

ISSN: 0368-0797. Известия высших учебных заведений. Черная металлургия. 2017. Том 60. № 8. С. 609 – 615.  
 © 2017. Дмитриев А.Н.

УДК 669.162.263

## АНАЛИТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КАЧЕСТВА ТИТАНОМАГНЕТИТОВОГО СЫРЬЯ НА ПОКАЗАТЕЛИ ДОМЕННОЙ ПЛАВКИ\*

**Дмитриев А.Н.,** д.т.н., главный научный сотрудник лаборатории пирометаллургии  
черных металлов (*andrey.dmitriev@mail.ru*)

**Институт металлургии УрО РАН**  
(620002, Россия, Екатеринбург, ул. Амундсена, 101)

**Аннотация.** Приведено краткое описание математических моделей доменного процесса и методики оценки количественного влияния металлических характеристик железорудного сырья и кокса на технико-экономические показатели доменной плавки, разработанных в Институте металлургии УрО РАН. Основными особенностями для данных математических моделей являются: для комплекса математических моделей – двумерность доменного процесса, заложенная при постановке задачи; для балансовой логико-статистической модели – возможность учета металлургических характеристик железорудного сырья (агломерат и окатыши) при анализе доменной плавки. Описана оригинальная методика оценки влияния показателей качества железорудного сырья и кокса на технико-экономические показатели доменной плавки. Суть этой методики заключается в следующем: исследование в лабораторных условиях металлургических характеристик железорудного сырья (восстановимость, прочность, температуры размягчения и плавления), определение с помощью математических моделей технико-экономических показателей доменной плавки, проведение опытно-промышленных и промышленных испытаний. Приведены результаты исследования влияния основности промышленного агломерата из титаномагнетитового концентрата на технико-экономические показатели доменной плавки. Представлены результаты литературных и собственных исследований по выявлению стабилизированной фазы двухкальциевого силиката SFCA. Понимание механизмов формирования таких фаз может привести к повышению эффективности промышленных процессов спекания. Для изучения минералогического состава агломератов был проведен микрорентгеноструктурный анализ с помощью растрового электронного микроскопа (Scanning Electron Microscope, SEM) JSM-5900LM. Выявлено наличие определенной взаимосвязи фазового состава агломерата и его горячей прочности. Согласно расчетам с использованием математической модели, повышение горячей прочности агломерата может дать экономию кокса до 3,9 кг/т чугуна и увеличение производительности до 6,3 %. Выполнена оценка влияния химического состава доменной шихты с учетом степени восстановления железа на положение и форму зоны когезии в доменной печи. Для расчета использованы прогнозные физико-химические модели, позволяющие учсть влияние химического состава железорудных материалов и их соотношений на температуры размягчения и плавления окускованного железорудного материала из титаномагнетитового концентрата.

**Ключевые слова:** доменный процесс, математическая модель, титаномагнетиты, железорудное сырье, металлургические характеристики, расход кокса, практические задачи.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2017-8-609-615

Использование математических моделей для решения практических задач доменной плавки при переработке различного железорудного сырья, в том числе комплексного, в настоящее время стало необходимым и неизбежным по двум основным причинам. Во-первых, в связи с тем, что проведение промышленных экспериментов на действующих доменных печах является дорогостоящим и технологически опасным, во-вторых, математическое моделирование позволяет исследовать поведение железорудного сырья новых месторождений.

Одной из первых математических моделей доменного процесса, учитывающих двумерный характер яв-

лений, протекающих в печи, была методика расчета температурного поля доменной печи с учетом неравномерности движения потоков шихты и газа [1], в состав которой входили математические модели газодинамики и теплообмена. Впоследствии данная математическая модель была дополнена моделями восстановления, зоны когезии и балансовой (равновесной) математической моделью [2].

В ряду комплексных математических моделей доменной плавки, состоящих из моделей отдельных процессов, отметим работу [3]. В настоящее время продолжается разработка математических моделей доменного процесса, как учитывающих двумерный характер явлений при постановке задачи, так и не учитывающих [4 – 6]. Большое внимание уделяется визуализации результатов расчетов с использованием математических моделей [7]. Также широко используется CFD-моделирование – вычислительная гидродинамика (Computational Fluid Dynamics) [8].

\* Работа выполнена в рамках Государственного задания ИМЕТ УрО РАН по теме №0396-2015-0081.

В работе принимали участие сотрудники Института металлургии УрО РАН Петухов Р.В. (м.н.с.), Овчинникова Л.А. (ст.н.с., к.х.н.), Витькина Г.Ю. (н.с., к.т.н.) и Института высокотемпературной электрохимии УрО РАН Панкратов А.А. (вед.инженер).

Математические модели доменного процесса могут интегрироваться в информационные системы в составе АСУ ТП, которые позволяют решать более широкий круг задач не только контроля, но и управления доменным процессом [9].

