

УДК 622.788.3:669.162.1

С.О. Гаврилко ⁽¹⁾, професор, к.т.н.

Ю.В. Куріс ⁽¹⁾, доцент, к.т.н.

Ю.В. Мосейко ⁽¹⁾, доцент, к.п.н.

Ю.С. Гаврилко ⁽²⁾, інженер I-ої категорії

ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК МІЦНОСТІ ОКАТИШІВ ПІД ЧАС ВІДНОВЛЕННЯ

⁽¹⁾ Запорізька державна інженерна академія,
⁽²⁾ ВАТ «Металургійний комбінат «Запоріжсталь»

Исследовано влияние степени восстановления окатышей ЦГОК и ПГОК на их размягчение. Установлено, что при степени восстановления до 50...70 % температура начала и конца размягчения окатышей снижается до минимальных значений, при степени восстановления 71...92 % значения указанных параметров повышаются, однако температура начала размягчения восстановленных окатышей ниже, чем невосстановленных.

Ключевые слова: окатыши, степень восстановления, агломерат, кокс, доменная печь

Досліджено вплив міри відновлення окатишів ЦГЗК та ПГЗК на їх розм'якшення. Встановлено, що за мірою відновлення до 50...70 % температура початку та кінця розм'якшення окатишів знижується до найменших значень, за мірою відновлення 71...92 % значення зазначених параметрів підвищуються, проте температура початку розм'якшення відновлених окатишів нижче, ніж невідновлених.

Ключові слова: окатиші, міра відновлення, агломерат, кокс, доменна піч

Influence of regeneration degree of pellets for CMBC and PMBC on their softening has been studied. It is set that at regeneration degree to a 50...70 % temperature start and end softening of pellets goes down to the minimum values, at regeneration degree to 91...92 % of values of this parameters is promoted, however the temperature of softening start for the regenerated pellets below, than unregenerated pellets.

Key words: pellets, degree of regeneration, agglomerate, coke, blast furnace

Вступ. Вдосконалення підготовки сировини до доменної плавки передбачає як подальше підвищення вмісту заліза, так і поліпшення способів його грудкування.

У зв'язку із залученням до експлуатації родовищ тонковкраплених залізистих кварцитів для одержання багатих концентратів сировину слід подрібнювати до фракції 0,053...0,044 мм. Такі концентрати піддають процесу грудкування переважно шляхом окатування.

Основними причинами інтенсивного розвитку процесу грудкування методом окатування є:

- низька продуктивність агломераційних машин під час спікання тонкоподрібнених концентратів;
- висока транспортабельність окатишів;
- рівномірність фракційного складу (низький вміст дрібних фракцій).

Аналіз публікацій. Нині виробляють частково офлюсовані та неофлюсовані окатиші [1-3]. У доменній печі офлюсовані окатиші відновлюються краще, ніж неофлю-

совані, що сприяє їх руйнуванню у верхній частині її робочого об'єму, погіршенню сходу шихти та збільшенню кількості примусових осідань [4].

Відомо, що під час відновлення зменшується міцність усіх залізородних матеріалів. Дослідники вважають, що основними причинами руйнування окатишів є змінування їх об'єму під час відновлення та наявність анізотропії швидкості відновлення [5]. Під час відновлення окатиша його об'єм зростає на 10...55 %, сягаючи максимуму за мірою відновлення 40 %, коли окатиш містить максимальну кількість іонів Fe^{+2} . Об'єм окатишів під час відновлення змінюється як результат перебудови гексагональних решіток гематиту (параметр решітки $a = 5,42 \text{ \AA}$) на кубічні решітки магнетиту (параметр решітки $a = 8,38 \text{ \AA}$).

У роботі [6] здійснювали дослідження з метою вивчення поведінки різних видів агломерату й окатишів на різних горизонтах доменної печі [6]. Відбирання матеріалів виконували за допомогою вертикального зонду. Доменні печі працювали на шихті, що складається з 100 % офлюсованого агломерату основністю 1,17...1,21, а також шихті з окатишів (окислених і неокислених) основністю 0,50...1,50.

Міцність на стискування початкових зразків фракцією 14...16 мм складала для агломератів 0,39...11,48 кН/зразок, для окатишів – 0,78...22,33 кН/окатиш.

Встановлено, що характер відновлення агломерату й окатишів за висотою доменної печі практично є однаковим. Після відновлення міцність агломерату на середніх горизонтах шахти виявилася вище за міцність окатишів. Мимовільне руйнування агломерату фракцією 10...20 мм було незначним.

