

ВЛИЯНИЕ ПРИРОДНОГО РУДООБРАЗОВАНИЯ НА МИНЕРАЛЬНЫЙ СОСТАВ И ХОЛОДНУЮ ПРОЧНОСТЬ ОФЛЮСОВАННЫХ ЖЕЛЕЗОРУДНЫХ АГЛОМЕРАТОВ

Малышева Т.Я.¹, к. г.-м. н., профессор кафедры

«Экстракция и рециклинг черных металлов»

Павлов Р.М.¹, магистр кафедры «Экстракция и рециклинг черных металлов»

Мансурова Н.Р.², к.т.н., главный специалист по исследованию железорудного сырья

Деткова Т.В.³, к.т.н., менеджер по исследованию сырья (tvdetkova@yandex.ru)

¹ **Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»**

(119049, Россия, Москва, Ленинский пр., 4)

² **ОАО «Новолипецкий металлургический комбинат»**

(398040, Россия, Липецк, пл. Металлургов, д. 2)

³ **Череповецкий металлургический комбинат ОАО «Северсталь»**

(162608, Россия, Вологодская область, Череповец, ул. Мира, 30)

Аннотация. Показано определяющее влияние природного рудообразования железных руд на процесс спекания и прочность офлюсованных агломератов. Кристаллы магнетита гомогенного строения активно переходят в расплав, формируя в агломератах низкой основности силикатные связки рудных зерен. С ростом основности смена силикатных связей на ферритные определяется количеством железа в расплаве и высоким окислительным потенциалом газовой фазы. Участие магнетита гетерогенного строения в процессах расплавообразования ограничено. При спекании агломератов низкое содержание железа в расплаве расширяет область кристаллизации силикатных связей, сдвигая начало процесса ферритообразования в сторону агломератов высокой основности.

Ключевые слова: железорудные месторождения, природное рудообразование, кристаллы магнетита гомогенного и гетерогенного строения, агломераты, основность, силикатные и ферритные связки, холодная прочность.

Повсеместное производство агломератов основности 1,2 закончилось с началом использования в доменной шихте наряду с агломератами железорудных окатышей. Основность промышленных агломератов каждого из металлургических комбинатов приходится рассчитывать с учетом состава и количества потребляемых окатышей для сохранения требуемой основности доменного шлака. Это явилось причиной появления большого числа работ, посвященных установлению зависимости прочностных свойств агломератов от основности. Было установлено, что для различных типов железных руд и технологических условий их спекания падение прочности агломератов происходит в узком интервале основности. При этом в результатах проведенных исследований отсутствовало единое мнение о природе, составе и свойствах минералов-связок, являющихся причиной разрушения агломератов. Плоды многочисленных работ обобщены в трех монографиях [1 – 3]. Позже появился ряд книг, касающихся разработки теоретических основ процессов формирования агломератов с подробным изложением технологических условий, обеспечивающих производство агломератов высоких металлургических свойств [4 – 6].

Сейчас, несмотря на это, трудности, связанные с производством высокоофлюсованных агломератов

на металлургических комбинатах обострились, поскольку изменились условия производства окатышей, используемых в шихте доменных печей. В России горно-обогатительные предприятия перешли на производство окатышей естественной основности ($\text{CaO}/\text{SiO}_2 = 0,05$) из концентратов руд труднообогатимых и тугоплавких железистых кварцитов. Проблема производства прочных офлюсованных агломератов на каждом металлургическом комбинате вновь стала актуальной.

Исследования последних лет показали, что два ведущих металлургических комбината, Магнитогорский (ММК) и Череповецкий (ЧерМК), производящих агломераты из генетически одинаковых магнетитовых руд и близких по составу шихтовых материалов в интервале основности от 1,0 до 3,0, имеют различные показатели холодной прочности агломератов [7, 8]. Известно, что холодная прочность спеченного агломерата во многом определяется минеральным составом и физико-механическими свойствами связок рудных зерен окисленного сырья, а направление расплавообразования на стадии жидкофазного спекания зависит от валентного состояния железа в расплаве [9].

