

УДК 669.162:669.181.24

ПОВЕДЕНИЕ БРИКЕТОВ ЭКСТРУЗИИ В РЕАКТОРАХ МИДРЕКС. Часть 2*

© **Курунов Иван Филиппович**¹, д-р техн. наук, e-mail: kurunov_if@nlmk.com;**Бижанов Айтбер Махачевич**², e-mail: abizhanov@jcsteele.com;**Уакиль Эмед Халид**³, e-mail: wakeel@qatarsteel.com.qa;**Мишра Бхагиратха**⁴, e-mail: bmishra@dalmiainstitute.in¹ ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат». Россия, г. Липецк² J.C.Steele&Sons, Inc. USA, Statesville, NC³ Qatar Steel Company. Qatar, State Mesaieed⁴ DISIR, Rajgangpur. India

Статья поступила 14.01.2016 г.

Приведены результаты испытаний в промышленном реакторе металлизации (процесс Мидрекс) брикетов экструзии (брэкс), изготовленных из отсевов окисленных окатышей, частично металлизированного шлама, окалины и пыли ДСП с применением двух различных связующих. Изучено влияние типа связующего материала на прочность и степень металлизации брикетов. С использованием оптической и электронной микроскопии изучена структура сырых и восстановленных брикетов.

Ключевые слова: окатыши; металлизация; дисперсные отходы; брикетирование; жесткая вакуумная экструзия; брэксы; магнезиальное связующее; известь; испытания; реактор Мидрекс; прочность; пористость.

На первом этапе исследования был проведен эксперимент по изучению поведения брикетов экструзии (брэкс), полученных из дисперсных металлургических отходов с использованием различных связующих, в промышленном реакторе Мидрекс [1]. В этом эксперименте брэксы поместили в жесткие стальные корзины, загрузили в реактор вместе с окатышами, а по окончании процесса корзины извлекли из реактора. Это позволило визуально определить физическое состояние восстановленных брэксов после пребывания в реакторе, изучить их состав и свойства. Очевидно, что в этом случае механическая прочность брэксов не играла существенной роли, поскольку они не подвергались давлению столба шихты и возможность деформации и механического разрушения брэксов была полностью исключена. На втором этапе испытаний брэксы помещали в легко деформируемые стальные газопроницаемые пакеты, что позволило смоделировать их поведение в реальных условиях промышленного реактора Мидрекс с учетом механического воздействия на брэксы движущейся шихты. Внешний вид стальных корзин и пакетов приведен на рис. 1.

Учитывая результаты первого этапа испытаний, проведенных на брэксах четырех типов, изготовленных из смеси

отсевов окисленных окатышей, частично металлизированного шлама и окалины с применением четырех типов связующего [1], на втором этапе работы испытали два вида брэксов, изготовленных из смеси тех же материалов с добавлением пыли ДСП. В качестве связующего использовали известь, показавшую лучшие результаты на первом этапе, и новое магнезиальное связующее.

Для изготовления брэксов были подготовлены две смеси из отсева окатышей (50,0%), частично металлизированного шлама (25,0%), окалины прокатного производства (15,0%), пыли электродуговых сталеплавильных печей (5%) и связующего (5%). В качестве связующего в первой смеси использовали известь (образцы типа 02-01), а во второй – связующее на основе гептагидрата сульфата магния (образцы типа 02-02). Фракционный состав использованных материалов составлял: отсев окатышей – 8% крупнее 6,30 мм, 60% в интервале 0,15–6,30 мм и 32% мельче 0,15 мм; окалина – 1% крупнее 10,0 мм, 98% в интервале 0,15–10,0 мм и 1% менее 0,15 мм; пыль ДСП – 100% крупностью 0–1 мм. Химический состав компонентов шихты для производства брэксов приведен в табл. 1.

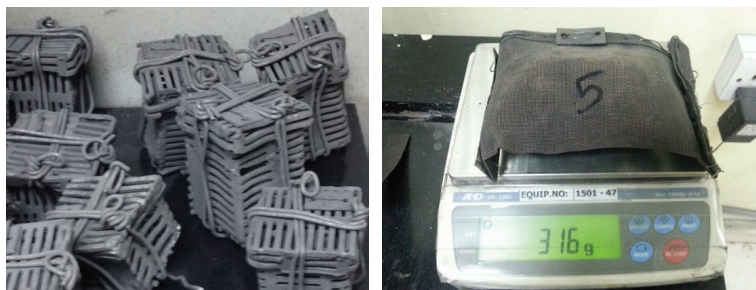


Рис. 1. Стальные корзины (а) и стальные газопроницаемые пакеты (на весах) (б) для подачи брикетов в реактор прямого получения железа

* Часть 1 – см. Металлург. 2015. № 4. С. 16–20.

