

УДК 669.162.1:622.788

## МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА БРЭКСОВ

© Курунов Иван Филиппович<sup>1</sup>, д-р техн. наук, проф.; Бижанов Айтбер Махачевич<sup>2</sup>;Тихонов Дмитрий Николаевич<sup>1</sup>, канд. техн. наук; Мансурова Наталья Равиловна<sup>1</sup>, канд. техн. наук<sup>1</sup> ОАО «Новолипецкий металлургический комбинат». Россия, г. Липецк. E-mail: kurunov\_if@nlmk.ru<sup>2</sup> J.C.Steele&Sons Inc. США, Statesville, NC. E-mail: abizharov@jcsteell.com

Статья поступила 25.04.2012 г.

Исследовали механическую прочность, поведение при нагреве в восстановительной атмосфере и горячую прочность брэксов, изготовленных из металлургических шламов, железорудного концентрата, марганцевой руды, отсева металлизированных окатышей и ферросплавов, коксовой мелочи и угля. Металлургические свойства брэксов позволяют успешно применять их в различных технологических процессах экстрактивной металлургии и при выплавке стали.

**Ключевые слова:** жесткая экструзия; брикеты экструзионные; брэксы; шлам; уголь; коксовая мелочь; руда; концентрат; холодная прочность; восстановительный нагрев; горячая прочность; металлургические свойства.

Технология жесткой вакуумной экструзии давно и успешно используется при производстве кирпичей. Результаты недавних разработок фирмы J.C.Steele&Sons Inc. показали, что эта технология может эффективно применяться для окускования техногенных и природных металл- и углеродсодержащих дисперсных материалов [1]. Брикетные экструзионные (БРЭКСЫ) – продолговатые куски правильной геометрической формы в поперечном сечении (круглые, квадратные, овальные) – имеют на выходе из экструдера достаточную прочность для их транспортировки и складирования в штабель для упрочняющего вылеживания.

*Брэксы для доменных печей.* Первые опубликованные результаты промышленного изготовления брэксов из техногенного и природного железосодержащего сырья и их применения в качестве основного компонента шихты в доменной печи (ДП) небольшого объема [2] подтвердили результаты проведенных ранее в России и США исследований металлургических свойств этих материалов. Успешная работа ДП с содержанием в шихте 80% брэксов является самым весомым критерием пригодности нового шихтового материала для его применения в доменной плавке.

*Испытания механической прочности брэксов* проводили сначала сразу после их получения, а затем после упрочняющего вылеживания с целью достижения максимальной прочности. В силу специфики формы брэксов испытания на механическую прочность (прочность на раскалывание по ГОСТ 28570–90 и ГОСТ 10180–90) можно проводить в двух вариантах их возможной ориентации

– вертикально поставленный цилиндр и цилиндр, лежащий на плоскости. В связи с очевидным преобладанием второй ориентации при размещении брэксов в штабеле или в слое материалов в шахте ДП в качестве основного был выбран этот вариант испытаний подготовленного фрагмента брэкса (рис. 1).

В качестве возможных компонентов доменной шихты рассматривали шламовые брэксы (из смеси доменного и конвертерного шламов и цемента) и рудококсовые брэксы – смесь железорудного концентрата, коксовой мелочи и цемента (табл. 1).

Для оценки прочности на раздавливание этих брэксов приготовили их цилиндрические образцы (диам. 25 мм) длиной 30 мм. Нагрузку прикладывали вдоль оси образцов. Испытывали образцы до и после их нагрева в восстановительной атмосфере (50% водорода + 50% азота) до 1150 °С со скоростью 500 °С/ч и последующего охлаждения в атмосфере азота. Для оценки прочности использовали по пять образцов каждого типа. Все термообработанные образцы сохранили свою форму и размеры (рис. 2). Как видно из результатов испытаний (табл. 2), после нагрева в восстановительной атмосфере по указанному режиму прочность образцов шламо-



