

УДК 622.78

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ВОССТАНОВЛЕНИЯ РУДОУГОЛЬНЫХ БРИКЕТОВ ЭКСТРУЗИИ (БРЭКСОВ)

© **Бижанов Айтбер Махачевич¹; Курунов Иван Филиппович²**, д-р техн. наук, проф.;
Павлов Александр Васильевич³, д-р техн. наук, проф.; **Чадаева Ольга Владимировна³**;
Чижов Павел Сергеевич⁴, канд. хим. наук

¹ J.C.Steele&Sons, Inc. USA, Statesville, NC. E-mail: abizhanov@jcsteele.com

² ОАО «Новолипецкий металлургический комбинат». Россия, Липецк

³ Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС». Россия, Москва

⁴ Московский государственный университет. Россия, Москва

Статья поступила 28.06.2013 г.

Технология жесткой вакуумной экструзии, созданная компанией J.C.Steele&Sons, Inc, была применена для окускования железорудного концентрата и мелкодисперсного угля. Продукты экструзии (брэкс) были подвергнуты высокотемпературному восстановлению. Приведены результаты моделирования поведения брэксов в условиях, близких к условиям процесса ITmk3[®]. Показано, что рудоугольные брэкс могут рассматриваться в качестве альтернативы рудоугольным окатышам, используемым для высокотемпературного восстановления в печах типа печей с вращающимся подом.

Ключевые слова: брикет экструзии (брэкс); жесткая вакуумная экструзия; процесс ITmk3[®]; печь с вращающимся подом; наггетс; шелл.

Технология жесткой вакуумной экструзии, разработанная и успешно применяемая компанией J.C.Steele&Sons, Inc. (США) для окускования природных и техногенных материалов, находит все более широкое распространение. Основные отличительные особенности технологии, обусловившие ее привлекательность, были описаны нами ранее [1–3]. Изложенные в этих работах результаты относились к использованию брэксов в качестве компонента шихты доменных и дуговых печей (включая рудно-термические).

Настоящая статья посвящена изучению поведения рудоугольных брэксов в нейтральной атмосфере при температуре 1350–1370 °С, т.е. в условиях, частично моделирующих условия восстановления рудоугольных окатышей в процессе ITmk3[®], разработанном фирмой Kobe Steel Ltd. (Япония) [4–5]. Этот процесс реализуется в кольцевой камерной печи с вращающимся подом. Рудоугольные окатыши загружаются в один-два слоя на вращающийся огнеупорный под печи. Процесс их нагрева и восстановления оксидов железа осуществляется за один оборот пода в течение 10–15 мин при максимальной температуре в печи не менее 1350 °С. Оксиды железа восстанавливаются углеродом, входящим в состав рудоугольных окатышей или брикетов. Восстановленное железо в окатышах науглероживается,

частицы его плавятся и коагулируют, превращаясь в фасолеобразные капли чугуна крупностью 3–12 мм внутри образующейся размягченной шлаковой оболочки. При охлаждении в нейтральной атмосфере капли затвердевают, образуя чугунные гранулы («наггетсы»). Рудоугольные окатыши или брикеты загружаются на вращающийся под кольцевой печи в сыром (необожженном) виде. При этом прочностные свойства окатышей или брикетов должны обеспечивать сохранение их целостности в процессе нагрева и восстановления, а образующаяся шлаковая оболочка – предотвращать растекание жидкой капли чугуна.

В данной работе для исследования использовали рудоугольные брэкс, изготовленные на лабораторном экструдере компании J.C.Steele из смесей концентрата ливийской гематитовой железной руды (содержание железа 63,12%) с различными видами углей и связующих. В экспериментах использовали образцы брэксов диам. 2,5 и 1,25 см, круглого и овального сечений длиной, равной 1,5–2,0 диаметра.

Компонентный состав брэксов и их плотность, измеренная приборами Mettler MS603S и Mettler MS-DNY-43, приведены в табл. 1.

