

На правах рукописи



Бижанов Айтбер Махачевич

ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ТЕХНОЛОГИИ ПРОИЗВОДСТВА И
ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ БРИКЕТОВ С ЦЕЛЬЮ
ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИХ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В
ЭКСТРАКТИВНЫХ ПРОЦЕССАХ ЧЕРНОЙ МЕТАЛЛУРГИИ

Специальность 05.16.02 – «Металлургия черных, цветных и редких металлов»

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

МОСКВА, 2016 г.

Диссертационная работа выполнена на кафедре «Энергоэффективные и ресурсосберегающие промышленные технологии» ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС».

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор,
главный доменщик
ПАО «Новолипецкий металлургический комбинат»

Курунов Иван Филиппович

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, доцент,
заведующий кафедрой «Металлургия железа и сплавов»

Загайнов Сергей Александрович

ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

кандидат технических наук,
вице-президент Инжиниринга
Группы компаний «МетПром»

Лазуткин Александр Евгеньевич

Ведущая организация:

ОАО "Уральский институт металлов", г. Екатеринбург

Защита состоится **29 декабря 2016 г.** в 10.00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.132.02 на базе Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» по адресу: 119049, г. Москва, Ленинский проспект, д. 6, ауд. А-305.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на официальном сайте Национального исследовательского технологического университета «МИСиС» - <http://misis.ru>.

Отзывы на автореферат диссертации (в двух экземплярах, заверенных печатью учреждения) просьба направлять по адресу: 119049, г. Москва, Ленинский проспект, д. 4, Ученый Совет. Копии отзывов можно присылать на e-mail: misistlp@mail.ru.

Автореферат разослан «__» _____ 2016 года.

Учёный секретарь диссертационного совета Д 212.132.02,
кандидат технических наук, доцент

А.В. Колтыгин

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Производство чугуна, стали и ферросплавов сопровождается образованием значительного объема мелкодисперсных материалов с существенным содержанием железа. Необходимым условием для рециклинга таких природных и техногенных материалов в производство является их окускование. Исторически, первым промышленно освоенным способом окускования в черной металлургии было брикетирование. Однако его широкому коммерческому распространению препятствовали низкая производительность применявшихся для брикетирования технических средств и целый ряд технологических ограничений, связанных с необходимостью предварительной сушки шихтовых материалов, тепло-влажностной обработки сырых брикетов, с ограничениями на применение некоторых типов гидратируемых связующих и т.д. Эти обстоятельства обусловили быстрое широкое распространение изобретенных в начале 20 века таких новых высокопроизводительных способов окускования железорудной мелочи и железорудных концентратов, как агломерация на конвейерных машинах и производство окатышей. Эти новые способы окускования включали высокотемпературную обработку железорудных материалов, связанную с расходом топлива и неизбежными выбросами газов и пыли с очевидными экологическими последствиями. Понятно, что потенциально технологии холодного, безобжигового брикетирования, при условии преодоления отмеченных недостатков, могли бы оказаться более предпочтительными экономически и экологически.

В работе, в качестве возможной альтернативы существующим технологиям холодного брикетирования, основными из которых, несомненно, являются валковое брикетирование и вибропрессование, предлагается технология брикетирования, основанная на жесткой вакуумной экструзии, применявшаяся до недавнего времени исключительно для производства

керамического кирпича. Прикладываемое при этом усилие прессы не превышает 4,5 Мпа (против 20 – 100 Мпа в валковом прессе), а влажность – в диапазоне 12-18%, что исключает необходимость предварительной сушки материалов. Производительность экструдеров такого типа существенно превосходит производительности валковых и вибрационных прессов и достигает 100 тонн в час. Прочность сырых продуктов экструзии позволяет значительно упростить их складирование и транспортировку.

