

УДК 622.788.3:669.162.1

Ю.В. Мосейко⁽¹⁾, доцент, к.п.н.

Ю.В. Куріс⁽¹⁾, професор, д.т.н.

О.С. Воденнікова⁽¹⁾, доцент, к.т.н.

С.В. Бараннік⁽¹⁾, студент

Ю.С. Гаврилко⁽²⁾, інженер I категорії

ВИВЧЕННЯ ІНТЕРВАЛУ РОЗМ'ЯКШЕННЯ ВІДНОВЛЕНИХ ЗАЛІЗОРУДНИХ МАТЕРІАЛІВ РІЗНИХ ФРАКЦІЙ В УМОВАХ ДОМЕННОГО ПЛАВЛЕННЯ

⁽¹⁾ Запорізька державна інженерна академія,

⁽²⁾ ВАТ «Металургійний комбінат «Запоріжсталь», м. Запоріжжя

Изучены причины неравномерного состава и качественных показателей железорудных материалов в процессе их спекания на агломерационной машине. Представлены результаты исследования степени размягчаемости разных фракций восстановленных железорудных материалов, позволяющих прогнозировать их поведение в условиях доменной печи, с целью улучшения показателей ее работы.

Ключевые слова: доменная печь, железорудный материал, восстановление, фракция, степень размягчаемости

Вивчено причини нерівномірного складу та якісних показників залізорудних матеріалів під час їх спікання на агломераційній машині. Подано результати дослідження міри розм'якшення різних фракцій відновлених залізорудних матеріалів, що дозволяють прогнозувати їх поведінку в умовах доменної печі, з метою поліпшення показників її роботи.

Ключові слова: доменна піч, залізорудний матеріал, відновлення, фракція, міра розм'якшення

There are studied causes of nonuniform of composition and qualitative indicators of iron-ore materials at their sintering on a sinter machine. There are presented the results of research for different factions softening degree of the recovered iron-ore materials, allowing to forecast their action in the conditions of blast furnace, with the purpose of improvement of indicators of its work.

Keywords: blast furnace, iron-ore material, renewal, faction, softening degree

Вступ. Інтенсифікація доменного процесу надає жорсткі вимоги до властивостей залізорудної сировини. Для зазначеного виробництва оцінку якості сировини зазвичай здійснюють за хімічним складом, вмістом фракції -5,0 мм, а також початкової міцності за ГОСТ15137-87 [1]. Такі показники, хоча і досить сильно впливають на газодинамічні властивості стовпа шихтових матеріалів у робочому об'ємі доменної печі, проте не повною мірою відображають особливості фізико-хімічних процесів, які визначають показники роботи печей даного типу.

Одним з шляхів інтенсифікації доменної плавки служить підвищення газопроникності нижньої частини стовпа шихтових матеріалів у печі, що може бути досягнуто шляхом поліпшення фізико-хімічних властивостей рідкої фази, тобто збільшенням рухливості шлаку зразу після його розплавлення. Склад шлаку, а, отже, його хімічна активність, температура плавлення, в'язкість та інші властивості значною мірою визначають якість чавуну, що виплавляють, інтенсивність процесу плавлення та рівність ходу доменної печі. Враховуючи регулюючу роль шла-

ку в доменній печі, його склад слід вибирати, орієнтуючись на температуру кристалізації та в'язкість при температурах, близьких до кристалізації.

Аналіз досягнень і публікацій. В умовах більшості металургійних підприємств СНД підвищення властивостей агломерату може бути досягнутим зменшенням вмісту скла у його мікроструктурі за рахунок збільшення кількості розплаву, змінюванням його хімічного та мінералогічного складу, а також зниженням температури плавлення.