В настоящей работе впервые особое внимание уделено микроструктурным особенностям кристаллов

магнетита железных руд, используемых в шихтах ММК и ЧерМК.

Генетические особенности железных руд

Аглошихта ММК состоит из аглоруд и концентратов осадочно-метаморфических железистых кварцитов Михайловского и Лебединского месторождений Курской магнитной аномалии и магматических руд скарнового типа Магнитогорского и Соколовско-Сарбайского рудопроявления.

В аглошихте ЧерМК используются оленегорские железистые кварциты и магматические руды Ковдорского месторождения. Основным рудным минералом аглошихт обоих комбинатов является магнетит Fe_3O_4 . Таким образом, каждый из двух металлургических комбинатов приблизительно в равных количественных соотношениях производит железорудные агломераты из одинаковых генетических типов магнетитовых руд: осадочно-метаморфических и магматических. Магнетит никогда не отвечает формуле Fe_3O_4 ($\text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+}_2\text{O}_4$). Отношение FeO к Fe_2O_3 в нем обычно несколько меньше единицы и является функцией температуры и окислительного потенциала газовой фазы.

Методом электронно-микроскопического анализа установлено, что магнетиты железорудных месторождений обладают принципиально разными типами природного оруденения [10, 11].

Магнетит руд железистых кварцитов и магматических руд скарнового типа имеет гомогенное строение и по своему составу близок к стехиометрии: 31,0 % FeO ; 69,0 % Fe_2O_3 . По данным рентгеноспектрального микрозондирования, в решетке кристаллов магнетита руд скарнового типа обнаружены десятые и сотые доли процентов элементов-примесей Mg , Al и Mn , не влияющих на его физико-механические свойства.

Магнетит магматических руд Ковдорского месторождения имеет гетерогенное строение, поскольку является продуктом распада твердых растворов в результате особых природных условий существования и охлаждения самого магматического очага. Кристаллы магнетита Ковдорского месторождения неодинаковы по составу и для них характерно повышенное содержание магнезия. Матрица кристаллов магнетита является магнезиоферритом, содержащим в своем составе до 3,5 – 4,5 % (по массе) оксида магнезия. Главные элементы-примеси алюминий, титан и магний в кристаллах магнетита находятся в виде отдельных микрофаз. Изоморфная примесь алюминия в магнетите присутствует как самостоятельная фаза герцинит FeAl_2O_4 , магний в виде шпинели MgFe_2O_4 , титан как ульвошпинель TiFe_2O_4 . Каждая из микрофаз имеет температуру плавления, отличную от температуры плавления магнетита стехиометрического состава Fe_3O_4 (1591 °C).

Информация о различном типе природного рудообразования кристаллов магнетита в аглошихтах маг-

нитогорских и череповецких агломератов позволяет по-новому рассмотреть механизм спекания агломератов и, главное, объяснить причину различных показателей холодной прочности в интервале их одинаковой основности.

С этой целью были повторно изучены образцы агломератов, полученные из промышленных аглошихт на рудоиспытательных станциях каждого из комбинатов. Исследования были дополнены замерами реальных составов минеральных связей методом рентгеноспектрального микрозондирования. Методом мессбауэровской спектроскопии определена эволюция железа магнетита на разных стадиях формирования минеральных связей – носителей прочности агломератов.

В ранее проведенных работах по изучению магнитогорских и череповецких агломератов в интервале основности 1,0 – 3,0 была прослежена эволюция минерального состава связей и холодной прочности агломератов. В настоящем исследовании для установления реальной зависимости холодной прочности от основности агломератов с учетом определяющей роли железа магнетита их показатели графически сопоставлены с эволюцией минеральных связей – носителей прочности готовой продукции.

Механизм спекания магнитогорских агломератов

Магнитогорские агломераты в широком интервале основности имели различный минеральный состав основных рудных фаз и связей-носителей их прочности. Химический состав исследованных агломератов приведен в табл. 1.