Максимальне зниження міцності окатишів на одиницю висоти доменної печі спостерігали під час змінування міри їх відновлення від 5 до 15 %. Під час знеміцнення більшості залізородних матеріалів найбільшу кількість дрібної фракції зафіксували за мірою відновлення, що складає 25...35 %.

Відновлення до металевого заліза ($Fe_{мет}$) на нижніх горизонтах шахти доменної печі сприяє стабілізації, а іноді і поліпшенню характеристик міцності окатишів. За мірою відновлення 70...80 % міцність гранул порівняно із зразками, що складаються з вюститу, збільшується у 2...3 рази.

Під час відновлення окислених окатишів металеве залізо утворюється під час перебудови ромбодричних решіток на кубічну ($Fe_2O_3 \Rightarrow Fe_3O_4$). Тому властивості міцності таких окатишів не покращувалися та вони, як правило, мимоволі руйнуються за всім перерізом печі.

Стійкими до руйнування за умов доменної плавки виявилися неокислені окатиші й агломерат з дрібнозернистою структурою, а найбільшому руйнуванню піддаються погано випалені окатиші [6].

Численні дослідження процесу знеміцнення залізородних матеріалів у ході відновлювально-теплової обробки дозволили виявити деякі закономірності цього явища та запропонувати ряд рекомендацій щодо підвищення гарячої міцності (після відновлювально-теплової обробки) грудкованої сировини [7-10]. Суть таких рекомендацій (оптимізація складу шихти та режиму зміцнюючого випалення) зводиться до одержання грудкованого матеріалу певної фізичної структури та мінералогічного складу, що характеризується підвищеною щільністю і зниженою відновною спроможністю. У роботах [7,9,10] робиться висновок про необхідність наявності у шихті деякої кількості грудкованих шлакотворних оксидів для забезпечення високої гарячої міцності окатишів. Проте така умова знижує ефективність використання для грудкування та наступної металізації багатих залізородних концентратів із низьким вмістом порожньої породи (менше ніж 1,0...1,5 %) зважаючи на дію на них шлакотворних додавань.

Іншим способом досягнення високої гарячої міцності окатишів із багатих концентратів є збільшення щільності сирих окатишів [11].

Останнім часом для збільшення рідкопукливості та десульфуруючої спроможності доменних шлаків (особливо за малим їх виходом на одиницю чавуну) до агломерата та окатишів вводять магнезію. У роботі [12] вказується, що міра відновлення окатишів, офлюсованих доломітизованим вапняком, нижче, а міцність вище ніж для окатишів, офлюсованих вапняком.

Постановка завдання. Метою роботи є вивчення розм'якшення відновлених окатишів Центрального гірничозбагачувального комбінату (ЦГЗК) та Полтавського гірничозбагачувального комбінату (ПГЗК) для одержання результатів, які дозволяють прогнозувати їх поведінку в доменній печі.

Результати дослідження. Досліджували розм'якшення окатишів ЦГЗК і ПГЗК, продукція яких у різні роки поступала на ВАТ «Металургійний комбінат «Запоріжсталь». Хімічний склад досліджуваних окатишів наведено у табл. 1.

Для вивчення розм'якшення відновлених окатишів зразки піддавали відновленню до різної міри у струмі водню на спеціальній установці. Міру відновлення зразка оцінювали за втратами його маси під час відновлення. Хімічний склад відновлених зразків окатишів ЦГЗК подано у табл. 2.

Таблиця 2 – Склад відновлених окатишів ЦГЗК

Міра відновлення, %	Вміст оксидів та елементів, %			
	$Fe_{заг.}$	$Fe_{мет}$	FeO	Fe_2O_3
0	60,06	-	3,26	82,18
12,0	62,68	-	52,23	31,15
16,6	63,51	-	65,47	18,06
21,1	64,06	3,54	63,41	16,00
36,4	65,40	15,91	54,15	10,61
47,6	67,95	26,65	45,30	8,68
58,7	70,80	39,26	35,00	6,20
67,9	74,20	50,24	25,61	5,80
79,2	77,10	61,10	16,46	4,57
87,9	78,93	70,15	8,21	3,43
92,1	81,97	76,17	5,80	1,85