В зв'язку з цим слід зазначити роботи щодо мінералогії та петрографії залізорудних матеріалів [2,3]. Так, під час переробки зазначеної сировини з концентратів різного хімічного складу відбувається утворення складних феритних фаз, у яких виявлено практично всі компоненти шихтових матеріалів. Першою до реакції з оксидом заліза вступає вапно з утворенням у твердій фазі кальцієвих феритів [3]. Поява феритів кальцію пояснюється низькою температурою початку реакції між оксидом кальцію (CaO) і двооксидом заліза (Fe_2O_3) в інтервалі температури 500...900 °C [4] і великими швидкостями взаємодії у твердій фазі. За характером розташування мінеральних фаз у агломераті можна констатувати, що

залежно від хімічного складу залізородної сировини в ній утворюються різні феритні фази [5].

В усіх реакціях між гематитом, вапном і кварцом спостерігається чітка послідовність кристалізації фаз: у центрі зерна початкового вапна зона кристалічного оксиду кальцію та двокальцієвого ($2CaO \cdot Fe_2O_3$) фериту; потім завжди вузька зона однокальцієвого ($CaO \cdot Fe_2O_3$) фериту та тільки щодо периферії – зона спільної кристалізації гематиту, однокальцієвого фериту та двокальцієвого силікату.

Фаза напівкальцієвого ($CaO \cdot 2Fe_2O_3$) фериту є стійкою у подвійній системі $CaO \cdot 2Fe_2O_3$ та може існувати за повної відсутності монооксиду заліза (FeO). Однокальцієвий і двокальцієвий ферити не утворюються у складі добре спеченої залізородної сировини звичайної основності. Зазначені ферити можна виявити тільки в об'ємах незасвоєного флюсу, де вони кристалізуються разом із зернами оксиду кальцію та двокальцієвого силікату.

Для реальних залізородних матеріалів головним продуктом утворення феритів на стадії твердофазного зміцнення сировини звичайної основності служить напівкальцієвий ферит і фази, що є близькими до нього за хімічним складом [6].

Японськими дослідниками встановлено, що тільки дрібнопориста структура гематиту та голчастого кальцієвого фериту забезпечує необхідні показники відновлюваності та гарячої міцності. Проте одержання агломерату з переважанням таких фаз потребує строгого дотримання температурного режиму, підвищеної основності агломерату за відносно високим вмістом оксиду алюмінію. Окрім того, голчастий ферит є нестійким за температури вище ніж $1300\text{ }^\circ\text{C}$ [7]. Вивчаючи голчастий напівкальцієвий ферит у агломераті ВАТ «Магнітогорський металургійний комбінат» Т.Я. Малишева дійшла до аналогічних висновків [3].

Нині у світовій практиці перехід на технологію виробництва феритного агломерату здійснюється тільки на основі застосування спеціально підготовленого негашеного вапна. У цьому плані значний досвід накопичено на агломераційних фабриках України, на яких першими у світі було налагоджено її виробництво та широке застосування [8].

Під час вибирання раціональних шляхів підвищення техніко-економічних показників доменного плавлення вивчають поведінку залізородних матеріалів у печі, зокрема, змінювання їх агрегатного стану в процесі нагрівання за різної температури. Вивчення стану цих матеріалів і їх

поведінки у низькотемпературній зоні доменної печі виконано досить детально. У високотемпературній зоні зазначеної печі, де відбуваються процеси розм'якшення та плавлення залізородних матеріалів, їх поведінка визначається, переважно, температурними умовами та мірою відновлення, які вивчено у меншій мірі.

Постановка завдання. Завданням роботи є вивчення міри розм'якшення відновлених залізородних матеріалів різних фракцій, яку прогнозують у високотемпературній зоні доменної печі.

Основна частина досліджень. За виробничих умов ВАТ «Металургійний комбінат «Запоріжсталь» виконували відбирання проб залізородної сировини масою $5 \dots 7$ кг кожної фракції. Потім проби піддавали послідовному дробленню та розсіванню на ситах розміром осередки $3,0$ і $1,0$ мм та за наступних досліджень використовували агломерат фракції $1,0 \dots 3,0$ мм. Подальше відновлення зразків залізородних матеріалів здійснювали з використанням водню на установці з визначення його міри відновлення, при цьому величину зазначеного показника оцінювали за втраченою масою зразків під час їх теплової обробки [9].

