

УДК 669.162.1: 669.046

## ВЛИЯНИЕ СТРУКТУРНЫХ ОСОБЕННОСТЕЙ КРИСТАЛЛОВ МАГНЕТИТА НА ПРОЦЕСС СПЕКАНИЯ АГЛОМЕРАТОВ

**Юсфин Ю.С.**, д.т.н., профессор кафедры «Экстракция и рециклинг черных металлов»

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

«Экстракция и рециклинг черных металлов» (igivgu@mail.ru)

Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»  
(119049, Россия, Москва, Ленинский пр., 4)

**Аннотация.** Применительно к железорудным агломератам разной основности ( $\text{CaO/SiO}_2$ ) исследован процесс формирования железосиликатного расплава при спекании аглоруд с кристаллами магнетита различного строения – гомогенного и гетерогенного. Кристаллы магнетита гомогенного строения, по составу близкого к стехиометрии, принимают активное участие в процессах формирования железосиликатного расплава. В агломератах низкой основности на месте расплава образуются связки рудных зерен в виде железокальциевого оливина. С ростом основности агломератов и при повышении окислительного потенциала газовой фазы вместо силикатных появляются связки высокожелезистого алюмосиликоферрита с образованием каркасной структуры агломератов. Кристаллы магнетита гетерогенного строения, представляющие собой продукт распада твердого раствора, препятствуют переходу железа магнетита в железосиликатный расплав. Низкое содержание в расплаве оксида железа расширяет в агломератах область кристаллизации силикатных связок и сокращает ферритных. Неспособность магнетита гетерогенного строения участвовать в процессе расплавообразования исключает возможность появления в связке агломератов высокожелезистого алюмосиликоферрита. В результате процесс ферритообразования в агломератах высокой основности начинается с появления высококальциевых ферритов.

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

DOI: 10.17073/0368-0797-2015-7-473-478

*Проблема получения высококачественного железорудного сырья была всегда главной в творческой биографии Юлиана Семеновича Юсфина. Темы, касающиеся техногенного сырья, обсуждались на вверенной ему кафедре и в статьях руководимого им журнала «Известия вузов. Черная металлургия». Юлиан Семенович постоянно обращался к своим коллегам с вопросом: «Почему процессы упрочнения техногенного сырья на различных металлургических комбинатах не одинаковы?». Он предлагал исследователям вернуться к истокам металлургии, ссылаясь на то, что «МЕТАЛЛУРГИЯ РОЖДАЕТСЯ В ЖЕРЛЕ ВУЛКАНА»... Это удивительно точное воссоздание единства двух процессов: магматического, подвластного только природе, и техногенного, создаваемого трудами человечества. Суть и общность природного и техногенного процессов в формировании конечно-го продукта с участием высокотемпературного структурообразующего расплава.*

*Юлиан Семенович собирался возглавить работы, появившиеся на стыке этих двух научных направлений: геологии и металлургии. Первые результаты в виде статьи под названием: «Влияние природного рудообразования на минеральный состав и холодную прочность офлюсованных железорудных агломератов» были опубликованы его коллегами и учениками в журнале «Известия вузов. Черная металлургия» [1]. С Юлианом Семеновичем неоднократно обсуждались материалы о влиянии генезиса железорудных месторождений и микроструктуры кристаллов магнетита на процесс формирования железорудного расплава в составе техногенных продуктов. По его предложению исследование механизмов упрочнения техногенного сырья должно быть дополнено имеющейся информацией о структурных особенностях природных кристаллов магнетита. Это статья, которую мы с Юлианом Семеновичем последний раз обсуждали, и которую он в окончательном виде не успел прочесть.*

При агломерации железных руд определяющим является магнетит. В процессе природного рудообразования кристаллы магнетита имеют разную микроструктуру. Магнетиты, образовавшиеся при высокой температуре, способны содержать в своем составе целый ряд изоморфных примесей (Al, Mg, Ti, Mn, Cr, Co, Si и др.), а при низкой температуре рудообразования в

кристаллах магнетита происходит распад твердых растворов, что сказывается на изменении его микроструктуры и физико-химических свойств.

