

УДК 621.745.55

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

ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ СПІКАННЯ ЗАЛІЗОРУДНИХ КОТУНІВ ІЗ ПІДВИЩЕНИМ ВМІСТОМ ТВЕРДОГО ПАЛИВА

This paper experimentally confirmed the possibility to obtain fluxed pellets with sufficient strength and high degree of metallization and cost-effective for its use in the blast furnace process. Specifically, we study the influence of the mineral composition of pellets by their strength and establish that the pellets strength with high basicity is somewhat reduced in the temperature range 1473–1493 K due to the significant amount of more brittle slag frame and decrease of the oxidation of pellets, which consequently reduces the amount of hematite, but meets GOST requirements. We investigate the effect of increasing fuel content in the pellets on their metallization efficiency. In this case, the maximum degree of metallization (31,5 %) is achieved with pellet content of about 12 % of pulverized coke fractions 0,08–0,8 mm. Increased pellets metallization occurs because the process of the liquid phase formation is extensively developing in the temperature range 1553–1593 K with the increase of their basicity. Moreover, the more lime is in the pellets, the greater the amount of the liquid phase, in which FeO oxide prevails. The combination of sintering and metallization allows transferring the recovery process from the blast furnace at the stage of preparing metallurgical materials.

Вступ

Відомо, що найбільш перспективним напрямом розвитку доменного виробництва є покращення якості вихідних шихтових матеріалів [1]. Від якості приготовленої шихти прямо пропорційно залежать питома витрата коксу, швидкість протікання хімічних реакцій та фізико-хімічних перетворень у доменній печі, що істотно впливає на інтенсифікацію доменного технологічного процесу [1, 2]. Останнім часом особлива увага приділяється удосконаленню доменного процесу як на стадії підготовки металургійної сировини, так і безпосередньо при веденні плавки в плавильному агрегаті.

Останніми роками розроблена низка технологій спікання агломерату, що включають поліпшення якості згрудкованої агломераційної шихти, підвищення кисню в повітрі, попереднє підігрівання шихти до запалювання [3–5]. У праці [6] встановлено, що продуктивність доменної печі різко зростає при сумісному використанні вугільнопорошкового палива з природним газом і високим вмістом кисню в дутті. Дослідженнями [7, 8] встановлено, що додавання твердого палива до шихти і використання його у вигляді водно-вугільної суспензії на випалювальних конвеєрних машинах дає змогу знизити питому витрату природного газу, підвищити міцність котунів і зменшити вихід дріб'язку в спеченому продукті.

Відомостей про використання у доменному процесі попередньо металізованої залізорудної шихти в періодичних виданнях майже не наводиться, хоча у підручниках [1, 2] відзнача-

ється, що одним із ефективних способів підвищення продуктивності доменних печей, поряд зі збільшенням кількості дуття і зменшенням витрати коксу, є використання високоякісної металізованої шихти. Тому можливість широкого використання твердого палива, як джерела теплової енергії, так і відновника оксидів заліза, у виробництві залізорудних котунів постійно перебуває в полі зору спеціалістів. У зв'язку з цим важливо вирішити такі завдання при виробництві котунів, як підвищення міцності офлюсованих котунів, що вміщують тверде паливо фракції 0,08–0,8 мм, покращення їх ступеня металізації та можливість перенесення частини процесу відновлення з доменної печі на стадію спікання гібридних згрудкованих шихтових матеріалів.

Постановка задачі

Мета роботи – теоретично й експериментально підтвердити можливість отримання офлюсованих котунів із достатньою міцністю і підвищеним ступенем металізації, економічно вигідним для доменного процесу, що дасть змогу перенести частину процесу відновлення з доменної печі на стадію підготовки металургійної сировини.

Дослідження процесу спікання залізорудних котунів і з'ясування їх основних властивостей

Актуальність проведення досліджень у зазначеному напрямі не викликає сумніву, оскільки виготовлення якісних офлюсованих котунів

із підвищеним вмістом вуглецю сприятиме підвищенню ступеня їх металізації і подальшому використанню металізованої шихти в доменному процесі, що забезпечить зниження витрати коксу, підвищення інтенсивності роботи і продуктивності плавильного агрегату.