Рис. 1. Размещение опытного образца для оценки прочности брэкса на раскалывание

Таблица 1. Компонентный состав шламовых и рудококсовых брэсков

Компоненты брэсков	Массовая доля компонентов, %	
	брэкс № 2	брэкс № 4
Портландцемент ПЦ 500	9,1	9,0
Коксовая мелочь	–	13,5
Бентонит	–	0,9
Шлам доменный	54,5	–
конвертерный	36,4	–
Железорудный концентрат	–	76,6

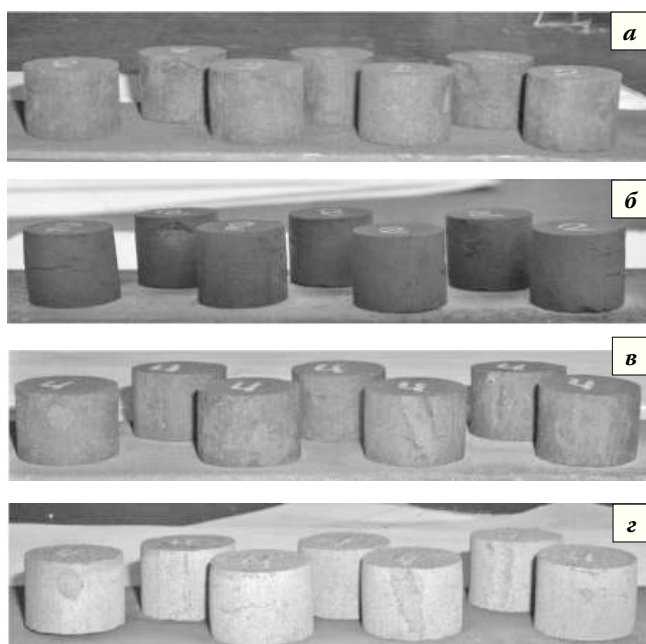


Рис. 2. Образцы брэсков № 2 (а, б) и № 4 (в, з) до (а, в) и после (б, з) термообработки в восстановительной атмосфере

вых брэсков уменьшилась на 8,2%, тогда как прочность образцов рудококсовых брэсков снизилась на 14,5%.

Исследование в отраженном свете микроструктуры образцов исходного и восстановленного рудококсового брэкса показало, что в исходном брэксе частицы концентрата и коксовой мелочи сцеплены цементной связкой, обеспечивающей его прочность (рис. 3, а). Прочность восстановленного образца брэкса, как и в брикетах, полученных вибропрессованием [3], обеспечивают железосиликатная связка и металлический каркас, образованный частицами железа (рис. 3, б).

Дополнительно оценили прочность на раздавливание рудококсовых брэсков, изготовленных из железной руды, получаемой методом гидродобычи (табл. 3).

Оценку прочности на раскалывание производили при наложении перпендикулярной нагрузки

Таблица 2. Прочность брэсков на раздавливание

Номер испытания	Прочность, Н/мм <sup>2</sup>	
	после термообработки	до термообработки
<i>Образец № 2, шламовый брэкс</i>		
1	9,8	10,4
2	12,5	8,9
3	10,2	11,2
4	10,5	12,5
5	11,8	16,6
Среднее значение	10,9	11,9
<i>Образец № 4, рудококсовый брэкс</i>		
1	9,3	12,5
2	9,6	10,4
3	10,6	11,0
4	8,7	10,4
5	9,3	11,4
Среднее значение	9,5	11,1