Таблица 1. Химический состав компонентов брэксов

Химические соединения	Отсев окатышей	Прокатная окалина	Шлам	Пыль ДСП
Fe _{общ}	65,00	70,0	66,2	29,68
SiO ₂	2,50	1,00	2,14	4,25
CaO	1,30	0,15	4,38	19,74
MgO	0,75	0,10	0,69	24,27
Al ₂ O ₃	0,95	0,25	0,83	1,32
MnO	0,10	1,20	0,16	0,96
S	0,015	0,015	0,01	0,13
Na ₂ O+K ₂	0,034	–	0,33	1,42

Компоненты брэксов по составу (табл. 2) и физико-механическим свойствам после упрочняющей выдержки (табл. 3) отличались незначительно. Пористость брэксов измеряли в соответствии со стандартом DIN 51056 вакуумным способом жидкостенасыщения.

Образцы брикетов после упрочняющей выдержки помещали в легкосминаемые газопроницаемые стальные пакеты и загружали вместе с окатышами в промышленный реактор Мидрекс. Это позволило смоделировать поведение брэксов в условиях, максимально приближенных к реальным условиям внутри слоя окатышей в реакторе. Наличие «холодной» выгрузки из реактора позволило извлечь эти пакеты по завершению процесса. Внешний вид сырых и восстановленных брэксов (после их извлечения из пакетов) представлен на рис. 2, а их химический состав – в табл. 4.

Как видно на рис. 2 и в табл. 4, брэксы на магниальном связующем (типа 02-02) после восстановления имели максимальную степень

Таблица 2. Химический состав брэксов типов 02-01 и 02-02

Химические соединения	Брэксы, тип	
	02-01	02-02
Fe _{общ}	62,47	62,61
CaO	9,24	4,30
MgO	3,61	6,24
SiO ₂	2,45	2,76
Al ₂ O ₃	1,29	0,99
MnO	0,343	0,349
S	0,075	0,502
Na ₂ O+K ₂ O	0,193	0,831
ZnO	0,362	0,346

металлизации и сохранили наибольшую целостность. Разлом этих брэксов на 2–3 части в реакторе происходил практически без образования мелочи. В то же время брэксы с известью в качестве связующего (типа 02-01) разламывались на 2–4 части с образованием мелочи, которая, закупоривая отверстия в пакетах, снижала их газопроницаемость, что негативно повлияло на конечную степень восстановления и металлизацию этих брэксов.

Механическую прочность восстановленных брэксов определяли в тестах на растяжение при раскалывании: 0,4 Н/мм² для брэксов 02-01 и 1,2 Н/мм² для брэксов 02-02. Видно, что прочность брикетов на магниальном связующем после металлизации практически не изменилась по сравнению с ее исходной величиной (см. табл. 3). Вероятной причиной снижения прочности брэксов типа 02-01 является распад связующего – порландита, который происходит при температуре ниже 480 °С, и замедленное образование новой

Таблица 3. Физико-механические свойства брэксов типа 02-01 и 02-02

Брэксы, тип	Плотность, г/см ³	Прочность на сжатие, Н/мм ²	Прочность на растяжение при раскалывании, Н/мм ²	Пористость, %	Влажность, %
02-01	3,5	4,8	1,5	29,7	8,4
02-02	3,66	4,4	1,2	25,1	8,6

Таблица 4. Состав и металлизация брэксов типов 02-01 и 02-02

Химические соединения	02-01	02-02
Fe _{общ}	74,86	86,86
Fe _{мет}	49,11	84
Металлизация, %	65,6	96,71
CaO	9,11	5,07
MgO	2,93	7,81
SiO ₂	3,41	4,04
Al ₂ O ₃	1,57	2,13
MnO	0,34	0,39
S	0,0256	0,26
Na ₂ O+K ₂ O	0,48	0,74
ZnO	0,18	0,045

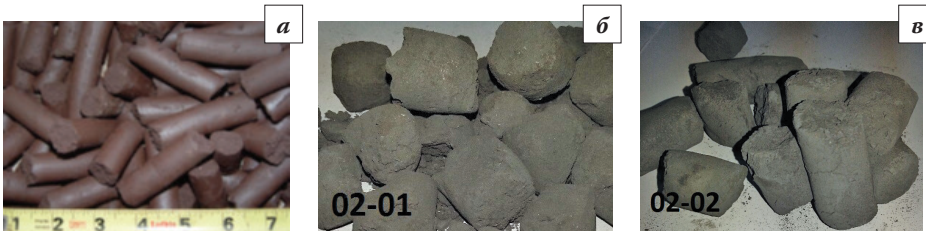


Рис. 2. Сырые (а) и восстановленные брэксы (б, в, типы 02-01 и 02-02 соответственно) после извлечения из стальных пакетов

связки – карбоната кальция – из-за дефицита CO_2 в газе при указанной температуре [2].