Вивчення процесу спікання залізорудних котунів із підвищеним вмістом твердого палива і впливу на цей процес деяких факторів становить значний інтерес. Тому в процесі дослідження було з'ясовано роль таких факторів, як основність залізорудних котунів, вміст у них твердого палива і температура спікання, на показники міцності при ударі й стиранні та ступінь металізації спеченого продукту.

Як основний сировинний матеріал використовували концентрат залізної руди, що був отриманий із використанням флотаційного способу збагачення та мокрої магнітної сепарації і який має такий хімічний склад, %: 67,6 Fe; 23,1 FeO; 5,6 SiO₂; 2,05 MnO; 1,05 CaO; 0,5 MgO; 0,14 S; 0,06 P, при вологості маси 9,8 %. Зазначений концентрат використовували для виготовлення як неофлюсованих, так і офлюсованих котунів з основністю 1,4 і 1,9. Відсотковий хімічний склад котунів основністю 1,4 становив: 63,5 Fe; 20,2 FeO; 2,05 MnO; 7,23 CaO; 0,75 MgO; 5,7 SiO₂; 0,14 S; 0,05 P, при вологості маси 8,8 %, а котунів основністю 1,9: 58,9 Fe; 18,9 FeO; 2,05 MnO; 5,8 SiO₂; 10,1 CaO; 1,0 MgO; 0,12 S; 0,05 P, при вологості маси 7,8 %.

Котуни випалювали в печі Таммана в кварцовій трубці діаметром 40 мм, через яку продували підігріте повітря в кількості 35 л/хв. Випалювання котунів (після попереднього підігрівання до 573 К протягом 5 хв) проводилось за температур 1553, 1573 і 1593 К протягом 10 хв їх завантаженням у розігріту кварцову трубку. Після короткої витримки котунів у печі за вказаних температур їх охолоджували сумісно з піччю до 1173 К, а потім видаляли з печі і охолоджували потоком холодного повітря.

Випалені котуни піддавали механічним випробуванням на деформаційне стиснення і стирання із застосуванням стандартних методик дослідження. З допомогою хімічного і рентгеноструктурного методів аналізу визначали у складі котунів монооксид заліза, фазовий склад та їх ступінь металізації.

Для отримання ступеня металізації котунів близько 35 % до зазначених сумішей, хімічний склад яких наведений вище, додавали пилоподібний кокс фракції 0,08–0,8 мм як відновник оксидів заліза. Котуни для доменного вироб-

ництва чавуну, як правило, не містять твердого палива або містять його в кількості 1–2 %, тоді як для прямого отримання заліза за технологією ITmk-3 вміст твердого палива в котунах коливається в межах 20–30 % [1, 5, 9]. Тому в складі котунів дослідної серії вміст твердого палива змінювали в межах 4–12 %.

Використання дисперсного твердого палива в складі котунів дало можливість отримати значною мірою відновлювальну атмосферу замість інтенсивного окиснення котунів у зоні їх нагрівання (випалювання). В інтервалі температур випалювання 1553–1593 К протягом 5 хв відбувається прогрівання котунів, що супроводжується формуванням розплаву, причому в рідкій фазі превалює вже оксид FeO замість Fe₂O₃, як у застосуванні традиційної технології при спіканні котунів без наявності у складі твердого палива. В результаті замість воластоніту (CaSiO₃) і двокальцієвого силікату (Ca₂SiO₄), які мають поля кристалізації в системі CaO·Fe₂O₃·SiO₂, утворюються олівін (CaFeSiO₄) і ферити кальцію з широким полем кристалізації в системі CaO·FeO·SiO₂, що дає можливість різко зменшити рівень внутрішніх напруг і підвищити механічну міцність спеченого продукту [10].

Змінення міцності котунів різної основності з вмістом твердого палива до 10 %, випалених протягом 10 хв за температур 1553, 1573 і 1593 К, показано на рис. 1.