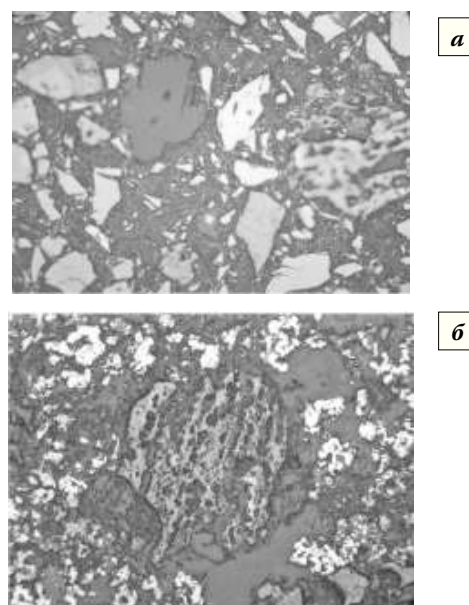


Рис. 3. Микроструктура брэкса № 4: а – исходного образца, увеличение  $\times 500$  (светлые – частицы магнетита концентрата, светло-серые – частицы кокса, темно-серое – цементная связка); б – после восстановления, увеличение  $\times 200$  (светлые – частицы металлического железа, серые поля – железосиликатная матрица, светло-серые частицы – кокс)

относительно продольной оси брэкса. Испытания показали высокую механическую прочность брэсков, позволяющую использовать их в ДП. При этом брэксы из смеси гидроруды и пыли газоочистки ЭСПЦ значительно превосходили по прочности рудококсовые брэксы (табл. 4). Последнее объясняется тем, что мелкодисперсная пыль газоочистки ЭСПЦ обладает пластифицирующими и вяжущими свойствами, что повышает

Таблица 3. Компонентный состав брэксов из гидроруды

Компоненты брэксов	Массовая доля компонентов, %	
	брэкс № 3.02	брэкс № 3.06
Портландцемент ПЦ 500	5,55	5,6
Бентонит	0,45	0,95
Гидроруда	79	60,75
Пыль газоочистки ЭСПЦ	–	18,7
Коксовая мелочь	15,0	14,0

Таблица 4. Прочность на раскалывание брэксов из гидроруды

Номер образца	Прочность, Н/мм <sup>2</sup>					Среднее значение
	6,5	7,4	8,9	13,8	9,1	
3.02	6,5	7,4	8,9	13,8	9,1	9,1
3.06	17,8	19,5	17,2	25,8	18,1	19,7

ет прочность брэксов как на выходе из экструдера, так и после их затвердевания.

Холодную (барабанную) прочность промышленных брэксов, производимых компанией Suraj Products Ltd (Индия) из доменных и сталеплавильных шламов, колошниковой пыли и железной руды (30%), оценили по стандартной методике ISO 3271. Стандартная проба (15 кг) была получена путем дробления брэксов и выделения нужной фракции (10–40 мм). Холодная прочность (количество фракции +6,3 мм после 200 оборотов барабана с частотой 25 мин<sup>-1</sup>) составила 91%, а истираемость (доля фракции –0,5 мм) 0,8%. Полученные показатели прочности брэксов превышают средние значения показателей прочности агломерата высокого качества.

**Восстановимость брэксов.** Восстановимость образцов № 3.02 и № 3.06 определяли с использованием стандартной методики (ГОСТ 28658–90, ИСО 7215–85), которая предусматривает непрерывное взвешивание образца при его изотермическом (900 °С) восстановлении монооксидом углерода. Нагрев образца и его охлаждение после восстановления проводили в атмосфере азота. Степень восстановления рассчитывали по потере массы образца с учетом массовой доли и окисленности железа в исходных образцах. Кривые восстановления представлены на рис. 4.

Потеря массы образцов в этих испытаниях является следствием не только восстановления оксидов железа, но и следствием дегидратации цементного камня и гидроксида кальция (в образце № 3.06). По этой причине расчетное значение степени восстановления в образце № 3.06 было выше.

