

УДК 662.6.9:519.6

ИССЛЕДОВАНИЕ АГЛОПРОЦЕССА С УЧАСТИЕМ В ШИХТЕ МАГНЕТИТОВЫХ КОНЦЕНТРАТОВ КОВДОРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

*Писарев С.А., аспирант кафедры «Энергоэффективные ресурсосберегающие
промышленные технологии» (labbor408@mail.ru)*

*Горбунов В.Б., к.т.н., доцент кафедры «Энергоэффективные ресурсосберегающие
промышленные технологии»*

*Малышева Т.Я., к. геол.-мин. н., профессор кафедры «Энергоэффективные ресурсосберегающие
промышленные технологии»*

Коровушкин В.В., д. геол.-мин. н., профессор кафедры технологии материалов электроники

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

Аннотация. Методом электронного микроанализа установлено, что в железных рудах кристаллы магнетита в зависимости от температурно-временных условий природного рудообразования имеют различную микроструктуру. Так в составе осадочно-метаморфических железистых кварцитов и магматических скарнов кристаллы магнетита имеют гомогенное строение и по составу близки к стехиометрии. В составе руд месторождения Ковдор кристаллы магнетита имеют гетерогенное строение, в матрице которых изоморфные примеси Al, Mg, Ti и др. существуют в виде отдельных шпинельных микрофаз. При восстановлении кристаллов магнетита в условиях, близких к агломерационным, установлено, что в процессе агломерации кристаллы гетерогенного строения разрушаются с образованием двух рудных фаз: твердых растворов магнетита и вюститита, не участвующих в процессах жидкофазного упрочнения агломератов. На заключительном этапе производства офлюсованных агломератов в составе готовой продукции на месте расплава образуются кальций-кремнистые силикатные связи мелилитового состава, обладающие низкими прочностными свойствами. В соответствии с результатами настоящего исследования предлагается при оценке железорудных месторождений обращать внимание не только на содержание в рудах оксидов железа и кремния, но и на структурные особенности кристаллов самого магнетита, поскольку именно железо магнетита определяет направление расплавообразования при производстве техногенного сырья.

Ключевые слова: агломерация, минералогия, железные руды, месторождение Ковдор, кристаллы магнетита гетерогенного строения, восстановление, силикатные связи.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-9-713-719

Со временем на металлургических комбинатах должна закончиться практика покупки и использования в аглошихтах железных руд только по их ценовой стоимости, без учета физико-механических и термических свойств, определяющих поведение концентратов и руд в высокотемпературных окислительно-восстановительных процессах окискования.

Руды в природных условиях формируются в различных температурно-временных и газовых условиях, которые определяют их минеральный состав, структурные особенности и физические свойства [1 – 3]. Смысл же техногенных процессов, в частности агломерации, заключается в превращении разрушенной при обогащении природной руды снова в кусковой продукт для использования его в восстановительных процессах. Минеральные связи рудных зерен, которые являются носителями прочности спеченных агломератов, формируются в высокотемпературных зонах жидкофазного спекания, их состав определяется количеством перешедших в железосиликатный расплав компонентов аглошихт. Конечный состав и микроструктура связей

зависят от основности шихты и условий охлаждения готовой продукции. С вовлечением в металлургическое производство большого количества месторождений железных руд различного генезиса и освоением процессов спекания офлюсованных агломератов, за достаточно короткое время прошлого и начала нового веков появилось огромное количество исследований и научно-практической информации о всех этапах подготовки аглошихт, механизмов спекания агломератов и качества готовой продукции [4 – 20].

В недалеком прошлом, когда в составе аглошихты каждый металлургический комбинат перерабатывал железные руды одного месторождения, процесс производства агломератов был не сложным. Железорудная аглошихта представляла собой гранулированную смесь разрушенной при обогащении руды, офлюсованной до основности (CaO/SiO₂) 1,2, как того требовалось для получения той же основности доменного шлака. Процесс жидкофазного спекания аглошихт низкой основности проходил в условиях низкого окислительного потенциала газовой фазы. В составе готовой продукции

роль связок рудных зерен выполняли силикаты оливиновой группы CaFeSiO_4 , занимающие обширное поле кристаллизации в диаграмме $\text{CaO} - \text{FeO} - \text{SiO}_2$ (рис. 1).

