

УДК 669.168:622.788

## БРИКЕТЫ ЭКСТРУЗИИ (БРЭКСЫ) ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ФЕРРОСПЛАВОВ

© **Бижанов Айтбер Махачевич<sup>1</sup>; Стил Ричард Бинион<sup>1</sup>;**

**Подгородецкий Геннадий Станиславович<sup>2</sup>**, канд. техн. наук;

**Курунов Иван Филиппович<sup>3</sup>**, д-р техн. наук, проф.;

**Дашевский Виктор Яковлевич<sup>4</sup>**, д-р техн. наук, проф.;

**Коровушкин Владимир Васильевич<sup>2</sup>**, д-р. геол.-минер. наук

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

<sup>2</sup> Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС». Россия, Москва

<sup>3</sup> ОАО «Новолипецкий металлургический комбинат». Россия, Липецк

<sup>4</sup> Институт металлургии и металловедения РАН им. А.А.Байкова. Россия, Москва

Статья поступила 24.10.2012 г.

Приведены результаты лабораторных исследований, опытно-промышленных испытаний и промышленного использования брикетов экструзии (брэкс) на основе техногенных и природных материалов и топлива для производства ферросплавов. Показана возможность достижения существенной экономии электроэнергии, снижения расхода кокса и повышения степени извлечения основного компонента при работе на брикетированной шихте.

**Ключевые слова:** брикет экструзии (брэкс); жесткая вакуумная экструзия; экструдер Steele; ферросплавы; ферроникель; латеритные никелевые руды; ферросиликомарганец; пыль аспирации; рудно-термическая печь.

Способ жесткой вакуумной экструзии, созданный компанией J.C.Steele&Sons, Inc., позволяет эффективно окусковывать различные техногенные и природные материалы и топливо, придавая брикетам экструзии (брэксам) металлургические свойства, делающие их привлекательным компонентом шихты для большинства металлургических печей [1–3]. В статье рассматриваются вопросы, связанные с применением этой технологии для производства ферросплавов.

Первый успешно реализованный проект компании в этом направлении связан с использованием брэксов в шихте для выплавки ферроникеля. На предприятии ВНР Billiton в Серро-Матосо (Монтелибано, Колумбия; выявленные ресурсы на 2006 г. – 99 млн т с содержанием никеля 1,54%) установлены три экструдера Steele-90 (рис. 1). На этих установках окусковывают мелкую фракцию (пыль) латеритной никелевой руды для последующей металлизации брэксов в трубчатых печах и использования их в качестве компонентов шихты для выплавки ферроникеля в электропечах. Пыль образуется при измельчении кусковой руды в трубчатых печах и собирается также в системах газоочистки электропечей. Суммарное производство брэксов – 700 тыс. т в год.

Экструзионная линия в Серро-Матосо состоит из смесителя на основе глиномялки с единственным валом, вакуумного смесителя и экструдера с

вакуумной системой. Характерной особенностью окускования латеритной никелевой руды жесткой экструзией является отсутствие потребности в связующем. Средняя производительность одного экструдера – 70 т/ч. По результатам промышленной эксплуатации экструзионных линий в 2004–2010 гг. полная себестоимость изготовления 1 т брэксов не превысила 2,1 долл. США. Срок службы основного оборудования – от 30 лет. Первоначально на этом предприятии, работающем с 1992 г. близ г. Монтелибано, для окускования пыли латеритной руды применяли окомкование и валковое брикетирование. В 1996 г. после проведения ряда сопоставительных испытаний различных способов окускования и переработки мелкой фракции латеритных руд (окомкование, агломерация, плазменные печи и экструзия) был сделан окончательный выбор в пользу способа жесткой экструзии Steele. Оказалось, что только этот способ позволил придать окускованным продуктам требуемые техническим заданием размер, форму, холодную и горячую прочность (как в трубчатых, так и в электропечах), равно как и обеспечить высокую производительность при низких значениях себестоимости. Производство никеля в ферроникеле предприятием ВНР Billiton в Серро-Матосо составляет 50 000 т в год, из которых 10 000 т привнесено брэксами. Содержание никеля в продукции 35% [4].