Металлургические свойства брикетов, получаемых по технологии жесткой вакуумной экструзии из сырьевых материалов для экстрактивных процессов черной металлургии, ранее металлургической наукой не изучались. Для наименования таких брикетов автором предложен и официально зарегистрирован термин «БРЭКС» (брикет экструзии) [1]. Пробел в знании о физико-механических свойствах брэксов (плотность, пористость, прочность) и о характере их поведения при нагреве в восстановительной атмосфере делал практически невозможным осознанное использование указанных выше преимуществ технологии жесткой вакуумной экструзии.

В настоящей работе большое внимание уделено изучению влияния специфики нового способа окускования дисперсных железорудных материалов и техногенного металлургического сырья на физико-механические и металлургические свойства брэксов.

В работе изучены:

- влияние особенностей жесткой вакуумной экструзии на физико-механические свойства брэксов;
- поведение брэксов при нагреве с градиентом 500 °С в час в восстановительной атмосфере, при использовании в шихте руднотермической печи, выплавляющей силикомарганец, в процессе металлизации промышленном реакторе прямого получения железа (процесс Midrex);
- многолетний опыт работы малой доменной печи с применением в шихте до 100 % брэксов;

– возможность и перспективы широкомасштабного применения брэксов в доменном производстве в качестве одного из основных компонентов шихты.

Цель работы. Изучить возможности применения технологии жесткой вакуумной экструзии для промышленного брикетирования мелкодисперсных природных и техногенных материалов черной металлургии и определить достижимые пределы использования брэксов в качестве компонентов шихты доменных, руднотермических печей и реакторов прямого получения железа, уточнить механизм восстановления брэксов, с учетом их состава и типа применяемого связующего, в условия доменной печи, руднотермической печи и промышленного реактора прямого получения железа.

Научная новизна. В диссертационной работе предметом научной новизны являются следующее:

1. Впервые получены зависимости физико-механических свойства брэксов от специфических условий жёсткой вакуумной экструзии.

2. Впервые установлен экстремальный характер изменения прочности брэксов на цементно-бентонитовом связующем в процессе их упрочняющего вылеживания.

3. Разработана методика и определены пределы оптимального содержания углерода в самовосстанавливающихся брэксах из природного и техногенного сырья, предназначенных для применения в шихте доменных печей.

4. Впервые показано, что горячая прочность брэксов из магнетитового железорудного концентрата и коксовой мелочи (стандарт ISO 4696, показатель $RDI_{+6,3}$) значительно превышает горячую прочность офлюсованных агломератов с основностью (B4) 1,2 1,4 и 1,6.

5. Предложено объяснение механизма сохранения прочности и целостности брэксов в процессе их восстановления в доменной печи, руднотермической печи и в реакторе прямого получения железа (процесс Midrex).

Фактический материал. Объект диссертационного исследования – лабораторные и промышленные брэксы на основе природных и техногенных сырьевых материалов доменного, ферросплавного производств и техногенных материалов мини-заводов с технологической схемой: металлизация покупных окисленных окатышей – получение ГБЖ, выплавка электростали–непрерывная разливка – производство сортового проката. Предмет исследования – образцы брэксов, полученные с использованием лабораторного экструдерного комплекса, в промышленной линии брикетирования и извлеченные после восстановления в реакторе прямого получения железа.

Работа выполнена на кафедре «Энергоэффективных и ресурсосберегающих промышленных технологий» Национального исследовательского технологического университета «МИСиС».

Практическая значимость.

Подтверждена возможность использования технологии жесткой вакуумной экструзии для эффективного окускования природных и техногенных материалов черной металлургии с получением брэксов с высокими металлургическими свойствами и регулируемым составом и размерами.

Для целей проектирования линий жесткой вакуумной экструзии разработаны рекомендации по подготовке шихтовых материалов для окускования методом жесткой вакуумной экструзии и по срокам набора прочности, учитывающие особенности применяемых материалов и связующих, тип металлургических печей и реакторов. Рекомендации использованы при строительстве ряда промышленных линий жесткой вакуумной экструзии в России, СНГ и за рубежом.

Предложены составы брэксов и связующих материалов для брикетирования природных и техногенных материалов доменного, ферросплавного производства и процессов получения прямого железа и

предложена методика определения оптимального содержания углерода в брэксах.