Дослідження щодо вивчення міри розм'якшення зразків відновленого агломерату виконували на стенді для визначення якості залізородних матеріалів, що є подібним до описаного у роботі [10]. Стенд містить ємність з розташованою в ній реакційним стаканом з дірчастим дном, шток з реєстратором переміщення та термоелектричний термометр, а також забезпечений трубкою з електродом, розміщеними у штоку. Рідка електропровідна фаза, що утворюється із зразка відновленого агломерату, витікає з дірчастого дна стакана у центр конічного дна ємності та замикає електричне коло між електродом і дном ємності, що дозволяє фіксувати температуру переходу рідкої фази у цілком рухливий стан, тобто температуру початку розм'якшення відновленого агломерату. Наступний контроль усадки зразка та моменту відривання рідкої фази дозволяє визначати температуру завершення розм'якшення агломерату, а також інтервал його в'язкопластичного стану.

Слід зазначити, що нагрівання зразків у перші 45 хвилин виконували із швидкістю 14 град/хв. (імітація нагрівання шихти в печі під час опускання її на $5 \dots 6$ м в області верхнього ступеня інтенсивного теплообміну) і далі із швидкістю $5 \dots 6$ град/хв. (імітація повільного нагрівання шихти у печі за температури вище ніж $830 \dots 850\text{ }^\circ\text{C}$). Загальна тривалість експерименту для кожного зразка складає дві години,

що відповідає тривалості попадання шихти до нижньої частини шахти доменної печі [11].

Слід зазначити, що наявність неоднорідності залізородного матеріалу по своєму хімічному

складу (табл. 1) визначається повнотою процесу його спікання на агломераційній машині, а, отже, повнотою фізико-хімічних перетворень протягом вказаного процесу.

Таблиця 1 – Хімічний склад залізородних матеріалів різних фракцій

Фракція, мм	Хімічний склад, %								
	CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	MnO	Fe	FeO	CaO _{віль}	CaO+MgO/SiO ₂
+60	13,52	10,90	1,10	1,27	0,59	51,52	10,54	1,125	1,34
-60 +40	13,89	10,75	0,94	1,29	0,47	51,48	11,50	1,10	1,37
-40 +25	13,66	10,69	1,02	1,34	0,55	51,69	12,56	1,10	1,38
-25 +10	13,05	11,85	0,99	1,29	0,64	50,95	13,14	1,21	1,18
-10 +5	13,56	10,78	1,07	1,26	0,49	51,35	13,94	1,31	1,36
-5	13,68	9,54	1,04	1,27	0,56	50,16	11,66	1,74	1,46

Встановлено, що головна частина гранулометричного складу залізородних матеріалів ВАТ «Металургійний комбінат «Запоріжсталь» (більше ніж 95,0 %) подана фракціями - 5 +40 мм.

Хімічний склад відновлених залізородних матеріалів різних фракцій, температура початку (T_1), завершення (T_2) їх розм'якшення, а також інтервал розм'якшення (ΔT) подано у табл. 2.

З результатів досліджень, які подано у табл. 2, випливає, що для залізородних матеріалів розглянутих фракцій під час підвищення міри їх відновлення до 60...70 % відбувається зниження температури початку розм'якшення, а процес відновлення до 92 % супроводжується підвищенням температури початку розм'якшення, проте за абсолютною величиною її значення нижче, ніж для невідновлених матеріалів.

Встановлено, що найнижчою температурою початку та завершення розм'якшення для дослідженого інтервалу відновлення залізородних матеріалів характеризується агломерат фракції - 5,0 мм. У міру збільшення побільшеності шматків агломерату температура початку та завершення його розм'якшення зростає. Найвище значення зазначеної температури зафіксовано для агломерату фракції -60,0 +40,0 мм. Отже, наявність у залізородному матеріалі фракції менше -5,0 мм, призводить, як до зниження газопроникності шару шихтових матеріалів, так і більш ранньому створенню розм'якшеної маси за висотою робочого об'єму доменної печі.