Каждый из металлургических комбинатов долгое время производил агломераты из железных руд одного генетического типа, вплоть до полного истощения месторождения. Поиск возможности повышения качества готовой продукции был связан с использованием информации о минеральном составе железных руд. Этим объясняется большое количество исследований, касающихся состава и свойств нерудных компонентов шихты. При этом различия состава и свойств агломератов связывали с особенностями минерального состава и физико-химических свойств вмещающих пород железных руд, которые совершенно не заслужено до сих пор называют «пустой породой» [12, 23 – 25].

Примечательно, что за долгие годы исследований ни в одной из работ по составу и свойствам агломератов не изучалась природа самого магнетита. И до сих пор природному магнетиту в процессах производства агломератов не уделяется никакого внимания. Тем не менее, методом электронного микроанализа установлено, что в железных рудах кристаллы магнетита в зависимости от температурно-временных условий природного рудообразования имеют различную микроструктуру. Так, в составе осадочно-метаморфических железистых кварцитов и магматических скарнов кристаллы магнетита имеют гомогенное строение и по составу близки к стехиометрии. В них методом рентгеноспектрального микрозондирования обнаружены десятые и сотые доли процента элементов-примесей в виде Al, Mg, Ti, Mn, Cr, V, не влияющих на физико-химические свойства кристаллов магнетита. Одновременно существует ряд магматических рудопроявлений, в составе которых кристаллы магнетита имеют гетерогенное строение. В матрице магнетита изоморфные примеси существуют в виде микрофаз – шпинелей: FeAl_2O_4 , MgFe_2O_4 , TiFe_2O_4 и др. [26].

В настоящее время аглофабрики практически всех металлургических комбинатов работают на привозном сырье. В аглошихтах одновременно используется несколько различных генетических типов руд без учета их термических особенностей. В каждом конкретном случае получение прочного кускового продукта осложняется многофазностью исходной аглошихты, в составе которой практически невозможно выявить роль основного компонента руды – магнетита. При многократных исследованиях минерального состава и структурных особенностей железорудных агломератов ряда промышленных комбинатов, несмотря на близость их химических составов и технологических условий производства, было обращено внимание на фазовые и структурные различия их готовой продукции, особенно на направление процессов плавления в жидкофазных зонах спекания. И все это долгое время не позволяло объяснить влияние нерудных составля-

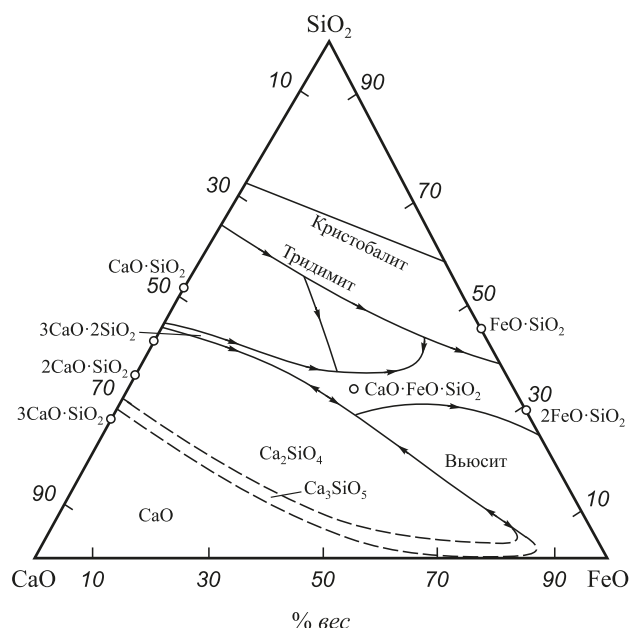


Рис. 1. Диаграмма состояния $\text{CaO} - \text{FeO} - \text{SiO}_2$ [21, 22]

Fig. 1. Diagram of the state of $\text{CaO} - \text{FeO} - \text{SiO}_2$ [21, 22]

щих аглошихт на процесс жидкофазного упрочнения агломератов.

Поиск информации по влиянию кристаллов магнетита гомогенного и гетерогенного строения на процесс плавления железорудных агломератов в отечественной и зарубежной литературе не дал результатов. Предыдущие исследования механизмов упрочнения касались агломератов низкой основности и преимущественно из руд железистых кварцитов с магнетитом гомогенного строения.

В металлургической практике следующим этапом окучивания природного железорудного сырья явилось появление способа производства из мелкодисперсного концентрата окатышей. Применение окатышей различной основности в шихтах доменных печей, наряду с агломератами, явилось причиной проведения большого количества исследовательских работ по поиску и разработке технологических способов производства агломератов повышенной основности. Сравнительный анализ механизмов упрочнения, минерального состава и прочностных свойств целого ряда агломератов повышенной основности не позволил ответить на главный вопрос: почему агломераты, близкие по содержанию в их составе железа, одинаковой основности (CaO/SiO_2) и близкими значениями технологических показателей спекания имеют различный состав упрочняющих их минеральных связок и, как следствие, различную холодную прочность.

