

УДК 621.745.55

Д.Ф. Чернега, В.М. Нещадим, П.Д. Кудь, Д.В. Іванченко

## СПОСОБИ СТВОРЕННЯ ПОШАРОВОЇ СИСТЕМИ ІЗ РУДНО-ФЛЮСО-ПАЛИВНИХ КОМПОЗИЦІЙ З ПІДВИЩЕНИМ ВМІСТОМ ТВЕРДОГО ПАЛИВА

Four methods of obtaining pellets with fluxing ore compositions with higher content of solid fuel, based on the combination of feedstock sintering process and sintering at a temperature of 1593–1598 K, namely: 1) a method wherein the solid fuel was mixed with the initial charge materials directly before agglomeration; 2) a method wherein the solid fuel was rolled on the surface of granules of size 10–15 mm, and after that pellets were burned out; 3) the method in which varying particles solid fuel (50 %) were also mixed with the raw materials before sintering, while the second part of them – was rolled on the surface of the granules, followed by imitation of the pellets real process of mixing with solid fuel in a drum mixer; 4) the method in which a solid fuel in an amount of 40 % was mixed with raw materials before sintering were experimentally investigated. Compression strength of burned out fluxing pellets with the higher content of powdered solid fuel, is changed within 1,9–2,45 kN/pellet and is not characterized as high index though it exceeds the requirements of GOST on 0,5–0,95 kN/pellet. The content of iron monoxide (FeO) and iron metal (Fe<sub>met</sub>) in fluxed pellets after burning out was found and it was established, that FeO varies in range of 21,5–27,2 %, whereas Fe<sub>met</sub> varies in range of 11,2–18,9 %. The maximum increase of these indexes was observed in the burned out pellets made according to the fourth method. Increasing the content of iron monoxide and, particularly, iron in the compact metallic charge materials indicates that the use of such technology is accompanied by the increasing of the hematite dissociation degree and plating in the final product and improving its metallurgical properties.

### Вступ

Відомо, що найефективнішим напрямом розвитку доменного виробництва є покращення приготування вихідних шихтових матеріалів. Досягається це насамперед за рахунок використання залізорудної сировини високоякісних концентратів, що вміщують 67 % заліза і більше, при низькому вмісті оксиду кремнію (< 5 %) [1].

Поряд з підвищенням якості залізорудної сировини особлива увага приділяється технології згрудкування сировинних матеріалів. Останнім часом збільшуються випуск залізорудних котунів і їх питома вага в підготовленій металургійній сировині (з 50,8 до 74,7 %). Одночасно відбуваються процеси скорочення вмісту дріб'язку (< 5 мм) як в агломераті, так і в котунах.

Однак незважаючи на позитивні зрушення за останні десятиліття, якість вітчизняних шихтових матеріалів порівняно з країнами ЄС залишається дещо гіршою, особливо за такими показниками, як вміст заліза загального, ступінь металізації, вміст оксиду кремнію, наявність дріб'язку тощо.

Поліпшенню металургійних властивостей котунів, виготовлених як з магнетитових, так і з гематитових концентратів, приділяється особлива увага. Так, у праці [2] відзначається по-

зитивний вплив в'язучих і шлакотвірних домішок у вигляді сульфідно-спиртової бражки і вапняного молока на згрудкування рудно-флюсових композицій, що містять тверде паливо навіть до 30 %. Дослідженнями [3, 4] встановлено, що додавання твердого палива до шихти і використання його у вигляді водовугільної суспензії на випалювальних конвеєрних машинах дає змогу знизити питому витрату природного газу, підвищити міцність котунів і зменшити вихід дріб'язку в спеченому продукті.

Суть запропонованих способів виготовлення котунів з підвищеним вмістом твердого палива, з метою отримання гібридного згрудкованого матеріалу для доменного процесу, полягає в тому, що дисперсне тверде паливо може змішуватись із сировинними матеріалами до їх згрудкування, накочуватись на поверхню гранул крупністю 10–15 мм і розподіляти у міжгранульному просторі в процесі змішування гранул і твердого палива.

