

УДК 669.162.1:669.046

## ОСОБЕННОСТИ ПОВЕДЕНИЯ МАГНЕТИТОВЫХ РУД КОВДОРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ В АГЛОПРОЦЕССЕ\*

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

*Куренков Д.С., магистр кафедры «Энергоэффективные ресурсосберегающие  
промышленные технологии»*

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

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

**Аннотация.** Особенностью руд Ковдорского месторождения является наличие в их составе магнетита гетерогенного строения, когда в железомagneзиевой матрице изоморфные примеси присутствуют в виде отдельных шпинельных фаз:  $\text{FeAl}_2\text{O}_4$ ,  $\text{MgFe}_2\text{O}_4$ ,  $\text{TiFe}_2\text{O}_4$ . Исследован процесс фазовых превращений кристаллов магнетита гетерогенного строения в условиях, приближенных к агломерационному. В интервале 1100 – 1300 °С в восстановительной среде происходит распад кристаллов магнетита на две оксидные фазы: магнетит и вюстит с перераспределением между ними изоморфных примесей. Одновременно в сростках кристаллов оксидных фаз с вмещающими породами образуются силикаты с высокой температурой плавления. Следовательно композиция оксидных и силикатных фаз является причиной ранее установленной заторможенности процесса расплавообразования при агломерации железных руд с участием магнетитового концентрата Ковдорского месторождения.

**Ключевые слова:** железные руды, магнетит гетерогенного строения, агломерационный процесс.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2016-5-354-356

Методом электронной микроскопии установлено, что в железорудных месторождениях различного генезиса кристаллы магнетита обладают принципиально разными типами оруденения. Магнетит большинства железорудных месторождений имеет гомогенное строение и по составу близок к стехиометрии: 31 % FeO; 69 %  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . В рудах Ковдорского месторождения магнетит имеет гетерогенное строение. В его железомagneзиевой матрице элементы изоморфных примесей существуют в виде отдельных шпинельных фаз: герцинита  $\text{FeAl}_2\text{O}_4$ , магнезиальной шпинели  $\text{MgFe}_2\text{O}_4$  и ульвошпинели  $\text{TiFe}_2\text{O}_4$  [1 – 3].

Для изучения структурных особенностей магнетита гетерогенного строения в условиях, приближенных к агломерационному процессу, отбраны хорошо ограниченные кристаллы магнетита из руд Ковдорского месторождения. Термообработку кристаллов магнетита проводили в лабораторной печи сопротивления в восстановительной атмосфере ( $\text{CO}_2:\text{CO} = 80:20$  и  $50:50$ ). Температура обжига составляла 900, 1100, 1300 °С, время обжига – 15 и 30 мин. Образцы охлаждались вместе с печью до комнатной температуры в среде восстановительных газов.

\* Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, соглашение № 14.278.21.0065 от 20.10.2014 г. Уникальный идентификатор соглашения RFMEF157814X0065.

Микроструктура восстановленных кристаллов магнетита изучена оптическим методом, химический состав минеральных фаз определен методом рентгено-спектрального микрозондирования.

В кристаллах магнетита, восстановленных при температуре 900 °С, отсутствуют фазовые и микроструктурные изменения. В восстановленных пробах при 1100 и 1300 °С четко прослеживаются структуры распада. Природный магнетит превращается в двухфазную рудную композицию, состоящую из магнетита и вюстита с перераспределением между фазами изоморфных примесей. Установлено, что в магнетите остаются практически все компоненты изоморфных примесей гетерогенных кристаллов ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{TiO}_2$ ). В составе новообразований вюстита обнаружен оксид магния, количество которого заметно превышает его содержание в составе природного магнетита (см. таблицу).

Данные о термических свойствах продуктов распада гетерогенных кристаллов магнетита пока отсутствуют. Однако очевидно, что они мало чем должны отличаться от температур плавления фаз стехиометрического состава, например магнетита и вюстита (1591 и 1350 °С соответственно).

При изучении минерального состава железорудных агломератов главное внимание отводится механизму

**Химический состав кристаллов природного магнетита и продуктов его распада по данным рентгеноспектрального микрозондирования, % (по массе)**

**Chemical composition of crystals of natural magnetite and its decay products according to X-ray spectral microprobe**

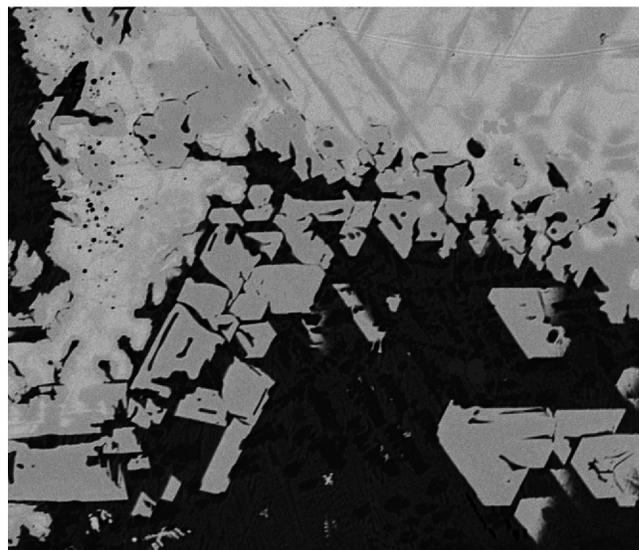
Минерал	Fe <sub>общ</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	MnO
Исходный	61,7	7,7	1,4	0,7	0,9
Магнетит	61,1	4,2	2,4	1,3	0,8
Вюстит	62,1	9,2	0,3	0,2	0,8

формирования силикатно-ферритных связок – носителей прочности готовой продукции. Капли первичного силикатного расплава, появившегося на участках контакта кристаллов магнетита с вмещающими породами, состоят из стеклофазы оливинового с дендритами кальцийфосфатного силиката – силикокарнитита  $\text{Ca}_5(\text{PO}_4)_2\text{SiO}_2$ , температура плавления которого превышает 1700 °С.