Результаты ситового анализа шубаркольского угля и угля Globe, выполненного в лаборатории J.C.Steele, приведены на рис. 1.

Таблица 1. Компонентный состав, форма и плотность брэсков

Образец брэкса	Компонент – доля, %				Плотность, г/см ³
	А	В	С	Д	
№ 1 – диам. 1,25 см (круг)	Железная руда – 63,5	Уголь Globe* – 31,3	Бентонит – 0,5	Портландцемент – 4,7	2,207
№ 2 – 1,25×2,5 см (овал)	Железная руда – 63	Шубаркольский уголь** – 32	Портландцемент – 5	–	2,072
№ 3 – диам. 1,25 см (круг)	Железная руда – 63	Шубаркольский уголь** – 32	Портландцемент – 5	–	2,034
№ 4 – 1,25×2,5 см (овал)	Железная руда – 63	Шубаркольский уголь** – 31	Портландцемент – 5	Жидкое стекло – 1	2,036

* Насыпная плотность 768 кг/м³; влажность 7,8%; зола 4%; летучие 37,7%.
 ** Насыпная плотность 800 кг/м³; влажность 10%; зола 7,1%; летучие 38,5%; S 0,40%; P 0,021%.

Ниже приведен химический состав железорудного концентрата (*w* – содержание):

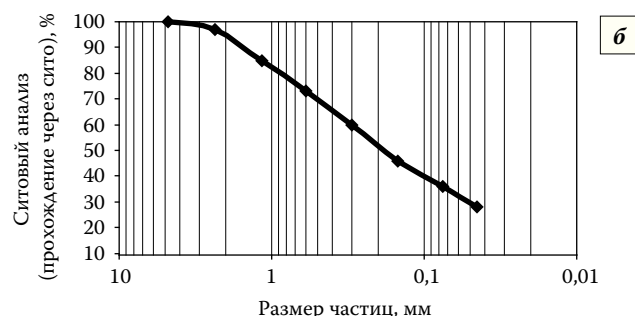
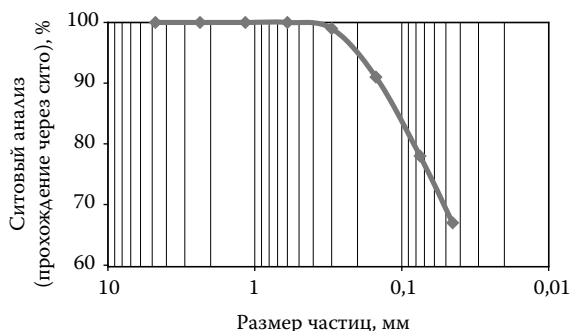
Компонент	<i>w</i> , %
Fe ₂ O ₃	90,18
SiO ₂	4,63
Al ₂ O ₃	3,11
MnO	0,807
CaO	0,346
MgO	0,337
Na ₂ O	0,163
P ₂ O ₅	0,129
TiO ₂	0,091
S	0,050
BaO	0,026
CuO	0,022
ZnO	0,021
NiO	0,017
Cl	0,016
Co ₃ O ₄	0,015

Лабораторный экструдер состоит из двух камер с герметичной насадкой между ними. В задней камере расположен трехдюймовый уплотняющий шнек, проталкивающий смесь через герметичную головку. Во второй камере располагается такой же трехдюймовый уплотняющий шнек для экструзии смеси через фильеру. В этой камере может создаваться вакуум. Перемешивание и увлажнение смеси перед экструзией про-

Таблица 2. Результаты бесстандартного рентгенофлуоресцентного анализа образца брэкса № 4

Компонент	Содержание, мас. %	
	ядро	оболочка
Fe ₂ O ₃	53,90	54,88
SiO ₂	5,34	5,06
CaO	5,22	4,92
Al ₂ O ₃	2,40	2,33
MgO	1,51	1,01
SO ₃	0,598	0,585
Na ₂ O	0,468	0,487
Cr ₂ O ₃	0,122	0,269
P ₂ O ₅	0,106	0,115
MnO	0,083	0,082
TiO ₂	0,077	0,077
K ₂ O	0,069	0,060
Cl	0,046	0,059
V ₂ O ₅	0,025	0,026
ZnO	0,023	0,019
Прочие	<0,01	<0,01
Неопределяемый остаток*, мас. %		
С	30	30

* Фиксированное расчетное содержание неопределяемого остатка при содержании угля 32% и зольности 7,1%.