Одним из основных резервов повышения технико-экономических показателей доменной плавки, в частности снижения удельного расхода кокса, является совершенствование подготовки железорудного сырья, улучшение его металлургических свойств – восстановимости, прочности, температуры размягчения и плавления. Эффективность такого влияния определяется условиями термодинамического равновесия реакции восстановления оксидов железа в конкретной доменной печи, зависящими от дутьевых и шихтовых условий [10].

Одна из лучших математических моделей, учитывающих металлургические характеристики железорудного сырья, разработана под руководством известного ученого-доменщика профессора С.В. Шаврина [11–12].

В Институте металлургии УрО РАН на основе комплекса двумерных математических моделей и балансовой логико-статистической модели доменного процесса [1, 2, 11, 12] разработана методика оценки влияния показателей качества железорудного сырья и кокса на технико-экономические показатели доменной плавки [13]. Суть этой методики заключается в следующем.

- Получение в лабораторных условиях агломерата или окатышей, определение их металлургических свойств (прочность, восстановимость, температура размягчения и плавления). Восстановимость сырья RI определяется в соответствии с ГОСТ 17212–84, прочность RDI – ГОСТ 15137–84 (ISO 13930), температура начала размягчения и плавления железорудного материала – ГОСТ 26517–85.

- Расчетное прогнозирование свойств кокса (прочность, реакционная способность) на основе свойств составляющих шихты для коксования. Реакционная способность кокса CRI и горячая прочность CSR определяются согласно ГОСТ Р 50921–2005.

- Определение с помощью математических моделей технико-экономических показателей доменной плавки.

- Проведение опытно-промышленных испытаний.

Эта методика широко используется в Институте металлургии УрО РАН при решении практических задач расширения железорудной базы России, а также совершенствовании технологии переработки существующей железорудной базы. В частности, решается задача повышения качества железорудного сырья АО «ЕВРАЗ Качканарский горно-обогатительный комбинат (КГОК)» и оценка его влияния на эффективность работы доменных печей ОАО «ЕВРАЗ Нижнетагильский металлургический комбинат (НТМК)».

Роль металлургических характеристик железорудного сырья в доменном процессе хорошо известна. Высо-

кая восстановимость обеспечивает снижение удельного расхода кокса, высокая «горячая» прочность (фракция +6,3 мм) – улучшение газодинамики процесса, и, как следствие, повышение производительности печи. Высокие температуры начала размягчения и плавления при их низком интервале и высокой восстановимости железорудного сырья обеспечивают оптимальное положение и форму зоны когезии в доменной печи, что имеет большое значение для обеспечения высокой производительности печи. Более важным моментом здесь является возможность формирования металлургических характеристик железорудного сырья на этапе его производства и прогнозирования технико-экономических показателей доменной плавки.

Остановимся на некоторых вопросах технологии производства железорудного агломерата из титаномагнетитового концентрата. В связи с тем, что лучшие прочностные показатели имеют неофлюсованные окатыши, возможна схема использования комбинированной шихты: неофлюсованные окатыши – высокоосновной агломерат. Хорошо известна сложная зависимость «горячей» прочности агломерата от его основности.

В работе [14] отмечено влияние основности агломерата на его прочность (фракция +6,3 мм). Установлено, что при основности агломерата ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» 1,4 его прочность составляет 61 %, при основности 1,6 – 56 %, при основности 3,0 – 69 %. Для агломерата ПАО «Северсталь» при основности 1,4 прочность составляет 62 %, при 1,6 – 2,2 – 60 %, при 3,0 – 71 %.

В работе [15] на экспериментальной установке исследовано влияние основности агломерата из титаномагнетитового концентрата Panzhihua Iron & Steel (Group) Co (Pangang Group) на его прочностные показатели. Содержание Fe в концентрате 53,51 %,  $TiO_2$  – 12,22 %. Результаты показали, что повышение основности может увеличить выход годной продукции, производительность и индекс восстановимости (RI) конечного агломерата. Однако индекс прочности при восстановлении ( $RDI_{+3,15}$ ) значительно уменьшается при изменении основности от 1,0 до 2,0. Также показано, что титаномагнетит и титаногематит являются главными минералами в агломерате, в то время как кирштейнит и силикат кальция являются основными фазами связки. Количество первовскита сначала увеличивается, а затем снижается с увеличением основности, тогда как содержание силикоферрита кальция и алюминия (SFCA) начинает увеличиваться при основности от 1,5 до 3,0. Сделан вывод, что корректировка основности агломерата способна снизить отрицательное воздействие  $TiO_2$  при спекании титаномагнетитового концентрата.