Публикации. По теме диссертации опубликована 21 научная работа, из которых 14 статей в журналах входящих в перечень ВАК Минобрнауки РФ, 14 статей переведены на английский язык, 3 статьи опубликованы в журнале «International ISIJ» (Япония). Получено 9 патентов Российской Федерации на составы брэксов и способы их получения и применения.

Достоверность полученных результатов. Достоверность полученных результатов подтверждается использованием комплекса современных средств и методик проведения исследований, проверкой полученных результатов с использованием различных методов, успешной промышленной проверкой результатов теоретических и экспериментальных исследований. Текст диссертации и автореферат проверены на отсутствие плагиата с помощью программы «Антиплагиат» (<http://antiplagiat.ru>).

Апробация работы. Основные результаты работы доложены и обсуждены на следующих конференциях и совещаниях:

– конгресс «Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований» (Техноген 2014, Екатеринбург).

– 6th International Congress on the Science and Technology of Ironmaking – ICSTI, 42nd International Meeting on Ironmaking and 13th International Symposium on Iron Ore, October 14th to 18th, 2012, Rio de Janeiro, RJ, Brazil.

– Международный форум «Инженерные системы», Москва, 10 – 11 апреля 2012 г.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных литературных источников из 113 наименований. Общий объем работы составляет 152 страницы, в том числе 82 рисунков и 14 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе приведены результаты сравнения основных промышленных технологий брикетирования и сформулированы цели исследования.

Проанализированы основные преимущества и недостатки используемых в промышленных масштабах, технологий брикетирования с точки зрения их влияния на металлургические свойства брикетов. Изучен и проанализирован опыт применения в металлургии экструзионного окускования.

По результатам аналитического обзора литературных данных сформулированы следующие задачи настоящего исследования:

- изучить влияние особенностей технологии жесткой вакуумной экструзии на физико-механические свойства получаемых брэксов и разработать рекомендации по оптимизации их компонентного состава и формы.

- изучить возможности применения технологии жесткой вакуумной экструзии для промышленного брикетирования мелкодисперсных природных и техногенных материалов черной металлургии;

- на основе изучения микроструктуры, фазового состава и минералогической структуры сырых и восстановленных брэксов, и в промышленных экспериментах определить возможность, достижимые и оптимальные пределы применения брэксов в качестве компонентов шихты в процессах экстрактивной металлургии черных металлов.

- оценить эффективность и перспективу применения в доменном производстве железоуглеродсодержащих брэксов из природного сырья в качестве частичной или полной замены агломерату.

Во второй главе приведены методы исследований, используемые в работе.

Лабораторные образцы брэксов изготавливались на компьютеризированном экструдерном комплексе, моделирующем работу линии жесткой вакуумной экструзии. Брэксы для промышленных испытаний

производились на действующих промышленных линиях жесткой вакуумной экструзии.

Восстановимость образцов брэксов определяли с использованием стандартной методики (ГОСТ 28657-90 Руды железные). Определение горячей прочности железорудных материалов во вращающемся барабане после низкотемпературного восстановления осуществляли по стандарту ISO 4696-1:1998 и ISO 4696-2:1998. Для определения температур фазовых превращений в образцах брэксов применяли синхронный термический анализ. Для исследования микроструктурных характеристик сырых и восстановленных брэксов применялись оптическая и электронная микроскопия, рентгеноструктурный анализ, мессбауэровская спектроскопия и компьютерная томография. Впервые для изучения пористости и морфологии брэксов применялась методика, основанная на ПО «STIMAN» (МГУ) [2].

Для математического моделирования процессов изготовления, укладки, хранения и испытаний брэксов на прочность применялся вычислительный пакет Simulia Abaqus [3], основанный на методе конечных элементов.

Третья глава посвящена исследованию особенностей жесткой вакуумной экструзии как способа окускования природного и техногенного сырья черной металлургии.