Під час розробки рекомендацій щодо зниження вмісту в спеченому агломераті фракції менш ніж -5,0 мм вивчали умови спікання залізородних матеріалів шляхом дослідження мінералогічного складу шару, що спікають.

Як впливає з роботи [3], верхня частина шару, що спікають на агломераційній машині, внаслідок короткочасного його перебування у зоні високої температури та наступного швидкого охолодження холодним повітрям, відрізняється низькою міцністю і містить значну кількість дрібної фракції. У нижній частині шару, що спікають, залізородний матеріал, знаходячись, тривалий час на ділянці високої температури, оплавляється, що призводить до значного зростання його міцності.

Головні причини нерівномірного складу та якості спеченого агломерату за висотою його шару полягають у сегрегації залізородних матеріалів під час їх завантаження на агломераційну машину та наявність несприятливого температурно-теплового режиму спікання за висотою шару.

Неоднаковість температурно-теплової обробки за висотою шару матеріалу супроводжується наявністю нерівномірності його властивостей. Внаслідок того, що температура спікання залізородних матеріалів підвищується поступово, у міру проходження зони горіння зверху донизу за висотою шару, верхній шар таких матеріалів не отримує теплоту в кількості, що є достатньою для повного проходження процесу спікання. У зв'язку з цим у залізородному матеріалі верхнього шару, через нетривалість його перебування в зоні дії високої температури (до 1400 °C) та наступного швидкого охолодження холодним повітрям, не встигають у повному обсязі завершитися фазові перетворення та, як наслідок, у мікроструктурі одержаного агломерату переважають залишкові зерна шихти, а в'язуче представлено нерозкриталізованим склом. Агломерат, що утворюється, має досить низькі характеристики міцності.

Таблиця 2 – Хімічний склад відновлених агломератів різних фракцій, температура початку (T_1), кінця (T_2) і інтервал (ΔT) розм'якшення

Фракція, мм	Хімічний склад, %				Міра відновлення агломерату, %	Параметри розм'якшення, °С		
	$Fe_{газ}$	Fe_2O_3	FeO	$Fe_{мет}$		T_1	T_2	ΔT
+60	51,48	61,92	10,45	-		1146	1235	89
	54,95	7,74	57,12	5,12	28,16	1057	1167	110
	56,72	3,46	47,79	17,19	44,32	1045	1178	133
	59,22	2,81	31,60	31,72	62,47	1032	1186	154
	63,14	1,85	5,08	57,89	92,12	1050	1283	233
-60 +40	51,41	60,74	11,45	-		1136	1203	77
	54,87	14,25	57,78	-	17,56	1062	1164	104
	57,42	6,78	48,70	14,82	38,07	1056	1160	104
	63,70	2,65	18,12	47,77	76,75	1062	1214	152
	66,13	1,42	4,64	61,50	92,95	1078	1325	251
-40 +25	51,66	59,85	12,56	-		1136	1205	69
	51,53	15,28	52,51	-	21,66	1072	1169	97
	56,87	7,06	39,31	21,44	47,75	1054	1178	124
	58,54	4,11	19,32	40,65	73,41	1030	1185	155
	61,51	0,72	5,36	56,82	93,21	1042	1248	206
-25 +10	51,90	58,16	13,07	-		1070	1174	104
	54,33	34,96	38,34	-	6,55	1044	1162	128
	56,17	4,46	42,94	19,63	46,52	1022	1158	136
	58,10	3,38	28,66	33,44	63,69	1005	1172	166
	62,57	2,10	9,12	53,88	86,85	1044	1238	194
-10 +5	51,39	57,93	13,94	-		1084	1152	68
	53,16	15,65	51,74	1,93	20,89	1025	1121	96
	55,27	11,24	29,04	24,82	51,85	1010	1141	131
	58,16	6,18	28,22	31,84	60,22	996	1147	151
	62,57	2,51	13,42	50,39	81,73	1012	1186	174
-5	50,15	58,64	11,62	-		1050	1147	97
	53,14	16,12	51,15	2,06	19,70	1001	1123	122
	56,85	4,52	50,57	22,16	48,62	949	1108	159
	59,79	2,20	17,03	45,05	78,05	942	1139	197
	65,02	2,00	0,74	63,07	94,90	1025	1236	211