Данні табл. 2 ілюструють змінювання вмісту металевого заліза та його оксидів під час відновлення окатишів. Вміст Fe_2O_3 різко зменшується від 82,0 % (невідновлений зразок) до 18,06 % за мірою відновлення 16,60 %. Подальше відновлення окатишів до 92,10 % сприяє зниженню вмісту Fe_2O_3 до мінімуму (1,85 %). Вміст FeO змінюється згідно екстремальної залежності. На початку періоду відновлення вміст FeO зростає за рахунок різкого зниження вмісту Fe_2O_3 , сягаючи максимуму (65,47 %) під час відновленні до 16,60 %. Потім, коли в окатишах залишається невелика кількість оксиду заліза (16,0 %) вміст Fe_2O_3 починає зменшуватися до мінімуму (5,80 %) під час відновлення окатишів до 92,10 %. У міру відновлення вміст загального заліза ($Fe_{заг.}$) зростає від 60 до 82 % за залежністю, що є близькою до прямолінійної.

Металево залізо зафіксували в окатишах за мірою відновлення до 21,10 % а потім у міру її підвищення вміст заліза зростає до максимальних значень 71,17 % (за мірою відновлення 92,10 %). Результати дослідження розм'якшення відновлених окатишів наведено у табл. 3 і на рис. 1.

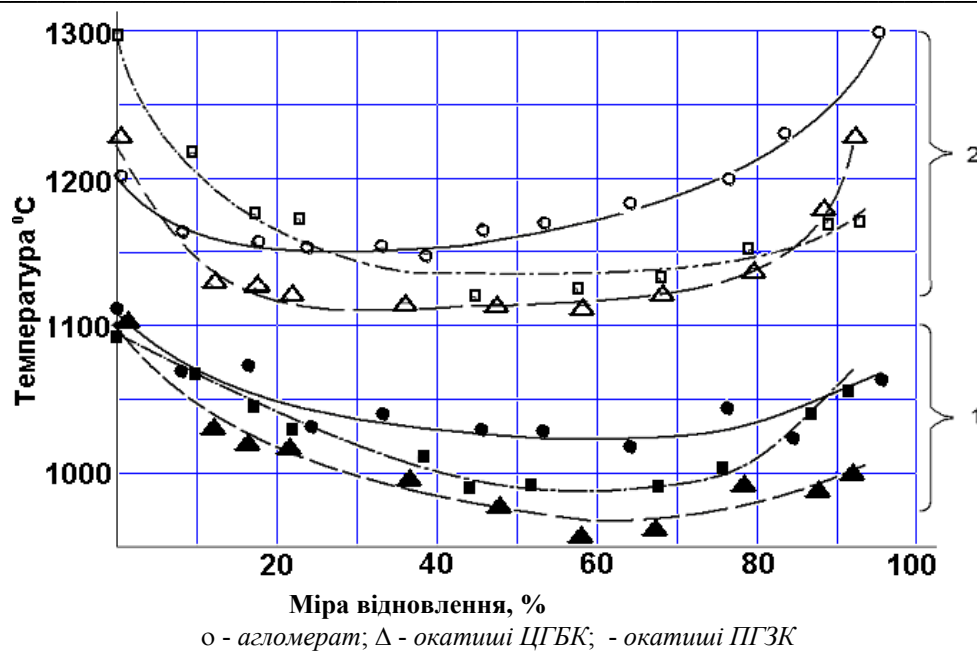


Рисунок 1 – Вплив міри відновлення окатишів на температуру початку (1) та кінця (2) їх розм'якшення

Як видно з рис. 1, температура початку розм'якшення окатишів ЦГЗК знижується з 1100 °С (невідновлений зразок) до 955...960 °С під час відновлення до 58,70...67,90 %. Наступне відновлення до 92,10 % супроводжується підвищенням температури початку розм'якшення окатишів до 1000 °С.

Аналогічно змінюється температура початку розм'якшення окатишів ПГЗК, проте вона є дещо вищою, ніж для окатишів ЦГЗК. Так, температура початку розм'якшення невідновлених окатишів становить 1095 °С. Для окатишів, відновлених до 44,30...68,80 %, мінімальне значення температури початку розм'якшення складає 990 °С, під час подальшого відновлення до 92,40 % температура початку розм'якшення окатишів збільшується до 1060 °С.

Температура кінця розм'якшення під час відновлення змінюється приблизно так само, як і температура початку розм'якшення. Для окатишів ЦГЗК відновлення на 10...20 % сприяє зниженню температури кінця розм'якшення від 1225 °С (невідновлений зразок) до 1130...1120 °С, та її величина не змінюється аж до міри відновлення 70...75 %. Відновлення окатишів до 92,10 % супроводжується підвищенням температури кінця розм'якшення до 1225 °С.