Рис. 1. Окускование мелочи латеритной никелевой руды экструдером Steele-90 в Колумбии



Рис. 2. Монтаж оборудования Steele в Бразилии на предприятии VALE (Mineracao Onca-Puma)

Успешные результаты, показанные при промышленном использовании жесткой экструзии в Колумбии, привлекли к ней внимание и со стороны другой крупнейшей горнорудной компании мира – VALE. На ее предприятии в Онка-Пума (Бразилия, выявленные ресурсы 423,3 млн т, содержание никеля 1%) также установлены три экструзионные линии для окускования мелких фракций латеритных никелевых руд (рис. 2). Годовое производство брэксов – 700 тыс. т.

Систематические исследования применимости жесткой экструзии для окускования в *ферросплавной промышленности* были впервые предприняты авторами настоящей статьи в 2010 г. Были исследованы металлургические свойства брэксов на основе природных и техногенных сырьевых материалов для выплавки феррохрома и марганцевых ферросплавов. По заказу одного из крупнейших производителей феррохрома в лаборатории компании J.C.Steele&Sons, Inc. в США были изготовлены, а в НИТУ «МИСиС» в Москве испытаны различные составы на основе концентрата хромовой руды и углей, а также составы с использованием пыли системы аспирации производства феррохрома (табл. 1).

Указанные материалы после смешения и добавления требуемого для экструзии количества воды (15,7, 14,7 и 16,1% соответственно) проявили высокую пластичность, экструдировались легко с образованием прочных «зеленых» брэксов. После суточного упрочнения в естественных условиях была измерена их механическая прочность в вариантах раскалывания и сжатия (табл. 2). Видно, что даже для лабораторных брэксов добавление менее 5% портландцемента приводит к достижению значений прочности, требуемых техническими условиями. Опыт компании

J.C.Steele&Sons, Inc. показывает, что доля связующего при работе промышленных экструдеров оказывается заметно меньшей, чем в лабораторных брэксах. Исследования поведения таких брэксов в условиях рудотермических печей и печей металлизации в настоящее время продолжаются в США (результаты будут приведены в отдельной статье).

В интересах одного из крупнейших производителей марганцевых ферросплавов в 2010–2011 гг. авторами статьи был выполнен комплекс научных исследований, завершившийся проведением опытно-промышленной кампании по выплавке силикомарганца из шихты с высоким содержанием брэксов на основе марганцевого

Таблица 1. Составы брэксов на основе хромовой руды, мас. %

Компоненты брэкса	Номер состава		
	X1	X2	X3
Концентрат хромовой руды	76,2	71,5	15,0
Аспирационная пыль производства феррохрома	–	–	67,0
Уголь	19,1	23,8	15,0
Портландцемент	4,7	4,7	3,0

Таблица 2. Результаты тестов на механическую прочность для брэксов на основе концентрата хромовой руды

Номер брэкса	Механическая прочность брэксов, Н/мм <sup>2</sup>	
	на раскалывание	на сжатие
X1	4,78	8,46
X2	2,88	8,06
X3	3,33	5,86

Таблица 3. Составы брэксов на основе марганцевого концентрата и пыли аспирации производства силикомарганца, мас. %

Компоненты брэксов	Номер состава брэксов				
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5
Концентрат марганцевой руды	70	50	56	–	–
Аспирационная пыль производства силикомарганца	30	50	24	15	–
Отсевы дробления силикомарганца	–	–	–	85	–
Коксовая мелочь	–	–	15	–	94,5
Портландцемент	3*	5*	5	5*	5
Бентонит	–	–	–	–	0,5

\*Сверх 100%.

Таблица 4. Диссоциация оксидов марганца

Реакция	$\lg p_{O_2} = A/T + B^*$	$T, K$
$4MnO_{2(r)} = 2Mn_2O_{3(r)} + O_2$	$\lg p_{O_2} = -9860/T + 15,98$	560–640
$6Mn_2O_{3(r)} = 4Mn_3O_{4(r)} + O_2$	$\lg p_{O_2} = -11740/T + 13,92$	810–910
$2Mn_3O_{4(r)} = 6MnO + O_2$	$\lg p_{O_2} = -23910/T + 17,73$	1270–1350
$2MnO_{(r)} = 2Mn_{(r)} + O_2$	$\lg p_{O_2} = -24730/T + 14,00$	1602–1747

\* $A, B$  – константы;  $p_{O_2}$  – упругость диссоциации оксидов.

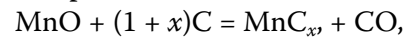
концентрата и пыли аспирации производства силикомарганца. На основе анализа имевшихся в наличии природных и техногенных материалов и топлива и в соответствии с техническим заданием были подобраны и изучены брэксы составов, приведенных в табл. 3.