Минералогический анализ выявил наличие в железорудном агломерате фаз двухкальциевого силиката: нестабилизированной  $2CaO \cdot SiO_2$  и стабилизированной  $Ca_{2,3}Mg_{0,8}Al_{1,5}Fe_{8,3}Si_{1,1}O_{20}$  (SFCA). Результаты ана-

лиза показали, что холодная прочность и прочность при восстановлении RDI агломерата из титаномагнетитового концентрата ухудшаются с увеличением перовскита в агломератах. Однако отрицательные воздействия нивелируются увеличением SFCA при основности более 2,0. Кроме того, спекание при основности ниже 0,5 и ультра высокое основное спекание (основность выше 2,5), как полагают авторы статьи [15], являются лучшим выбором для спекания титаномагнетитового концентрата относительно прочности при восстановлении RDI.

В работе [16] представлены результаты исследований по выявлению стабилизированной фазы двухкальциевого силиката SFCA. В работах [17, 18] также отмечается влияние режимов нагрева и охлаждения агломерата [17], а также основности [18] на формирование фазы SFCA.

Фаза SFCA в железорудном агломерате была классифицирована на основе состава, морфологии и кристаллической структуры как два основных типа. Первым является высокожелезистый, низкокремнистый тип под названием SFCA-I, который имеет характерную (описанную как игольчатую) морфологию. Фаза SFCA-I в промышленном агломерате содержала, %: 84 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 13 CaO, 1 SiO<sub>2</sub> и 2 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> [18]. Также был синтезирован материал SFCA-I, который имел состав, %: 83,2 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 12,6 CaO и 4,2 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Второй тип SFCA – низкожелезистая форма под названием SFCA, который описан как имеющий колонноподобную морфологию. Фаза SFCA, найденная в промышленных агломератах, как правило, содержит, %: 60 – 76 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 13 – 16 CaO, 3 – 10 SiO<sub>2</sub>, 4 – 10 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и 0,7 – 1,5 MgO, основность в диапазоне от 1,6 до 4,4 [18].

Авторы работы [17] полагают, что SFCA и SFCA-I – ключевые фазы связки в железорудном агломерате и по-

нимание механизмов их формирования может привести к повышению эффективности промышленных процессов спекания.

В Институте металлургии УрО РАН была предпринята попытка исследования промышленного агломерата АО «ЕВРАЗ КГОК» из титаномагнетитового концентрата на предмет наличия в нем фазы SFCA. Были исследованы агломераты основностью 2,1 и 2,4.

Для изучения минералогического состава агломерата был проведен микрорентгеноструктурный анализ с помощью растрового электронного микроскопа (Scanning Electron Microscope, SEM) JSM-5900LM.

Основной фазой в агломерате основностью 2,1 является Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (магнетит). В пробе присутствует Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (гематит) в небольших количествах, а также хорошо проявляется Ca-содержащий силикат сложного состава Ca<sub>2,3</sub>Mg<sub>0,8</sub>Al<sub>1,5</sub>Fe<sub>8,3</sub>Si<sub>1,1</sub>O<sub>20</sub>. На рис. 1 приведен фазовый состав пробы агломерата (обозначения в табл. 1).

В исходном агломерате можно выделить фазы магнетита Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>, титаната кальция (перовскит) CaO·TiO<sub>2</sub>, извести CaO и двухкальциевых силикатов, один из которых стабилизирован алюминием – Ca<sub>2,3</sub>Mg<sub>0,8</sub>Al<sub>1,5</sub>Fe<sub>8,3</sub>Si<sub>1,1</sub>O<sub>20</sub>. Двухкальциевый силикат 2CaO·SiO<sub>2</sub> (фазы 4, 5 в табл. 1) не стабилизирован и в результате приводит к образованию мелочи из агломерата.

На рис. 2 приведен фазовый состав пробы агломерата основностью 2,4 (обозначения в табл. 2).

Основными фазами являются Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (магнетит) и Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (гематит). Фаза магнетита представляет компактную, но довольно угловатую форму (см. рис. 2, фазы 1, 2) и по химическому составу имеет некоторый избыток кислорода, что может характеризовать некоторую недовосстановленность железа. Фаза гематита представлена в виде утолщенных игл (см. рис. 2,

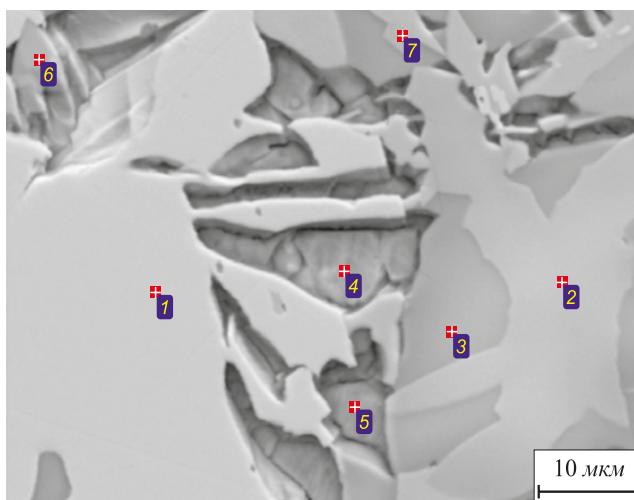


Рис. 1. Фазовый состав агломерата основностью 2,1 в режиме BES ( $\times 2000$ )

