

УДК 669.162.1.004.15

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РУДОУГОЛЬНЫХ БРЭКСОВ В ДОМЕННОЙ ПЛАВКЕ ПУТЕМ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

© Курунов Иван Филиппович<sup>1</sup>, e-mail: kurunov\_if@nlmk.com;Филатов Сергей Васильевич<sup>1</sup>;Бижанов Айтбер Махачевич<sup>2</sup>, e-mail: abizhanov@jcsteele.com<sup>1</sup> ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат». Россия, г. Липецк<sup>2</sup> J.C.Steele&Sons, Inc. USA, Statesville, NC

Статья поступила 19.09.2016 г.

С применением математической модели доменного процесса, разработанной в МИСиС, оценили эффективность применения в доменной плавке шихты, содержащей равные доли уголь содержащих брэксов из железорудного концентрата, суперфлюсованного агломерата и окисленных нефлюсованных окатышей. Математическое моделирование показало, что замена на 50% производства агломерата экологически чистым производством брэксов позволит обеспечить снижение расхода кокса как минимум на 10% и снизить пылевые и газовые выбросы аглофабрики на 50%.

**Ключевые слова:** математическое моделирование; доменная плавка; уголь содержащие брэксы; расход кокса; выбросы аглофабрики.

Металлургические свойства брэксов различного состава [1], пятилетний опыт эффективной работы малой доменной печи на шихте из 80–100% брэксов [2] и наличие технологии и высокопроизводительного оборудования для их производства послужили основанием для оценки перспектив широкомасштабного применения в доменных печах этого нового компонента доменной шихты. Исследования выполнили с применением математической модели доменного процесса и программы ДОМНА, разработанных в МИСиС [3, 4]. Моделировали доменную плавку в доменной печи объемом 4297 м<sup>3</sup>, работающей в условиях ПАО «НЛМК». Учитывая основность брэксов, определяемую содержанием в них цемента и бентонита, а также долю окатышей в шихте, определяемую мощностью строящейся в ПАО «НЛМК» фабрики окомкования (6 млн т окатышей в год), моделировали плавку на шихте, состоящей из трех разноосновных компонентов – суперфлюсованного агломерата, нефлюсованных окатышей и углеродсодержащих брэксов из железорудного концентрата с основностью 0,53. Основность брэксов из концентрата и угля марки СС определили с учетом экспериментально установленного содержания в шихтовой смеси брэксов цемента (6%) и бентонита (1%) и угля. При указанных содержаниях связующего основность брэксов (В2) составляет 0,50–0,55. Моделировали ситуацию с годовой производительностью чугуна 12,0 млн т, при которой с учетом основности окатышей и брэксов основность агломерата В2 ≈ 3,0. При этом доля каждого из трех компонентов шихты составит около 33%, т.е. брэксы должны заменить порядка 50% производимого в ПАО «НЛМК» агломерата.

Следует заметить, что при основности 3,0 в структуре агломерата преобладают фазы, обеспечивающие повышение его прочности по сравнению с производимым в настоящее время агломератом с основностью в диапазоне 1,5–1,7 [5]. Содержание угля в брэксах определили по методике, разработанной на основе результатов изучения структурного состава брэксов после их нагрева в восстановительной атмосфере до 1400 °С, когда после достижения практически полной металлизации в структуре брэкса оставались неизрасходованные частицы коксовой мелочи из-за ее избыточного содержания в шихте для брикетирования. Разработанная методика определения оптимального содержания углерода в брэксе основана на анализе показателей интенсивно работающих доменных печей с высоким расходом вдуваемого топлива, при котором степень прямого восстановления железа (по М.А.Павлову) колеблется в относительно высоких (30–50%) пределах [6, 7]. С учетом этого расход углеродсодержащего материала в шихте для брикетирования рассчитывали исходя из стехиометрического соотношения кислорода и железа в брэксах (O:Fe), составляющего 0,3–0,5, к моменту их прихода в зону с температурой более 1000 °С. Соответственно стехиометрическое соотношение содержаний углерода и железа в брэксах (C:Fe) должно отвечать неравенству  $0,35 \leq (C:Fe) \leq 0,55$ .