В составе низкоофлюсованных агломератов носителями прочности являются высокожелезистые оливины CaFeSiO_4 , образовавшиеся при охлаждении железосиликатного расплава, в составе которого направление минералообразования определяется двухвалентным железом. Высокожелезистые оливиновые связки – про-

Т а б л и ц а 1

Химический состав магнитогорских агломератов, % (по массе)*

Основность, CaO/SiO_2	$\text{Fe}_{\text{общ}}$	FeO	SiO_2	CaO
1,0	59,2	19,5	6,7	7,1
1,2	57,6	19,9	7,4	9,0
1,3	55,6	21,7	6,8	8,8
1,6	55,5	17,5	7,0	11,2
1,9	54,9	15,0	6,7	12,6
2,3	54,1	13,7	5,7	13,8
3,0	51,4	11,6	4,9	15,2

* Содержание Al_2O_3 и MgO в составе агломератов не превышало 1,5 – 2,0 % (по массе)

дукт кристаллизации железосиликатного расплава при низком окислительном потенциале газовой фазы в зонах горения твердого топлива. В этих условиях в спекаемом слое агломерата происходит перераспределение железа между магнетитом (преимущественно мелкой фракции) и силикатным расплавом, о чем свидетельствует резкое снижение железа магнетита и столь же резкое его повышение в расплаве (рис. 1).

Начало падения прочности агломератов с ростом основности связано с появлением в силикатной связке наряду с высокожелезистым оливином двукальциевого силиката Ca_2SiO_4 . Причиной изменения минерального состава связки является наличие общей границы полей кристаллизации между оливином CaFeSiO_4 и двукальциевым силикатом Ca_2SiO_4 в тройной диаграмме состояния $\text{CaO}-\text{FeO}-\text{SiO}_2$ (рис. 2) [12].

Особое место при спекании магнитогорских аглошихт занимает область формирования агломератов основности 1,6. При этой основности в агломерационный расплав переходит максимальное количество железа магнетита и одновременно повышается окислительный потенциал газовой фазы. Расплавообразующим компонентом вместо двухвалентного железа становится трехвалентное, которое резко меняет направление минералообразования в расплаве. Железосиликатный расплав из области совместной кристаллизации оливина и двукальциевого силиката, существующей на границе их полей кристаллизации в диаграмме состояния $\text{CaO}-\text{FeO}-\text{SiO}_2$, перемещается в область низкотемпературной тройной эвтектики двукальциевый силикат-гематит-полукальциевый феррит (CaFe_4O_7), расположенной в железном углу Fe_2O_3 диаграммы состояния $\text{CaO}-\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$ (рис. 3) [13].

В результате в агломератах появляется связка рудных зерен в виде стеклофазы с тонкой дендритной композицией двукальциевого силиката и полукальциевого феррита. Преобладающие в эвтектике зерна двукальциевого силиката в результате модификационного превращения $\text{Ca}_2\text{SiO}_4 \beta \rightarrow \gamma$ становятся причиной разрушения агломератов основности 1,6, отмеченной в работах [1 – 3].

Резкое повышение прочности агломератов наблюдается при основности выше 1,6 (см. рис. 1). Рост окис-