Определяющая роль железа магнетита в процессах фазообразования агломератов была впервые установлена при исследовании двух серий промышленных агломератов, офлюсованных в интервале основности CaO/SiO_2 от 1,2 до 2,5. В аглошихтах в приблизительно-

но одинаковом соотношении были использованы железные руды с магнетитом гомогенного и гетерогенного строения. В первом случае спекались агломераты из смеси руд железистых кварцитов и магматических скарнов, в составе которых магнетит имел гомогенное строение, во втором – рудная смесь состояла из железистых кварцитов (магнетит гомогенного строения) и магматических руд с магнетитом гетерогенного строения (руды Ковдора). При спекании получены агломераты разного состава, упрочненные различными связками рудных зерен. Анализ агломератов двух изученных серий установил, что направление процесса расплавообразования определяется количеством железа магнетита в железосиликатном расплаве и показал, что участие в аглошихтах руд с магнетитом гетерогенного строения, по сравнению с гомогенным, затормаживает и изменяет процесс расплавообразования при спекании агломератов [27 – 28].



Рис. 2. Магнетитовая руда месторождения Ковдор: магнетит – черные кристаллы; кальцитовая порода – белая, размер образцов уменьшен в два раза

Fig. 2. Magnetite ore of the Kovdor deposit: magnetite – black crystals; calcite rock – white, the size of samples is reduced by half

Поскольку в настоящее время в составе аглошихты используются железные руды без учета их генетических особенностей, сравнительный анализ процессов минералообразования агломератов, содержащих в своем составе одновременно кристаллы магнетита гомогенного и гетерогенного строения, не позволил решить вопрос об индивидуальных свойствах кристаллов каждого из них. Тем более, что сведения о физико-химических и термических свойствах редко используемого в аглопроцессах магнетита гетерогенного строения отсутствуют. С этой целью в работе проведены исследования по восстановлению кристаллов магнетита гетерогенного строения из кальцит-форстеритовой породы месторождения Ковдор, концентрат которого поступает на спекание агломератов Череповецкого металлургического комбината. Для проведения эксперимента из крупных образцов руды вручную были выделены кристаллы магнетита, структура которых по данным электронной микроскопии имеет гетерогенное строение (рис. 2).

Методом рентгеноспектрального микрозондирования определен химический состав выделенных из руды кристаллов магнетита (табл. 1).

Химический состав выделенных магнетитовых кристаллов из железных руд месторождения Ковдор (табл. 1, образец 1) оказался близок по составу к кристаллам, изученным методом электронной микроскопии [26] (табл. 1, образец 2).

Кристаллы магнетита восстанавливались в атмосфере газа состава $\text{CO}_2:\text{CO} = 80:20$. Температура обжига составляла 900, 1100, 1300 °С, время обжига – 30 мин. В конце опыта образцы охлаждались вместе с печью до комнатной температуры в среде восстановительных газов. Исследовано 16 образцов природных кристаллов магнетита месторождения Ковдор.

Микроструктура природных и восстановленных кристаллов магнетита изучалась оптическим методом, химический состав минеральных фаз определялся методом рентгеноспектрального микрозондирования, состав и структурные особенности исходных и вновь образованных минералов определялись методом мессбауэровской спектроскопии.

В кристаллах магнетита, восстановленных при температуре 900 °С, отсутствовали фазовые и микроструктурные изменения. Оптически полированная поверхность

Таблица 1

Химический состав природных кристаллов магнетита гетерогенного строения, % (по массе)

Table 1. Chemical composition of natural crystals of magnetite of heterogeneous structure, % mass

Образец	Fe _{общ}	MgO	Al ₂ O ₃	TiO ₂	MnO
1	61,7	7,7	1,4	0,7	0,9
2	62,4	5,4	1,4	1,9	0,5

восстановленных кристаллов сохраняет форму и цвет природных кристаллов. В восстановленных при 1100 и 1300 °С кристаллах одинаково четко прослеживаются укрупненные фрагменты структуры их распада. Природный магнетит в процессе восстановления превращается в двухфазную минеральную композицию. Оптически микроструктура рудной композиции на полированной поверхности шлифов представляет собой чередующиеся участки светлой и темной минеральных фаз (рис. 3).