Одна из основных особенностей жесткой вакуумной экструзии заключается в применении высокого сдвигового напряжения, как в процессе подготовки шихты, так и самого экструзионного окускования с использованием шнекового нагнетания массы. В результате воздействия сдвигового напряжения изменяется не только гранулометрический состав брикетируемого материала, но и характер реакции на внешнее механическое воздействие готового брэкса. На рисунке 1 показаны результаты испытания на прочность при раскалывании брэксов, изготовленных из шихты (коксовой мелочи, 95% и портландцемента, 5%), измельченной тремя различными способами: брэкс №1 – из материала, измельченного на валковой дробилке, брэкс №2 – из материала, полученного

двойным продавливанием через протирочную фильеру экструдера и брэкс №3 – из материала, измельченного молотковой мельницей.

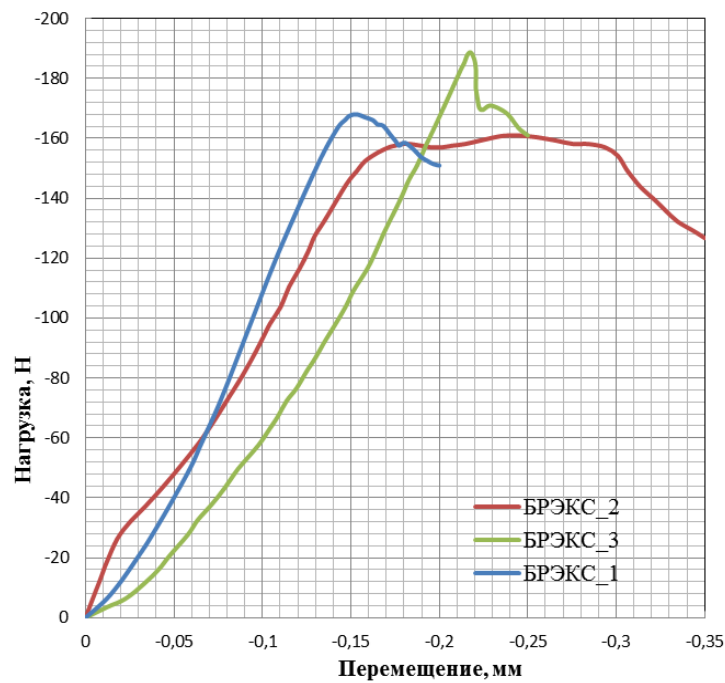


Рисунок 1– График «нагрузка-перемещение» при испытании брэксов на прочность на растяжение при раскалывании

Видно, что характер реакции на раскалывающее усилие брэкса №2 принципиально отличен от такового для других брэксов и является вязко-пластичным, в отличие от хрупкого характера разрушения брэксов №1 и №3. Результаты этого исследования позволили использовать эффект воздействия сдвигового напряжения для подготовки смеси к гомогенизации смеси перед ее окускованием методом жесткой вакуумной экструзии. Гомогенизация заключается в предварительном замачивании формуемой смеси с добавлением пластификатора и последующем вылеживании такой смеси материала в течение некоторого времени перед дальнейшей переработкой. Этот способ позволяет достичь высокой степени однородности смеси для последующего формования. В ряде случаев механическая прочность брэксов может существенно возрастать. Так, например для брэксов на основе марганецсодержащих материалов, чьи

компонентные составы приведены в таблице 1, применение 4-х часовой гомогенизации брикетируемой смеси, предварительно продавленной через протирачную фильеру, привело к росту прочности на сжатие: брэкса №1 – на 14,2%, брэкса №2 – 7,62%, и брэкса №3 – на 54,5%.

Таблица 1 – Компонентный состав брэксов

Составы брэксов	№1	№2	№3
Марганцеворудный концентрат	80	66	56
Пыль аспирации	14	28	38
цемент	5	5	5
бентонит	1	1	1

Исследование структуры брэкса №2 в вариантах с гомогенизацией смеси и без нее методом электронной микроскопии позволило выявить различие в структуре распределения и в размерах пор. На рисунке 2 представлена структура брэкса №2 в двух вариантах изготовления.