В лабораторных условиях были исследованы брэксы № 1 и № 2 на основе смеси марганцевого концентрата и пыли систем аспирации производства силикомарганца, а также состав № 3 с добавлением коксовой мелочи. В качестве связующего использовался портландцемент, бентонит применялся в качестве пластификатора.

При выборе состава брэксы № 3 были учтены особенности диссоциации оксидов марганца (табл. 4). Известно, что в присутствии углерода оксиды  $MnO_2$ ,  $Mn_2O_3$  и  $Mn_3O_4$  могут взаимодействовать как с твердым углеродом, так и с оксидом углерода  $CO$ .  $MnO$  взаимодействует только с твердым углеродом [5]. В случае марганцеворудных брикетов, содержащих угольную или коксовую мелочь, в процессе их нагрева содержащиеся в них оксиды марганца будут восстанавливаться. Однако этот процесс будет происходить не только за счет твердого углерода. Одновременно будут протекать процессы диссоциации оксидов и

восстановления высших оксидов марганца оксидом углерода.

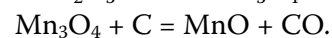
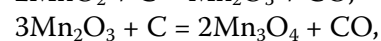
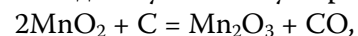
В условиях температур реальной плавки диссоциация идет до оксида  $MnO$ , который затем восстанавливается твердым углеродом по реакции



$$\Delta G_T^\circ = 196\,293 - 123T, \text{ Дж/моль},$$

где  $\Delta G_T^\circ$  – энергия Гиббса;  $T$  – температура, К.

В случае тесного контакта  $Mn$ -содержащих материалов в шихте с углеродом в брэксах восстановление высших оксидов может идти с участием углерода



Количество восстановителя – углерода в брэксе определяется двумя факторами. С одной стороны, более тесный контакт компонентов шихты положительно влияет на кинетику процессов восстановления. В таком случае рационально все необходимое количество восстановителя вносить в брэкс. Кроме того, наличие углерода в брэксе способствует росту электропроводности этой части шихты. С другой стороны, увеличенное содержание восстановителя в брэксе приводит к снижению его механической прочности. Возможное увеличение расхода восстановителя может быть компенсировано повышением других технико-экономических показателей, в частности повышением извлечения марганца в металл и снижением удельного расхода электроэнергии\*.

Методом термического анализа были определены превращения, которые могут происходить в 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 °C со скоростью 20 °C/мин. Соответствующие термограммы приведены на рис. 3.

Материалы брикетов № 1 и № 2 аналогичны по минеральному составу (см. рис. 3). Потери массы образцов № 1 и № 2 составили 12,7–11,38%. Эти потери массы связаны в основном с удалением конституционной влаги и влаги гидратов. В целом содержание воды в образцах № 1 и № 2 составляет 6–8%. При тем-

\*Детальному изучению взаимного действия этих факторов и поиску оптимального содержания углерода в брэксах будут посвящены последующие публикации.