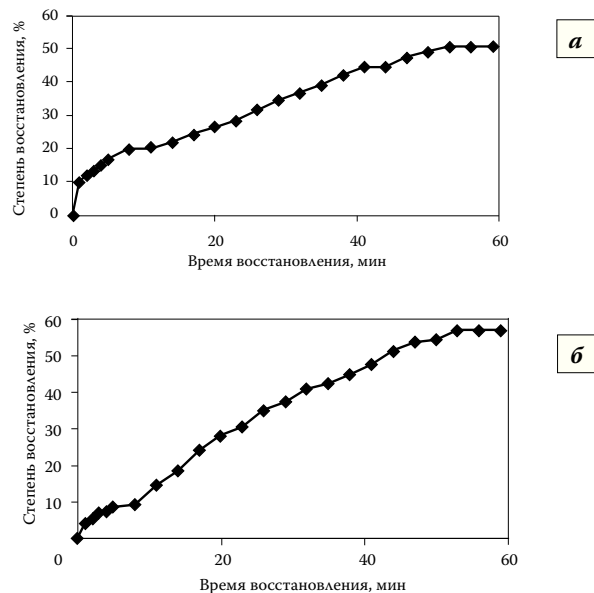


Рис. 4. Кривая восстановления брэксов образца № 3.02 (а) и образца № 3.06 (б)

Оценка прочности восстановленных образцов брэксов из гидроруды показала, что прочность образца № 3.02 снизилась почти вдвое, а образца № 3.06 – в четыре раза. Такое снижение прочности, значительно превышающее снижение прочности брэксов в результате их нагрева в восстановительной атмосфере до 1150 °С (см. табл. 2), объясняется распадом цементной связи в брэксах и недостаточным временем их пребывания при температуре 900 °С для образования в результате твердофазных реакций упрочняющей матрицы из железокальциевых силикатов и каркаса из металлического железа. При нагреве образцов до 1150 °С, напротив, образование такой матрицы в теле брэксов практически компенсировало потерю прочности из-за распада цементной связи. В итоге прочность восстановленных образцов лишь незначительно снизилась по сравнению с прочностью исходных образцов.

**Горячую прочность брэксов,** предназначенных для применения в качестве компонента доменной шихты, оценивали в соответствии со стандартом ISO 4696 и с использованием стандартного оборудования. Испытывали брэксы следующего компонентного состава, %:

- брэкс рудокосовый (БРК): концентрат 76,9; коксовая мелочь 13,6; портландцемент 9,0; лигнин 0,5;
- брэкс шламовый (БШ): доменный шлак 54,5; конвертерный шлак 36,4; портландцемент 9,1.

Для сравнения одновременно оценивали по тому же стандарту горячую прочность агломератов различной основности, полученных из железорудного концентрата (табл. 5).

Таблица 5. Показатели горячей прочности брэксов и агломератов различного состава

Материал	Показатель RDI, %	
	для -3,15	для +6,4
Брэкс: БРК	38	62
БШ	3,5	96,5
Агломерат: основность 1,2	16,9	64
основность 1,4	15,1	60
основность 1,6	8,9	77

Горячая прочность рудококсовых брэксов БРК сопоставима с горячей прочностью агломерата с основностью 1,2 и 1,4, но уступает горячей прочности агломерата с основностью 1,6. В то же время показатель горячей прочности шламового брэкса БШ значительно превосходит соответствующие показатели всех указанных агломератов.

*Брэксы для производства ферросплавов.* Испытания на прочность брэксов различного компонентного состава, изготовленных из марганецсодержащих материалов и отходов и предназначенных для выплавки силикомарганца, выполнены по той же методике с приложением нагрузки перпендикулярно продольной оси брэкса (табл. 6).

Брэксы состава № 1, полученные с минимальным расходом цемента (3%), после их испытаний в независимой лаборатории (L.ROBERT KIMBALL&ASSOCIATES, INC., Ebensburg, PA, США) были выбраны для проведения полномасштабной кампании опытно-промышленных плавов на промышленной руднотермической печи в США [2]. Партия (2000 т) брэксов указанного состава была проплавлена без снижения производительности печи и качества выплавляемого силикомарганца. Расход электроэнергии на выплавку сплава уменьшился на 9%.

Исследовали поведение брэксов для производства ферросплавов при высокотемпературном нагреве. Компонентный состав брэксов приведен в табл. 7.

Методом термического анализа определены превращения, которые могут происходить в таких брэксах при их нагреве. Исследования проводили с применением прибора STA 449 C (Германия) в атмосфере аргона при нагреве порошкообразных образцов массой 50–70 мг в диапазоне температур 20–1400 °С со скоростью 20 °С/мин.