По данным мессбауэровской спектроскопии, светлая фаза является магнезиевюститом, которая образуется на месте матрицы кристаллов природных магнетитов, темная – магнетитом. Спектры минералов приведены на рис. 4, их расшифровка в табл. 2.

По результатам мессбауэровских спектров природный кристалл гетерогенного магнетита и продукты его восстановления (магнетит и вюстит) представляют собой сложные твердые растворы, микроструктура которых четко прослеживается при анализе поверхности образцов методом рентгеноспектрального микрозондирования (см. рис. 3).

Результаты замера химического состава магнетита и магнезиевюstitа позволили установить реальный состав продуктов распада природных кристаллов гетерогенного магнетита в условиях их восстановления на лабораторной установке в атмосфере газа состава $\text{CO}_2:\text{CO} = 80:20$. Температура обжига составляла 900, 1100, 1300 °С, время обжига – 30 мин (табл. 3).

Результаты химического анализа четырех серий образцов кристаллов магнетита гетерогенной структуры, восстановленных при 1300 °С, свидетельствуют о том, что на месте природных кристаллов магнетита образуется высокотемпературная композиция двух разных по составу твердых растворов магнетита и вюstitа. Установлено, что в составе вюstitа, появившегося на месте магнезиевой матрицы природных кристаллов, количество оксида магния значительно увеличивается, вплоть до 13,5 %, при сравнительно низких содержаниях в магнезиевюstitе оксидов марганца, алюминия и титана (десятые доли процента). Одновременно в составе новообразований магнетита при практически постоянном содержании в нем оксида магния (до 3,5 – 4,9 %) отмечается повышен-

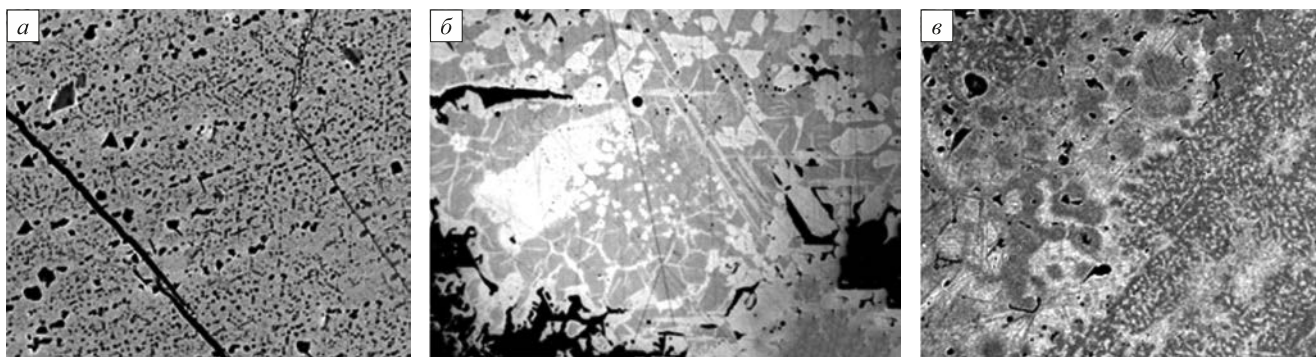


Рис. 3. Минеральный состав и микроструктурные особенности кристаллов природного магнетита (а) и восстановленного при температуре 1100 °С (б) и 1300 °С (в). Снято в обратно рассеянных электронах, $\times 500$

Fig. 3 Mineral composition and microstructural features of natural (a) magnetite crystals recovered at 1100 (b) and 1300 °C (c). Shot in back scattered electrons, an $\times 500$

Таблица 2

Параметры мессбауэровских спектров природного и восстановленного магнетита

Table 2. Parameters of Mossbauer spectra of samples of natural and reconstituted samples

Образец	Компоненты спектра	δ , мм/с	Δ , мм/с	$H_{\text{эфф}}$, кЭ	S, %	Интерпретация
Исходный магнетит	C1(Fe^{3+})	0,27	–0,01	488	43,1	Магнетит (твердый раствор)
	C2($\text{Fe}^{3+} + \text{Fe}^{2+}$)	0,75	0,09	462	39,5	
	C3(Fe^{3+})	0,43	–0,10	465	17,4	
Магнетит после термообработки	C1(Fe^{3+})	0,29	0,00	487	33,5	Магнетит (твердый раствор)
	C2($\text{Fe}^{3+} + \text{Fe}^{2+}$)	0,68	0,03	454	30,2	
	C3(Fe^{3+})	0,42	–0,03	463	16,7	
	C3($\text{Fe}^{3+} + \text{Fe}^{2+}$)	0,66	0,05	424	7,7	
	D(Fe^{2+})	0,97	0,78	–	12,0	Магнезиевюстит (твердый раствор)

