

УДК 669.162:669.181.24

ПОВЕДЕНИЕ БРИКЕТОВ ЭКСТРУЗИИ (БРЭКСОВ) В РЕАКТОРАХ МИДРЕКС. Часть I

© **Бижанов Айтбер Махачевич**¹, e-mail: abizhanov@jcsteele.com;**Курунов Иван Филиппович**², д-р техн. наук, e-mail: kurunov_if@nlmk.com;**Уакиль Эмед Халид**³, e-mail: wakeel@qatarsteel.com.qa¹ J.C.Steele&Sons. USA, Statesville, NC² ОАО «Новолипецкий металлургический комбинат». Россия, г. Липецк³ Qatar Steel Company. Qatar, State Mesaieed

Статья поступила 20.03.2015 г.

Приведены результаты ящичных испытаний металлизации в промышленном реакторе Мидрекс брикетов экструзии (брэкс), изготовленных методом жесткой вакуумной экструзии из дисперсных железосодержащих отходов с использованием различных связующих материалов. На основе данных оптической и электронной микроскопии изучена структура исходных и металлизированных брэкс. Степень металлизации составила 90,92–96,65% для брэкс, изготовленных с использованием связующего различного типа и количества.

Ключевые слова: жесткая вакуумная экструзия; брикет экструзии (брэкс); прочность; пористость; связующее; реактор Мидрекс; металлизация.

Технология жесткой вакуумной экструзии мелкодисперсных техногенных и природных материалов металлургии за последние несколько лет приобрела репутацию проверенной технологии изготовления брикетов экструзии (брэкс) для металлургических печей (доменных, руднотермических, ДСП и др.) [1–5]. В статье рассмотрены результаты экспериментов по оценке возможности металлизации брэкс в реакторах прямого получения железа. Эксперименты проведены в промышленном реакторе Мидрекс компании Qatar Steel (Катар, Доха). Компания Qatar Steel импортирует ежегодно 3,5 млн т железорудных окатышей для производ-

ства 2,35 млн т ГБЖ. Во время разгрузки, складирования и последующей загрузки окатышей в реакторы металлизации, выгрузки металлизированных окатышей и их брикетирования ежегодно образуются десятки тысяч тонн мелкодисперсных железосодержащих отходов. Для испытаний были использованы брэкс, произведенные из смеси отсева окатышей – 55,6% (92% крупностью не более 6,3 мм), металлизированного шлама – 27,8% (92% крупностью не более 6,3 мм) и прокатной окалины – 16,6% (99% крупностью не более 10 мм). Основными целями исследования являлись оценка металлургических свойств брэкс применительно к процессу Мидрекс и выбор связующего, обеспечивающего их прочность и максимальную степень металлизации. Смесь перед брикетированием дополнительно измельчили (рис. 1) на валковой дробилке. Химический состав компонентов смеси представлен в табл. 1.

Опытные брикеты четырех типов (табл. 2), незначительное отличие химического состава которых определялось только видом и содержанием

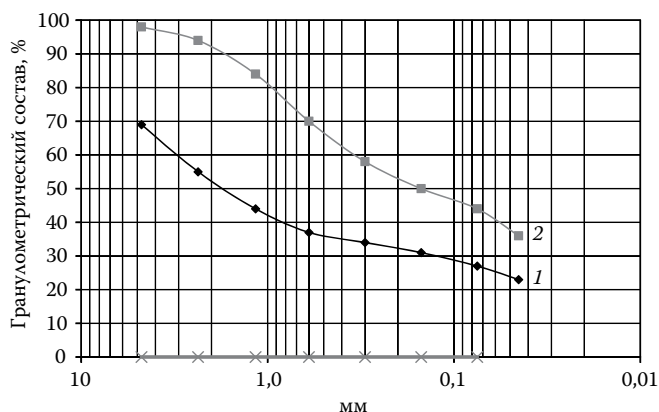


Рис. 1. Гранулометрический состав смеси материалов Qatar Steel для брикетирования: 1 – исходная смесь; 2 – после доизмельчения (максимумы на кривых соответствуют содержанию в смеси частиц крупностью менее 5 мм)

Таблица 1. Химический состав компонентов смеси для приготовления брэкс в компании Qatar Steel