Отримані позитивні результати досліджень можуть послужити для реалізації принципу керуваного синтезу формування спеченої пошарової системи із рудно-флюсових композицій, що містять тверде паливо, й дадуть змогу отримати продукцію з високими металургійними властивостями і в подальшому значно удосконалити технологію виготовлення згрудкованої залізорудної сировини для доменної плавки.

## Постановка задачі

Мета роботи – теоретично обґрунтувати й експериментально дослідити способи створення пошарової системи з рудно-флюсових композицій з підвищеним вмістом твердого палива, проаналізувати металургійні властивості випалених за кожним способом котунів та визначити оптимальний режим отримання якісного згрудкованого шихтового матеріалу.

## Методика проведення експерименту

Як об'єкт досліджень використовувались котуни з рудно-флюсових композицій, що виготовлені з концентрату залізної руди ВАТ "Центральний гірничо-збагачувальний комбінат", вапняку, порохнявого коксу та бентоніту. Концентрат залізної руди мав такий хімічний склад, %: 66,7 Fe<sub>заг.</sub>; 7,8 SiO<sub>2</sub>; 25,6 FeO; 0,05 MnO; 0,55 MgO; 0,52 CaO; 0,03S; 0,05 P. Вапняк, що використовувався як флюсова домішка, містив, %: 53,5 CaO; 1,62 SiO<sub>2</sub>; 1,05 Fe; 0,71 MgO, інші невизначені домішки близько 43,12 %. Бентоніт характеризувався таким хімічним складом, %: 52,8 SiO<sub>2</sub>; 18,9 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; 2,84 CaO; 2,14 Fe; 3,78 MgO і близько 19,5 % інших домішок. До складу офлюсованих сирих котунів, що використовувались для дослідження способів створення пошарової системи з рудно-флюсових композицій із підвищеним вмістом твердого палива, входило 76–77 % концентрату, 11–12 % вапняку, 12 % твердого палива з додаванням до суміші сировинних шихтових матеріалів як в'язучої речовини 1 % бентоніту.

У першому варіанті тверде паливо змішувалося з вихідними шихтовими матеріалами безпосередньо перед їх згрудкуванням, тоді як у другому – тверде паливо накочувалося на поверхню гранул крупністю 10–15 мм, і лише потім котуни підлягали випаленню за температури 1593–1598 К. У третьому варіанті частинки твердого палива (50 %) також змішувались із сировинними шихтовими матеріалами перед їх згрудкуванням, а решта накочувалась на поверхню гранул з подальшою імітацією реального процесу змішування котунів із твердим паливом у барабанному змішувачі. В четвертому варіанті тверде паливо в кількості 40 % змішувалося із сировинними шихтовими матеріалами перед їх згрудкуванням; на поверхню отриманих гранул крупністю 10–15 мм накочувалося 40 % твердого палива (як палива робочого) з подальшою імітацією реального процесу інтен-

сивного змішування котунів із твердим паливом у барабанному змішувачі. Після видалення котунів із барабанного змішувача на їх поверхню пошарово додатково наносилось 20 % залишкового палива, що могло відігравати роль пускового палива.

Отримані таким чином котуни підлягали випаленню в електропечі опору за температури 1593–1598 К (1320–1325 °С) протягом 8 хв з подальшим охолодженням їх на повітрі. Швидкість нагрівання котунів залежно від технологічного режиму випалювання змінювалась у межах 50–100 К/хв.

Спечений продукт піддавали хімічному і рентгеноструктурному аналізу з метою визначення вмісту заліза загального, металевого і його монооксиду (FeO). Для визначення міцності шихтового матеріалу спечені котуни піддавали роздавлюванню на машині МР-0,5-1.