Для моделирования доменной плавки использовали расчетные составы агломератов с основностью 1,70 и 3,02 и состав брэксов из концентрата

Таблица 1. Составы сырьевых материалов, агломератов и брэксов

Материал	FeO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	C	SO <sub>3</sub>
Цемент	–	4,71	20,64	4,98	63,58	1,15	–	2,55
Бентонит	0,5	4,37	59,25	14,27	2,07	3,62	–	0,14
Уголь СС	–	1,2	2,7	1,5	0,4	0,1	68,9	0,36
Окатыши СГОК	1,51	90,31	7,04	0,32	0,22	0,45	–	0,12
Концентрат СГОК	29,2	62,3	6,62	0,18	0,26	0,1	–	0,05
Агломерат (1,70)	11,81	66,0	6,70	0,72	11,37	2,51	–	0,05
Агломерат (3,02)	10,0	60,8	6,30	0,7	19,0	3,0	–	0,06
Брэксы	24,83	53,28	7,67	0,71	4,09	0,19	5,5	0,22

Таблица 2. Результаты моделирования доменной плавки на традиционной шихте и шихте, на треть состоящей из железоуглеродсодержащих брэксов

Показатели работы печи	База	Вариант 1	Вариант 2
Расход, кг/т:			
агломерата В2 = 1,7	1109	–	–
агломерата В2 = 3,0	–	557	575
окатышей СГОК	546	557	541
брэксов	–	557	575
руда СГОК	–	17	–
Содержание Fe в шихте, %	58,2	57,45	57,15
Расход кокса, кг/т	391	354	284
Расход природного газа, нм <sup>3</sup> /т	125	125	35
Расход ПУТ, кг/т	–	–	160
Расход дутья, м <sup>3</sup> /мин	7483	7568	7345
Температура дутья, °С	1240	1240	1240
Содержание O <sub>2</sub> в дутье, %	30,5	30,5	30,5
Влажность дутья, г/м <sup>3</sup>	10	10	20
Выход колошникового газа, м <sup>3</sup> /т	1545	1540	1470
Давление колошникового газа, кПа	240	240	240
Содержание, %:			
CO	24,4	24,9	26,2
CO <sub>2</sub>	23,2	22,6	23,9
H <sub>2</sub>	9,7	9,9	8,2
Выход шлака, кг/т	318	314	323
Основность шлака В2	1,01	1,01	1,02
Производительность, т/сут.	12465	12624	12708
Производительность, т/(м <sup>2</sup> ·сут.)	92,48	93,66	94,3
Эффективность восстановления, %	94,2	94,2	94,2

СГОК, доля углерода в котором отвечала стехиометрическому соотношению C:Fe = 0,44 (табл. 1).

Моделирование проводили для одного и того же состава чугуна и его температуры ([Si] = 0,4%; [C] = 4,9%;  $T_{\text{чуг}} = 1500$  °С) и одинаковой эффективности газового восстановления вюститита (степень приближения к равновесному составу газа в зоне восстановления вюститита). Результаты показали, что, благодаря углероду, содержащемуся в рудоугольных брэксах, расход кокса на выплавку чугуна сокращается по сравнению с базовым вариантом на 10%. При вдувании пылеугольного топлива (ПУТ) с расходом 160 кг/т работа печи с брэксами позволяет достичь расхода кокса 284 кг/т, а при вдувании природного газа с расходом 125 м<sup>3</sup>/т – расхода кокса 354 кг/т (табл. 2).

**Заключение.** Исследование металлургических свойств брэксов из техногенных и природных сырьевых материалов и опыт работы малой доменной печи на шихте, состоящей из 80–100% таких брэксов, позволяют считать их подготовленным компонентом шихты высокого качества, производимым по экологически чистой технологии. Математическое моделирование доменной плавки на шихте из суперофлюсованного агломерата, окисленных неофлюсованных окатышей и угольсодержащих брэксов из железорудного концентрата продемонстрировало возможность снизить расход кокса как минимум на 10%. Замена 50% производства агломерата производством брэксов позволит снизить выбросы аглофабрики на 50%.

#### Библиографический список

1. Курунов И.Ф., Бижанов А.М., Тихонов Д.Н., Мансурова Н.Р. Металлургические свойства брэксов // Металлург. 2012. № 6. С. 44–48.

2. **Курунов И.Ф., Бижанов А.М.** Брэксы – новый этап в окислении сырья для доменных печей // Металлург. 2014. № 3. С. 49–53.

3. **Курунов И.Ф., Яценко С.Б.** Методика расчета технико-экономических показателей доменной плавки // Научные труды МИСиС. 1983. № 152. С. 63–69.