Fig. 1. Phase composition of agglomerate with the basicity of 2.1 in the BES mode ( $\times 2000$ )

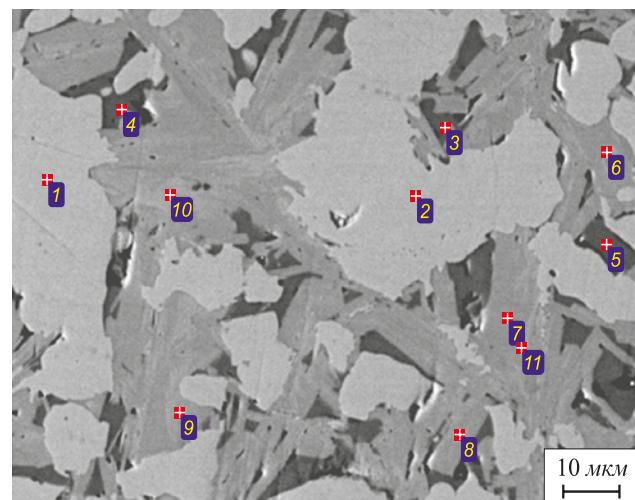


Рис. 2. Фазовый состав агломерата основностью 2,4 в режиме BES ( $\times 1000$ )

Fig. 2. Phase composition of agglomerate with the basicity of 2.4 in the BES mode ( $\times 1000$ )

Таблица 1

**Результаты количественного анализа в точках I – 7 (рис. 1)***Table 1. Results of the quantitative analysis in points I – 7 (fig. 1)*

Спектр	O	Na	Mg	Al	Si	Ca	Ti	V	Fe
Фаза	Магнетит $\text{Fe}_3\text{O}_4$								
I	53,64		2,11	1,25		1,21			41,78
Фаза	Титанат кальция (перовскит) $\text{CaO}\cdot\text{TiO}_2$								
2	64,12			0,56	4,20	18,29	6,05		6,77
Фаза	Двухкальциевый силикат (SFCA) $2\text{Ca}(\text{Mg}, \text{Fe}, \text{Mn})\text{O}\cdot\text{SiO}_2$ (стабилизирована Al)								
3	61,35			3,45	13,66	15,98	0,71	0,83	4,01
Фаза	$2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ (не стабилизирована)								
4	59,68	0,27			13,92	24,83		0,43	0,87
5	56,10				13,05	29,62		0,48	0,75
Фаза	Известь $\text{CaO}$								
6	57,69			0,64	4,28	21,11	7,28		9,00
7	56,98			1,31	4,11	19,54	7,52		10,53

Таблица 2

**Результаты количественного анализа в точках I – 11 (рис. 2)***Table 2. Results of the quantitative analysis in points I – 11 (fig. 2)*

Спектр	O	Mg	Al	Si	S	Ca	Ti	V	Cr	Mn	Fe
Фаза	Магнетит $\text{Fe}_3\text{O}_4$ (доля 46 %)										
I	29,03	2,70	0,74	0	0	1,55	0	0	0	0	65,98
2	28,39	2,58	0,81	0	0	1,24	0	0	0	0	66,97
Фаза	Перовскит ( $\text{CaTiO}_2$ ) + двухкальциевый силикат $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ (доля 6 %)										
3	33,68	0	0,59	8,92	0	22,62	6,77	2,67	0	0	24,74
4	35,78	0	0,46	7,72	0	21,30	7,96	1,95	0	0	24,83
5	34,65	0	0,56	7,66	0	22,42	8,61	1,81	0	0	24,29
Фаза	Гематит $\text{Fe}_2\text{O}_3$ (доля 37 %)										
6	31,87	0,59	1,74	2,69	0	10,20	1,45	0	0	0	51,46
7	32,41	0,63	1,91	2,43	0	10,25	1,13	0	0	0	51,25
8	32,11	0,60	1,75	2,55	0	10,39	1,52	0	0	0	51,08
9	30,24	1,27	1,92	1,68	0	6,91	0,64	0	0	0	57,34
10	31,06	1,55	2,08	1,12	0	6,18	0,47	0	0	0	57,55
11	30,79	1,15	1,99	1,61	0	7,84	0,60	0	0	0	56,02

фазы 6 – 11). Также обнаружено небольшое количество  $\text{CaO}\cdot\text{TiO}_2$  (перовскит) и  $\beta\text{-}2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  (двукальциевый силикат) (см. рис. 2, фазы 3 – 5).

Определение прочности агломератов по ГОСТ 15137–84 показало, что для агломерата основностью 2,4 она выше, чем для агломерата 2,1, на 24 % (отн.). Согласно расчетам с использованием математической модели [10, 11], такое повышение горячей прочности агломерата может дать экономию кокса до 3,9 кг/т чугуна и увеличение производительности до 6,3 %.