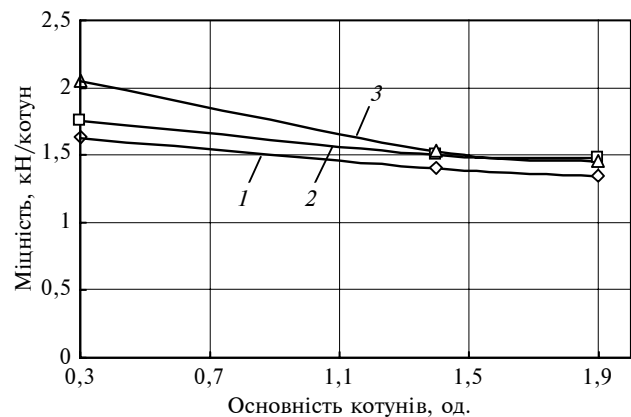


Рис. 1. Змінення міцності котунів різної основності з вмістом палива 10 %, випалених протягом 10 хв: 1 – 1553 К; 2 – 1573 К; 3 – 1593 К

Котуни, отримані за цією технологічною схемою, характеризуються достатніми показниками міцності в холодному стані і не руйнуються при відновленні, оскільки вони мають міцні шлакові силікатні зв'язки і значно менший рівень рекристалізації. Наявність у складі

котунів оксиду магнію до 1,0 % дає змогу не тільки істотно підняти температуру випалу (до 1593 К), але й розширити температурний інтервал випалу. В процесі зміцнення MgO проникає в решітку магнетиту методом дифузії в твердій фазі, утворюючи сполуку $(Mg,Fe) \cdot Fe_2O_3$ на межі зерен, і діє як сильна в'яжуча речовина між зернами оксидів заліза [10, 11].

Наведена на рис. 1 залежність міцності випалених котунів від температури вказує на той факт, що з підвищенням температури до 1593 К міцність їх зростає незалежно від основності. Проте з підвищенням основності їх міцність дещо знижується. Зниження міцності пояснюється тим, що в міру підвищення температури відбуваються інтенсивне оплавлення силікатних мінералів, частка яких з ростом основності збільшується, і утворення значної кількості більш крихкого шлакового каркасу. Крім того, наявність у складі котунів дисперсного твердого палива в кількості 4–12 % призводить до збільшення відновного потенціалу, зменшення ступеня окиснення котунів і, як наслідок, до зменшення кількості гематитової зв'язки, міцність якої в інтервалі температур 1473–1493 К досягає максимальних значень [12, 13].

З іншого боку, в міру підвищення температури до 1573 К і вище в результаті інтенсифікації процесу відновлення, видалення кисню і перебудови кристалічної решітки (у зв'язку з дисоціацією залишкового гематиту і утворенням вторинного магнетиту) по зовнішньому периметру котуна збільшується мікропористість, яка послаблює зв'язки між агрегатами кристалів [12, 14].

Підтвердженням такої закономірності щодо змінення міцності котунів різної основності з підвищенням температури випалювання є результати барабанних проб спеченого продукту (рис. 2).

Важливим завданням покращення якості згрудкованого матеріалу для доменного виробництва чавуну, крім підвищення його основності і "холодної" міцності, є збільшення ступеня металізації після його термообробки. Одна з умов вирішення цієї проблеми – це перенесення частини процесу відновлення з доменної печі на стадію спікання металургійної сировини. Для цього до складу зазначених вище котунів додавали 4–12 % пиловидного коксу фракції 0,08–0,8 мм. Використання в доменній печі попередньо металізованої залізородної шихти зі ступенем металізації 30–35 %, за рахунок додаткового введення в склад котунів пиловидного коксу або вугілля, дасть можливість знизити

витрати коксу приблизно на 7 % та збільшити її продуктивність приблизно на 8 % на кожні 10 % металевого заліза в шихті [1]. Наявність твердого палива у складі котунів у сполученому процесі спікання і металізації приведе до зменшення витрати природного газу приблизно в 1,5 разу. Отримання таких шихтових матеріалів з високими металургійними властивостями дасть змогу підвищити ефективність роботи доменного виробництва.