## Дослідження процесів згрудкування і випалення залізородних котунів та визначення їх металургійних властивостей

Використання дрібняку твердого палива в складі котунів дало змогу отримати значною мірою відновлювальну атмосферу й істотно зменшити інтенсивність їх окиснення у зоні нагрівання (випалювання). В інтервалі температур випалювання 1553–1598 К протягом невеликого проміжку часу відбувається прогрівання котунів, що супроводжується формуванням визначеної кількості розплаву, причому в рідкій фазі превалює вже оксид FeO замість Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, як і при традиційній технології спікання котунів без наявності у складі твердого палива. В результаті в офлюсованих котунах з основністю 1,4 в рідкій шлаковій фазі переважно утворюються ферити й силікати кальцію при зниженні вмісту силікату заліза (Fe<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>), що призводить до зменшення рівня внутрішніх напруг і підвищення механічної міцності та ступеня металізації спеченого продукту [5].

З метою підтвердження такого розвитку у формуванні зазначених вище властивостей спеченого залізородного матеріалу в роботі проведені дослідження зі створення пошарової системи з рудно-флюсо-паливних композицій і подана порівняльна характеристика ефективності чотирьох варіантів виготовлення котунів з підвищеним вмістом твердого палива, яка відображена на графічному матеріалі, що складається з трьох рисунків. Залежність міцності котунів від варіанту їх отримання показано

на рис. 1, результати хімічного аналізу на визначення монооксиду заліза в котунах — на рис. 2, а вміст заліза металевого, що характеризує ступінь металізації металургійної шихти, по кожному варіанту — на рис. 3.

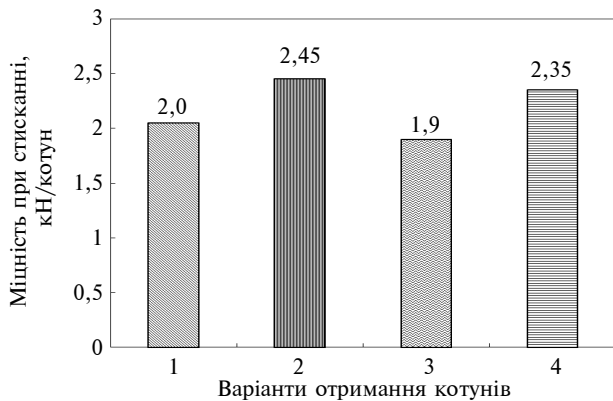


Рис. 1. Зміна міцності котунів основністю 1,4 із вмістом твердого палива 12 %, отриманих за чотирма варіантами і випалених протягом 8 хв за температури 1593–1598 К

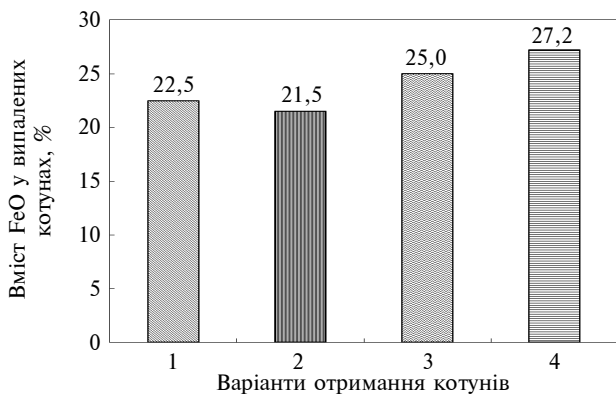


Рис. 2. Результати хімічного аналізу на визначення монооксиду заліза в котунах основністю 1,4 із вмістом твердого палива 12 %, отриманих за чотирма варіантами і випалених протягом 8 хв за температури 1593–1598 К