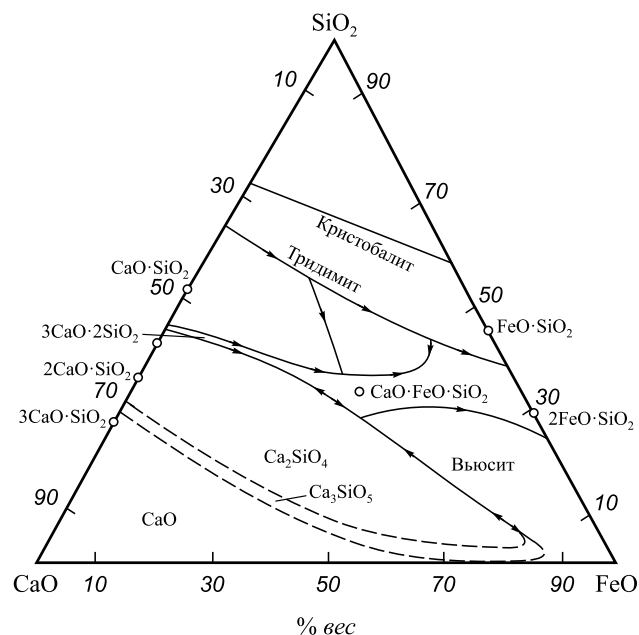


Рис. 2 Диаграмма состояния $\text{CaO}-\text{FeO}-\text{SiO}_2$

Fig. 2. The phase diagram of $\text{CaO}-\text{FeO}-\text{SiO}_2$

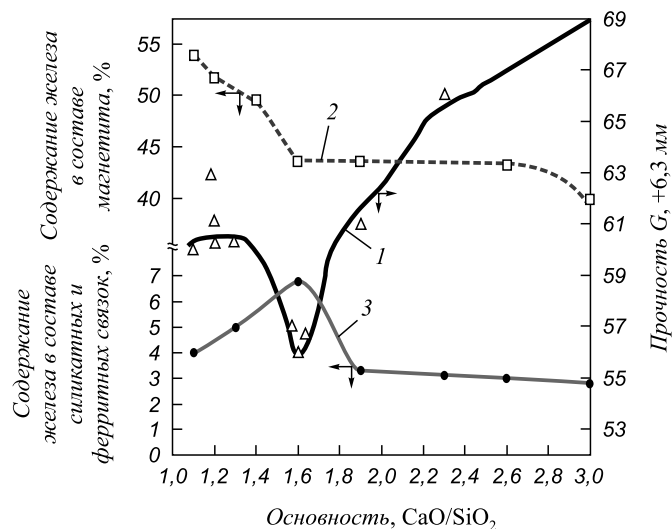


Рис. 1. Зависимость прочности агломератов ММК (1) и содержания железа в составе: магнетита (2); силикатных и ферритных связок (3) от основности

Fig. 1. The dependence of the strength of agglomerates of “ММК” (1) and the iron content in: magnetite (2); silicate and ferritic ligaments (3) from the basicity

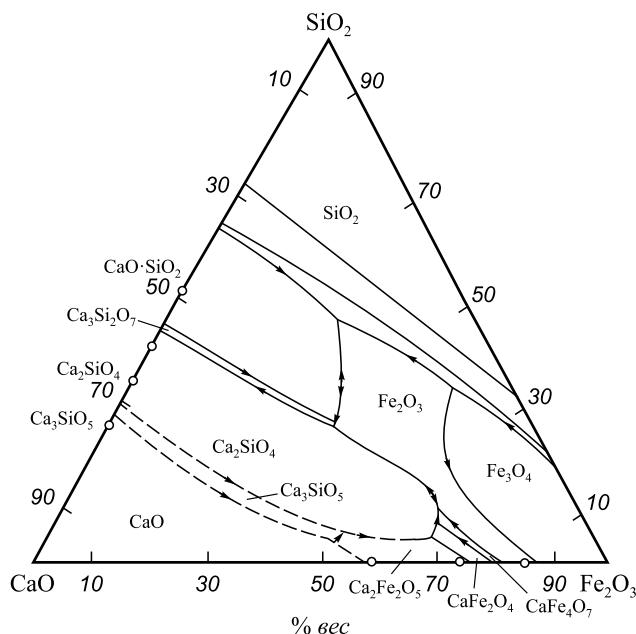


Рис. 3. Диаграмма состояния $\text{CaO}-\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$

Fig. 3. The phase diagram of $\text{CaO}-\text{Fe}_2\text{O}_3-\text{SiO}_2$

лительного потенциала газовой фазы в слое шихты и увеличение оксида кальция в составе железосиликатного расплава приводит к замещению силикатных связей ферритными. Процесс образования ферритных фаз происходит на контакте окисляющегося с поверхности кристаллов магнетита с железосиликатным расплавом. При увеличении основности вплоть до изученной 3,0 в связках рудных зерен наблюдается постепенная смена состава ферритных фаз от высокожелезистого полукальциевого феррита (85,06 % Fe_2O_3 ; 14,04 % CaO) до высококальциевых: однокальциевого (74,01 % Fe_2O_3 ; 25,99 % CaO) и двукальциевого (58,74 % Fe_2O_3 ; 41,26 % CaO) ферритов [14].