Также авторами была выполнена оценка влияния химического состава доменной шихты с учетом степени восстановления на положение и форму зоны когезии в доменной печи. Для расчета использовались прогнозные физико-химические модели [19 – 21], позволяющие учесть влияние химического состава железорудных материалов и их соотношений. Были внесены дополнения, учитывающие наличие в железорудном сырье оксидов титана и ванадия. В качестве исходных данных для расчета зоны когезии взято соотношение в домен-

ной шихте окускованного сырья АО «ЕВРАЗ КГОК» – агломерат 40 %, окатыши 60 %. В итоге получены следующие уравнения и для расчета температуры начала размягчения шихты (1) и температуры плавления (2):

$$T_{\text{ппШ}}^R = 1143(1 - 4,9 \cdot 10^{-3}R + 3,75 \cdot 10^{-5}R^2); \quad (1)$$

$$T_p^R = 1469(1 - 9,97 \cdot 10^{-3}R + 3,357 \cdot 10^{-5}R^2 - 3,652 \cdot 10^{-6}R^3 + 1,3 \cdot 10^{-8}R^4), \quad (2)$$

где  $R$  – степень восстановления, доли ед.

На рис. 3 приведены расчетные с помощью математической модели [2] температурные поля и зона когезии для доменной печи № 5 объемом 1719 м<sup>3</sup> Нижнетагильского металлургического комбината (до ее последней реконструкции).

Таким образом, показана возможность анализа и прогнозирования влияния качества железорудного сырья на показатели доменной плавки на примере титаномагнетитов.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

- Дмитриев А.Н., Щербатский В.Б., Суханов Е.Л. и др. Методика расчета температурного поля доменной печи с учетом неравномерности движения потоков шихты и газа // Изв. вуз. Черная металлургия. 1979. № 8. С. 28 – 32.
- Дмитриев А.Н. Математическое моделирование двумерных процессов в доменной печи // Вычислительные методы и программирование. 2004. Т. 5. Раздел 1. С. 252 – 267.
- Blast Furnace Phenomena and Modeling. – London – New York: Elsevier Applied. 1987. – 631 p.
- Shigeru Ueda, Shungo Natsuo, Hiroshi Nogami etc. Recent progress and future perspective on mathematical modeling of blast furnace // ISIJ International. 2010. Vol. 50. No. 7. P. 914 – 923.
- Zongliang Zhang, Jiale Meng, Lei Guo, Zhancheng Guo. Numerical study of the gas distribution in an oxygen blast furnace. Part 1. Model building and basic characteristics // JOM. 2015. Vol. 67. No. 9. P. 1936 – 1944.
- Zongliang Zhang, Jiale Meng, Lei Guo, Zhancheng Guo. Numerical study of the gas distribution in an oxygen blast furnace. Part 2. Effects of the design and operating parameters // JOM. 2015. Vol. 67. No. 9. P. 1945 – 1955.
- Chenn Zhou, Guangwu Tang, Jichao Wang etc. Comprehensive numerical modeling of the blast furnace ironmaking process // JOM. 2016. Vol. 68. Issue 5. P. 1353 – 1362.
- Jun-ichiro Yagi, Hiroshi Nogami, Aibing Yu. Multi-dimensional mathematical model of blast furnace based on multi-fluid theory and its application to develop super-high efficiency operations // Proceedings of Fifth International Conference on CFD in the Process Industries CSIRO, Melbourne, Australia, 13 – 15 December, 2006. P. 1 – 6.
- Математическое моделирование металлургических процессов в АСУ ТП / Н.А. Спирина, В.В. Лавров, В.Ю. Рыболовлев и др. / Под ред. Н.А. Спирина. – Екатеринбург: ООО “УИПЦ”, 2014. – 558 с.
- Dmitriev A.N. The role of reducibility in achievement of the minimal coke consumption in the blast furnace smelting // Defect and Diffusion Forum. 2006. Vols. 258 – 260. P. 91 – 100.
- Ченцов А.В., Чесноков Ю.А., Шаврин С.В. Балансовая логико-статистическая модель доменного процесса. – Екатеринбург: УрО РАН, 2003. – 164 с.
- Dmitriev A.N., Vitkina G.Yu., Chesnokov Yu.A. Methodical basis of investigation of influence of the iron ore materials and coke metallurgical characteristics on the blast furnace smelting efficiency // Advanced Materials Research. 2013. Vols. 602 – 604. P. 365 – 375.
- Малышева Т.Я., Павлов Р.М., Мансурова Н.Р., Деткова Т.В. Влияние природного рудообразования на минеральный состав и холодную прочность огнеупорных железорудных агломератов // Изв. вуз. Черная металлургия. 2015. Т. 58. № 3. С. 180 – 185.
- Zhengwei Yu, Guanghui Lu, Tao Jiang etc. Effect of basicity on titanomagnetite concentrate sintering // ISIJ International. 2015. Vol. 55. No. 4. P. 907 – 909.
- Hamilton J.D.G., Hoskins B.F., Mumme W.G. etc. The crystal structure and crystal chemistry of  $\text{Ca}_{2,3}\text{Mg}_{0,8}\text{Al}_{1,5}\text{Si}_{1,1}\text{Fe}_{8,3}\text{O}_{20}$  (SFCA): solid solution limits and selected phase relationships of SFCA in the  $\text{SiO}_2 - \text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{CaO}(-\text{Al}_2\text{O}_3)$  system // Neues Jahrb. Miner. Abh., 1989. Vol. 161. P. 1 – 26.
- Nathan A.S. Webster, Mark I. Pownceby, Ian C. Madsen, Justin A. Kimpton. Silico-ferrite of calcium and aluminum (SFCA) iron ore sinter bonding phases: new insights into their formation during heating and cooling // Metallurgical and Materials Transactions B. 2012. Vol. 43B. December. P. 1344 – 1357.
- Nathan A.S. Webster, Mark I. Pownceby, Ian C. Madsen etc. Fundamentals of silico-ferrite of calcium and aluminum (SFCA) and SFCA-I iron ore sinter bonding phase formation: effects of  $\text{CaO}:\text{SiO}_2$  ratio // Metallurgical and Materials Transactions B. 2014. Vol. 45B. December. P. 2097 – 2115.