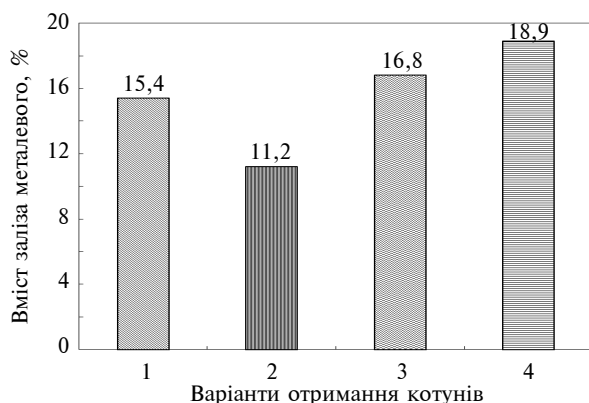


Рис. 3. Зміна вмісту заліза в котунах основністю 1,4 із вмістом твердого палива 12 %, отриманих за чотирма варіантами і випалених протягом 8 хв за температури 1593–1598 К

При механічному змішуванні сировинних шихтових компонентів із твердопаливною насадкою (варіант 1) частинки дисперсного коксу зменшують густину і змочування складових матеріалу, що підлягає згрудкуванню, незважаючи на підвищену пористість частинок твердого палива. З ростом кількості твердого палива в шихті показники згрудкування сировинних шихтових матеріалів будуть зменшуватись у результаті зниження НКВ (найменшої капілярної вологості) [6], що не може не відобразитись на якості випалених котунів, міцність яких не характеризується високим рівнем, хоча і перевищує вимоги держстандарту (рис. 1, вар. 1). Практика показує, що чим більша здатність шихти до згрудкування, тим більша міцність отриманих котунів, а робоча вологість маси буде наближатись до НКВ [6].

З другого боку, якщо всі частинки коксу розміщені всередині гранул, то частинки коксу, ближчі до поверхні гранул, у процесі термообробки будуть інтенсивно окиснюватись киснем повітря. Чим більше буде частинок коксу в поверхні гранул, тим більше утворюватиметься суміші газів  $\text{CO}_2$  і  $\text{CO}$ . Наявність цих газів сумісно з  $\text{CO}_2$ , що виділяється при протіканні реакції дисоціації вапняку, звичайно, сприятиме підвищенню пористості гранул. Підвищена пористість гранул значно полегшує контакт кисню з магнетитом гранул і сприяє росту швидкості його окиснення, — що в кінцевому результаті при швидкоплинності процесу спікання не призводить до істотного збільшення вмісту  $\text{FeO}$  і заліза металевого у випалених котунах, — в результаті зниження ступенів дисоціації гематиту й металізації спеченого продукту, які відповідно дорівнюють 22,5 і 15,4 % (рис. 2, 3, вар. 1). При накопчуванні твердого палива на поверхню гранул крупністю 10–15 мм міцність випалених котунів помітно підвищується (рис. 1, вар. 2), оскільки вуглецеві частинки містяться переважно на поверхні гранул, а тому не створюють додаткових мікротріщин у процесі їх спікання. Пористість і утворення мікротріщин у котунах відбувається переважно за рахунок виділення  $\text{CO}_2$  в результаті дисоціації вапняку. Необхідно також враховувати і той факт, що тверде паливо вище температур 973–1023 К спалахує і горить, тобто відбувається інтенсивне окиснення вуглецю, а це своєю чергою призводить до зростання швидкості росту температури спікання (100 К/хв) і утворення рідкої шлакової зв'язки. В цьому випадку максимальна температура спікання досягається на 8–10 хв раніше, ніж у попередньому варіанті.

Вміст монооксиду заліза ( $\text{FeO}$ ) в котунахах змінюється неістотно, тоді як вміст заліза металевого знижується до 11,2 % (рис. 2, 3, вар. 2). Пояснюється це явище тим, що в результаті інтенсивного окиснення вуглецю в міжгранульному просторі не відбувається утворення достатньої кількості  $\text{CO}$  як газу-відновника, і, як наслідок, відбувається зниження відновлювального потенціалу пошарової системи в цілому.