На основании применения комплекса химических и минералогических методов исследования: электронной микроскопии, рентгеноспектрального микрозондирования и мессбауэровской спектроскопии были полу-

чены данные о структурных особенностях магнетитов большого числа железорудных месторождений [2 – 6].

В окислительно-восстановительных условиях агломерационного процесса магнетит претерпевает структурные изменения под влиянием меняющихся температуры и состава газовой фазы в слое спекаемой аглошихты. В настоящее время в агломерационном процессе используются магнетитовые руды, обладающие принципиально разными типами природного оруденения. В рудах железистых кварцитов и магматических скарных кристаллы магнетита имеют гомогенное строение и по своему составу близки к стехиометрии, % (по массе): 31 FeO и 69 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. В их составе присутствуют десятые и сотые доли процентов Mg, Mn и Al, не влияющих на его физико-механические свойства. В ряде железных руд магматического происхождения магнетит имеет гетерогенное строение, поскольку он является продуктом распада твердых растворов в результате особых природных условий существования и охлаждения магматического очага. Магнетит таких железорудных месторождений всегда не одинаков по составу. Главные элементы-примеси в его составе всегда присутствуют в виде самостоятельных микрофаз. Так изоморфная примесь алюминия в составе магнетита присутствует в виде самостоятельной фазы герцинита FeAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, магний в виде шпинели MgFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>, титан как ульвошпинель в виде TiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub> и каждая из этих микрофаз, в отличие от кристаллов магнетита стехиометрического состава, имеет только ей присущие физико-химические свойства [7 – 8].

Смысл процесса спекания железорудных агломератов в формировании в их составе железосиликатного расплава, при кристаллизации которого на его месте образуются минеральные связки – носители прочности готовой продукции. Железосиликатный расплав образуется в высокотемпературной зоне спекания. В его состав переходят кремнийсодержащие минералы исходной руды, продукты твердофазных реакций начала процесса спекания, часть мелкой фракции магнетита, флюс и компоненты металлургических отходов. Главными минералообразующими компонентами железосиликатного расплава являются оксиды железа, кальция и кремния. Их сочетание, наряду с показателем основности расплава CaO/SiO<sub>2</sub> и валентным состоянием железа, определяет минеральный состав связок готового агломерата. Оксиды магния, марганца, алюминия, титана и других составляющих железорудной шихты не образуют самостоятельных фаз в составе агломерата. Они входят в состав железорудных и силикатных минералов в виде твердых растворов.

Железосиликатный расплав в процессе спекания агломерата играет роль структурообразующего компонента. От его состава и физико-механических свойств в большой степени зависит состав и структура минеральных связок [9 – 10].

На примере промышленных аглошихт исследовано влияние различного количества гомогенного и гетерогенного магнетита в железных рудах на процесс спекания офлюсованных агломератов. Для большинства агломератов характерны близкие количественные соотношения в их составе основной рудной фазы магнетита и силико-ферритных связок как (80 – 75)/(20 – 25). В процессе спекания аглошихты основное количество магнетита крупной фракции преобразуется в твердопластическом состоянии, в то время как в железосиликатном расплаве формируются минеральные композиции связок рудных зерен [11 – 12]. Судить о химических процессах образования реальных железосиликатных расплавов, находящихся в высокотемпературных зонах спекания агломератов, практически невозможно. Поэтому изучать пути фазовых превращений в расплаве остается по конечному составу минеральных связок готового продукта. Наличие в составе железосиликатного расплава оксидов кальция, железа и кремния позволяет использовать известные диаграммы состояния CaO–FeO–SiO<sub>2</sub> [13] и CaO–Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub> [14] для анализа эволюции минерального состава связок. Минералы-связки, обнаруженные в железорудных агломератах, близко соответствуют полям кристаллизации минеральных фаз стехиометрического состава в диаграммах состояния.