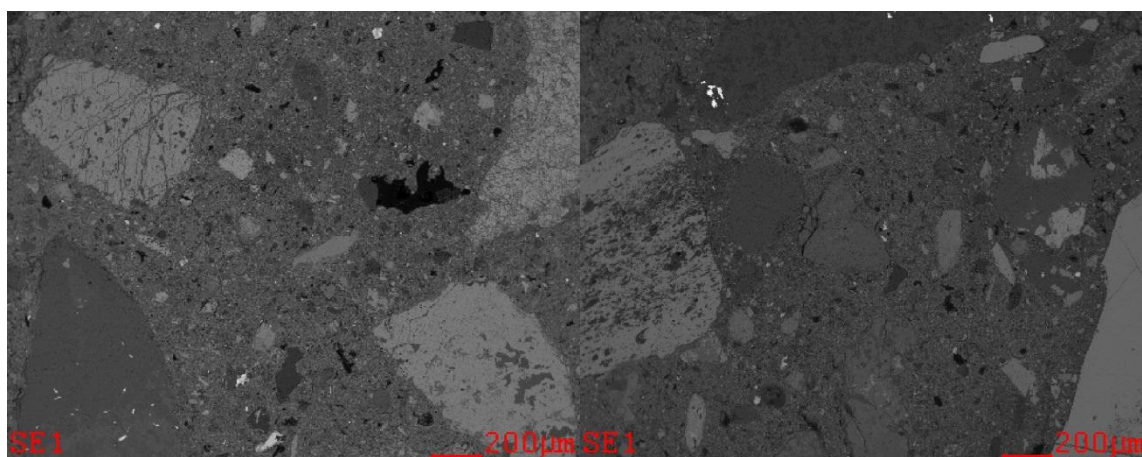


Рисунок 2 – Сканирующая электронная микроскопия структуры брэкса №2.
 Слева – без гомогенизации; справа – с гомогенизацией в течение 4 часов после продавливания через протирачную пластину.
 Поры – области черного цвета

Видно, что размер пор существенно меньше в брэксе, изготовленном из предварительно гомогенизированной шихты.

Важной особенностью жесткой вакуумной экструзии является длина сырых брэксов на выходе из фильеры экструдера, могущая достигать значений, многократно превышающих величину их диаметра. Опыт эксплуатации линий жесткой вакуумной экструзии показал, что в процессе транспортировки и складирования, продолговатые брэксы спонтанно разламываются на изоморфные фрагменты с длинами от 1 до 3 диаметров. Дело в том, что при выходе из экструдера продолговатый брэкс прогибается под действие собственного веса, образуя тем самым, зоны концентрации напряжений, по которым впоследствии и происходит его разламывание. Процесс разламывания продолговатых брэксов был удовлетворительно моделирован нами с помощью пакета Simulia Abaqus.

Жесткое экструзионное окускование, в отличие от альтернативных способов брикетирования, практически лишено ограничений на форму сечения и на размер брикетов. Брэксам может быть придана практически любая форма простым изменением формы отверстия фильеры. Минимальный размер брэкса сопоставим с размером окатышей. Было показано, что придание брэксам овального сечения приводит к различию в величинах прочности на раскалывание в зависимости от направления приложения усилия. Большим значениям соответствует приложение раскалывающего усилия вдоль малой оси овала.

В соответствии с ГОСТ 25471-82 для определения прочности на сбрасывание железных руд, агломератов и окатышей применяют трехкратное сбрасывание с высоты 2 метров. Испытание по этой методике рудошламовых брэксов (железорудный концентрат – 27%, шламы – 34%, пыли – 32%, портландцемент – 6%, бентонит – 1%) показало, что образование мелочи не превысило 2,7% после 48- часовой выдержки и без предварительной гомогенизации формуемой смеси, в то время как после предварительной гомогенизации доля образования мелочи (фракция 0–5 мм) составила 2,1%. При