По данным мессбауэровской спектроскопии и результатам рентгеноспектрального микроанализа, в составе офлюсованных агломератов процесс образования высококальциевых ферритов происходит при постоянном содержании железа магнетита (см. рис. 1, кривая 2) и возрастающем количестве оксидов кальция в железосиликатном расплаве (см. табл. 1).

Результаты исследования магнитогорских агломератов свидетельствуют о решающей роли железа магнетита в процессах образования силикатных и ферритных связей. Кристаллы магнетита гомогенного строения активно переходят в железосиликатный расплав, формируя в агломератах низкой основности силикатные связи рудных зерен, при высокой основности – ферритные связи. С ростом основности смена силикатных связей на ферритные определяется количеством железа магнетита в железосиликатном расплаве и высоким окислительным потенциалом газовой фазы в слое спекаемой шихты.

Следовательно, высокое содержание железа в расплаве при одновременно возрастающем парциальном давлении кислорода в слое определяют направление минералообразования связей – носителей прочности высокоофлюсованных агломератов.

Механизм спекания череповецких агломератов

Результаты предыдущих работ [8] по исследованию череповецких офлюсованных агломератов с участием в их шихте магматических железных аглоруд и концентратов Ковдорского месторождения свидетельствуют об иной, по сравнению с магнитогорскими агломератами, зависимости их холодной прочности от основности. При повторном изучении образцов череповецких агломератов особое внимание было уделено поведению кристаллов гетерогенного магнетита в условиях жидкофазного спекания агломератов и, как следствие, его влиянию на эволюцию минеральных связей во всем интервале изученной основности. Результаты химического анализа череповецких агломератов приведены в табл. 2.

По аналогии с магнитогорскими агломератами, показатели холодной прочности графически совмещены с эволюцией железа магнетита и связей рудных зерен (рис. 4).

Химический состав череповецких агломератов, % (по массе)*

Основность, CaO/SiO_2	Fe	FeO	SiO_2	CaO
1,0	60,9	13,5	4,9	5,1
1,3	59,2	11,5	4,9	6,4
1,4	59,6	12,5	4,7	6,8
1,7	58,9	12,1	4,5	7,6
1,9	58,1	11,7	4,5	8,5
2,3	55,8	11,3	4,8	11,1
2,7	54,6	10,9	4,7	12,6
2,9	54,3	11,8	4,7	13,4

* Содержание $\text{MgO} \approx 3\%$ (по массе), $\text{Al}_2\text{O}_3 \approx 1\%$ (по массе)

В череповецких агломератах низкой основности связкой рудных зерен, как и в случае с магнитогорскими агломератами, является высокожелезистая силикатная фаза оливнинового состава CaFeSiO_4 . На построение оливниновой фазы из железосиликатного расплава расходуется практически все железо магнетита. В остаточном расплаве остается не более 1,0 – 1,5 % железа магнетита (см. рис. 4). При низком содержании железа в силикатном расплаве расплавообразующим компонентом становится оксид кальция и при повышении основности, вслед за высокожелезистыми силикатами оливнинового состава, в связке агломератов появляе-

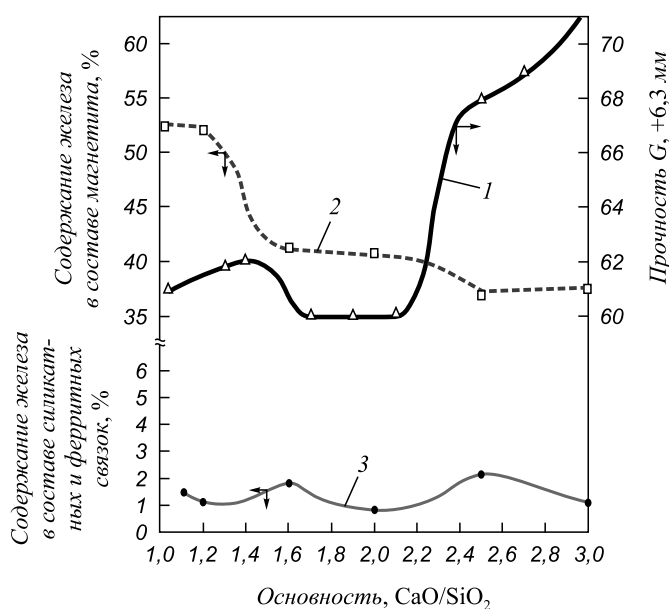


Рис. 4. Зависимость прочности агломератов ЧерМК (1) и содержания железа в составе: магнетита (2); силикатных и ферритных связей (3) от основности