Для офлюсованных агломератов, полученных из железных руд с магнетитом гомогенного строения, характерно наличие в расплаве большого количества оксидов железа. В агломератах низкой основности (1,0 – 1,4) процесс формирования железосиликатного расплава происходит в условиях низкого окислительного потенциала газовой фазы, где расплавообразующим компонентом является двухвалентное железо. Содержание в объемах силикатного расплава большого количества закиси железа делает его жидкотекучим, что дает ему возможность быстро пропитывать смежные участки шихты. При разных режимах охлаждения железосиликатный расплав застывает либо в виде стеклофазы, либо кристаллов или дендритов железокальциевого оливина, близкого по составу к стехиометрии CaFeSiO<sub>4</sub> (рис. 1). О составе железосиликатного расплава в момент его образования с достаточной достоверностью можно судить по наличию в нем оливиновой фазы, имеющей обширное поле кристаллизации в диаграмме состояния CaO–FeO–SiO<sub>2</sub> [13]. Раскристаллизованные объемы железосиликатного расплава в составе агломератов в свою очередь позволяют сделать вывод о реально существующем процессе перераспределения расплавообразующих компонентов при его охлаждении между кристаллами оливина и стеклофазой. По данным рентгеноспектрального анализа на построение оливиновой фазы расходуется большая часть закиси железа, а остаточный расплав застывает обогащенным шлаковыми компонентами шихты CaO, SiO<sub>2</sub> и значительно обедненным оксидом железа (см. таблицу).

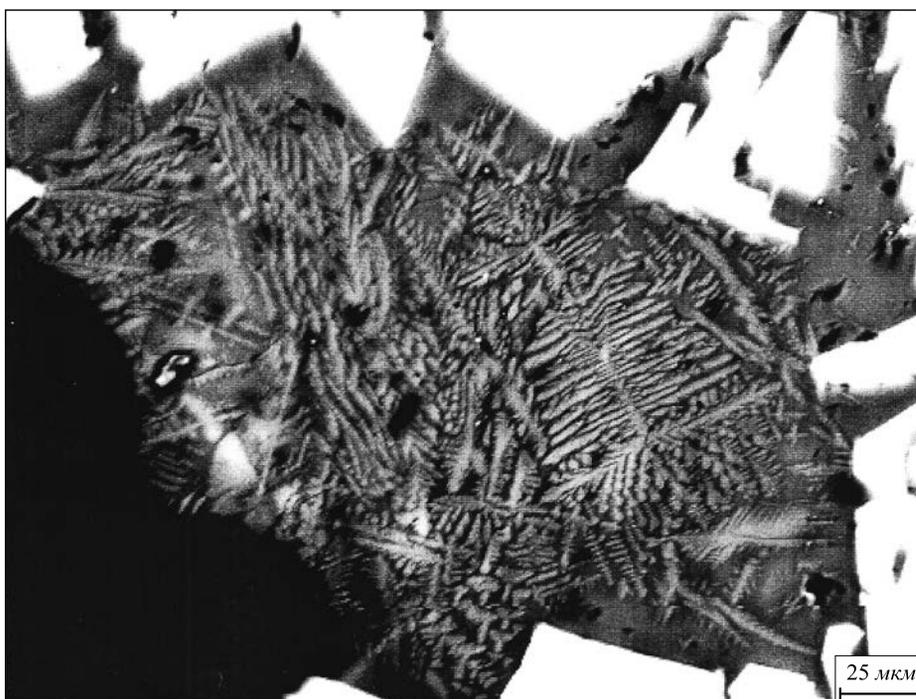


Рис. 1. Фрагмент агломерата низкой основности: дендриты железокальциевого оливина – светлые; стеклофаза – серая. Изображение снято во вторичных электронах

Fig. 1. Fragment of agglomerate of low basicity: iron and calcium containing olivine dendrites – light; glass phase – gray. Image was taken in secondary electrons

При исследовании агломератов более высокой основности (1,4–1,5) в составе связок появляется композиция двух силикатных минералов: оливина

**Химический состав минеральной композиции оливин/остаточный расплав в агломератах низкой основности по данным рентгеноспектрального микрозондирования**

*Table. Chemical compound of the mineral composition of olivine/remaining melt in the agglomerates of low basicity according to the X-ray microprobe*