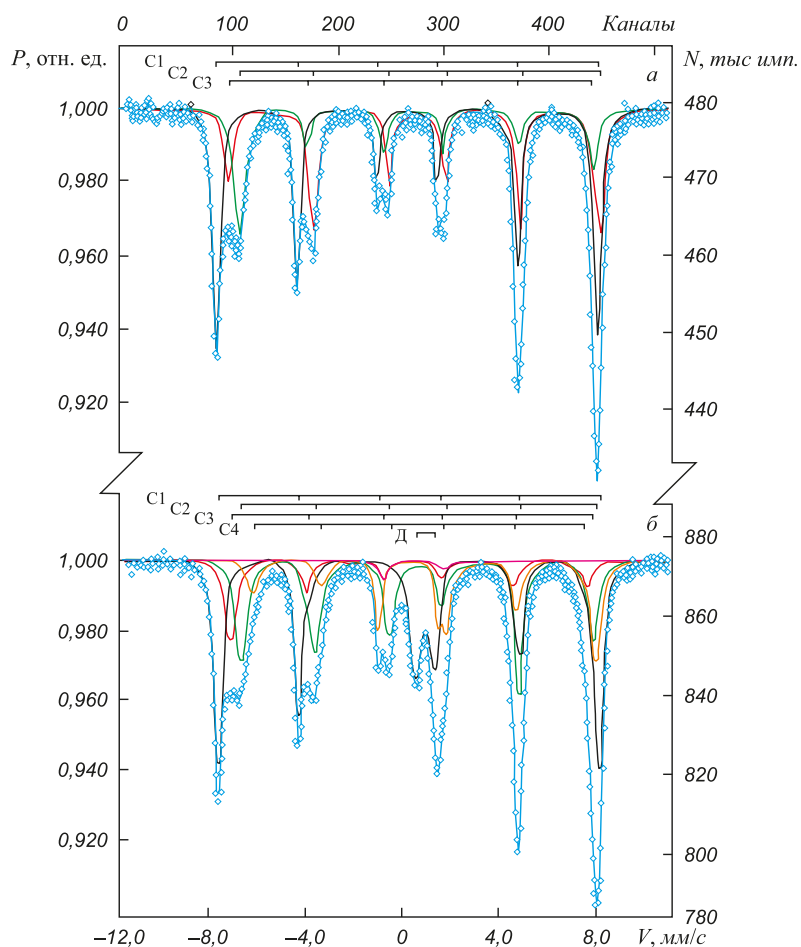


Рис. 4. Мессбауэровские спектры магнетита:
а – природный магнетит; б – после термообработки при 1300 °С

Fig. 4. Mossbauer spectra of magnetite:
а – natural magnetite; б – after heat treatment at $T = 1300\text{ }^{\circ}\text{C}$

Таблица 3

Химический состав кристаллов природного магнетита и восстановленного при 1300 °С по данным рентгеноспектрального микрозондирования, % (по массе)

Table 3. Chemical composition of crystals of natural magnetite recovered at 1300 °C, according to X-ray spectral microprobe

Номер пробы	Минерал	Fe _{общ}	MgO	MnO	Al ₂ O ₃	TiO ₂
1	Магнезиовюстит	60,8	9,2	1,0	0,3	0,1
	Магнетит	62,1	4,2	0,8	1,8	1,3
2	Магнезиовюстит	58,7	13,5	1,1	0,5	0,3
	Магнетит	63,9	4,9	0,7	1,6	0,7
3	Магнезиовюстит	64,3	7,4	1,1	—	—
	Магнетит	61,5	4,0	0,7	5,0	1,7
4	Магнезиовюстит	64,0	6,0	0,8	—	0,4
	Магнетит	63,0	3,5	0,8	2,8	1,7

ное содержание оксида алюминия (до 5,0 %) и титана. Количество железа в составе твердых растворов магнетита и вюстита определяется суммой находящихся в составе кристаллов изоморфных примесей (см. табл. 3).

По результатам исследования новообразований магнетита и вюстита в восстановленных кристаллах природного магнетита предполагать о возможном механизме перераспределения изоморфных примесей

при термообработке руд Ковдорского месторождения в агломерационном процессе пока преждевременно. Для решения проблемы использования железных руд с магнетитом гетерогенного строения в температурно-временных условиях металлургических процессов необходимо дальнейшее продолжение работ с учетом фазового и микроструктурного анализа магнетита методом электронной микроскопии.