Минералогический анализ брэксов методами оптической и электронной микроскопии показал, что в составе исходных брэксов отсев окатышей с основностью ($\text{CaO}/\text{SiO}_2 = 0,3\text{--}0,5$) представлен оболочками, состоящими из сростков гематита с ферритом кальция и микрочастицами железосиликатного расплава и стеклофазы. Окалина имеет состав магнетита – твердый раствор $(\text{Fe},\text{Mn})\text{O}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$. В составе пыли ЭСПЦ присутствуют расплавообразующие компоненты шихты: CaO , MgO , SiO_2 , MnO и Na_2O .

Для брэксов типа 02-01 после восстановления характерно присутствие микрообъемов первичных железосиликатных расплавов непостоянного состава в разных частях тела брикетов в контакте с крупными частицами окатышей и металлическим железом. Первичный железосиликатный расплав по своему составу близок к составу оливиновых фаз. На контакте обломков окатышей с расплавом в теле брэкса наблюдаются металлические волосовины.

Брэксы на магниальном связующем после восстановления имеют высокую степень металлизации, в процессе которой микроструктура исходного брэкса не сохраняется и становится близкой к состоянию двухфазной системы «металл – силикатная фаза». По данным рентгеноспектрального микронзондирования среди изученных силикатных зон в структуре брикета преобладают два минеральных вида, близких по составу к оливинам и меллититу, но отличающихся по содержанию оксидов железа, магния и марганца.

С целью изучения характера изменения пористости брэксов в процессе их восстановления были сопоставлены величины пористости, определенные путем изучения морфологических параметров исходных и восстановленных брэксов по методике STIMAN [3]. Микроструктуру образцов исследовали, используя свежий скол поверхности образца, с помощью растрового электронного

микроскопа LEO 1450 VP (фирма Carl Zeiss, Германия) с разрешением 3,5 нм.

Для морфологических исследований микроструктуры использовали режим вторичных электронов, позволяющий получать высококачественные полутоновые изображения в широком диапазоне увеличений. Количественный анализ микроструктуры проводился с помощью программного обеспечения STIMAN двумя методами: 1 – по серии РЭМ-изображений, полученных в режиме отраженных электронов, позволяющем получать корректные изображения с более четкими границами между порами и частицами; 2 – путем комплексного анализа по серии РЭМ-изображений и изображений, полученных с помощью компьютерного томографа Yamato TDM-1000 (Япония).

В процессе металлизации суммарная пористость брэксов типа 02-02 увеличилась на 19,4%, а брэксов типа 02-01 только на 8,3%. Причем пористость возросла за счет крупных и сверхкрупных пор (более 100 мкм по классификации, принятой в порошковой металлургии [4]): для брэксов типа 02-02 – в 6,9 раза, а для брэксов типа 02-01 – только на 24%. Максимальный диаметр пор в брэксах типа 02-02 увеличился в 3 раза, а в брэксах типа 02-01 – в 1,43 раза.

Различие в характере изменения пористости исходных и восстановленных брэксов можно заметить и на снимках, сделанных компьютерным томографом (рис. 3). В брэксах на извести и магниальном связующем (в наибольшей степени) наблюдается развитие внутренних трещин, способствовавшее образованию связанной пористой системы и росту темпа восстановления.

Можно предположить, что причиной различного изменения пористости в рассматриваемых брэксах явилось различие в скорости и степени восстановления оксидов железа. В брэксах типа 02-02, сохранивших свою прочность и не образовавших мелочи, процесс металлизации сопровождался образованием металлического каркаса

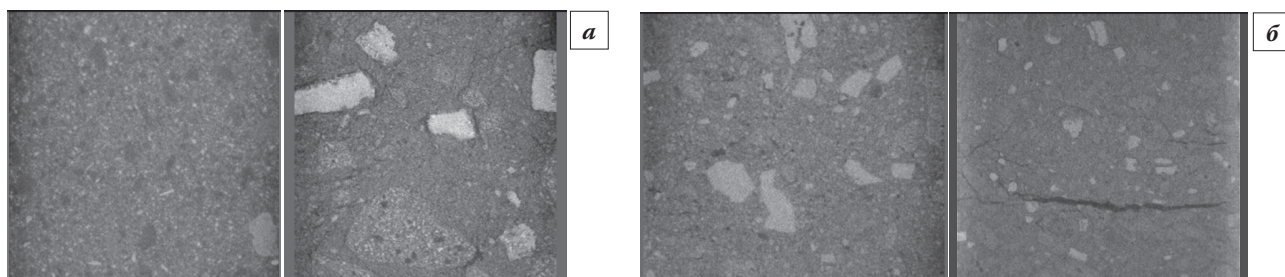


Рис. 3. Сопоставление распределения пор в исходных (слева) и в восстановленных брэксах (а – брэкс типа 02-01; б – брэкс типа 02-02); компьютерная томография, $\times 64$

