813, 1999. doi: **10.1007/s11663-999-0042-5**.
3. J.-X. Feng, Z.-Y. Xie, and Y.-M. Chen, «Temperature distribution of iron ore pellet bed in grate», *Journal of Iron and Steel Research International*, vol. 19, pp. 7-11, 2012. doi: **10.1016/S1006-706X(12)60052-1**.
4. J.-X. Feng, K.-. Liang, C. Zhang, J.-H. Xu, Y.-M. Zhang, and J.-B. Yang, «Development and application of thermal mathematical model of iron ore pellet bed in grate», *Journal of Shanghai Jiaotong University (Science)*, vol. 16, pp. 312-315, 2011. doi: **10.1007/s12204-011-1150-3**.
5. A.-L. Ljung, T.S. Lundström, and K. Tano, «Simulation of heat transfer and fluid flow in a porous bed of iron ore pellets during up-draught drying», in *Proceedings of the Fifth International Conference on CFD in the Process Industries*, Melbourne, Australia, 2006, pp. 1-6.
6. F.A. Riabokon et al., «Sposob obzhyha okatishei na konveiernoi mashyne» [«Method of firing pellets on a conveyor machine»], *author's certificate 1010144 USSR Appl. 3332634/22-02*, Apr. 07, 1983. (Rus.)

7. E.V. Chuprinov, F.M. Zhuravlev, V.P. Lyalyuk, D.O. Kassim, and K.O. Shmeltser, «Ofliusovani lokalni speky – ohrudkovana zalizorudna monosyrovyna dlia suchasnoi domennoi plavky» [«Fluxed local cakes – lumped mono-raw materials for modern blast furnace»], *Visnyk Pryazovskoho derzhavnoho tekhnichnoho universytetu. Serii: Tekhnichni nauky – Reporter of the Priazovskyi State Technical University. Section: Technical sciences*, № 41, pp. 60-70, 2020. doi: 10.31498/2225-6733.41.2020.226183. (Ukr.)

Стаття надійшла 06.03.2024

Стаття прийнята 28.03.2024

УДК 669.715.22

doi: 10.31498/2225-6733.48.2024.310676

© Фон Прусс М.А.*

МЕТОДИ НЕЙТРАЛІЗАЦІЇ ЗАЛІЗОВМІСНИХ ФАЗ В ЛИВАРНИХ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВАХ СИСТЕМИ Al-Si-Cu З ВМІСТОМ ЗАЛІЗА ДО 1,5 % МАС.

У статті представлено результати експериментальних досліджень, які демонструють можливість нейтралізації несприятливих залізовмісних фаз в алюмінієвих сплавах системи Al-Si-Cu, отриманих методом лиття, за допомогою модифікування Cr, Mo, V і Co. Проведено аналіз впливу цих елементів на процес кристалізації, мікроструктуру та фазовий склад алюмінієвих сплавів. Отримані результати свідчать про суттєві зміни у морфології та розподілі залізовмісних фаз, що дозволяє покращити механічні та експлуатаційні характеристики алюмінієвих сплавів.

Ключові слова: модифікування, мікроструктура, алюмінієві сплави, вторинне виробництво, залізовмісні фази.

M.A. Fon Pruss. Methods of neutralization of iron-containing phases in cast aluminum alloys of the Al-Si-Cu system with iron content of up to 1,5 mass. %. The article discusses the effectiveness of various modifiers, namely chromium (Cr), molybdenum (Mo), vanadium (V), and cobalt (Co), in neutralizing the negative impact of iron on the properties of aluminum alloys in the Al-Si-Cu system by altering the morphology of iron-containing phases. The current advancements in the modification of aluminum alloys are examined, focusing on the influence of these elements on microstructural changes and mechanical properties. An in-depth analysis of the microstructure was conducted, and the optimal concentrations of the modifying elements were identified to achieve enhanced mechanical characteristics. The study highlights that the addition of Cr, Mo, V, or Co facilitates the formation of a fine-grained structure and significantly reduces the size of iron-containing phases to approximately 10 μm . Furthermore, the research elaborates on the thermodynamic interactions between iron and the modifying elements, providing insights into the mechanisms by which these modifiers influence the crystallization process and phase distribution within the alloy. This study opens new avenues for the development of high-performance aluminum alloys with optimized microstructures through precise control of modifier concentrations. The improved alloys exhibit superior mechanical properties, making them suitable for applications in various industrial sectors, including automotive and other industries, where high strength and reliability are critical. Experimental results demonstrate that the strategic addition of Cr, Mo, V, and Co can effectively mitigate the adverse effects of iron inclusions, leading to alloys with enhanced ductility, tensile strength, and

* мол. наук. співробітник, Фізико-технологічний інститут металів та сплавів Національної академії наук України, м. Київ, ORCID: 0000-0002-0450-5490, m.fonpruss@gmail.com