Анализ термограмм образцов № 2-1 и № 2-2 показал слабовыраженные эндотермические эффекты в диапазоне 300–450 °С, обусловленные разложением гидратов. Эндотермические пики в диапазоне 1120–1225 °С обусловлены восстановлением оксидов железа и марганца углеродом, содержащимся в аспирационной пыли. Аналогичные эндотермические пики

Таблица 6. Прочность на раскалывание брэксов из марганецсодержащих материалов

Компоненты брэксов	Содержание компонентов в брэксах, %						
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5	№ 6	№ 7
Марганцевая руда	70	70	70	–	–	70	–
Аспирационная пыль	30	30	30	15	30	30	–
Отсевы дробления силикомарганца	–	–	–	85	70	–	–
Коксовая мелочь	–	–	15*	–	–	–	94,5
Уголь	–	10*	–	–	–	5*	–
Портландцемент	3*	4*	5*	5*	3*	3*	5
Бентонит	–	–	–	–	–	–	0,5
Прочность на раскалывание, Н/мм <sup>2</sup>	21,1	15,7	15,6	34,4	11,7	7,7	18,0

\* Сверх 100%.

Таблица 7. Компонентный состав брэксов для исследования их поведения при высокотемпературном нагреве

Компоненты брэксов	Содержание компонентов в образцах брэксов, %		
	№ 2-1	№ 2-2	№ 2-3
Мелочь марганцевой руды	70	50	56
Пыль аспирации производства силикомарганца	30	50	24
Портландцемент	5*	5*	5
Уголь	–	–	15

\* Сверх 100%.

имеются и в термограмме образца № 2-3 при 1123 и 1213 °С.

Термостойкость брэксов оценивали путем опускания образцов (длиной 50 мм) в корзинке из вольфрамовой проволоки в печь, разогретую до 1200 °С или до 1500 °С, с последующей выдержкой в печи в течение 5 мин в воздушной атмосфере. Образцы № 2-1 и № 2-2 после 5-минутной выдержки при температуре 1200 °С сохранили форму и размеры, появились лишь следы начального оплавления образцов. Образец № 2-3 при опускании в печь, разогретую до 1500 °С, размягчился и оплавился в течение примерно 1 мин. (рис. 5).

Образцы брэксов № 4 и № 5 (см. табл. 6), изготовленных из отсевов силикомарганца, также выдержали 15-минутное пребывание в печи при 1200 °С без разрушения и потери формы. При опускании в расплавленный шлак с температурой 1580 °С образцы расплавились. Время полного расплавления образца (длина и диаметр 25 мм) составило 10 мин.

*Брэксы из коксовой мелочи* могут применяться как дешевый заменитель коксового орешка в ферросплавных или доменных печах. Испытания

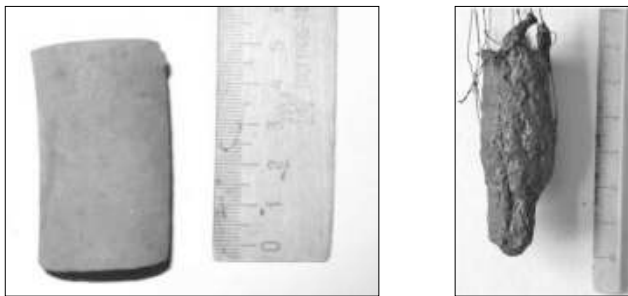


Рис. 5. Образец № 2-3 до и после термической выдержки при  $t = 1500\text{ }^\circ\text{C}$

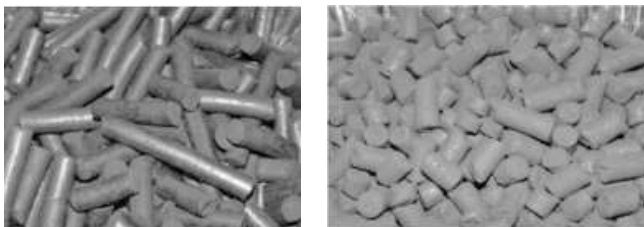


Рис. 6. Коксовые брэксы до и после барабанных испытаний

этих брэксов (94,5% коксовой мелочи, 5% цемента, 0,5% бентонита) показали высокую прочность на раскалывание ( $18,0\text{ Н/мм}^2$ ). Кроме того, визуальнo оценили характер разрушения коксовых брэксов в процессе вращения в барабане. В результате такой нагрузки исходный размер брэксов уменьшился в 3–4 раза с образованием незначительного количества мелких фракций (рис. 6).