Выводы. Исследование процесса агломерации с участием в аглошихте концентратов железных руд Ковдорского месторождения в настоящей работе дополнено изучением минерального состава и структурных особенностей магнетита при восстановлении его кристаллов в условиях, близких к агломерационным ($\text{CO}_2:\text{CO} = 80:20$; $T = 1300^\circ\text{C}$; выдержка 30 мин).

Установлено, что природные кристаллы магнетита гетерогенной структуры при восстановлении превращаются в двухфазную высокотемпературную композицию твердых растворов магнетита и магнезиевюстита. Полученные результаты эксперимента подтверждают установленный ранее факт о затормаживающем действии рудных высокотемпературных фаз на формирование железосиликатного расплава. По результатам исследования промышленных офлюсованных агломератов Череповецкого металлургического комбината связкой рудных зерен является высококальцевая (меллитовая) силикатная фаза, в кристаллах которой железо магнетита обнаруживается только в виде изоморфной примеси.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Татаринов Л.М. Условия образования месторождений рудных и нерудных полезных ископаемых. – М.: Госгеотехиздат, 1955. – 280 с.
2. Синяков В.И. Основы теории рудогенеза. – Ленинград: Недра, 1987. – 192 с.
3. Овчинников Л.Н. Образование рудных месторождений. – М.: Недра, 1988. – 285 с.
4. Ростовцев С.Т. Теория и практика металлургии. 1938. № 6. С. 3 – 9.
5. Рамм А.Н. Теоретические основы применения офлюсованного агломерата в доменных печах. Тр. НТО ЧМ. Т. 8. – М.: Металлургиздат, 1956. С. 44 – 64.
6. Луйкен В. Подготовка сырых материалов к доменной плавке / Пер. с немецкого. – М.: Металлургиздат, 1959. – 412 с.
7. Парфенов А.М. Основы агломерации железных руд. – М.: Металлургиздат, 1961. – 320 с.
8. Якубцинер Н., Горелик И. Изготовление из магнетитовой руды самоплавкого агломерата и выплавка из него чугуна // Сталь. 1940. № 5 – 6. С. 1 – 3.
9. Хохлов Д.Г., Миллер В.Я. Теория и практика производства офлюсованного агломерата // Сталь. 1955. № 6. С. 488 – 497.
10. Бабушкин Н.М., Тимофеев В.Н. Экспериментальное изучение процесса горения углерода в слое агломерационной шихты // Научн. тр. ВНИИМТ. – М.: Металлургиздат, 1962. № 7. С. 17 – 47.
11. Сигов А.А., Шурхал В.А. Агломерационный процесс. – Киев: Техніка, 1969. – 232 с.
12. Малышева Т.Я. Петрография железорудного агломерата. – М.: Наука, 1969. – 168 с.
13. Малышева Т.Я. Железорудное сырье, упрочнение при термообработке. – М.: Наука, 1988. – 197 с.
14. Коротич В.И. Основы теории и технологии подготовки сырья к доменной плавке. – М.: Металлургия, 1978. – 210 с.
15. Коротич В.И., Фролов Ю.А., Бездежский Г.Н. Агломерация рудных материалов. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2003. – 400 с.
16. Вегман Е.Ф. Окускование руд и концентратов. – М.: Металлургия, 1968. – 257 с.
17. Базилевич С.В., Вегман Е.Ф. Агломерация. – М.: Металлургия, 1967. – 368 с.
18. Пузанов В.П., Кобелев В.А. Структурообразование из мелких материалов с участием жидких фаз. – Екатеринбург: УрО РАН, 2001. – 633 с.
19. Малышева Т.Я., Долицкая О.А. Петрография и минералогия железорудного сырья. – М.: МИСИС, 2004. – 423 с.
20. Пузанов В.П., Кобелев В.А. Введение в технологию металлургического структурообразования. – Екатеринбург: УрО РАН, 2005. – 501 с.
21. Bowen N.L., Schaiser J.F., Posnjak E. The system $\text{CaO} - \text{FeO} - \text{SiO}_2$ // Am. J. Sci., 5th Ser. 1933. Vol. 26. P. 193 – 284.
22. 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.
23. Кисин Д.А., Литвинова Т.И. Агломерация железных руд // Сталь. 1960. № 5. С. 397 – 403.
24. Лившиц Б.А., Васильев Г.С. Состав агломератов // Изв. вуз. Черная металлургия. 1964. № 6. С. 23 – 29.
25. Утков В.А. Высокоофлюсованный агломерат. – М.: Металлургия, 1977. – 155 с.
26. Гайдукова В.С. Электронная микроскопия для решения практических геолого-минералогических задач. – М.: Недра, 1983. – 225 с.
27. 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. Т. 58. № 3. С. 180 – 185.
28. Писарев С.А., Куренков Д.С., Малышева Т.Я. Особенности поведения магнетитовых руд ковдорского месторождения в аглопроцессе // Изв. вуз. Черная металлургия. 2016. Т. 59. № 5. С. 354 – 356.