Таблица 5. Параметры брэксов типа 02-01 после первой и второй серии испытаний

Брэкс	Fe _{общ} , %	Fe _{мет} , %	Металлизация, %
02-01-1	80,07	77,39	96,65
02-01-2	74,86	49,11	65,56

с исчезновением мелких пор и увеличением размеров крупных пор. Газопроницаемость пакетов с брэксами типа 02-01 из-за образования мелких фракций понизилась, что привело к снижению и скорости восстановления, и окончательной степени восстановления.

Интересно сопоставить результаты испытаний для брэксов на известковом связующем (табл. 5). При восстановлении этих брэксов в стальных деформируемых газопроницаемых пакетах степень металлизации брэксов на известке существенно снизилась – на 33%. Механическая прочность таких брэксов оказалась недостаточной для противодействия механическим нагрузкам от движущегося слоя окатышей в температурных условиях реактора и они разламывались с образованием мелочи.

Для окончательного вывода о возможности или невозможности применения брэксов на известковом связующем в качестве компонентов шихты реакторов прямого получения железа требуются дополнительные исследования. Следует признать успешными результаты испытаний лишь брэксов на магнезиальном связующем. Полученные результаты позволяют заключить, что технология брикетирования методом жесткой вакуумной экструзии позволяет реализовать рециклинг дисперсных отходов, образующихся при металлизации окатышей и выплавке стали, путем их брикетирования и последующей металлизации совместно с окатышами. Ограничением

для использования брэксов на магнезиальном связующем при таком рециклинге является повышенное содержание серы в связующем, которая частично будет переходить в колошниковый газ. При отсутствии сероочистки колошникового газа сера с газом будет поступать в реформер, снижать качество катализатора и содержание CO и H₂ в получаемом газе. Именно этот параметр и будет определять допустимое содержание таких брикетов в шихте печи металлизации.

Заключение. Испытания в промышленном реакторе Midrex брэксов, полученных с использованием магнезиального связующего из дисперсных отходов производства металлизированных окатышей и выплавки стали, показали возможность достижения высокой степени металлизации брэксов с сохранением их целостности. Результаты испытаний позволяют считать возможным применение жесткой вакуумной экструзии для реализации рециклинга указанных отходов путем их брикетирования и металлизации брэксов совместно с окатышами.

Библиографический список

1. **Бижанов А.М., Курунов И.Ф., Халид У.Э.** Поведение брикетов экструзии (брэксов) в реакторах Midrex. Ч. 1 // *Металлург.* 2012. № 4. С. 16–20.
2. **Kemppainen X.A., Pijana M., Heikkinen E-P. Et al.** Reduction Behavior of Cold-bonded Briquettes under Simulated Blast Furnace Conditions // *ISIJ Int.* 2014. Vol. 54, No. 7. P. 1539–1545.
3. **Соколов В.Н., Юрковец Д.И., Разгулина О.В., Мельник В.Н.** Компьютерный анализ неоднородных полидисперсных пористых структур по РЭМ изображениям // *Изв. АН, сер. физическая.* 1999. Т. 63. № 7. С. 1328–1331.
4. **Лебедев М.П.** Пористость деталей, полученных технологиями порошковой металлургии. М. : Academia, 2011. 79 с.

BEHAVIOR OF EXTRUSION BRIQUETTES (BREX) IN MIDREX REACTORS. Part 2

© **Kurunov I.F., Bizhanov A.M., Wakeel A.Kh., Mishra B.**

The results of the industrial testing of the metallization of the extrusion briquettes (BREX) made of the indurated pellets fines, DRI sludge, mill scale and EAF dust with the application of two different binders in Midrex process reactor are considered. The influence of the binder type on the BREX strength and degree of metallization has been studied. With the help of the optical and electronic microscopy the structure of the raw and reduced BREX has been investigated.

Keywords: pellets; metallization; disperse fines; briquetting; stiff vacuum extrusion; BREX; magnesium binder; lime; testing; Midrex reactor; strength; porosity.