4. **Курунов И.Ф.** Разработка ресурсосберегающих технологий доменной плавки на основе ее исследования и математического моделирования. Дис. ... д-ра техн. наук. М.: МИСиС, 1986. 117 с.

5. **Вегман Е.Ф.** Доменное производство: Справ. изд. В 2-х т. Т. 1. Подготовка руд и доменное производство. М.: Металлургия, 1989. 496 с.

6. **Филатов С.В., Курунов И.Ф., Тихонов Д.Н., Басов В.И.** Влияние интенсивности плавки на производительность доменной печи и расход кокса // Металлург. 2016. № 7. С. 20–24.

7. **Geerdes M., Chaigneau R., Kurunov I., Lingiardi O., Rikkets J.** Modern Blast Furnace Ironmaking. Amsterdam : IOS Press BV, 2015. 218 p.

## EVALUATION OF EFFICIENCY OF ORE-COAL BREX IN BF VIA MATHEMATICAL MODELLING

© **Kurunov I.F., Filatov S.V., Bizhanov A.M.**

With the application of the mathematical model of the Blast Furnace process developed by MISiS the efficiency of the Blast Furnace charge containing equal parts of the coal-containing BREX made of iron ore concentrate, super-fluxed sinter and non-fluxed oxidized pellets has been estimated. Mathematical modelling demonstrated that the substitution of 50% of sinter production by ecologically sound production of BREX will result in the Coke rate reduction by 10% at least and will also reduce dust and gas emissions of sintering plant by 50%.

**Keywords:** mathematical modelling; Blast furnace smelting; coal-containing BREX; Coke rate; sintering plant emissions.

### ВЫШЛА В СВЕТ НОВАЯ КНИГА

#### «Современный доменный процесс. Введение»

С таким названием в 2015 г. в Голландии в издательстве IOS Press BV вышла на английском языке книга, подготовленная интернациональным авторским коллективом: **Маартен Геердес** (Голландия), **Ренард Ченьо** (Бразилия), **Иван Курунов** (Россия), **Оскар Лингарди** (Аргентина), **Джон Рикеттс** (США).

Авторы – известные высококвалифицированные специалисты – эксперты в области доменного производства. В книге представлено краткое описание конструкции доменной печи и доменного процесса, изложены физические, химические и металлургические аспекты доменной плавки, наблюдения опытных операторов-технологов, анализ проблем, возникающих при работе доменных печей и меры для их разрешения.

Принципиальная позиция авторов по управлению работой печи заключается в том, что оптимизация доменного процесса базируется не только на «применении лучших разработанных технологий и приемов управления», но требует также концептуального понимания использования приемов и условий работы печи, при которых они дают положительный эффект. По мнению авторов, операционные улучшения базируются не только на «знаю как», но и на «знаю почему».

Книга «Современный доменный процесс» может служить руководством по управлению доменным процессом, полезным как технологическому персоналу, уже работающему на доменных печах, так и тем, кто готовится стать доменщиком или хочет поближе познакомиться с доменным процессом.

Это третье издание книги с таким названием. Первые два издания, вышедшие в 2004 г. и в 2009 г. (авторы М. Геердес, Х. Токсопеус, К. ван дер Влит) были некоммерческими и предназначались для специалистов заводов, где внедрялись системы подготовки и вдувания пылеугольного топлива. Оба издания были переведены на русский язык и изданы ограниченным тиражом ПД «НЛМК» для специалистов комбината.

В третьем издании сохранен главный аспект первых двух изданий особенности технологии доменной плавки с вдуванием пылеугольного топлива.

Книга дополнена разделами, посвященными: типам и характеристикам углей, применяемых для производства кокса; функциям кокса в доменной печи и методам испытаний его металлургических свойств; технологии плавки с вдуванием природного газа и с совместным вдуванием ПУТ и природного газа; оперативному контролю доменного процесса с помощью экспертных систем и математических моделей; производительности и эффективности работы доменной печи.

Расширены разделы, посвященные качеству железорудных материалов и операциям на литейном дворе.

Кроме подготовленного к изданию перевода книги на русский язык сделан перевод и уже издана книга на голландском языке, и в этом году она будет издана на китайском языке.

Заявки на приобретение книги следует направлять в ООО «Металлургиздат», тел.: +7 (495)777-95-61, e-mail: metallurgizdat@yandex.ru