5-кратном сбросе эти же величины составили – для смеси без гомогенизации 5,6% и 3,7% для брэксов, изготовленных из гомогенизированной смеси (рисунок 3). Эти результаты были получены спустя 48 часов после изготовления брэксов. Известно, что набор прочности изделиями на цементных вяжущих происходит при тепловой обработке в течение 16–20 часов или при естественном твердении (при температуре не менее 20 °С) в течение 7 суток [4]. Незначительное образование мелочи при испытаниях брэксов на 3-х кратное сбрасывание с высоты 2-х метров спустя 48 часов вылеживания объясняется вязко-пластичным характером их разрушения в первые 4 суток вылеживания.



Рисунок 3 – Рассев брэксов (48 часов вылеживания) после 5-кратного сбрасывания с 2-х метровой высоты

В ряде случаев окускования смеси из частиц, значительно различающихся своими средними размерами, может иметь место явление миграции мелкой фракции к поверхности брэкса. Нами была предложена гидродинамическая модель, удовлетворительно объясняющая возможность такой миграции.

Таким образом, применение технологии жесткой вакуумной экструзии приводит к появлению принципиально новых физико-механических свойств окускованных продуктов, по сравнению с валковыми и вибропрессовальными брикетами, что обуславливает простоту и эффективность их производства, складирования и хранения.

В четвертой главе приведены результаты исследования свойств, оптимизации состава и анализа эффективности и перспектив применения брэксов в доменном производстве.

На основе результатов изучения металлургических свойств двух типов лабораторных брэксов, шламовых и рудококсовых (таблица 2), по методике определения восстановимости по ГОСТ 28657-90 и ГОСТ 21707-76 было установлено, что:

– благодаря прочности цементной связки и отсутствию дезинтеграции рудных частиц при низкотемпературном восстановлении горячая прочность брэксов из магнетитового железорудного концентрата и коксовой мелочи (показатель $RDI_{+6,3}$) значительно превышает горячую прочность агломератов с основностью (B4) 1,2 1,4 и 1,6.

– существует оптимальное содержание углерода в таких брэксах, отвечающее стехиометрическому соотношению $C/O = 0,3-0,5$ по отношению к кислороду вюстита, который остается в брэксах после восстановления высших оксидов железа до вюстита. Избыточный углерод частиц коксовой мелочи или угля по сравнению с этим соотношением может оставаться невостребованным в шлаке, образуемом из пустой породы компонентов брэкса, и повышать его вязкость, ухудшая показатели работы печи.

Таблица 2 – Компонентный состав шламовых и рудококсовых брэксов

Компоненты брэксов	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	-
Шлам конвертерный	36,4	-
Железорудный концентрат		76,6

Минералогическое исследование структуры сырых и восстановленных брэксов проводились на полированных шлифах в отраженном свете. Микроструктура восстановленного образца рудококсового брэкса (рисунок 4) представлена системой из спеченных между собой зерен металлического железа и частично раскристаллизованной стеклофазы железооливинового состава, а также включениями не прореагировавшей коксовой мелочи. Носителем прочности частично восстановленного рудококсового брэкса является не только железосиликатная фаза, но и каркас из металлического железа, образовавшийся из спекшихся зерен металла в периферийной части брэкса.

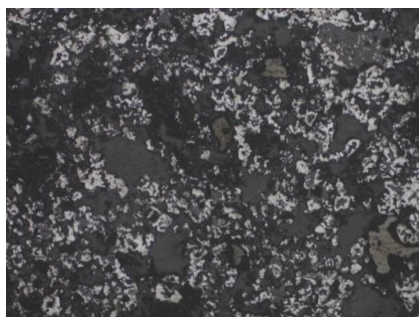


Рисунок 4 – Микроструктура восстановленного брэкса №4: отраженный свет, увеличение $\times 100$

Структура восстановленного шламового брэкса представлена разрозненными мелкими зернами металлического железа, вюститита, кокса и силикатной фазой. Явно выраженный металлический каркас, наблюдаемый в восстановленном брэксе из концентрата (рисунок 5), в поверхностном слое шламового брэкса отсутствует. Это связано с пониженным содержанием железа в шламовом брэксе и с более высоким содержанием дисперсной коксовой мелочи и, как следствие, более высоким содержанием остаточного углерода. Носителем прочности такого брэкса, как и рудококсового брэкса, является силикатная фаза. Можно сделать заключение, что сохранение целостности шламового брэкса при его нагреве в восстановительной атмосфере обеспечивается образованием матрицы из железосиликатной фазы.