Элементы и оксиды	Содержание в компоненте, мас. %		
	отсев окатышей	шлам	окалина
Fe	65,0	66,6	70,0
SiO ₂ + CaO	3,8	6,52	1,00
CaO	1,3	4,38	0,15
MgO	0,75	0,69	0,10
Al ₂ O ₃	0,95	0,83	0,25
MnO	0,1	0,16	1,20
P	0,055	0,045	0,02
TiO ₂	–	0,010	0,020
V ₂ O ₅	–	0,12	0,025
C	–	–	0,30
S	0,015	0,01	0,015
Na ₂ O + K ₂ O	–	0,33	–

Таблица 2. Компонентный состав брэксов

Компоненты шихты	Тип брикета			
	01-01	01-02	01-03	01-04
Смесь отсева окатышей, шламов и окалины	95,0	95,0	91,5	92,0
Гашеная известь	5,0	–	–	6,0
Портландцемент	–	5,0	8,0	–
Бентонит	–	–	0,5	–
Меласса	–	–	–	2,0

Таблица 3. Физико-механические свойства брэксов после вылеживания

Свойства	Тип брикета			
	01-01	01-02	01-03	01-04
Плотность ¹ , г/см ³	3,314	3,458	3,300	3,464
Плотность ² , г/см ³	3,085	3,005	2,844	3,038
Прочность ¹ на сжатие, Н/мм ²	2,2	1,6	1,6	18,4
Влажность ¹ , %	11,5	10,5	9,8	8,9
Влажность ² , %	1,11	1,07	1,06	2,53

¹ Сырые брикеты.
² Упрочненные брикеты.

ем связующего, были изготовлены в компании J.C.Steele&Sons, Inc. на лабораторном экструдере. Для приготовления смеси и ее гомогенизации использован лабораторный смеситель Hobart, моделирующий обработку шихты в глиномялке с вакуумным затвором.

Физико-механические свойства сырых и упрочненных брэксов (после вылеживания в течение 14 сут.) существенно отличались (табл. 3).

Одним из наиболее важных свойств брикетов, определяющих их восстановимость, является пористость. Изучение образцов с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) LEO 1450 VP (Carl Zeiss, Германия) с гарантийным разрешением 3,5 нм

в сочетании с количественным анализом РЭМ-изображений, полученных в режиме отраженных электронов с помощью программного обеспечения STIMAN [6], позволило наряду с количественной оценкой (в диапазоне величин радиусов пор от 0,002 до десятков мкм) определить микроструктуру образцов и специфику их пористости. Пористость образцов брикетов 01-01 и 01-03 изучали на свежем сколе поверхности образцов. Морфологические исследования микроструктуры проводили с использованием режима вторичных электронов, позволяющем получать высококачественные полутоновые изображения в широком диапазоне увеличений. Методика STIMAN позволяет получать корректные изображения с четкими границами между порами и частицами. Измеренные таким образом морфологические параметры брэксов 01-01 и 01-03 и характеристики пор приведены в табл. 4. Из этих данных видно существенное различие пористости образцов только по коэффициенту анизотропии, обусловленное, вероятно, типом связующего материала.

Распределение макропор (размерами от 100 мкм) можно определять методами рентгеновской компьютерной томографии. Изображения на рис. 2 иллюстрируют различие в распре-

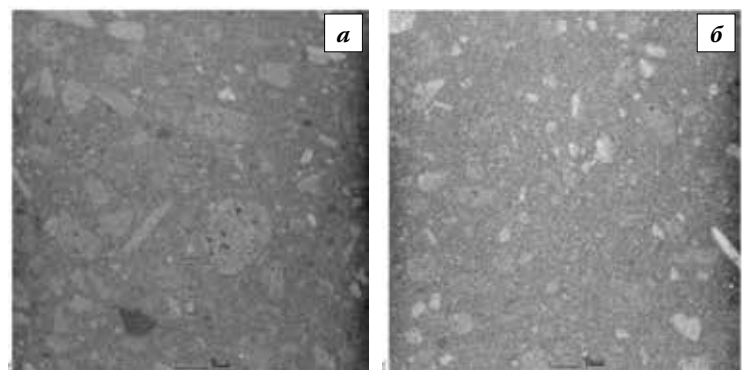


Рис. 2. Распределение пор размером больше 100 мкм в образцах брикетов 01-01 (а) и 01-03 (б) (микрорентгеновская томография)