У третьому варіанті 50 % твердого палива змішується із сировинними шихтовими компонентами безпосередньо перед їх згрудкуванням. Решта палива накочується на поверхні гранул, які в подальшому пропускаються через експериментальний барабан діаметром 250 мм і довжиною 500 мм при швидкості обертання 60 об/хв. Час перебування котунів у барабані сумісно з дисперсним паливом не перевищував 35 с. Під дією відцентрової сили частинки вуглецю прилипали до сирих котунів і вдавлювались у поверхневий шар гранул. Отримані котуни видалялись із барабана і піддавались спіканню в електропечі опору.

Результати досліджень спечених котунів показали, що їх міцність така ж, як і в першому досліді, тоді як вміст монооксиду заліза ( $\text{FeO}$ ) і заліза металевого зростають і досягають значень: для  $\text{FeO}$  – 25 %, а для  $\text{Fe}_{\text{мет}}$  – 16,8 % (рис. 2, 3, вар. 3).

На відміну від попереднього варіанта, в цьому випадку тверде паливо міститься як всередині гранул, так і в міжгранульному просторі. Частинки вуглецю в міжгранульному просторі слугують додатковим джерелом теплоти і сприяють більш інтенсивному протіканню процесу спікання й утворенню в гранулах достатньої кількості рідкої фази, яка “закупорює” пори та мікротріщини в котунах. Доступ кисню до частинок вуглецю, що містяться всередині гранул, затрудняється або значно уповільнюється. Частинки вуглецю в гранулах повільно окиснюються з утворенням достатньої кількості  $\text{CO}$ , що сприяє збільшенню відновлювального потенціалу. Вірогідність процесу окиснення частинок магнетиту, що містяться в ядрі гранул, значно зменшується. Можна припустити, що при швидкоплинності процесу спікання частинки магнетиту в центрі гранул можуть навіть повністю не окиснюватись до гематиту, а наявність рідкої фази шлакової зв'язки буде перешкоджати повторному окисненню вторинного магнетиту при охолодженні спеченого продукту.

У четвертому варіанті 40 % твердого палива змішували з вихідними сировинними матеріалами в процесі отримання сирих гранул, 40 % твердого палива як палива робочого накочували на поверхню гранул, які в подальшому пропускали через експериментальний барабан при швидкості обертання останнього 60 об/хв. Час перебування в барабані котунів сумісно з порохнявим паливом не перевищував 35 с. У результаті такого технологічного прийому частинки вуглецю прилипали до сирих котунів і вдавлювались у їх поверхневий шар. Після видалення котунів з барабана на їх поверхню додатково накочувалось 20 % залишкового палива як палива пускового.

Отримані таким чином котуни піддавались спіканню в електричній печі опору за температури 1593–1598 К, причому швидкість нагрівання до температури 1023 К коливалась у межах 50–60 К/хв, а потім підвищувалась до 100 К/хв. Такий хід процесу випалу гранул забезпечував повне видалення  $\text{CO}_2$  уже за низьких температур у результаті дисоціації вапняку, а подальше прискорене нагрівання робило швидким проходження інтервалу температур 923–1373 К, що дало змогу дещо знизити ступінь окиснення магнетиту. Подальше підвищення температури спікання, як відомо з досліджень [7], призводить до зниження ступеня окиснення магнетиту ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) через стадію магеміту ( $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ ) до магнетиту вторинного ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ).

Підтвердженням можливості протікання процесів при спіканні в такому напрямі слугують результати досліджень спеченого продукту, які показали, що рівень міцності гранул відрізняється від отриманого в попередньому досліді неістотно, тоді як вміст монооксиду заліза ( $\text{FeO}$ ) і заліза металевого (при вмісті  $\text{Fe}_{\text{зар}}$  58,6 %) зростають і досягають значень: для  $\text{FeO}$  – 27,2 %, а для  $\text{Fe}_{\text{мет}}$  – 18,9 % (рис. 1–3, вар. 4).