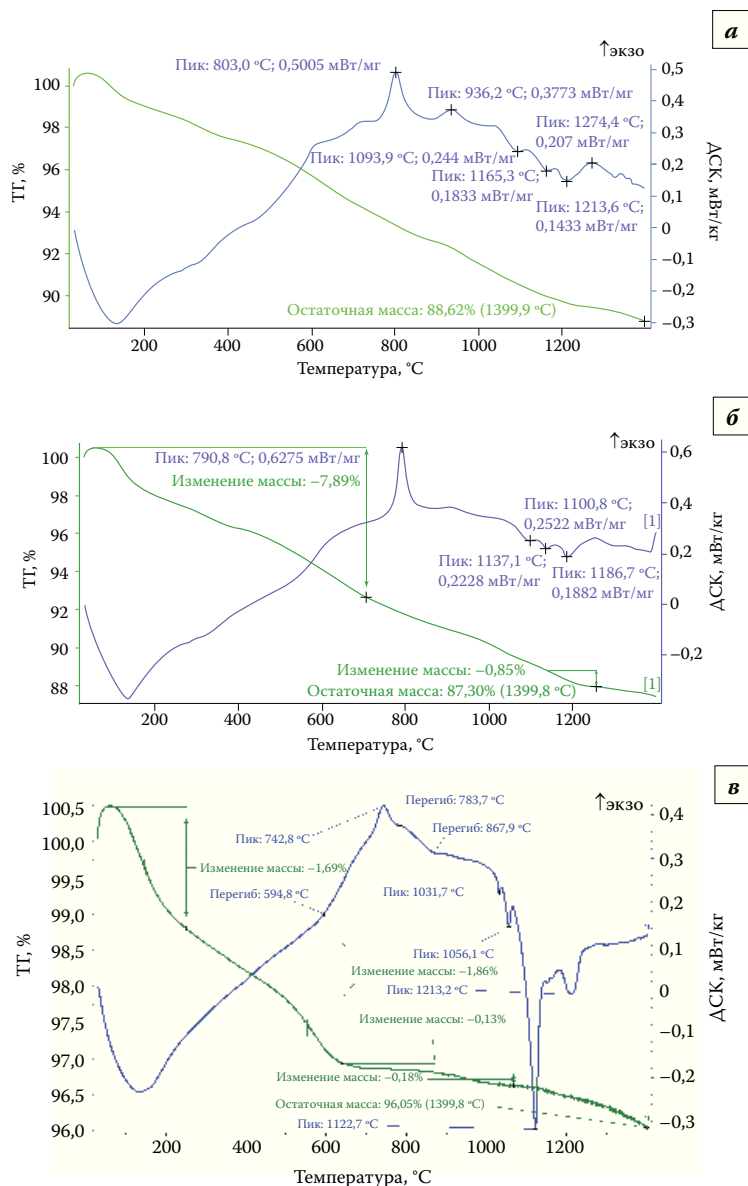
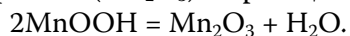


Рис. 3. Термограммы (ТГ) материалов: а – брэкса № 1; б – брэкса № 2; в – брэкса № 3

пературах выше 1000 °C начинается разложение карбонатов, которое заканчивается к 1400 °C. При температуре около 800 °C наблюдается ярко выраженный экзотермический эффект, связанный, по-видимому, с началом твердофазного взаимодействия в системе FeO–SiO<sub>2</sub>–CaO.

Из рис. 4 видно, что эндотермический пик в диапазоне 150–200 °C сопровождается потерей массы в 1,69%. Это связано с удалением сорбционной влаги из образца. В диапазоне 300–500 °C выраженных эндотермических пиков не наблюдается, но потеря массы при этом происходит. Это можно связать с «растянутым» восстановлением MnO<sub>2</sub> до Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. В этом же диапазоне происходит фазовое превращение манганита (MnOОН) в курнаит (Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) по реакции

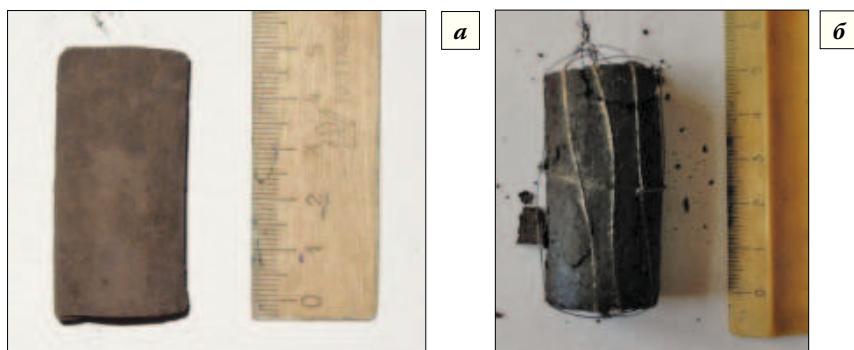
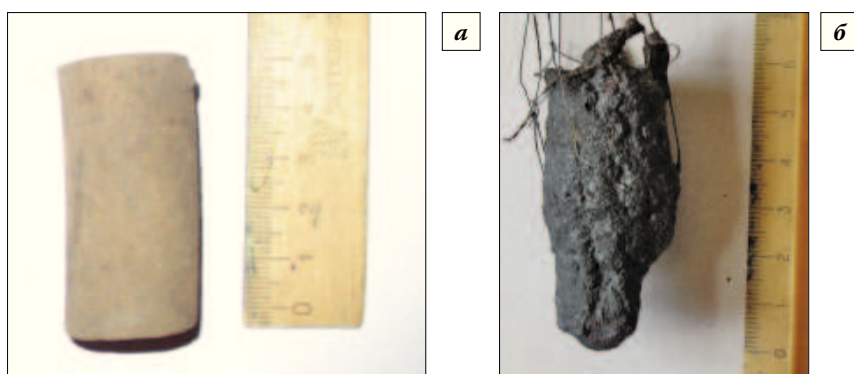