Номер образца	Точка замера	Химический состав, % (по массе)*		
		CaO	SiO <sub>2</sub>	FeO
1	1	31,6/38,5	30,8/34,1	31,7/19,0
	2	30,0/38,2	30,7/35,4	32,0/19,8
	3	31,5/38,5	31,8/35,3	31,3/17,5
	4	30,1/37,9	31,1/34,8	32,2/18,4
2	1	33,5/38,1	31,6/35,0	26,5/19,3
	2	34,0/38,1	32,7/35,2	25,8/19,2
	3	33,1/38,6	31,9/36,4	26,4/18,0
Стехиометрический состав железокальциевого оливина		29,8	32,0	38,2

\* Содержание в составе оливина и остаточного расплава оксидов алюминия и титана одинаково и составляет 2,0–3,0 % (по массе).

CaFeSiO<sub>4</sub> и двукальциевого силиката Ca<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub>. Сочетание высокожелезистого и высококальциевого силикатов является причиной наличия в диаграмме состояния CaO–FeO–SiO<sub>2</sub> общей границы полей кристаллизации этих двух минералов. В этом случае область существования железосиликатного расплава в диаграмме состояния ограничивается составом, % (по массе): 28–36 CaO; 30–40 FeO; 30–34 SiO<sub>2</sub> [13].

Для агломератов из железных руд с кристаллами магнетита гомогенного строения в узком интервале основности 1,5–1,7 при возросшем окислительном потенциале газовой фазы в составе железосиликатного расплава структурообразующим компонентом вместо двухвалентного железа становится трехвалентное. В результате изменения валентного состояния оксида железа железосиликатный расплав из области совместной кристаллизации оливина и двукальциевого силиката в диаграмме состояния CaO–FeO–SiO<sub>2</sub> перемещается в область низкотемпературной эвтектики, расположенной в железном угле диаграммы состояния CaO–Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>–SiO<sub>2</sub> на границу полей кристаллизации двукальциевого силиката и полукальциевого феррита CaFe<sub>4</sub>O<sub>7</sub>. В реальном составе агломератов вместо полукальциевого феррита при охлаждении железосиликатного расплава образуется сложный по составу высокожелезистый алюмосиликоферрит [15–17]. При кристаллизации в его составе концентрируются практически все элементы, содержащиеся в железосиликатном расплаве. Появление в агломератах алюмоси-

ликоферрита свидетельствует о росте окислительного потенциала газовой фазы, меняющего направление минералообразования в слое шихты. Связками рудных зерен вместо силикатных становятся алюмосиликоферритные. Кристаллы алюмосиликоферрита появляются и растут с окисляющейся поверхности магнетитовых зерен вглубь железосиликатного расплава. При этом в составе агломератов образуется кристаллическая каркасная микроструктура связок, определяющая свойства готовой продукции (рис. 2).

Такой путь фазовых превращений присущ агломератам, в составе которых используются железные руды с магнетитом гомогенного строения.

Иной механизм минералообразования присущ агломератам, полученным из смеси железных руд с гомогенным и гетерогенным строением магнетитовых кристаллов. В данной работе приводится информация о механизме образования железосиликатных расплавов агломератов при соотношении руд с магнетитом гомогенного и гетерогенного строения, близком к 60/40.

При спекании агломератов низкой основности, как и в случае с магнетитовыми рудами гомогенного строения, связками рудных зерен являются дендриты оливинового состава. Аналогия с процессами минералообразования связок при спекании руд с магнетитами гомогенного строения свидетельствует о том, что на построение высокожелезистых оливиновых связок при спекании аглошихты в интервале той же основности 1,0–1,4 предположительно расходуется практически все железо магнетита гомогенного строения. По данным мессбауэровской спектроскопии в остаточном

железосиликатном расплаве после образования оливиновой связки остается не более 1,0–1,5 % (по массе) оксида железа.