Размер отверстия сита, мм: № 4 – 4,75; № 8 – 2,36; № 16 – 1,16; № 30 – 0,6; № 50 – 0,3; № 100 – 0,15; № 200 – 0,075; № 325 – 0,045

Рис. 1. Ситовый анализ: а – шубаркольский уголь (99% частиц с размером менее 0,3 мм); б – уголь Globe (73% частиц с размером менее 0,6 мм)

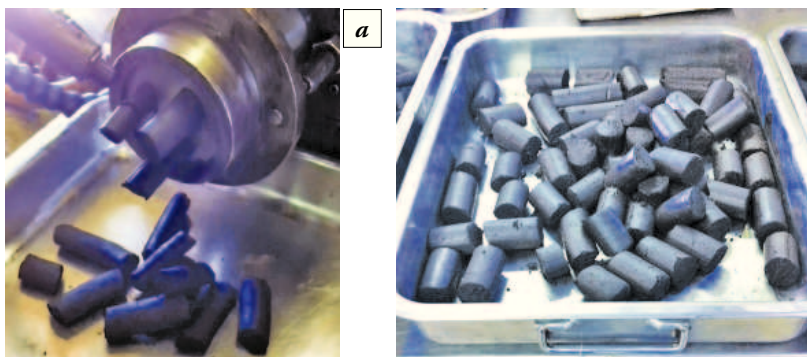


Рис. 2. Образцы брэсков: а – изготовление брэсков; б – внешний вид рудоугольных брэсков

изготавливали в смесителе компании Hobart. Все испытанные составы проявили высокую экструзионную способность. Внешний вид брэсков сразу после изготовления приведен на рис. 2.

Фазовый состав брэсков исследовали на примере образца № 4. Использовали аналитический комплекс ARL 9900 Workstation IP3600. Качественный фазовый анализ выполняли, используя базу данных