Поступила 29 марта 2017 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2017. Vol. 60. No. 9, pp. 713–719.

INVESTIGATION OF THE SINTERING PROCESS WITH PARTICIPATION OF MAGNETITE CONCENTRATES OF THE KOVDOR DEPOSIT IN THE CHARGE

S.A. Pisarev, V.B. Gorbunov, T.Ya. Malysheva, V.V. Korovushkin

National University of Science and Technology “MISIS” (MISIS), Moscow, Russia

Abstract. Using the method of electronic microanalysis, it has been established that in magnetite ores magnetite crystals, depending on the temperature-time conditions of natural ore formation, have different microstructure. So in the composition of sedimentary-metamorphic ferruginous quartzites and magmatic skarns, magnetite crystals have a

homogeneous structure and are close in composition to stoichiometry. In the Kovdor deposit, magnetite crystals have a heterogeneous structure, in the matrix of crystals of which the isomorphic impurities of Al, Mg, Ti, etc. exist as separate spinel microphases. When the crystals of Kovdor magnetite are restored under conditions close to agglomeration, it is established that in the process of agglomeration, crystals of a heterogeneous structure are destroyed with the formation of two ore phases: solid solutions of magnetite and wustite that do not participate in liquid-phase hardening of agglomerates. At the final stage of production of fluxed agglomerates, calcium silicate bonds (melilitic composition) with low strength properties are formed in the composition of the finished product at the melt site. In accordance with the results of the present study, the physical and chemical processes of hardening of fluxed agglomerates using magmatic ores of different genesis it is suggested, when buying iron ore deposits, to pay attention not only to the content of iron oxides and silicon in the ores, but also on the structural features of crystals of magnetite itself. At the same time, there are a number of magmatic ore occurrences in which the magnetite crystals have a heterogeneous structure.

Keywords: sintering, mineralogy, iron ore, Kovdor deposit, magnetite crystals of heterogeneous structure, restoration, silicate bonds.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-9-713-719