Для окатишів ПГЗК спостерігається плавніше зниження температури кінця розм'якшення та її мінімальні значення (1120...1130 °С) було зафіксовано за мірою відновлення 44,30...68,80 %. Коли міра відновлення окатишів дорівнювала 92,40 % температура кінця їх розм'якшення підвищувалася до 1175 °С.

Таким чином, має місце однаковий характер змінювання температури початку та кінця розм'якшення під час відновлення окатишів ЦГЗК і ПГЗК, а відрізняються тільки абсолютні значення температури. Окатиші ПГЗК починають розм'якшуватися за вищої температури, ніж окатиші ЦГЗК. Це пояснюється тим, що окатиші ЦГЗК частково є офлюсованими та за дії температури й тиску вони починають раніше розм'якшуватися, оскільки їх шлакова складова характеризується наявністю у своєму складі легкоплавких сполук на основі $CaO \cdot SiO_2$. Окатиші ПГЗК є неофлюсованими з більш тугоплавною шлаковою складовою (SiO_2).

Для порівняння на рис. 1 наведено значення температури початку та кінця розм'якшення офлюсованого агломерату ВАТ «Металургійний комбінат «Запоріжсталь» [13-14]. Видно, що характер змінювання температури початку та кінця розм'якшення агломерату під час його відновлення є таким же як і для окатишів, проте агломерат починає розм'якшуватися за вищої температури в усьому інтервалі відновлення, ніж окатиші.

За умов доменної плавки така обставина має вирішальне значення. Агломерат у доменній печі починає розм'якшуватися за вищої температури та сприяє розташуванню зони первинного шлакоутворення нижче за висотою печі, ніж окатиші. Це збільшує (за висотою печі) «суху» зону відновлюваних залізородних матеріалів і, як наслідок, сприяє кращому використанню хімічної та теплової енергії висхідного відновного газу, що супроводжується зниженням витрати коксу. Окрім того, зменшення за висотою печі зони первинного шлакоутворення знижує опір висхідному потоку горнового газу, що дозволяє подавати до печі більшу кількість повітря та підвищити її продуктивність.

Вплив міри відновлення окатишів та агломерату на розм'якшення можна пояснити їх мінералогічним складом. Петрографічний аналіз зразків агломерату показав, що у невідновленому зразку спостерігається значна кількість тугоплавких фаз – гематиту (10 %) та магнетиту (35...38 %). Підвищення міри відновлення зразків агломерату до 20 % призводить до зникнення гематиту, а кількість магнетиту зростає до 44...46 %. Подальше відновлення агломерату призводить до зменшення кількості магнетиту та за мірою відновлення, що складає 30 %, він є практично є відсутнім.

Кількість вюститу починає помітно збільшуватися за мірою відновлення 18...20 % за рахунок відновлення магнетиту та найбільшу його кількість (45...55 %) спостерігали у зразках за мірою відновлення 30...40 %. Найбільшим значенням вюститу відповідають мінімальні значення температури початку та кінця розм'якшення. Встановлено, що за мірою відновлення 60...70 % температура початку та кінця розм'якшення практично не змінюється. Наступне відновлення зразків призводить до зниження вмісту вюститу до мінімуму та до подальшого підвищення вмісту металевого заліза (60...65 %), який стає провідною фазою. Зерна металевого заліза сусідніх шматочків зростаються між собою, утворюючи суцільний металевий каркас в усьому об'ємі дослідженого зразка, який повільно розм'якшується під дією температури та тиску. У зв'язку з цим зразки починають розм'якшуватися за вищої температури (окатиші ЦГЗК – 1000 °С, ПГЗК – 1060 °С і агломерат – 1063 °С). Температура кінця розм'якшення також зростає до максимальних значень: для окатишів ЦГЗК – 1225 °С; ПГЗК – 1175 °С та агломерату – 1307 °С.

Висновки

1. Відновлення окатишів ЦГЗК, ПГЗК та агломерату супроводжується зниженням температури початку та кінця їх розм'якшення. Характер змінювання цієї температури під час відновлення залізородних матеріалів є ідентичним і відмінність полягає тільки в її абсолютних значеннях: мінімальну температуру мають окатиші ЦГЗК, вищу температуру – окатиші ПГЗК та найвищу температуру – офлюсований агломерат.