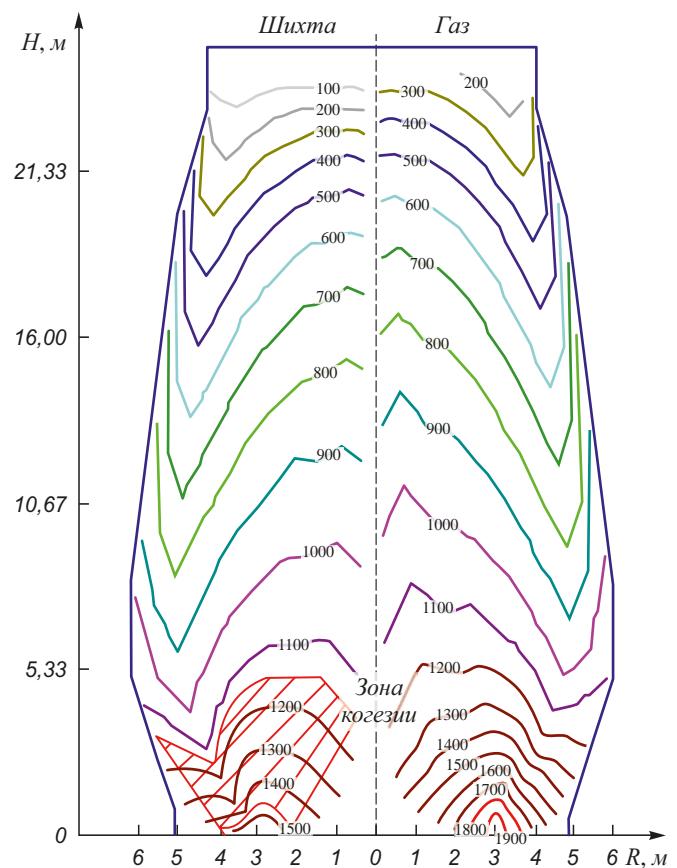


Рис. 3. Температурные поля и зона когезии

Fig. 3. Temperature fields and cohesion zone

19. Тогобицкая Д.Н., Хамхотько А.Ф., Гладков Н.А., Ходотова Н.Е. Разработка моделей для прогнозирования агрегатных превращений железорудных материалов в доменной печи // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии. 2009. № 19. С. 49 – 67.
20. Гаврилко С.А., Киселев А.А., Громук Г.А. и др. Исследование размягчаемости восстановленного агломерата различных фракций // Металлургия: Сборник научных трудов ЗГИА. – Запорожье. 2009. Вып. 20. С. 26 – 31.
21. Приходько Э.В., Хамхотько А.Ф., Тогобицкая Д.Н. и др. Роль химического состава железорудных материалов в формировании их металлургических свойств. Подготовка сырьевых материалов к металлургическому переделу и производство чугуна // Черная металлургия. Бюл. ин-та «Черметинформация». 1987. Вып. 5. С. 1 – 25.

Поступила 12 апреля 2017 г.

IZVESTIYA VUZOV. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2017. VOL. 60. NO. 8, pp. 609–615.