При 594,8 °C на кривой ДСК (дифференциальная сканирующая калориметрия) наблюдается перегиб, который также сопровождается потерей массы. Этот эндотермический эффект можно связать с эффектом восстановления низших оксидов марганца до Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub>. Экзотермический эффект с максимумом при 742,8 °C практически не сопровождается потерей массы, и его можно объяснить эффектами перекристаллизации или раскристаллизации аморфных фаз. Перегибы при 783,7 и 867,9 °C также не сопровождаются потерей массы, поэтому их нельзя связать с восстановлением марганца, и в этом диапазоне, согласно [6], не должны наблюдаться термические эффекты. По-видимому, здесь также имеют место эффекты структурных преобразований. Эндотермический эффект с максимумом при 1031,7 °C связан с восстановлением Mn<sub>3</sub>O<sub>4</sub> до MnO, поскольку он сопровождается потерей массы, а эффект при 1056,1 °C – с фазовым превращением в железосодержащей фазе. Эндотермический пик с максимумом при 1122,7 °C объясняется образованием карбида марганца Mn<sub>3</sub>C, углерод которого восстанавливает марганец из MnO.

Следовательно, термические эффекты, наблюдаемые при температурах 1122,7 и 1213,2 °C, связаны с фазовыми превращениями марганцевой составляющей брэксы.

Важным показателем, характеризующим металлургические свойства брэксов, является их термическая устойчивость. Этот параметр определяет поведение брэксов в условиях их последующей металлургической переработки (плавления, восстановления). Высокая термическая устойчивость брэксов улучшает показатели работы металлургических агрегатов. Термическая устойчивость брэксов проверялась следующим образом: опускали образец в печь, разогретую до 1200 и 1500 °C, и выдерживали в течение 5 мин. Из брэксов выпиливали образцы длиной 50 мм и в корзинке из вольфрамовой проволоки опускали в печь Таммана с воздушной атмосферой. До и после термической выдержки образцы взвешивали. Фотографии образцов брэксов № 1 и № 3 до и после термической выдержки приведены на рис. 4 и 5.

Результаты термических испытаний показали высокую термическую устойчивость всех без

Рис. 4. Образец брэкса № 1 до (а) и после (б) выдержки при  $t = 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ Рис. 5. Образец брэкса № 3 до (а) и после (б) выдержки при  $t = 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ 

исключения образцов брэксов. Образцы брэксов № 4 (см. табл. 3), изготовленных из отсевов силикомарганца, также выдержали 15-минутное пребывание в печи при  $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$  без разрушения и потери формы. При опускании в расплавленный шлак с температурой  $1580\text{ }^{\circ}\text{C}$  образцы расплавились. Время полного расплавления образца (длиной и диам. 25 мм) составило 10 мин. Результаты испытаний образца брэкса № 5 на основе коксовой мелочи приведены в работе [3]. В частности, было показано, что по содержанию связующего (5%) и по параметрам  $CSR$  (20%) и  $CRI$  (45,6%) эти брэксы существенно превосходят известные и промышленно производимые на валковых прессах коксовые брикеты известного производителя (содержание связующего 15%;  $CSR = 1,1\%$ ;  $CRI = 54,9\%$ ). Сопоставительные горячие и холодные барабанные пробы брэксов и таких брикетов показали следующие значения: холодная проба (доля фракции  $>6,3\text{ мм}$ ) – брэксы 75%, брикеты 63,6%; горячая проба (доля фракции  $> 3,15\text{ мм}$ ) – брэксы 74%, брикеты 71%.

Приведенные результаты показали, что образцы всех брэксов обладают достаточно высокой термостойкостью. Минералогический состав брэксов способствует образованию легкоплавких эвтектик, что предопределяет высокую скорость плавления брэксов. Все образцы брэксов имеют высокую хорошую термическую прочность

без предварительной сушки. Для проведения опытно-промышленной кампании на первом этапе были выбраны образцы состава № 1, полученные с минимальным расходом цемента (3%). Перед непосредственным изготовлением полной партии брэксов (2000 т) эти образцы были также испытаны в независимой лаборатории (L.ROBERTKIMBALL&ASSOCIATES, INC., Ebensburg, Pennsylvania, США). Для определения прочностных характеристик марганецсодержащих брэксов было отобрано две пробы данного вида шихтового материала. Прочность брэксы первой пробы составила  $12,0\text{ Н/мм}^2$ , а брэксы второй пробы –  $21,1\text{ Н/мм}^2$ .