В отличие от агломератов из руд с магнетитом гомогенного строения, где с ростом окислительного потенциала газовой фазы при основности 1,6 происходит резкая смена связок от силикатных к ферритным, в аналогичных условиях при спекании шихт с гетерогенным магнетитом состав связок с ростом основности агломератов до 2,0 остается силикатным. В этом случае происходит смена одних силикатов – высокожелезистых оливинов другими силикатами – высококальциевыми мелилитами. Увеличение области кристаллизации силикатных связок вместо ферритных объясняется недостатком в железосиликатном расплаве оксида железа. В результате расплавообразующим компонентом становится оксид кальция, а железо магнетита в минералах силикатных связок остается в виде изоморфной примеси. Широкая область существования в агломератах высококальциевых расплавов заканчивается при основности 2,0 с образованием мелилитовых связок. При основности шихты выше 2,0 в составе агломерата появляются ферритные фазы. Однако неспособность магнетита гетерогенного строения участвовать в процессах расплавообразования препятствует появлению в связке высокоофлюсованных агломератов высокожелезистого алюмосиликоферрита. Поэтому в составе связки агломератов сразу после высококальциевого силиката – мелилита образуются два высококальциевых феррита – однокальциевый и двукальциевый.



Рис. 2. Фрагмент агломерата высокой основности: магнетит – белый; алюмосиликоферрит – серый; стеклофаза – черная. Изображение снято во вторичных электронах

Fig. 2. Fragment of agglomerate of high basicity: magnetite – white; aluminum silicoferrite – gray; glass phase – black. Image was taken in secondary electrons

Механизм расплавообразования с широким интервалом существования силикатных связей, заторможенным процессом начала ферритообразования и отсутствием в связках высокожелезистого алюмосиликоферрита, свидетельствует об ограниченной возможности участия гетерогенных кристаллов магнетита в процессах формирования железосиликатного расплава.

Это общая схема минералообразования связей для шихт с гомогенным и гетерогенным магнетитом составлена путем сравнения процессов спекания промышленных аглошихт различных металлургических комбинатов. Схема требует дополнительного уточнения температурно-временных и газовых режимов спекания, более подробного анализа состава и структуры силикатных и ферритных фаз и установления зависимости прочности агломерата от минерального состава его связей.

**Выводы.** Проведен сравнительный анализ влияния железных руд с кристаллами магнетита гомогенного и гетерогенного строения на механизм формирования железосиликатного расплава и фазовый состав связей рудных зерен готового агломерата.

Установлено, что содержание оксида железа в железосиликатном расплаве определяется структурой кристаллов природного магнетита. Магнетит гомогенного строения при спекании агломерата легко переходит в железосиликатный расплав, выполняя роль расплавообразующего компонента. В агломератах низкой основности и низком окислительном потенциале газовой фазы в составе агломератов образуется узкая область высокожелезистого силикатного расплава с появлением на его месте силикатной связки в виде железокальциевого оливина. В агломератах высокой основности и высоком окислительном потенциале газовой фазы появляется обширная область ферритообразования. Связкой рудных зерен становится высокожелезистый алюмосиликоферрит.

Присутствие в аглошихте гетерогенного магнетита уменьшает количество оксида железа в составе железосиликатного расплава. При этом увеличивается область существования силикатных связей и меняется ее минеральный состав вплоть до появления в связках высококальциевых силикатов мелилитового состава. Низкое содержание оксида железа в расплаве затормаживает процесс ферритообразования, препятствуя появлению высокожелезистого алюмосиликоферрита.

Показано, что микроструктурная композиция минералов связей готового агломерата свидетельствует о реальном составе железосиликатного расплава в высокотемпературной зоне спекания. Следовательно, управ-