Таблица 4. Морфологические параметры микроструктуры пористости образцов брэксов

Тип брикета	Параметры	Категории пор					$n_{из}$, %	K_a , %	
		D_1 (<0,1 мкм)	D_2 (0,1–1,0 мкм)	D_3 (1,0–10 мкм)	D_4 (10–100 мкм)	D_5 (>100 мкм)			
01-01	N , %	0,7	13,5	56,2	29,6	–	32,36	21,25	8,50
	K_f	0,42–0,50; 0,58–0,67							
01-03	N , %	1,9	18,2	46,9	33,1	–	32,2	20,88	17,69
	K_f	0,33–0,42; 0,50–0,58							

Примечания: 1. N – доля пор разных размерных категорий в общей пористости $n_{из}$, рассчитанная по РЭМ-изображению; $D_1–D_5$ – различные размерные категории пор; D_{max} – максимальный эквивалентный диаметр пор; K_a – коэффициент анизотропии, или степень ориентации твердых структурных элементов; K_f – коэффициент формы пор.
2. Коэффициент K_f рассчитывается как соотношение малой и большой полуосей эллипса, вписанного в пору. Для изометричных пор $K_f = 0,66–1,00$, для анизометричных $K_f = 0,1–0,66$, для щелевидных пор $K_f < 0,1$.

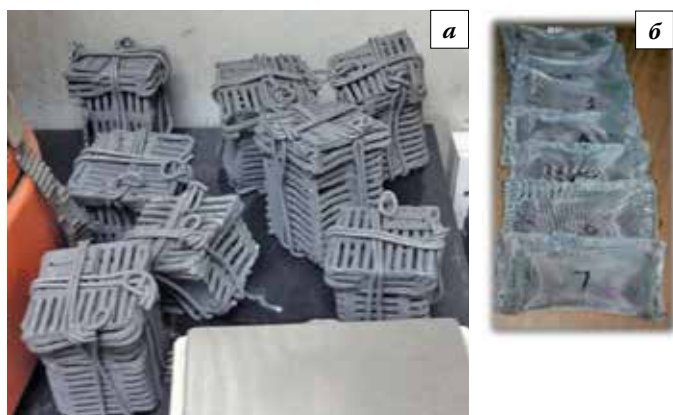


Рис. 3. Стальные корзины (а) и пакеты (б) для ввода брэксов вместе с окатышами в реактор Мидрекс

делении макропор в сырых брэксах типов 01-01 и 01-03. Съемка проводилась с помощью рентгеновского компьютерного микротомографа Yamato TDM-1000 (Япония) при 32-кратном увеличении и разрешении 11 мкм. Можно констатировать, что доля пор размером от 100 мкм в брэксе 01-01 выше, чем в брэксе 01-03.

Величины открытой пористости, полученные по методике STIMAN, хорошо согласуются с величинами пористости, измеренными в соответствии со стандартом DIN 51056 жидкостенасыщением (ГОСТ 26450.1-85) в вакууме. Для образцов рассматриваемых брэксов значения пористости находятся в диапазоне 21–24%.

Проведено две серии ящичных испытаний по восстановлению брэксов в промышленном реакторе Мидрекс. В первой серии упрочненные брэксы (по 25–30 шт.) помещали внутрь жестких стальных

корзин (рис. 3, а), которые загружали в реактор вместе с окатышами, а по окончании процесса извлекали из реактора. Это позволило визуально оценить состояние восстановленных брикетов, изучить их состав и свойства. В этом случае механическая прочность брэксов не играла существенной роли, поскольку они не подвергались давлению столба шихты. Жесткость корзины полностью устранила давление слоя окатышей на брэксы и, как следствие, возможную деформацию или разрушение брэксов. Во второй серии испытаний брэксы помещали в деформируемые газопроницаемые стальные пакеты (рис. 3, б), что позволило изучить их поведение в условиях, приближенных к условиям внутри слоя окатышей в реакторе Мидрекс. Ниже рассмотрены результаты первой серии испытаний.

После извлечения из реактора (рис. 4) хорошо видны трещины на брэксах 01-02 и 01-03, полученных с использованием цементной связки, причем трещин больше на брэксах 01-03 с более высоким содержанием связующего (см. табл. 2). Можно сделать вывод о связи горячей прочности брэксов с их прочностью на раздавливание. Менее прочные и менее плотные в холодном состоянии брэксы 01-02 и 01-03 (см. табл. 3) имели и меньшую горячую прочность, что выразилось в образовании в них поверхностных трещин. Это соответствует результатам исследования горячей прочности железорудных окатышей в сопоставлении с их прочностью на раздавливание [7]. Для окатышей также наблюдалась и негативная зависимость горячей прочности от соотношения Al_2O_3/SiO_2 , увеличение которого снижает горячую прочность окатышей. Брэксы 01-02 и 01-03, показавшие меньшую горячую прочность по сравнению с брэксами на известковом связующем, имели самый высокий модуль из-за значительного содержания глинозема в цементе и особенно в бентоните (брэксы 01-03). В то же время наличие в брэксах 01-01 и 01-04 извести и гематита (отсев окатышей и окалина)