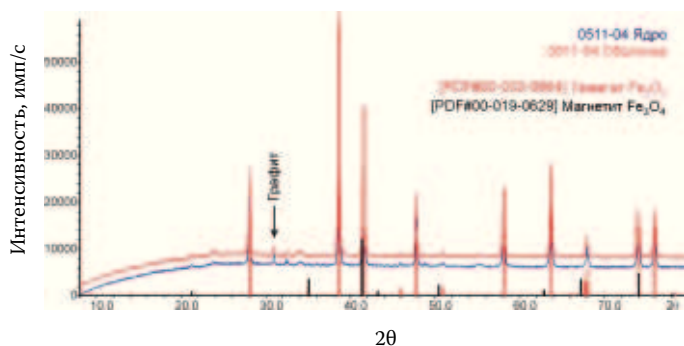


Рис. 3. Качественный рентгенофазовый анализ образца № 4

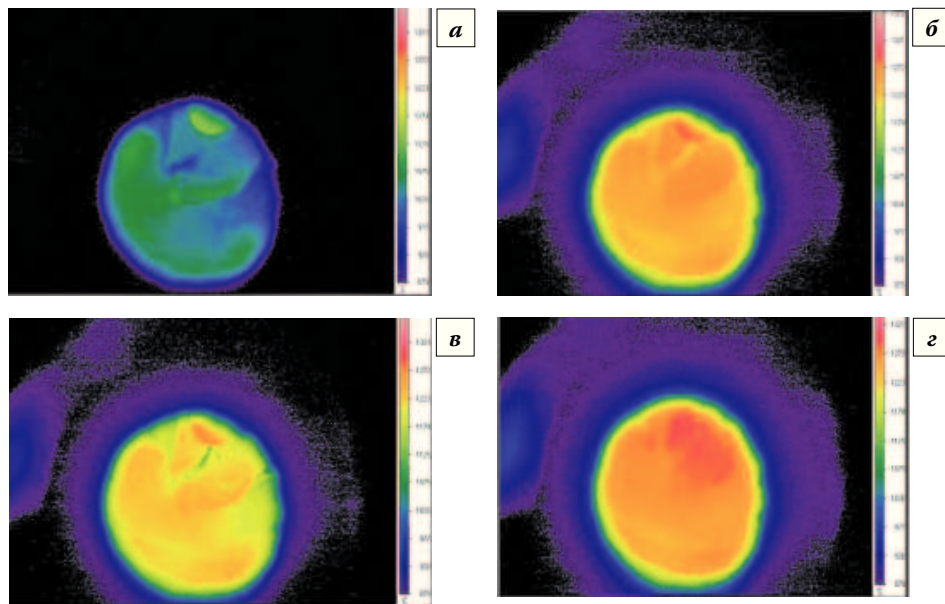


Рис. 4. Брэкс № 2: а – окончание выхода летучих, $t = 1$ мин; б – твердофазное восстановление, $t = 3,5$ мин; в – начало плавления, $t = 6$ мин; г – перед полным расплавлением, $t = 7$ мин

ICDD PDF-2 и программный пакет Crystallographica Search-Match. Бесстандартный количественный рентгенофазовый анализ проводили в программном комплексе Phase Quant X (ядро RIETAN-2000); для создания шаблонов применяли структурные модели из базы данных FIZ NIST ICSD. Исследовали пробы из поверхностного слоя (оболочка) и из осевой части (ядро) брэкса. Результаты (рис. 3 и табл. 2) показали достаточно высокую степень

однородности фазового состава брэсков. В образце № 4 основной фазой является гематит (Fe_2O_3) с малыми примесями замещенного магнетита (Fe_3O_4).

Эксперименты по восстановлению рудоугольных брэсков проводили в лабораторной электропечи сопротивления СШВЭ-1.2,5/25-И2 с контролируемой атмосферой и вертикальным расположением графитового нагревателя внутренним диам. 65 мм. В изотермической зоне нагревателя располагали рабочий сменный алундовый тигель (98% Al_2O_3).

Температуру в печи регулировали и стабилизировали с помощью регулировочной термопары ВР(А) 5/20, расположенной в изотермической зоне печи с внешней стороны нагревателя. Истинную температуру процесса измеряли второй измерительной термопарой ВР(А) 5/20, расположенной внутри нагревателя и опущенной сверху в рабочий алундовый тигель. Рабочую температуру 1360 °С поддерживали с точностью ± 10 °С.

Образцы брэсков подвергались сушке в течение 2 ч при температуре 110 °С для удаления гигроскопической влаги. Перед началом экспериментов в печи с установленным в ней рабочим сменным алундовым тиглем форвакуумным насосом создавали разрежение 10^{-1} Па и заполняли печь аргоном марки ВЧ. Затем открывали сброс газа в атмосферу и устанавливали расход аргона через печь 0,5 л/мин.