Брэксы были изготовлены на предприятии в США, оснащенном экструдером Steele-75 со средней производительностью 53 т/ч. По-



Рис. 6. Выгрузка из баржи. Перевалки (порядка 20):  
экструдер > конвейеры > самосвал > штабеля > фронтальный погрузчик > грузовик > штабель > фронтальный погрузчик > бункер > грейфер > баржа > грейфер > бункер > конвейеры > самосвал > штабель > фронтальный погрузчик > хранилища завода > печь

ставка готовых брэксов на завод производилась водным путем. Перевозка от причала на открытый склад шихты завода производилась автотранспортом с последующей транспортной подачей в печные бункеры. Общее количество перегрузок от момента изготовления брэксов до их проплавки в промышленной рудотермической печи составило порядка 20 операций (рис. 6). При этом образовалось не более 10% мелочи (с размером частиц менее 6 мм).

Брэксы проплавлялись в промышленной рудотермической печи на ферросплавном предприятии в США (подробно результаты этой опытной кампании будут изложены в следующей публикации). Предварительные результаты были обобщены в работе [7]. Результаты опытно-промышленных плавок с высоким содержанием брэксов в рудной части шихты (до 50%) для выплавки силикомарганца показали значительное улучшение основных параметров печи (расход электроэнергии и кокса, извлечение марганца, производительность).

**Заключение.** Лабораторные исследования и опытно-промышленные кампании убедительно свидетельствуют о несомненной привлекательности жесткой экструзии для окускования природных и техногенных материалов и топлива с дальнейшим использованием брэксов в качестве существенной части шихты (до 50% рудной части) промышленных рудотермических печей. Полученные в крупномасштабном промышленном эксперименте результаты являются уникальными и ранее, при использовании традиционных способов брикетирования, не достигались. По всем

важнейшим параметрам процесса выплавки силикомарганца с использованием брэксов в шихте достигаются существенная экономия расхода электроэнергии, снижение расхода кокса, увеличение степени извлечения основного компонента без снижения производительности печи. С учетом низкой себестоимости изготовления брэксов (меньше 10 долл. США за тонну со связующим) и меньшего по сравнению с альтернативным окускованием расходом связующего (3%) можно сделать вывод о возможности значительного улучшения технико-экономических показателей процесса выплавки ферросплавов в целом.

**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. Бижанов А.М., Курунов И.Ф., Дуров Н.М., Нуштаев Д.В., Рыжов С.В. Механическая прочность брэкса. Часть 1 // *Металлург.* 2012. № 7. С. 32–35.
3. Курунов И.Ф., Бижанов А.М., Тихонов Д.Н., Мансурова Н.Р. Металлургические свойства брэксов // *Металлург.* 2012. № 6. С. 44–48.
4. Игревская Л.В. Тенденции развития никелевой промышленности. Мир и Россия. М. : Научный мир, 2009. 268 с.
5. Гасик М.И. Марганец. М. : Metallurgia, 1992. 608 с.
6. Иванова В.П. и др. Термический анализ. Л. : Недра, 1974. 400 с.
7. Steele R.B., Bizhanov A.M. Stiff Extrusion Agglomeration of Arc Furnace Dust and Ore Fines for Recovery at a Ferro Alloy Smelter: Proc. 32<sup>nd</sup> Biennial Conf. (New Orleans, Louisiana, September, 2011). Institute for Briquetting and Agglomeration. Vol. 32. P. 41–53.

**EXTRUSION BRIQUETTES (BREX) FOR THE PRODUCTION OF THE FERRO ALLOYS**

© **Bizhanov A.M.; Steele R.B.; Podgorodetskyi G.S., PhD.; Kurunov I.F., ScD, prof.; Dashevskiy V.Ya., ScD, prof.; Korovushkin V.V., ScD, prof.**

The results of the laboratory investigations as well as the full-scale industrial trials and the industrial utilization of the extrusion briquettes (brex) made of the anthropogenic and natural materials and fuels for the Ferro Alloys production are represented. The opportunity to decrease sufficiently power and coke consumption together with the increased recovery of the main component based on the briquetted charge has been demonstrated.

**Keywords:** extruded briquette (BREX); stiff vacuum extrusion; Steele Extruder; ferronickel; laterite nickel ore; ferrosilicomanganese; aspiration dust; electric ore smelting furnace.