Рис. 4. Внешний вид восстановленных брикетов после извлечения из жестких корзин



Рис. 5. Слипание брэксов 01-02 в процессе твердофазного восстановления

благоприятствовало во время их нагрева в реакторе Мидрекс быстрому образованию уже при температурах выше 400–500 °С ферритов кальция, имеющих низкую температуру плавления и размягчения, упрочняющих структуру брэкса и повышающих его восстанавливаемость [8].

Часть брэксов на цементной основе слиплась в процессе их восстановления (рис. 5). Такое слипание могло иметь тот же механизм, который обуславливает слипание безобжиговых окатышей на цементной связке [9].

После извлечения брэксов из жестких стальных корзин определены их химический состав, общее содержание железа, содержание металлического железа и степень металлизации (табл. 5). Максимальную степень металлизации имели брэксы типа 01-01 с содержанием известкового связующего 5%, а минимальную – брэксы 01-03, с максимальным (8%) содержанием цементной связки.

Для оценки изменения пористости брэксов в процессе их восстановления использовали систему промышленной рентгеновской микротомографии Phoenix V|tome|XS 240, оснащенную двумя рентгеновскими трубками: микрофокусной с максимальным ускоряющим напряжением 240 кВ / мощностью 320 Вт и нанофокусной с максимальным ускоряющим напряжением 180 кВ / мощностью 15 Вт. Первичную обработку данных и создание объемной модели образца на базе рентгеновских снимков (проекций) выполнили с помощью программного обеспечения

Таблица 5. Химический состав сырых и восстановленных брикетов

Тип брикета	Сырой брикет		Восстановленный брикет			
	Fe _t	C	Fe _p %	Fe _{мет} %	Металлизация, %	C, %
01-01	64,53	2,32	80,07	77,39	96,65	0,984
01-02	64,06	1,88	79,22	74,63	94,21	0,836
01-03	62,53	1,72	75,2	68,37	90,92	0,874
01-04	60,46	2,6	76,4	70,17	91,85	1,7

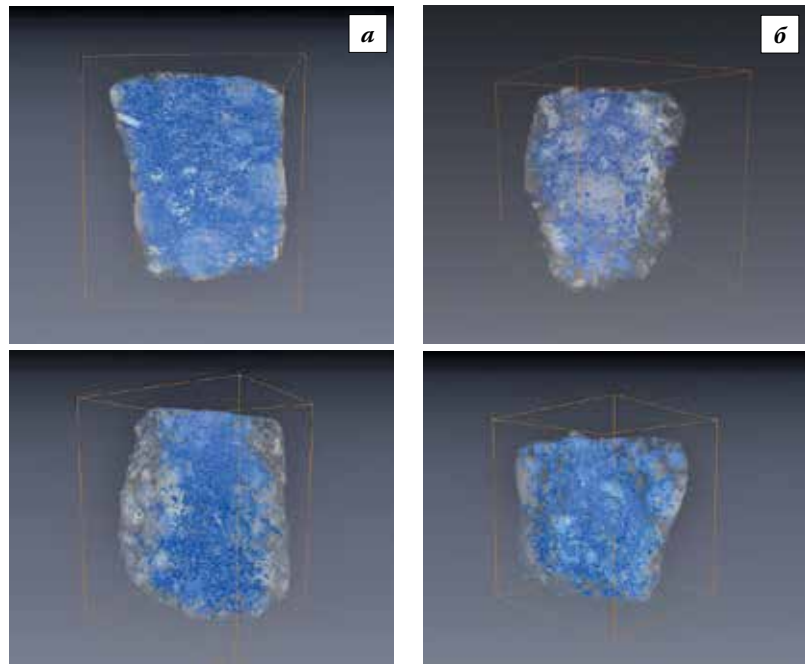


Рис. 6. 3D-модели порового пространства брэксов 01-01 (а) и 01-03 (б)

«datos|x reconstruction», а визуализацию и анализ данных по элементам объемного изображения – с помощью программного обеспечения VGStudioMAX 2.1 и AvizoFire 7.1. Съемку проводили при ускоряющем напряжении 100 кВ и токе 200 мА; разрешение при съемке – 5,5 мкм. Результаты измерения объема и количества пор в брэксах до и после восстановления приведены в табл. 6. Визуализация распределения пор в виде 3D-модели представлена на рис. 6.