2. Невідновлені агломерат та окатиші починають розм'якшуватися за досить високої температури (1112 °С; 1095...1100 °С відповідно), що пояснюється наявністю гематиту та магнетиту. Під час відновлення до 30...40 % у зразках збільшується кількість легкоплавкої складової – вюститу (Fe_xO), що призводить до мінімальних значень температури розм'якшення. Підвищення температури початку розм'якшення за

мірою відновлення більше ніж 80 % пояснюється створенням металевого каркаса з відновленого заліза в усьому об'ємі зразка.

ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРИ

1. *Попов, Ф. У.* Окатыши – эффективное металлургическое сырье [Текст] / Ф. У. Попов, Н. Н. Бережной, Н. А. Бондаревский // Металлургическая и горнорудная промышленность. – 1974. – № 5 (89). – С. 15-17.
2. *Крюков, Н. М.* Освоение технологии доменной плавки на офлюсованных окатышах [Текст] / Н. М. Крюков // Металлург. – 1972. – № 10. – С. 10-13.
3. *Новиков, В. С.* Применение высокоосновного агломерата и неофлюсованных окатышей в доменной шихте [Текст] / В. С. Новиков // Черная металлургия. – 1977. – Вып. 3 (813). – С. 13-14.
4. *Бабарыкин, Н. Н.* Использование неофлюсованных и офлюсованных окатышей для выплавки чугуна на Магнитогорском металлургическом комбинате [Текст] / Н. Н. Бабарыкин // «Экспресс-информация» Черная металлургия. – М. : 1980. – № 2. – С. 19.
5. *Шайб, У.* Особенности восстановления гематитовых руд, агломерата и окатышей в доменной печи [Текст] / У. Шайб // Черные металлы. – 1967. – № 19. – С. 22-24.
6. Поведение агломерата и окатышей в доменной печи [Текст] / *В. И. Логинов, А. И. Парфенов, И. Л. Колесник* [и др.] / Черная металлургия. – 1973. – № 6 (768). – С. 31-33.
7. Анализ работы доменных печей ОАО ДМЗ им. Петровского на железнорудной шихте различного состава [Текст] / *В. А. Петренко, О. В. Бочка, В. В. Котов* [и др.] // Металл и литье Украины. – 2003. – № 5. – С. 25-28.
8. Восстановительно-тепловая обработка железорудного и марганцевого сырья [Текст] / *С. А. Пчелкин, А. Е. Воронтышев, В. С. Кудрявцев, В. А. Мудросевич.* – М. : Наука, 1974. – С. 35-38.
9. Свойства обожженных окатышей в зависимости от их основности и содержания кремнезема в исходном концентрате [Текст] / *Л. А. Дрожилов, Ф. М. Журавлев, А. В. Мерлин* [и др.] // Черная металлургия. – 1975. – № 2 (788). – С. 33-35.
10. *Юсфин, Ю. С.* Исследование упрочнения и металлургических свойств окатышей из Лебединского концентрата [Текст] / Ю. С. Юсфин, Т. Н. Базилевич, В. П. Трофимов // Сталь. – 1975. – № 6. – С. 485-490.
11. *Похвиснев, А. Н.* Получение прочных при восстановлении окатышей из богатых железорудных концентратов [Текст] / А. Н. Похвиснев, Н. Ф. Пашков, С. Г. Савельев // Известия вузов. Черная металлургия. – 1976. – № 9. – С. 30-32.
12. *Ванюкова, Н. Д.* Исследование металлургических свойств железорудных окатышей, полученных с твердым топливом [Текст] / Н. Д. Ванюкова / Металлургическая и горнорудная промышленность. – 2001. – № 3 (204). – С. 12-15.
13. Определение температуры размягчения восстановленного агломерата [Текст] / *Ю. М. Потебня, С. А. Гаврилко, Р. Г. Рихтер, Е. В. Савченко* // Известия вузов. Черная металлургия. – 1971. – № 12. – С. 27-29.
14. *Потебня, Ю. М.* Влияние степени восстановления агломерата на его температуры размягчения [Текст] / Ю. М. Потебня, С. А. Гаврилко // Металлургия и коксохимия : межвед. научн.-техн. сб. – Киев : Техника, 1972. – Вып. 29. – С. 14-20.

Стаття надійшла до редакції 28.02.2013 р.

Рецензент, проф. В.М. Ковшов