ление процессом получения агломерата заранее заданного состава и свойств может осуществляться путем сочетания основных компонентов расплава: оксидов кальция и кремния (основность), а также количеством и валентным состоянием железа с учетом их положения на соответствующих диаграммах состояния.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Малышева Т.Я., Павлов Р.М., Мансурова Н.Р., Деткова Т.В. Влияние природного рудообразования на минеральный состав и холодную прочность офлюсованных железорудных агломератов // Изв. вуз. Черная металлургия. 2015. № 3. С. 180 – 185.
2. Павлов Н.В., Чупрына Н.Н. О магнетитах как индикаторах глубинного оруденения // Докл. АН СССР. 1955. Т. 104. № 2. С. 298 – 301.
3. Григорьев В.М. Элементы примеси в железных рудах и их генетическое значение // Минеральное сырье. 1971. Вып. 15. С. 3 – 12.
4. Кудрявцева Г.П., Колесников Л.В. Химический и фазовый состав феррошпинелидов Ковдорского массива // Вестник Моск. ун-та. Серия геология. 1973. № 5. С. 88 – 93.
5. Смелянская Г.А. К вопросу о кремнисто-кальциевом магнетите. // Записки Всесоюз. минерал. об-ва. 1976. Т. 105. Вып. 4. С. 496 – 497.
6. Техническая минералогия железных руд / Б.И. Пирогов, Г.С. Порохов, И.В. Холошин и др. – Л.: Наука, 1988. – 304 с.
7. Чернышева Л.В., Смелянская Г.А., Зайцева Г.М. Типоморфизм магнетита и его использование при поисках и оценке рудных месторождений. – М.: Недра, 1981. – 235 с.
8. Гайдукова В.С. Электронная микроскопия для решения практических геолого-минералогических задач. – М.: Недра, 1983. – 225 с.
9. Металлургия чугуна / Е.Ф. Вегман, А.Н. Похвиснев, Ю.С. Юсфин и др. – М.: Академкнига, 2004. – 774 с.
10. Пузанов В.П., Кобелев В.А. Введение в технологию металлургического структурообразования. – Екатеринбург: УрО РАН, 2005. – 501 с.
11. Малышева Т.Я., Долицкая О.А. Петрография и минералогия железорудного сырья. – М.: МИСИС, 2004. – 425 с.
12. Коротич В.И., Фролов Ю.А., Бездежский Г.Н. Агломерация рудных материалов. – Екатеринбург: ГОУ ВПО «УГТУ-УПИ», 2003. – 400 с.
13. Allen W.C., Snow R.B. The orthosilicate iron oxide portion of the system CaO – FeO – SiO<sub>2</sub> // J. Am. Ceram. Soc. 1955. Vol. 38. P. 264 – 280.
14. Phillips B., Muan A. Phase Equilibria in the System CaO–Iron Oxide–SiO<sub>2</sub> in Air // J. Am. Ceram. Soc. 1959. Vol. 42. P. 413 – 23.
15. Малышева Т.Я., Чугунов М.П., Чернышев А.М. и др. // Новое о ферритной фазе (результаты микронзондирования). Деп. в ВИНТИ. М., № 1582. 1969. С. 5.
16. Малышева Т.Я., Лядова В.Я., Модель М.С. и др. Алюмосиликоферрит кальция из железорудного сырья. Деп. в ВИНТИ, М., № 1017. 1973. С. 11.
17. Модель М.С., Лядова В.Я., Чугунова Н.В. Ферритообразование в железорудном сырье. – М.: Наука, 1990. – 150 с.

Поступила 17 июня 2015 г.

## INFLUENCE OF STRUCTURAL FEATURES OF MAGNETITE CRYSTALS ON THE PROCESS OF AGGLOMERATE SINTERING

**Yusfin Yu.S.**, *Dr. Sci. (Eng.), Professor*

**Malysheva T.Ya.**, *Dr. Sci. (Geologo-Mineralogical), Professor of Chair “Extraction and Recycling of Ferrous Metals”*  
(igivgu@mail.ru)

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

**Abstract.** Regarding to the iron ore agglomerates of various (CaO / SiO<sub>2</sub>) basicity the authors have investigated the formation of ferriferous silicate melt during sintering of sinter ore with magnetite crystals of different structures – homogeneous and heterogeneous. Magnetite crystals of homogeneous structure, with close to stoichiometry composition, take an active part in the formation of ferriferous silicate melt. The ore grains ligaments in the form of iron and calcium containing olivine are locally formed on the place of the melt in the agglomerates of low basicity. With the growth of the agglomerates basicity and increasing the oxidation potential of the gas phase instead of silicate the high-iron ligaments of aluminum silicoferrite appear to form a frame structure of the agglomerates. Magnetite crystals of heterogeneous structure, as a product of decomposition of the solid solution, impede the transition of magnetite iron into the ferriferous silicate melt. Low content of iron oxide in the melt expands the range of crystallization of silicate ligaments and reduces the area of ferritic ligaments in the agglomerate. Failure of magnetite of heterogeneous structure to participate in formation of a melt excludes the possibility of appearance of high-iron aluminum silicoferrite in agglomerates ligament. As a result, the process of ferrite formation in the agglomerates of high basicity begins with the appearance of high-calcium ferrites.