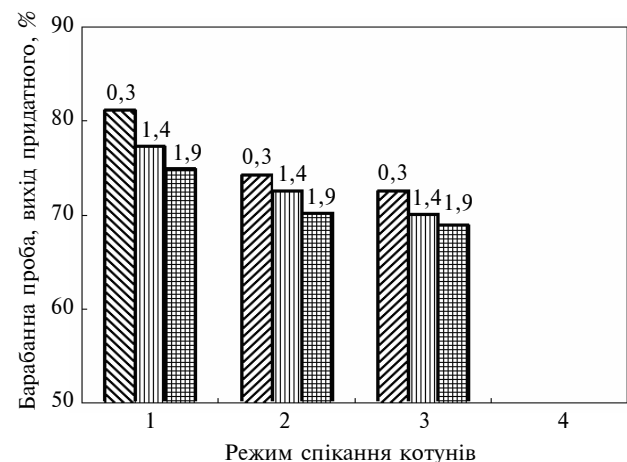


Рис. 2. Результати барабанних проб котунів різної основності, випалених протягом 10 хв: 1 – 1593 К; 2 – 1573 К; 3 – 1553 К

Зміну ступеня металізації офлюсованих і неофлюсованих котунів залежно від вмісту в них твердого палива показано на рис. 3.



Рис. 3. Зміна ступеня металізації котунів різної основності за температур спікання 1553 і 1593 К залежно від вмісту в них твердого палива: 1 – неофлюсовані котуни, випалені за температури 1553 К; 2 – котуни основністю 1,4, випалені за температури 1553 К; 3 – котуни основністю 1,9, випалені за температури 1553 К; 4 – неофлюсовані котуни, випалені за температури 1593 К; 5 – котуни основністю 1,4, випалені за температури 1593 К; 6 – котуни основністю 1,9, випалені за температури 1593 К

Із рис. 3 видно, що зі збільшенням вмісту твердого палива у складі котунів ступінь металізації спеченого продукту постійно зростає і досягає свого максимуму, економічно вигідного для доменного процесу, за наявності в складі шихти близько 12 % вуглецю. З підвищенням вмісту вапна (CaO) у складі котунів (за однакової кількості твердого палива) їх ступінь металізації також підвищується, хоча значно меншою мірою, ніж при зміні в них вмісту твердого палива. Так, ступінь металізації нефлюсованих котунів за температури випалу 1593 К і вмісту в них твердого палива 12 % становить 27,5 %, тоді як ступінь металізації офлюсованих котунів (1,9 од.) за тієї ж температури випалу сягає вже 31,5 %. Підвищення ступеня металізації котунів зумовлюється тим, що в інтервалі температур 1553–1593 К з підвищенням їх основності активно відбувається процес утворення рідкої фази. Причому чим більше вапна у складі котунів, тим більша кількість рідкої фази. З іншого боку, з підвищеннями основності котунів ступінь окиснення спадає [12], оскільки випалювання згрудкованого матеріалу супроводжується утворенням значної кількості рідкої фази, що ускладнює подальший доступ окисника до ядра гранули, а одночасний перебіг процесу дисоціації гематиту сприяє утворенню в центральній зоні котунів переважно магнетитової структури з підвищеним вмістом заліза.

Більш помітна залежність зміни ступеня металізації від температури спікання вказує на той факт, що підвищення температури призводить до збільшення кількості рідкої фази в котунах і до прискорення процесу рідкофазового спікання в них, а також, як наслідок, до зниження ступеня ізотермічного окиснення [12]. Наявність частинок твердого палива в складі

котунів сприяє підвищенню вмісту CO в газовій фазі, що супроводжується ростом відновного потенціалу спеченого шару. Підтвердженням такого явища є утворення в центральній зоні гранул магнетитової структури з наявністю в твердому розчині оксиду заліза (FeO) і збільшеної кількості відновленого заліза, тоді як при високотемпературному випалюванні котунів без палива відбувається дисоціація гематиту з утворенням через стадію маггеміту магнетитової структури з високим вмістом оксиду заліза (Fe_2O_3) без наявності включень відновленого заліза.