## ANALYTICAL STUDY OF QUALITY INFLUENCE OF TITANOMAGNETITE RAW MATERIALS ON BLAST FURNACE INDICATORS

**A.N. Dmitriev****Institute of Metallurgy, UB RAS, Ekaterinburg, Russia**

**Abstract.** A short description of the mathematical models of blast-furnace process and the estimation technique of metallurgical characteristics quantitative influence of iron ore raw materials and coke on technical and economic indicators of blast furnace smelting developed at Institute of metallurgy of Ural Branch of the Russian Academy of Sciences are provided. Features of these mathematical models are the main: for a complex of mathematical models – two-regularity of blast-furnace process put at a problem definition for balance logic-statistical model – possibility of the accounting of metallurgical characteristics of iron ore raw materials (agglomerate and pellets) in analysis of the blast furnace smelting phenomena. The original estimation procedure of influence of quality characteristics of iron ore raw materials and coke on technical and economic indices of blast furnace smelting is described. The essence of this procedure consists in the following: examination in vitro the metallurgical characteristics of iron ore raw materials (reducibility, strength, softening and melting temperatures), definition by means of mathematical models of technical and economic indices of blast furnace smelting, carrying out trial and industrial trials. Effects of examination of influence of basicity of industrial agglomerate from titanomagnetite concentrate on technical and economic indices of blast furnace smelting are given. The results of literary and one's examinations on detection of the stabilized phase of two-calcic silicate SFCA are provided. The understanding of shaping mechanisms of such phases can lead of efficiency increase of industrial sintering processes. The micro X-ray diffraction analysis by raster-type electron microscope (Scanning Electron Microscope, SEM) JSM-5900LM has been carried out to study of mineralogical composition of the agglomerates. Existence of particular correlation of agglomerate phase composition and its hot strength was revealed. According to the calculations with the use of mathematical model such rise of agglomerate hot strength can give economy of coke about 3.9 kg/t of cast iron and efficiency rise about 6.3 %. The influence estimation of chemical composition of blast furnace charge was fulfilled taking into account the degree of iron reduction on location and the shape of cohesion zone in the blast furnace. For the calculation, predictive physico-chemical models have been used that allow to take into account the influence of the chemical composition of iron-ore materials and their ratios on the softening and melting temperatures of the agglomerated iron-ore material from the titanomagnetite concentrate.

**Keywords:** blast-furnace process, mathematical model, titaniferous magnetite, iron ore raw materials, metallurgical characteristics, coke consumption, practical tasks.

**DOI:** 10.17073/0368-0797-2017-8-609-615

### REFERENCES

- blast furnace, taking into account the unevenness of charge and gas flows. *Izvestiya VUZov. Chernaya metallurgiya = Izvestiya. Ferrous Metallurgy.* 1979, no. 8, pp. 28–32. (In Russ.).
2. Dmitriev A.N. Mathematical modeling of two-dimensional processes in a blast furnace. *Vychislitel'nye metody i programmirovaniye.* 2004, vol. 5, pp. 252–267. (In Russ.).
3. *Blast Furnace Phenomena and Modeling.* London – New York: Elsevier Applied, 1987, 631 p.
4. Shigeru Ueda, Shungo Natsuo, Hiroshi Nogami, Jun-ichiro Yagi, Tatsuro Ariyama. Recent progress and future perspective on mathematical modeling of blast furnace. *ISIJ International.* 2010, vol. 50, no. 7, pp. 914–923.
5. Zongliang Zhang, Jiale Meng, Lei Guo, Zhancheng Guo. Numerical study of the gas distribution in an oxygen blast furnace. Part 1: Model building and basic characteristics. *JOM.* 2015, vol. 67, no. 9, pp. 1936–1944.
6. Zongliang Zhang, Jiale Meng, Lei Guo, Zhancheng Guo. Numerical study of the gas distribution in an oxygen blast furnace. Part 2: Effects of the design and operating parameters. *JOM.* 2015, vol. 67, no. 9, pp. 1945–1955.
7. Chenn Zhou, Guangwu Tang, Jichao Wang, Dong Fu, Tyamo Okosun, Armin Silaen, Bin Wu. Comprehensive numerical modeling of the blast furnace ironmaking process. *JOM.* 2016, vol. 68, Issue 5, pp. 1353–1362.
8. Jun-ichiro Yagi, Hiroshi Nogami, Aibing Yu. Multi-dimensional mathematical model of blast furnace based on multi-fluid theory and its application to develop super-high efficiency operations. In: *Proceedings of Fifth International Conference on CFD in the Process Industries CSIRO, Melbourne, Australia, 13-15 December, 2006,* pp. 1–6.
9. Spirin N.A., Lavrov V.V., Rybolovlev V.Yu., Gileva L.Yu., Krasnobaev A.V., Shvydkii V.S., Onorin O.P., Shchepanov K.A., Burykin A.A. *Matematicheskoe modelirovaniye metallurgicheskikh protsessov v ASU TP* [Mathematical modeling of metallurgical processes in automatic control systems of technological processes]. Spirin N.A. ed. Ekaterinburg: OOO “UIPTs”, 2014, 558 p. (In Russ.).
10. Dmitriev A.N. The role of reducibility in achievement of the minimal coke consumption in the blast furnace smelting. *Defect and Diffusion Forum.* 2006, vols. 258–260, pp. 91–100.
11. Chentsov A.V., Chesnokov Yu.A., Shavrin S.V. *Balansovaya logiko-statisticheskaya model' domennogo protsessa* [Logic-statistic balance model of blast furnace smelting]. 2nd ed. Ekaterinburg: UrO RAN, 1991, 90 p. (In Russ.).
12. Chentsov A.V., Chesnokov Yu.A., Shavrin S.V. *Balansovaya logiko-statisticheskaya model' domennogo protsessa* [Logic-statistic balance model of blast furnace smelting]. Ekaterinburg: UrO RAN, 2003, 164 p. (In Russ.).
13. Dmitriev A.N., Vitkina G.Yu., Chesnokov Yu.A. Methodical basis of investigation of influence of the iron ore materials and coke metallurgical characteristics on the blast furnace smelting efficiency. *Advanced Materials Research.* 2013, vols. 602–604, pp. 365–375.
14. Malyshova T.Ya., Pavlov R.M., Mansurova N.R., Detkova T.V. Influence of ore formation on the mineral composition and strength