Максимальну кількість вільного вапна у верхній частині шару, що спікають, можна пояснити сегрегацією залізородних матеріалів, а його повне зникнення у нижній частині шару – підвищенням температури спікання, збільшенням часу перебування цих матеріалів за вказаної температури, що сприяє взаємодії вапна з розплавом до його повного зникнення. Нерівномірність процесу спікання шихтових матеріалів посилюється також локальним збагаченням їх окремих ділянок коксиком. У місцях скупчення коксика відбувається швидке зростання температури спікання та відновні умови сприяють створенню у цьому мікрооб'ємі легкоплавкого залізолікатного розплаву, збагаченого оксидом заліза $FeO \cdot Fe_2O_3$. Швидке охолодження

верхньої частини залізородних матеріалів холодним повітрям супроводжується припиненням у ньому процесу спікання, внаслідок чого спостерігаються області агломерату, де в одному мікрооб'ємі разом з початковою гематитовою рудою та кварцом існують ділянки «замороженого» залізолікатного розплаву з найдрібнішими кристалітами магнетиту, воститу і залишками коксика. При цьому контакти різних за складом і структурою мікрооб'ємів агломерату є найменш міцними.

У зв'язку з цим пропонується понизити негативне впливання сегрегації залізородних матеріалів шляхом зменшення верхньої межі побільшеності цих матеріалів і вапняку, що буде сприяти глибшому протіканню реакцій утворен-

ня агломерату з повним засвоєнням вапна, а, отже, дозволить усунути «білі» вкраплення незасвоєного вапна й області кристалізації двохкальцієвого силікату. Для досягнення вирівнювання температурно-теплогового режиму спікання за висотою шару залізородних матеріалів пропонується перенести надлишкову кількість теплоти з його нижньої частини у верхню частину, збільшуючи вміст вуглецю в залізородних матеріалах верхньої частини шару, що спікають, з одночасним використанням нагрітого повітря на першій третині довжини агломераційної машини після запального горна. Також можливим є застосування подовженого горна, коли верхня частина шару, якого спікають, більш тривалий час знаходиться у зоні дії високої температури, що дозволить забезпечити повнішу взаємодію часток агломерату і тим самим підвищити міцність матеріалу.

Невелика кількість новоутворень магнетиту у верхніх зонах шару, що спікають, пояснюється відсутністю глибоких перетворень в залізородних матеріалах на початковому періоді процесу спікання. Великі шматки залізородного матеріалу (фракції +5,0 -12,0 мм) не встигають розплавитися, що обумовлено недостатньою кількістю теплоти та наступним їх різким охолодженням. Реакції за участі рідкої фази, тобто реакції утворення скла, феритів кальцію та силікатів мають обмежений розвиток і, як наслідок, для вказаних умов повна розкристалізація компонентів шихти є неможливою.

У міру наростання температури у шарі залізородних матеріалів, що спікають, міра їх взаємодії зростає через достатню кількість теплоти для розплавлення часток і реакції взаємодії про-

тікають у рідкій фазі. Біля колосників агломераційної машини залізородний матеріал знаходиться тривалий час за температури близько 1600 °С, що сприяє його сильному оплавленню та позитивно впливає на характеристики його міцності, при цьому різко зростає кількість скла, розкристалізованого до силікатів різного складу.

Слід зазначити, що зменшення загальної частки верхнього шару в усій масі залізородних матеріалів є можливим шляхом збільшення висоти шару, що спікають, до 500...600 мм. У цьому разі доля верхнього частки шару в загальному обсязі залізородних матеріалів зменшується, а процес спікання покращується через повніше використання регенованої теплоти [12].

Висновки

1. Результати виконаних досліджень дозволили встановити найнижчу температуру розм'якливості для залізородних матеріалів фракції -5,0 мм, а найвищою температурою початку та завершення розм'якшення характеризується зазначений матеріал фракції -60,0 +40,0 мм.