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

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2015-7-473-478

### REFERENCES

1. Malysheva T.Ya., Pavlov R.M., Mansurova N.R., Detkova T.V. Effect of natural ore formation on mineral composition and cold strength of iron ore fluxed agglomerates. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2015, no. 3, pp. 180 – 185. (In Russ.).
2. Pavlov N.V., Chupryna N.N. Magnetite as an indicator for the deep mineralization. *Dokl. AN SSSR*. 1955. Vol. 104, no. 2, pp. 298–301. (In Russ.).
3. Grigor'ev V.M. Impurity elements in iron ores and their genetic value. *Mineral'noe syr'e*. 1971. Issue 15, pp. 3–12. (In Russ.).
4. Kudryavtseva G.P., Kolesnikov L.V. The chemical and phase composition of Kovdor ferrosphenes. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya geologiya*. 1973, no. 5, pp. 88 – 93. (In Russ.).
5. Smelyanskaya G.A. On the issue of silica-calcium magnetite. *Zapiski Vsesoyuznogo mineralogicheskogo obshchestva*. 1976. Vol. 105. Issue 4, pp. 496 – 497. (In Russ.).
6. Pirogov B.I., Porotov G.S., Kholoshin I.V., Tarasenko V.N. *Tekhnicheskaya mineralogiya zheleznykh rud* [Technical mineralogy of iron ores]. Leningrad: Nauka, 1988. 304 p. (In Russ.).
7. Chernysheva L.V., 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, 1981. 235 p. (In Russ.).
8. Gaidukova V.S. *Elektronnaya mikroskopiya dlya resheniya prakticheskikh geologo-mineralogicheskikh zadach* [Electron microscopy to solve practical problems in Geology and Mineralogy]. Moscow: Nedra, 1983. 225 p. (In Russ.).
9. Vegman E.F., Zherebin B. P., Pokhvisnev A.N., Yusfin Yu.S., Kurunov I. F., Paren'kov A. E., Chernousov P. I. *Metallurgiya chuguna* [Cast iron metallurgy]. Yusfin Yu.S. ed. Moscow: Akademkniga, 2004. 774 p. (In Russ.).
10. Puzanov V.P., Kobelev V.A. *Vvedenie v tekhnologiyu metallurgicheskogo strukturoobrazovaniya* [Introduction to the technology of metallurgical structure formation]. Ekaterinburg: UrO RAN, 2005. 501 p. (In Russ.).
11. 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.).
12. Korotich V.I., Frolov Yu.A., Bezdezhskii G.N. *Aglomeratsiya rudnykh materialov* [Agglomeration of ore materials]. Ekaterinburg: GOU VPO «UGTU-UPI», 2003. 400 p. (In Russ.).
13. Allen W.C., Snow R.B. The orthosilicate iron oxide portion of the system CaO – FeO – SiO<sub>2</sub>. *J. Am. Ceram. Soc.* 1955. Vol. 38, pp. 264 – 280.
14. Phillips B., Muan A. Phase Equilibria in the System CaO–Iron Oxide–SiO<sub>2</sub> in Air. *J. Am. Ceram. Soc.* 1959. Vol. 42, pp. 413 – 423.
15. Malysheva T.Ya., Chugunov M.P., Chernyshev A.M. etc. New about the ferrite phase (results of microprobe). *Dep. VINITI*. 1969, no. 1582, p. 5. (In Russ.).
16. Malysheva T.Ya., Lyadova V.Ya., Model' M.S. etc. Aluminum silicoferrite of calcium from iron ore. *Dep. VINITI*. 1973, no. 1017, pp. 11. (In Russ.).
17. Model' M.S., Lyadova V.Ya., Chugunova N.V. *Ferritoobrazovanie v zhelezorudnom syr'e* [Ferrite formation in iron ore]. Moscow: Nauka, 1990. 150 p. (In Russ.).

Received June 17, 2015