Відмінність від попереднього варіанта полягає в тому, що випалювання котунів проводилось у два етапи – спочатку нагрівання до 1023 К у повільному, а потім у прискореному режимі. Це дало змогу не тільки швидко пройти температурний інтервал максимального окиснення гранул, але й за наявності в міжгранульному просторі значної кількості твердого палива отримати в офлюсованих котунах достатню кількість рідкої фази, до складу якої входять переважно силікати і ферити кальцію при зниженому вмісті силікату заліза ( $\text{Fe}_2\text{SiO}_4$ ) і яка, як відзначалось для попереднього варіанта, уповіль-

нює доступ кисню до ядра гранул, що сприяє росту відновлювального потенціалу, підвищенню міцності та ступеня металізації випалених котунів.

Порівнюючи результати досліджень, можна констатувати, що застосування технологічного режиму отримання й спікання котунів за четвертим варіантом приводить до одержання найбільш якісних металургійних властивостей спеченого продукту. Застосування такого шихтового матеріалу з достатньою міцністю і підвищеним ступенем металізації є економічно вигідним для доменного процесу, оскільки дає можливість зменшити витрату дорогоцінного коксу в доменній печі та збільшити її продуктивність.

### Висновки

З'ясовано ефективність різних варіантів отримання котунів з підвищеним вмістом твердого палива, що базується на поєднанні процесів згрудкування сировинних шихтових матеріалів і їх спікання за температури 1593–1598 К.

Досліджено міцність на стиснення випалених котунів і встановлено, що міцність офлюсованих котунів, які отримані за різними варіантами і містять тверде паливо як джерело тепла та відновника, змінюється в межах 1,9–2,45 кН/котун і перевищує вимоги Держстандарту на 0,5–0,95 кН/котун.

Вміст монооксиду заліза (FeO) і заліза металевого у випалених офлюсованих котунах змінюється в межах 21,5–27,2 і 11,2–18,9 відповідно. Максимальний рівень зазначених вище показників спостерігається в четвертому варіанті отримання котунів, що базується на раціональному розподіленні твердого палива як всередині котунів, так і в міжгранульному просторі, і при двостадійному режимі випалювання.

Проведення досліджень з перенесенням технології виготовлення котунів за четвертим варіантом як найбільш оптимальним на конвеєрні агломераційні машини відкриває можливість отримання компактних шихтових матеріалів з достатньою міцністю і підвищеним ступенем металізації, економічно вигідним для доменного процесу.

1. *Перебудов В.В., Грицина А.Е., Драгун Б.Т.* Современное состояние и перспективы развития железорудной промышленности Украины // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2010. – № 2. – С. 12–16.
2. *Исследование* некоторых закономерностей процесса окомкования гематитовых концентратов / *И.С. Вохлякова, С.И. Покаленко, Р.А. Полуяхтов и др.* // *Сталь*. – 2010. – № 9. – С. 30–32.
3. *Ладыгичев М.Г., Майзель Г.М., Баранов М.С.* Особенности тепловой обработки окатышей с добавкой в шихту твердого топлива. Сообщение 1 и 2 // *Теплотехнические исследования процессов и агрегатов в черной металлургии*. – М.: Металлургия, 1986. – С. 17–21.
4. *О применении* твердого топлива на обжиговых машинах / *С.Н. Евстюгин, В.И. Клейн, В.В. Брагин и др.* // *Сталь*. – 2009. – № 8. – С. 8–11.
5. *Модель М.С., Лядова В.Я., Чугунова Н.В.* Ферритообразование в железорудном сырье. – М.: Наука, 1990. – 152 с.
6. *Перишков А.А., Соболев А.В.* Справочник рабочего фабрики окомкования. – Челябинск: Металлургия, 1988. – С. 36–49.
7. *Юрьев Б.П., Спирин Н.А.* Результаты исследования процесса окисления железорудных окатышей // *Сталь*. – 2011. – № 9. – С. 9–12.

Рекомендована Радою  
інженерно-фізичного факультету  
НТУУ “КПІ”

Надійшла до редакції  
16 вересня 2013 року