REFERENCES

1. Tatarinov L.M. *Usloviya obrazovaniya mestorozhdenii rudnykh i nerudnykh poleznykh iskopaemykh* [Conditions for the formation of deposits of ore and non-metallic minerals]. Moscow: Gosgeotekhnizdat, 1955, 280 p. (In Russ.).
2. Sinyakov V.I. *Osnovy teorii rudogeneza* [Fundamentals of the theory of ore genesis]. Leningrad: Nedra, 1987, 192 p. (In Russ.).
3. Ovchinnikov L.N. *Obrazovanie rudnykh mestorozhdenii* [Formation of ore deposits]. Moscow: Nedra, 1988, 285 p. (In Russ.).
4. Rostovtsev S.T. In: *Teoriya i praktika metallurgii* [Theory and practice of metallurgy]. 1938, no. 6, pp. 3–9. (In Russ.).
5. Ramm A.N. Theoretical bases of application of fluxed sinter in blast furnaces. In: *Trudy NTO ChM*. Vol. 8. Moscow: Metallurgizdat, 1956, pp. 44–64. (In Russ.).
6. Luyken W. *Die Vorbereitung des Hochofenmüllers einschließlich des Hochofenkokses*. Berlin u. a., Springer-Verl., 1953. (Russ.ed.: Luyken W. *Podgotovka syrykh materialov k domennoi plavke*. Moscow: Metallurgizdat, 1959, 412 p.).
7. Parfenov A.M. *Osnovy aglomeratsii zheleznykh rud* [Basics of sintering of iron ores]. Moscow: Metallurgizdat, 1961, 320 p. (In Russ.).
8. Yakubtsiner N., Gorelik I. Manufacture of self-melting sinter from magnetite ore and smelting of cast iron from it. *Stal'*. 1940, no. 5-6, pp. 1–3. (In Russ.).
9. Khokhlov D.G., Miller V.Ya. Theory and practice of production of fluxed sinter. *Stal'*. 1955, no 6, pp. 488–497. (In Russ.).
10. Babushkin N.M., Timofeev V.N. Experimental study of the carbon combustion in the layer of sintering charge. In: *Nauchn. tr. VNIIMT*. Moscow: Metallurgizdat, 1962, no 7, pp. 17–47. (In Russ.).
11. Sigov A.A., Shurkhal V.A. *Agglomeratsionnyi protsess* [Sintering process]. Kiev: Tekhnika, 1969, 232 p.
12. Malysheva T.Ya. *Petrografiya zhelezorudnogo aglomerata* [Petrography of iron ore sinter]. Moscow: Nauka, 1969, 168 p. (In Russ.).
13. Malysheva T.Ya. *Zhelezorudnoe syr'e, uprochnenie pri termoo-brabotke* [Iron ore raw materials, hardening at heat treatment]. Moscow: Nauka, 1988, 197 p. (In Russ.).
14. Korotich V.I. *Osnovy teorii i tekhnologii podgotovki syr'ya k domennoi plavke* [Fundamentals of the theory and technology of raw material preparation for blast furnace smelting]. Moscow: Metallurgiya, 1978, 210 p. (In Russ.).
15. Korotich V.I., Frolov Yu.A., Bezdezhskii G.N. *Agglomeratsiya rudnykh materialov* [Sintering of ore materials]. Ekaterinburg: UGTU-UIP, 2003, 400 p. (In Russ.).
16. Vegman E.F. *Okuskovanie rud i kontsentratsiy* [Sintering of ores and concentrates]. Moscow: Metallurgiya, 1968, 257 p. (In Russ.).
17. Bazilevich S.V., Vegman E.F. *Agglomeratsiya* [Sintering]. Moscow: Metallurgiya, 1967, 368 p. (In Russ.).
18. Puzanov V.P., Kobelev V.A. *Strukturoobrazovanie iz melkikh materialov s uchastiem zhidkikh faz* [Structuration from small materials with the participation of liquid phases]. Ekaterinburg: UrO RAN, 2001, 633 p. (In Russ.).
19. Malysheva T.Ya., Dolitskaya O.A. *Petrografiya i mineralogiya zhelezorudnogo syr'ya* [Petrography and mineralogy of iron ore raw materials]. Moscow: MISIS, 2004, 423 p. (In Russ.).
20. 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.).
21. Bowen N.L., Schaiser J.F., Posnjak E. The system CaO – FeO – SiO₂. *Am. J. Sci., 5th Ser.* 1933, vol. 26, pp. 193–284.
22. Allen W.C., Snow R.B. The orthosilicate iron oxide portion of the system CaO – FeO – SiO₂. *J. Am. Ceram. Soc.* 1955, vol. 38, pp. 264–280.
23. Kisin D.A., Litvinova T.I. Sintering of iron ores. *Stal'*. 1960, no 5, pp. 397–403. (In Russ.).
24. Livshits B.A., Vasil'ev G.S. Composition of sinters. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 1964, no 6, pp. 23–29. (In Russ.).
25. Utkov V.A. *Vysokoofyusovannyi aglomerat* [Highly fluxed sinter]. Moscow: Metallurgiya, 1977, 155 p. (In Russ.).
26. Gaidukova V.S. *Elektronnaya mikroskopiya dlya resheniya prakticheskikh geologo-mineralogicheskikh zadach* [Electron microscopy for solving practical geological and mineralogical problems]. Moscow: Nedra, 1983, 225 p. (In Russ.).
27. 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 sinters. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2015, vol. 58, no 3, pp. 180–185. (In Russ.).
28. Pisarev S.A., Kurenkov D.S., Malysheva T.Ya. Behavior of magnetite ores of Kovdor deposit in sintering process. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2016, vol. 59, no 5, pp. 354–356. (In Russ.).

Information about the authors:

S.A. Pisarev, Postgraduate of the Chair “Energy-Efficient and Resource-Saving Industrial Technologies” (labbor408@mail.ru)
V.B. Gorbunov, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor of the Chair “Energy-Efficient and Resource-Saving Industrial Technologies”
T.Ya. Malysheva, Cand. Sci. (Geol.-Mineralogical), Professor of the Chair “Energy-Efficient and Resource-Saving Industrial Technologies”
V.V. Korovushkin, Dr. Sci. (Geol.-Mineralogical), Professor of the Chair “Technology of Electronics Materials”

Received March 29, 2017