Fig. 4. The dependence of the strength of agglomerates of “CHerMK” (1) and the iron content in: magnetite (2); silicate and ferritic ligaments (3) from the basicity

ся высококальциевый силикат – мелилит, в котором железо присутствует только в виде изоморфной примеси. Мелилитовая связка череповецких агломератов представляет собой сложную по составу промежуточную фазу между конечными членами широкого мелилитового ряда: окерманит ($\text{Ca}_2\text{MgSi}_2\text{O}_7$) – железистый геленит ($\text{Ca}_2\text{Fe}^{3+}\text{SiAlO}_7$) – щелочной геленит ($\text{NaCaAlSi}_2\text{O}_7$) [15].

Агломераты с силикатной мелилитовой связкой образуют широкую область устойчивой прочности. Смена состава силикатных связок, т. е. замена одной силикатной фазы – высокожелезистых оливинов другой силикатной связкой – высококальциевой мелилитовой, обладающих различными физико-химическими и механическими свойствами, происходит в агломератах с незначительной потерей холодной прочности (см. рис. 4). Агломератами на мелилитовой связке заканчивается широкая область формирования силикатных носителей холодной прочности готовой продукции, и только с ростом основности выше 2,0 в череповецких агломератах меняется направление минералообразования связок, когда вместо силикатов носителями их прочности становятся ферриты кальция. Однако недостаток железа в железосиликатном расплаве затормаживает процесс ферритообразования, который, в отличие от магнитогорских агломератов, начинается с появления в связке сразу двух высококальциевых ферритов: однокальциевого (CaFe_2O_4) и двукальциевого ($\text{Ca}_2\text{Fe}_2\text{O}_5$) при отсутствии в агломератах области кристаллизации высокожелезистого полукальциевого феррита (CaFe_4O_7).

Рост холодной прочности череповецких агломератов связан с появлением в их составе ферритных связок, которые по своим физико-механическим показателям превосходят силикатные.

Таким образом, широкий интервал существования силикатных связок в составе череповецких агломератов и заторможенный процесс начала ферритообразования с отсутствием в связках высокожелезистого полукальциевого феррита свидетельствует об ограниченной возможности участия кристаллов магнетита гетерогенного строения в процессах формирования упрочняющих связок при спекании офлюсованных агломератов.

Выводы. Оксиды железа являются одними из основных расплавообразующих компонентов железосиликатного расплава, определяющего состав связок – носителей прочности офлюсованного агломерата.

Впервые установлено, что участие оксидов железа в процессе жидкофазного спекания агломератов зависит от микроструктурных особенностей кристаллов природного магнетита.

Магнетит гомогенного строения (железистые кварциты и скарны) активно участвует в процессах силикато- и ферритообразования связок рудных зерен агломератов. Узкая область существования силикатных связок и широкая – ферритных является следствием высокого содер-

жания оксидов железа в железосиликатном расплаве при условии возрастающего окислительного потенциала газовой фазы с ростом основности агломератов.

Участие магнетита гетерогенного строения в процессах расплавообразования ограничено. При спекании агломератов низкое содержание железа в железосиликатном расплаве расширяет область кристаллизации силикатных связок, сдвигая начало процесса ферритообразования в агломераты более высокой основности.