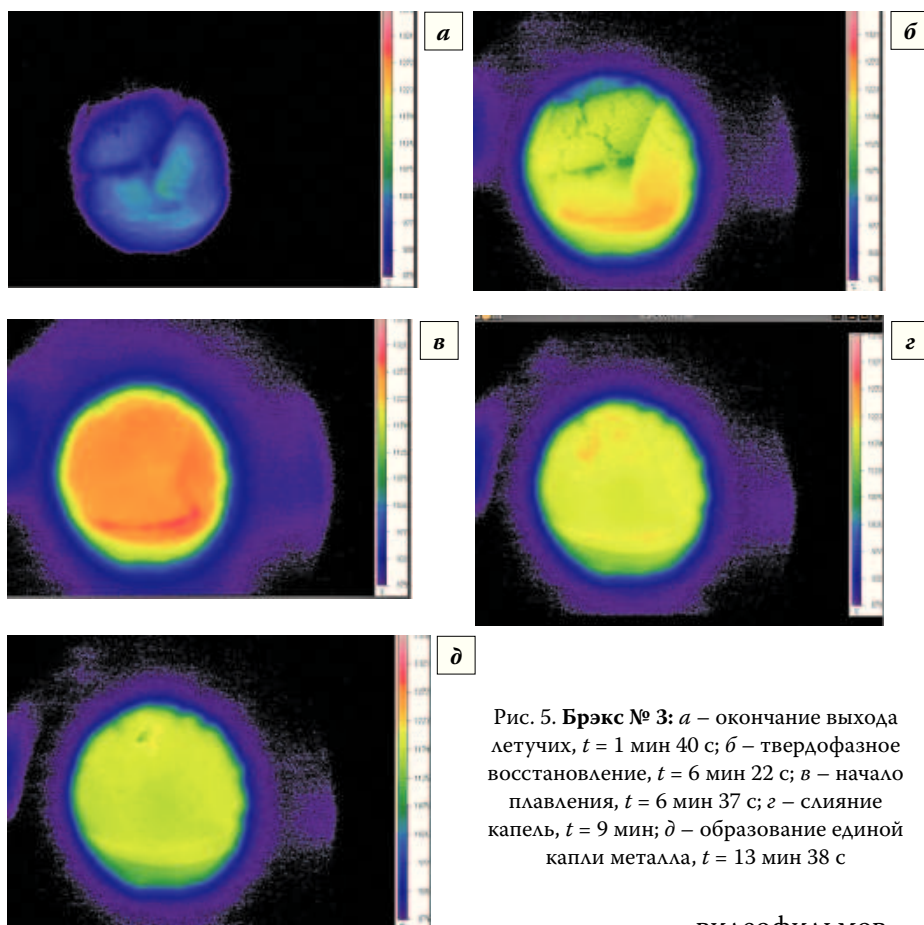


Рис. 5. Брэкс № 3: а – окончание выхода летучих, $t = 1$ мин 40 с; б – твердофазное восстановление, $t = 6$ мин 22 с; в – начало плавления, $t = 6$ мин 37 с; г – слияние капель, $t = 9$ мин; д – образование единой капли металла, $t = 13$ мин 38 с

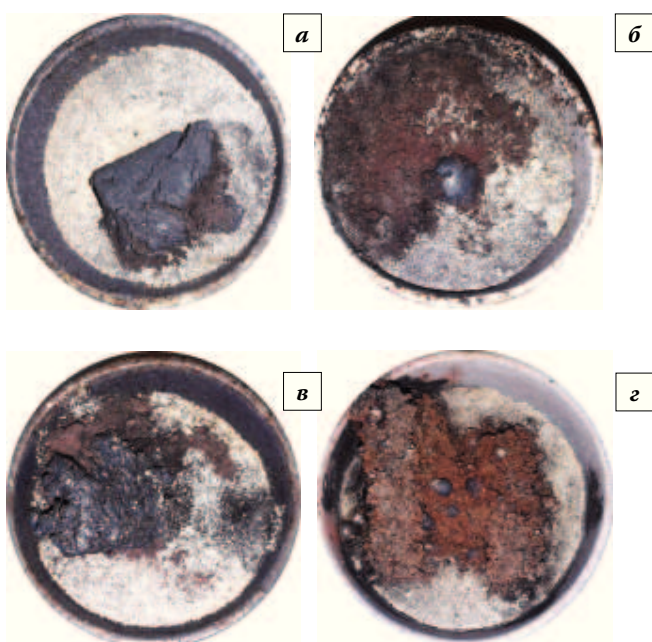


Рис. 6. Внешний вид продуктов восстановления образцов рудоугольных брэкс и шлака в тигле: а – № 2; б – № 3; в – № 4; г – № 1

Выключали нагрев печи, достигали заданной температуры и стабилизировали ее, затем через шлюз-дозатор в тигель сбрасывали испытуемый рудоугольный брэкс. Момент сброса считали началом эксперимента.