Проведенные независимой лабораторией испытания горячей прочности коксовых брэксов дали следующие показатели:  $CSR = 20\%$ ,  $CRI = 45,6\%$ . Очевидно, что такие коксовые брэксы вполне могут заменять коксовый орешек в ДП при их количестве в шихте не более 15–25 кг/т чугуна. Возможно также их применение и в качестве восстановителя в рудотермических печах.

Брэксы из отсевов металлизированных окатышей. Отсевы, образующиеся при производстве ГБЖ из металлизированных окатышей, использовали для получения брэксов, с помощью которых можно утилизировать дисперсные металлические отходы при выплавке металла. Брэксы (рис. 7) имели следующий состав: отсев металлизированных окатышей 92%; меласса 4%; известь 4%; бентонит 0,5% (сверх 100%).



Рис. 7. Брэксы из отсевов производства ГБЖ

Прочность на раздавливание таких брэксов колебалась в пределах  $5\text{--}12,2\text{ Н/мм}^2$ . Время расплавления образца брэкса в печи Таммана при  $1513\text{ }^\circ\text{C}$  составило 10 мин.

**Выводы.** 1. Технология брикетирования методом жесткой вакуумной экструзии может успешно применяться для окускования широкого перечня природных и техногенных материалов с целью использования получаемых материалов (брэксов) в качестве компонента шихты в доменных, рудотермических и сталеплавильных печах.

2. Механическая прочность брэксов уже на выходе из фильеры достаточно высока, что существенно упрощает процедуру их последующей транспортировки, перегрузки и штабелирования. Прочность брэксов после твердения обеспечивает их целостность при хранении, транспортировке, перегрузках и в слое шихты в металлургических печах до их расплавления.

3. Горячая прочность брэксов также отвечает требованиям металлургических процессов, она соответствует горячей прочности агломерата, а в некоторых случаях даже превосходит ее.

#### Библиографический список

1. Steele R.B., Bizhanov A. Stiff Extrusion Agglomeration of Arc Furnace Dust and Ore Fines for Recovery at a Ferro Alloy Smelter: Proc. 32<sup>nd</sup> Biennial Conference (September, 2011. New Orleans, Louisiana). Ins. for Briquetting and Agglomeration. Vol. 32.
2. Далмиа Й.К., Курунов И.Ф., Стил Р.Б., Бижанов А.М. Новый шихтовый материал для доменных печей // Металлург. 2012. № 3. С. 39–41.
3. Курунов И.Ф., Малышева Т.Я., Большакова О.Г. Исследование фазового состава железорудных брикетов с целью оценки их поведения в доменной печи // Металлург. 2007. № 10. С. 41–46.

## METALLURGICAL PROPERTIES OF BREX

© Kurunov I.F., ScD, prof.; Bizhanov A.M.; Tikhonov D.N., PhD; Mansurova N.R., PhD

Mechanical strength, behavior during the heating under the reducing atmosphere and the hot strength of the brex made from metallurgical sludge, iron-ore concentrate, manganese-ore fines, metallized pellets fines and the Ferro Alloys fines, coke breeze and coal fines have been investigated. Metallurgical properties of the brex allow for their successful utilization for the variety of the metallurgical extractive technologies and for the steelmaking.

**Keywords:** stiff extrusion; extruded briquettes; BREX; sludge; coal; coke breeze; ore; concentrate; cold strength; reducing heating; hot strength; metallurgical properties.