Существующие в настоящее время технологические оценки обогащенного железорудного концентрата только по Fe и SiO_2 и по термическим свойствам расплавообразующих компонентов шихты должны быть дополнены микроструктурными особенностями кристаллов природного магнетита, определяющими направление минералообразования связок – носителей прочности готовой продукции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Базилевич С.В., Вегман Е.Ф. Агломерация. – М.: Металлургия, 1967. – 368 с.
2. Сигов А.А., Шурхал В.А. Агломерационный процесс. – М.: Техника, 1969. – 232 с.
3. Утков В.А. Высокоосновный агломерат – М.: Металлургия, 1977. – 156 с.
4. Пузанов В.П., Кобелев В.А. Структурообразование из мелких материалов с участием жидких фаз. – Екатеринбург: УрО РАН, 2001. – 634 с.
5. Пузанов В.П., Кобелев В.А. Введение в технологию металлургического структурообразования. – Екатеринбург: УрО РАН, 2005. – 501 с.
6. Коротич В.И., Фролов Ю.А., Бездежский Г.Н. Агломерация рудных материалов. – Екатеринбург: ГОУ ВПО «УГТУ-УПИ», 2003. – 400 с.
7. Малышева Т.Я., Павлов Р.М. Влияние минералогического состава связок на прочностные свойства агломератов различной основности // Изв. вуз. Черная металлургия. 2012. № 11. С. 6 – 10.
8. Деткова Т.В., Малышева Т.Я., Павлов Р.М. Исследование агломератов Череповецкого металлургического комбината ОАО «Северсталь» в интервале основности 1,0 – 3,0 // Изв. вуз. Черная металлургия. 2013. № 7. С. 5 – 8.
9. Малышева Т.Я., Долицкая О.А. Петрография и минералогия железорудного сырья. – М.: МИСИС, 2004. – 425 с.
10. Чернышёва Л.В., Смелянская Г.А., Зайцева Г.М. Типоморфизм магнетита и его использование при поисках и оценке рудных месторождений. – М.: Недра, 1981. – 235 с.
11. Гайдукова В.С. Электронная микроскопия для решения практических геолого-минералогических задач. – М.: Недра, 1983. – 225 с.
12. Allen W.C., Snow R.B. The orthosilicate iron oxide portion of the system $\text{CaO} - \text{FeO} - \text{SiO}_2$ // J. Am. Ceram. Soc. 1955. Vol. 38. P. 264 – 280.
13. Phillips B., Muan A. Phase Equilibria in the System $\text{CaO} - \text{Iron Oxide} - \text{SiO}_2$ in Air // J. Am. Ceram. Soc. 1959. Vol. 42. P. 413 – 23.
14. Малышева Т.Я., Юсфин Ю.С., Мансурова Н.Р. Механизм минералообразования и металлургические свойства агломератов основности 1,1 – 3,1 для шихтовых и технологических условий ММК // Сталь. 2007. № 2. С. 8 – 12.
15. Винчелл А.Н., Винчелл Г.В. Оптические свойства искусственных минералов. – М.: Мир, 1967. – 526 с.

Поступила 11 марта 2015 г.

EFFECT OF NATURAL ORE FORMATION ON MINERAL COMPOSITION AND COLD STRENGTH OF IRON ORE FLUXED AGGLOMERATES

Malysheva T.Ya.¹, Dr. Sci. (Geologo-Mineralogical.), Professor of Chair “Extraction and recycling of ferrous metals”

Pavlov R.M.¹, Undergraduate Student

Mansurova N.R.², Cand. Sci. (Eng.), Chief Specialist of iron ore resources

Detkova T.V.³, Cand. Sci. (Eng.), Manager, use of raw materials (tvdetkova@yandex.ru)

¹ National University of Science and Technology “MISIS” (MISIS) (4, Leninskii ave., Moscow, 119049, Russia)

² JSC “Novolipetsk Metallurgical Plant” (2, Metallurgov sq., Lipetsk, 398040, Russia)

³ Cherepovets Metallurgical plant JSC “Severstal” (30, Mira str., Cherepovets, Vologda Region, 162608, Russia)

Abstract. The article displays the determining influence of natural iron ore mineralization on the sintering process and the strength of fluxed sinter. Magnetite crystals with homogeneous structure actively move into the melt, forming the silicate binder ore grains in agglomerates of low basicity. With the growth of the basicity the change of silicate ligaments to ferrite ones can be determined by the amount of iron in the melt and high oxidation potential of the gas phase. The participation of magnetite of heterogeneous structure in processes of melt formation was limited. During the sintering of agglomerates the low iron content in the melt expanded the range of crystallization of silicate ligaments, shifting the start of the process of ferrite formation toward to the agglomerates of high basicity.