В ходе процесса записывали тепловизионный фильм с помощью тепловизора Pyrovision M9000 (Micron, США), показывающего температуру в каждой точке каждого кадра.

Исследуемый образец выдерживали в печи 15 мин, после чего печь разгерметизировали, тигель с образцом извлекали и закачивали на воздухе, в печь устанавливали новый рабочий тигель, а в дозатор – следующий брэкс. Печь закрывали, продували аргоном и после установления требуемой температуры экспериментальный цикл повторяли.

На рис. 4 и 5 показаны фотографии отдельных этапов восстановления и проплавления брэкс № 2 и № 3, сделанные на основе снятых

видеофильмов.

Во всех случаях высокая плотность брэкса и наличие большого количества летучих угля не помешали твердофазному характеру восстановления железа. В ходе интенсивного нагрева брэксы растрескивались, но оставались компактными. В конечном итоге из брэкс формировались жидкая металлическая капля (аналог наггетса) и капля шлака. В случае избытка восстановителя в брэксе образовывались металлизированные оболочки (аналоги шеллов), смешанные с каплями шлака. На рис. 6 приведены фотографии продуктов восстановления брэкс и шлака.

Химический состав металла (образец № 3) и шеллов приведен в табл. 3. Из-за повышенного содержания угля в брэксах концентрация углерода в металле составила 3,3–4,8%.

Образцы металла (аналогов наггетса и шеллов) были изучены также с использованием сканирующего электронного микроскопа Jeol JSM 6490 LV, который позволяет работать с увеличением до $\times 300\,000$ и ускоряющим напряжением 0,3–30 кВ. На рис. 7 приведены изображения образцов в отраженных электронах.

Все образцы, за исключением № 1, обладают сходной микроструктурой: островные неметаллические включения в металлической матрице. Наименьшим размером включений из трех об-

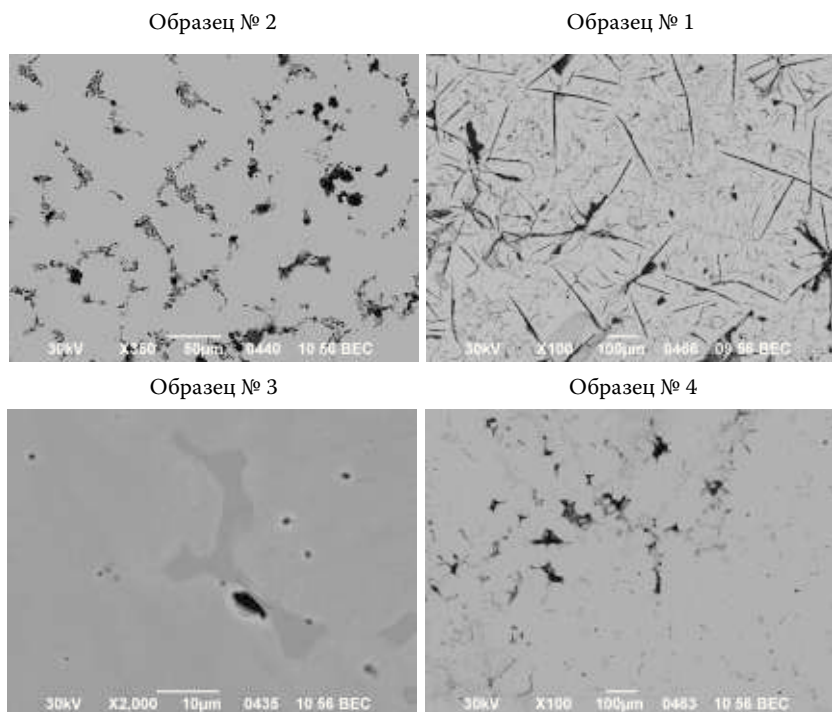


Рис. 7. Изображения образцов в отраженных электронах

Таблица 3. Химический состав металла (аналогов наггетсов и шеллов)