- of fluxed iron-ore sinter. *Steel in Translation*. 2015, vol. 45, no. 3, pp. 190–194.
15. Zhengwei Yu, Guanghui Lu, Tao Jiang, Yuanbo Zhang, Feng Zhou, Zhiwei Peng. Effect of basicity on titanomagnetite concentrate sintering. *ISIJ International*. 2015, vol. 55, no. 4, pp. 907–909.
  16. Hamilton J.D.G., Hoskins B.F., Mumme W.G., Borbridge W.E., Montague M.A. The crystal structure and crystal chemistry of  $\text{Ca}_{2.3}\text{Mg}_{0.8}\text{Al}_{1.5}\text{Si}_{1.1}\text{Fe}_{8.3}\text{O}_{20}$  (SFCA): solid solution limits and selected phase relationships of SFCA in the  $\text{SiO}_2 - \text{Fe}_2\text{O}_3 - \text{CaO}(-\text{Al}_2\text{O}_3)$  system. *Neues Jahrb. Miner. Abh.*, 1989, vol. 161, pp. 1–26.
  17. Nathan A.S. Webster, Mark I. Pownceby, Ian C. Madsen, Justin A. Kimpton. Silico-ferrite of calcium and aluminum (SFCA) iron ore sinter bonding phases: new insights into their formation during heating and cooling. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2012, vol. 43B, December, pp. 1344–1357.
  18. Nathan A.S. Webster, Mark I. Pownceby, Ian C. Madsen, Andrew J. Studer, James R. Manuel, Justin A. Kimpton. Fundamentals of silico-ferrite of calcium and aluminum (SFCA) and SFCA-I iron ore sinter bonding phase formation: effects of  $\text{CaO}:\text{SiO}_2$  ratio. *Metallurgical and Materials Transactions B*. 2014, vol. 45B, December, pp. 2097–2115.
  19. Togobitskaya D.N., Khamkhot'ko A.F., Gladkov N.A., Khodotova N.E. Developing of models for forecasting of modular transformations of iron ore materials in a blast furnace. *Fundamental'nye i prikladnye problemy chernoi metallurgii*. 2009 no. 19, pp. 49–67. (In Russ.).
  20. Gavrilko S.A., Kiselev A.A., Gromak G.A., Lichkonenko N.V., Moiseiko Yu.V., Pechennikova V.M., Gavrilko Yu.S. Study of softening of the reduced agglomerate of different fractions. In: *Metalurgiya: sbornik nauchnykh trudov ZGIA, vyp. 20* [Metallurgy: Proceeding of scientific works of ZGIA. Issue 20]. Zaporizhia: ZGIA, 2009, pp. 26–31. (In Russ.).
  21. Prikhod'ko E.V., Khamkhot'ko A.F., Togobitskaya D.N., Grebenkin N.A., Shepetovskii E.A., Zevin S.L. Role of the chemical composition of iron ore materials in forming of their metallurgical properties. Preparation of raw materials for metallurgical processing and production of cast iron. *Chernaya metallurgiya. Byul. in-ta "Chernometinformatsiya"*. 1987, Issue 5, pp. 1–25. (In Russ.).

**Acknowledgements.** The work was financially supported by the State task of Institute of Metallurgy of Ural Branch of Russian Academy of Sciences, the Project no. 0396-2015-0081.

The work was performed with participation of the employees of the Institute of Metallurgy of the Urals Branch of the Russian Academy of Sciences (Petukhov R.V., Ovchinnikova L.A., Vitkina G.Yu.) and of the Institute of High-Temperature Electrochemistry, UrB RAS (Pankratov A.A.).

#### Information about the authors:

**A.N. Dmitriev, Dr. Sci. (Eng.), Chief Researcher of the Laboratory “Pyrometallurgy of Ferrous Metals”** (andrey.dmitriev@mail.ru)

Received April 12, 2017