Keywords: iron ore deposits, natural ore formation, magnetite crystals of homogeneous and heterogeneous structure, agglomerates, basicity, silicate and ferrite ligaments, cold strength.

REFERENCES

1. Bazilevich S.V., Vegman E.F. *Agglomeratsiya* [Sintering]. Moscow: Metallurgiya, 1967. 368 p. (In Russ.).
2. Sigov A.A., Shurkhal V.A. *Agglomeratsionnyi protsess* [Sintering process]. Moscow: Tekhnika, 1969. 232 p. (In Russ.).
3. Utkov V.A. *Vysokoosnovnoi aglomerat* [High-basic sinter]. Moscow: Metallurgiya, 1977. 156 p. (In Russ.).
4. Puzanov V.P., Kobelev V.A. *Strukturoobrazovanie iz melkikh materialov s uchastiem zhidkikh faz* [Pattern formation of fine materials with the participation of liquid phases]. Ekaterinburg: UrO RAN, 2001. 634 p. (In Russ.).
5. Puzanov V.P., Kobelev V.A. *Vvedenie v tekhnologii metallurgicheskogo strukturoobrazovaniya* [Introduction to the technology of metallurgical structure formation]. Ekaterinburg, 2005. 406 p. (In Russ.).
6. Korotich V.I., Frolov Yu.A., Bezdezhskii G.N. *Agglomeratsiya rudnykh materialov* [Sintering of ore materials]. Ekaterinburg. 2003. 400 p. (In Russ.).
7. Malysheva T.Ya., Pavlov R.M. Bundle mineral composition influence on basicity of sinter with different strength properties. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya – Ferrous Metallurgy*. 2012, no. 11, pp. 6–10. (In Russ.).
8. Detkova T.V., Malysheva T.Ya., Pavlov R.M. Investigation of agglomerates of Cherepovets metallurgical plant JSC “Severstal” in the range of basicity 1.0 – 3.0. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya – Ferrous Metallurgy*. 2013, no. 7, pp. 5–8. (In Russ.).
9. Malysheva T.Ya., Dolitskaya O.A. *Petrografiya i mineralogiya zhelezorudnogo syr'ya* [Petrography and mineralogy of iron ore]. Moscow: MISiS, 2004. 422 p. (In Russ.).
10. Chernysheva L.B., Smelyanskaya G.A., Zaitseva G.M. *Tipomorfizm magnetita i ego ispol'zovanie pri poiskakh i otsenke rudnykh mestorozhdenii* [Typomorphism of magnetite and its use in the search and evaluation of mineral deposits]. Moscow: Nedra, 1982. 235 p. (In Russ.).
11. Gaidukova V.S. *Elektronnaya mikroskopiya dlya resheniya prakticheskikh geologo-mineralogicheskikh zadach* [Electron microscopy in solving the practical problems in Geology and Mineralogy]. Moscow: Nedra, 1983. 225 p. (In Russ.).
12. Allen W.C., Snow R.B. The orthosilicate iron oxide portion of the system CaO–FeO–SiO₂. *Am. Ceram. Soc.* 1955. Vol. 38, pp. 264–280.
13. Phillips B., Muan A. Phase Equilibria in the System CaO–Iron Oxide–SiO₂ in Air. *J. Am. Ceram. Soc.* 1959. Vol. 42, pp. 413–423.
14. Malysheva T.Ya., Yusfin Yu.S., Mansurova N.R., Gibadulin M.F., Legin V. P. Mechanism of mineral formation and metallurgical properties of sinter of basicity 1.1–3.1 at OAO MMK. *Steel in Translation*. 2007, Vol. 37, Issue 2, pp. 126–130.
15. Winchell A.N., Winchell H. The microscopical characters of artificial inorganic solid substances: optical properties of artificial minerals. New York & London, Academic Press, 1964. (Russ.ed.: Winchell A.N., Winchell H. *Opticheskie svoistva iskusstvennykh mineralov*. Moscow: Mir, 1967. 525 p.).

Received March 11, 2015