Содержание элемента, %	Образец № 2	Образец № 3	Образец № 4	Образец № 1
[Fe]*	96,05	94,08	94,99	95,53
[C]	3,333	4,800	3,610	3,740
[Si]	0,154	0,605	0,383	0,252
[Mn]	0,121	0,136	0,114	0,076
[S]	0,118	0,185	0,340	0,107
[P]	0,058	0,085	0,150	0,135
[Cu]	0,0074	0,0090	0,2510	0,0030
[Co]	0,1030	0,0343	0,0980	0,0905
[Ti]	0,0656	0,0570	0,0604	0,0580
[Zn]	0,0005	0,0050	0,0030	0,0060

* Определено по разности.

разцов характеризуется № 3 (10–20 мкм); в образце № 4 включения размером 80–90 мкм; в образце № 2 размеры включений составляют 50–60 мкм. Образец № 1 характеризуется неоднородностями линейной формы, шириной около 5–10 мкм, протяженностью 200–300 мкм, иногда звездчатой формы. В образце № 3 оксидные компоненты во включениях отсутствуют.

Заключение. Рудоугольные брэксы могут рассматриваться в качестве возможной альтернативы рудоугольным окатышам для использования в процессе ITmk3°.

Для окончательного заключения о пригодности брэксов для процесса необходимо проведение исследований по оптимизации их размеров и состава шлакообразующих оксидов в брэксе.

Библиографический список

1. Далмиа Й.К., Курунов И.Ф., Стил Р.Б., Бижанов А.М. Производство и проплавка в доменной печи брикетов нового поколения // *Металлург.* 2012. № 3. С. 39–41.
2. Курунов И.Ф., Бижанов А.М. Жесткая вакуумная экструзия Steele – перспективный способ окускования металлургического сырья и отходов // *Черная металлургия: Бюл. НТИЭИ.* 2012. № 4. С. 46–49.
3. Бижанов А.М., Стил Р.Б., Подгородецкий Г.С. и др. Брикетты экструзии (брэксы) для производства ферросплавов // *Металлург.* 2013. № 2. С. 44–49.
4. Kikuchi S., Ito S., Kobayashi I. et al. KOBELCO Technology Review. 2010. No 29 Dec. P. 77–84.
5. Курунов И.Ф., Савчук Н.А. Состояние и перспективы бездоменной металлургии железа. М.: Черметинформация, 2002. 198 с.

STUDY OF HIGH TEMPERATURE REDUCTION OF IRON ORE AND COAL EXTRUDED BRIQUETTES (BREXES)

© **Bizhanov A.M.; Kurunov I.F.,** Dr Sc. (Eng.), prof.; **Pavlov A.V.,** Dr Sc. (Eng.), prof.; **Chadaeva O.V.; Chizhov P.S.,** Cand. Sc. (Chem.)

Stiff vacuum extrusion developed by J.C.Steele&Sons, Inc. has been applied for the agglomeration of the iron ore concentrate and fine coal. The products of agglomeration – extrusion briquettes (BREX) were subjected to the high temperature reduction. The present article is considering the results of the simulation of the brex behavior under the conditions similar to the ITmk3° process in general. It has been demonstrated that the iron ore and coal brex could be considered as the alternative to the iron and coal pellets for the high temperature reduction in furnaces like Rotary Hearth Furnace.

Keywords: extrusion briquette (brex); stiff vacuum extrusion; ITmk3° Process; Rotary Hearth Furnace; nuggets; shell.