Видно, что пористость рассматриваемых брэксов (в диапазоне крупных и сверхкрупных пор размерами 1–100 мкм и больше) в процессе восстановления изменилась разнонаправленно. В брэксе 01-01 суммарный объем порового пространства уменьшился в 1,6 раза, в брэксе 01-03 вырос на 20%. Возросшую пористость восстановленного брэкса на цементном связующем можно объяснить разрушением цементного камня при 850 °С со снижением прочности брэкса, целостность которого сохраняется в результате

Таблица 6. Объем и количество пор в образцах брэксов

Характеристика	Тип брикета (сырой / восстановленный)	
	01-01	01-03
Суммарный объем порового пространства, мм ³	0,71666214 / 0,45010023	0,69426956 / 0,86682289
Количество пор в исследованном объеме образца	186 063 / 93 321	198 420 / 241 634

образования металлической матрицы из восстановленного железа. Восстановление брэксов на известковом связующем, напротив, сопровождалось снижением их пористости, что может объясняться слипанием мелких пор при образовании металлической матрицы из восстановленного железа.

Заключение. Ящичные испытания брэксов, изготовленных из смеси отсева окатышей, прокатной окалины и дисперсных отходов производства ГБЖ, в промышленном реакторе Мидрекс показали возможность эффективной их металлизации с сохранением целостности. Максимальную степень металлизации и максимальную прочность показали брэксы на известковой связке. При сохранении целостности брэксов с цементной связкой на их поверхности появились трещины, причем трещинообразование была выше на брэксах с более высоким содержанием связующего.

Авторы выражают благодарность канд. техн. наук, проф. Т.В.Мальшевой (МИСиС, кафедра экстракции и рециклинга) и канд. техн. наук Т.В.Никитченко (начальник отдела перспективного развития ТУ ОАО «ЛГОК») за обсуждение материалов статьи и ценные замечания.

Библиографический список

1. 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.
2. Курунов И.Ф., Бижанов А.М., Тихонов Д.Н., Мансурова Н.Р. Металлургические свойства брикетов // Металлург. 2012. № 6. С. 44–48.
3. Курунов И.Ф., Бижанов А.М. Брэксы – новый этап в окусковании сырья для доменных печей // Металлург. 2014. № 3. С. 49–53.
4. Далмиа Й.К., Курунов И.Ф., Стил Р., Бижанов А.М. Производство и применение в доменной плавке брикетов нового поколения // Металлург. 2112. № 3. С. 39–41.
5. Бижанов А.М., Подгородецкий Г.С., Курунов И.Ф. и др. Брикеты экструзии (брэксы) для производства ферросплавов // Металлург, 2013. № 2. С. 44–49.
6. Соколов В.Н., Юрковец Д.И., Разгулина О.В., Мельник В.Н. Изучение характеристик микроструктуры твердых тел с помощью компьютерного анализа РЭМ-изображений // Изв. РАН. Сер. физическая. 2004. Т. 68, № 9. С. 1332–1337.
7. Dwarapud S. and Ranjan M. Influence of Oxide Silicate Melt Phases on the RDI of Iron Ore Pellets Suitable for Shaft Furnace of Direct Reduction Process // ISIJ Int. 2010. Vol. 50, No. 11. P. 1581–1589.
8. Вегман Е.Ф., Жеребин Б.Н., Похвиснев А.Н. и др. Металлургия чугуна / Учеб. для вузов. М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. 774 с.

BEHAVIOR OF THE EXTRUSION BRIQUETTES (BREX) IN MIDREX REACTORS. Part 1

©Bizhanov A.M., Kurunov I.F., Wakeel A.K.

The results of the basket metallization tests of the extrusion briquettes produced by the Stiff Vacuum Extrusion from the fine iron containing wastes with the different binders in the industrial Midrex reactor are considered. The structure of the green and reduced BREX has been investigated by the optical and electronic microscopy. Metallization degree has achieved the levels of 90.92–96.65% for BREX bonded with different amounts and types of the binders.

Keywords: Stiff Vacuum Extrusion; extrusion briquette (BREX); strength; porosity; binder; Midrex reactor; metallization.