2. Головними причинами нерівномірності складу та якості агломерату під час його спікання є сегрегація залізородних матеріалів під час їх завантаження на агломераційну машину та неоднаковий температурно-тепловий режим за висотою шару, що спікають.

3. Підвищення міцності агломерату є можливим збільшенням висоти шару матеріалу, що спікають на агломераційній машині, до 500...600 мм, при цьому завдяки повнішому використанню регенованої теплоти процес спікання покращується, а доля верхньої частки шару в усьому обсязі агломерату зменшується.

Бібліографічний список

1. **ГОСТ 15137-87.** Руды железные и марганцевые, агломераты и окатыши. Метод определения прочности во вращающемся барабане [Текст] – М. : Издательство стандартов, 1987. – 6 с.
2. **Вегман, Е. Ф.** Термообработка агломерата [Текст] / Е. Ф. Вегман // *Сталь* 1961. – № 11. – С. 33-35. – Библиогр.: с. 35.
3. **Мальшева, Т. Я.** Железорудное сырье : упрочнение при термообработке [Текст] / Т. Я. Мальшева. – М. : Наука, 1988. – 268 с. – Библиогр.: с. 266-267. – 1800 экз.
4. **Базилевич, С. В.** Агломерация [Текст] / С. В. Базилевич, Е. Ф. Вегман. – М. : Metallurgiya, 1967. – 367 с. – Библиогр.: с. 365-366. – 2500 экз.
5. **Мальшева, Т. Я.** Петрография железорудного агломерата [Текст] / Т. Я. Мальшева. – М. : Наука, 1969. – 168 с. – Библиогр.: с. 167. – 1500 экз.
6. **Модель, М. С.** Ферритообразование в железорудном сырье [Текст] / М. С. Модель, В. Я. Лебедева, Н. В. Чугунова. – М. : Наука, 1990. – 152 с. – Библиогр.: с. 150-151. – 1200 экз.
7. **Busly, N. J.** Фундаментальные исследования фазового состава и структуры агломерата с целью оптимизации его металлургических свойств [Text] / N. J. Busly, T. Fray // *Ryromet.* – 1987. – Symp., L., 21-23 Sept., 1987. – L. 1987. – P. 141-166. – Bibliog.: с. 164-166.
8. **Смородникова, А. В.** Применение извести на аглофабриках СССР. Обзорная информация [Текст] / А. В. Смородникова, Ф. Ф. Колесников, Н. С. Климова и др. – М. : Черметинформация, 1978. – Серия 3, Вып. 2. – С. 1-34. – Библиогр.: с. 32-34.

9. **Потебня, Ю. М.** 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. – Библиогр.: с. 29.
10. **А. с. 962739 СССР, МПК F 27 В 17/02.** Лабораторная печь для определения качества железорудных материалов [Текст] / К. М. Ахметов, С. Н. Просвилов, Г. М. Цымбал, М. К. Балапанов, В. В. Емушинцев, В. А. Мирко, Б. Г. Пластинин, Г.М. Никитин ; патентообладатель Химико-металлургический институт АН КазССР. – 3289706; заявл. 26.02.1981; опубл. 30.09.1982. Бюл. № 36.
11. **Вегман, Е. Ф.** Металлургия чугуна [Текст] : учебн. пособие / Е. Ф. Вегман, Б. Н. Жеребин, А. Н. Похвиснев, Ю. С. Юсфин. – М. : Металлургия, 2004. – 774 с. – Библиография в конце разделов. – 300 экз.
12. **Кухарь, А. С.** Производство и качество агломерата [Текст] / А. С. Кухарь, В. А. Мартыненко, В. П. Шевченко. – М. : Металлургия, 1977. – 158 с. – Библиогр.: с. 1570. – 1780 экз.

Стаття надійшла до редакції 07.10.2015 р.
Рецензент, проф. С.А. Воденніков

Текст даної статті знаходиться на сайті ЗДІА в розділі Наука
<http://www.zgia.zp.ua>