Следовательно, наличие в аглошихте руд Ковдорского месторождения магнетита гетерогенного строения и появление в процессе спекания агломерата продуктов их распада в виде высокотемпературных оксидных и силикатных минералов подтверждает высказанное ранее предположение о сложности ведения процесса агломерации при использовании магнетитовых руд гетерогенного строения [4].

**Выводы.** Гетерогенные кристаллы магнетита Ковдорского месторождения являются сложной микросистемой, состоящей из железомagneйовой матрицы с включениями шпинельных фаз в виде  $\text{FeAl}_2\text{O}_4$ ,  $\text{MgFe}_2\text{O}_4$ ,  $\text{TiFe}_2\text{O}_4$ . В условиях агломерационного процесса природные кристаллы гетерогенного магнетита распадаются на две высокотемпературные фазы: магнетит и вюстит с перераспределением между ними изоморфных примесей. Появление наряду с продуктами распада магнетита высокотемпературных силикатов усугубляет микроструктурную неоднородность композиции рудных и силикатных фаз, затормаживающих процесс расплавообразования при участии в железорудной шихте магнетитовых руд Ковдорского месторождения.

Работа с железными рудами, имеющими в своем составе кристаллы магнетита гетерогенного строения, только начата. Полученных в настоящем исследовании



Капля силикатного расплава на границе с продуктами распада кристалла гетерогенного магнетита:  
вюстит – белый; магнетит – серый;  
силикокарнитит – черные дендриты; стеклофаза – темно-серая.  
Отраженный свет, ×900

Silicate melt drop at the boundary with the decay products of heterogeneous crystal of magnetite:  
wustite – white, magnetite – grey,  
silicoorganic – black dendrites, glass phase – dark grey.  
Reflected light, ×900

данных недостаточно для совершенствования существующего процесса спекания аглошихт с их участием. Необходимо продолжение поиска возможности использования этих руд в технологических процессах.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. Гайдук И.С., Чернышева Л.И. Новые данные о структурах распада в магнетитах Ковдорского месторождения // Докл. АН СССР. 1970. Т. 195. № 3. С. 682 – 685.
2. Григорьев И.М. Элементы – примеси в железных рудах и их генетическое значение // Минеральное сырье. 1971. Вып. 15. С. 3 – 12.
3. Кудрявцева Г.П. Ферримагнетизм природных оксидов. – М.: Недра, 1988. – 232 с.
4. Малышева Т.Я., Павлов Р.М., Мансуров Н.Р., Деткова Т.И. Влияние природного рудообразования на минеральный состав и холодную прочность офлюсованных железорудных агломератов // Изв. вуз. Черная металлургия. 2015. Т. 58. № 3. С. 180 – 185.

Поступила 11 апреля 2016 г.

**BEHAVIOR OF MAGNETITE ORES OF KOVDOR DEPOSIT IN SINTERING PROCESS**

*S.A. Pisarev, D.S. Kurenkov, T.Ya. Malysheva*

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

**Abstract.** The peculiarity of Kovdor deposit ores is the presence of magnetite of heterogeneous structure when the isomorphous impurities present in celonite matrix as separate spinel phases:  $\text{FeAl}_2\text{O}_4$ ,  $\text{MgFe}_2\text{O}_4$ ,  $\text{TiFe}_2\text{O}_4$ . The authors have investigated the process of phase transfor-

mations of magnetite crystals of heterogeneous structure in conditions close to sinter. In the range of 1100 – 1300 °C in reducing environment occurs the dissolution of magnetite crystals in two oxide phases: magnetite and wustite with redistribution of isomorphous impurities between them. At the same time the silicates with high melting points are formed in the joints of crystals of oxide phases with the host rocks. Therefore, the composition of oxide and silicate phases is the cause of the previously established retardation of the process of melt formation during iron ore sintering with the participation of magnetite concentrate of Kovdor deposit.

**Keywords:** iron ore, magnetite heterogeneous structure, sintering process.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2016-5-354-356

#### REFERENCES

1. Gaidukova I.S., Chernysheva, L.I. New data on the decay structures in Kovdor magnetites. *DAN SSSR*. 1970, vol. 195, no. 3, pp. 682–685. (In Russ.).
2. Grigor'ev I.M. Trace elements in iron ores and their genetic significance. *Mineral'noe syr'e*. 1971, vol. 15, pp. 3–2. (In Russ.).
3. Kudryavtseva G.P. *Ferrimagnetizm prirodnykh oksidov* [Ferrimagnetism of natural oxides]. Moscow: Nedra, 1988, 232 p. (In Russ.).

4. Malysheva T.Ya., Pavlov R.M., Mansurov N.R., Detkova I.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, vol. 58, no. 3, pp. 180–185. (In Russ.).

**Acknowledgements.** The work was financially supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, the agreement number 14.278.21.0065 from 20.10.2014, the unique identifier of the agreement RFMEF 157814X0065.

#### Information about the authors:

**S.A. Pisarev**, MA Student of the Chair “Energy-efficient and Resource-saving Industrial Technologies” (labbor408@mail.ru)

**D.S. Kurenkov**, MA Student 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”

Received April 11, 2016