Висновки

Установлено, що міцність випалених котунів при збільшенні температури зростає незалежно від величини основності. Проте при підвищенні основності для котунів, отриманих за однакової температури випалу, міцність знижується з 1,6 до 1,4 кН/котун (температура випалу 1553 К), з 1,7 до 1,45 кН/котун (температура випалу 1573 К) і з 2 до 1,5 кН/котун (температура випалу 1593 К).

Досліджено вміст твердого палива в котунах на ефективність металізації залізородних шихтових матеріалів в процесі їх спікання. Установлено, що за використання в складі шихти коксопорошкової насадки ступінь металізації котунів поступово підвищується, досягаючи свого максимуму (31,5 %) при вмісті твердого палива 12 %.

Подальші дослідження перспективні в напрямі розроблення технології, що поєднує процес спікання і металізації, з метою вивчення можливості перенесення частини процесу відновлення з доменної печі на стадію підготовки металургійної сировини.

1. *Основи металургійного виробництва металів і сплавів* / Д.Ф. Чернега, В.С. Богушевський, Ю.Я. Готвянський та ін. – К.: Вища школа, 2006. – 504 с.
2. *Воскобойников В.Г., Кудрин В.А., Якушев А.М.* Общая металлургия. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 2002. – 768 с.
3. *Оптимизация параметров работы окомкователя агломашины в промышленных условиях* / С.В. Кривенко, А.А. Томаш, В.И. Левченко и др. // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2009. – № 9. – С. 101–105.
4. *Кривенко С.В., Томаш А.А., Руських В.П.* Эффективность спекания подогретой шихты с применением обогащенного кислородом воздуха // Сталь. – 2011. – № 1. – С. 2–6.
5. *Исследование некоторых закономерностей процесса окомкования гематитовых концентратов* / И.С. Вохлякова, С.И. Поколенко, Р.А. Полуяхтов и др. // Там же. – 2010. – № 9. – С. 30–31.
6. *Производительность доменной печи при частичной или полной замене природного газа пылевидным топливом* / С.А. Дубровский, А.А. Терновых, Р.А. Полуяхтов и др. // Там же. – 2011. – № 1. – С. 7–10.

7. *Ладыгичев М.Г., Майзель Г.М., Баранов М.С.* Особенности тепловой обработки окатышей с добавкой в шихту твердого топлива. Сообщения 1 и 2 // Тепло-технические исследования процессов и агрегатов в черной металлургии. – М.: Металлургия, 1986. – С. 17–21.
8. *О применении твердого топлива на обжиговых машинах / С.Н. Евстюгин, В.И. Клейн, В.В. Брагин и др.* // Сталь. – 2009. – № 8. – С. 8–11.
9. *Бондаренко Б.И., Шаповалов В.А., Гармаш Н.И.* Теория и технология безкоксовой металлургии. – К.: Наук. думка, 2003. – 535 с.
10. *Модель М.С., Лядова В.Я., Чугунова Н.В.* Ферритообразование в железорудном сырье. – М.: Наука, 1990. – 152 с.
11. *Юсфин Ю.С., Базелевич Т.М.* Обжиг железорудных окатышей. – М.: Металлургия, 1973. – 272 с.
12. *Юрьев Б.П., Спиринов Н.А.* Результаты исследования процессов окисления железорудных окатышей // Сталь. – 2011. – № 5. – С. 9–12.
13. *Меламуд С.Г., Юрьев Б.П.* Исследование кинетики окисления титаномагнетитовых качканарских окатышей // Металлы. – 2000. – № 1. – С. 3–10.
14. *Меламуд С.Г., Потанин Ю.Н., Юрьев Б.П.* К вопросу о напряженном состоянии в обожженных зональных окатышах // Там же. – 2002. – № 1. – С. 3–9.

Рекомендована Радою
інженерно-фізичного факультету
НТУУ "КПІ"

Надійшла до редакції
25 січня 2013 року