В брэксе из железорудного концентрата и коксовой мелочи, благодаря более высокой концентрации железа, помимо железосиликатной матрицы сохранению целостности способствует также образование в процессе газового восстановления поверхностного каркаса из металлического железа.

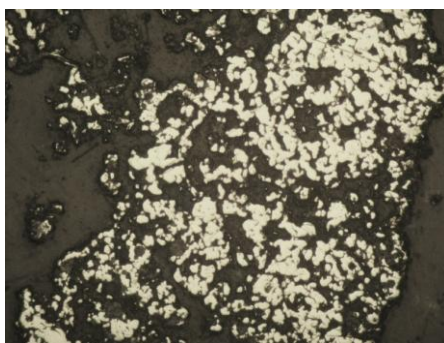


Рисунок 5 – Микроструктура восстановленного рудококсового брэкса на основе гидроруды

В центральной части брэкса из железорудного концентрата металлического железа не наблюдали.

Полученные результаты легли в основу проектирования линии жесткой экструзии на предприятии Suraj PL при участии автора.

На следующем этапе нами были исследованы физико-химические свойства промышленных брэксов следующего компонентного состава: по 42,5% массы брэкса составляли конвертерный шлам (LD) и колошниковая пыль, 10% – железорудная мелочь, связующее – 5% массы брэкса (смесь портландцемента (80%) и бентонита (20%)). Было установлено наличие локального максимума прочности промышленного брэкса на цементно-бентонитовом связующем спустя 48 часов вылеживания в естественных условиях (рисунок 6). При этом в течение первых четырех суток вылеживания брэксы демонстрируют вязко-пластичный характер разрушения.

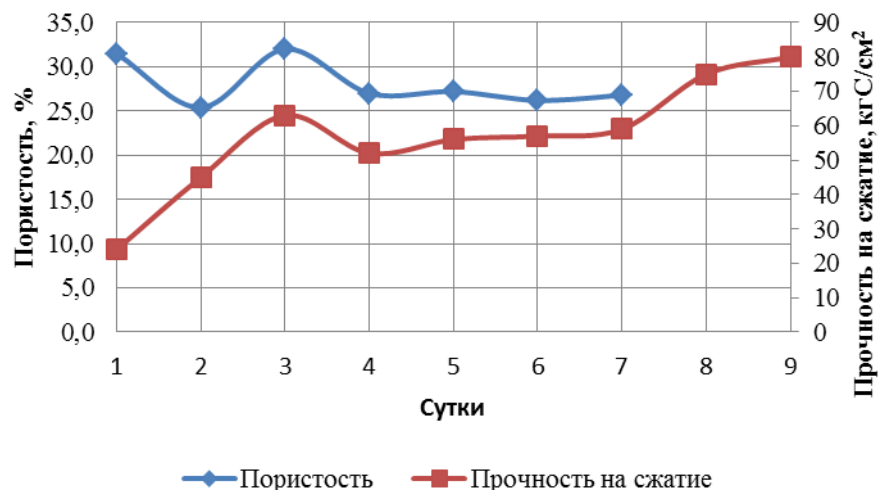


Рисунок 6 – Изменение прочности и пористости брэкса во время упрочняющего вылеживания

Обеспечение горячей прочности промышленного брэкса на основе доменного и конвертерного шлама с добавлением железорудной мелочи и с комбинированным цементно-бентонитовым связующим, после утраты связующей способности цементной связки, достигается за счет образования, еще при газовом восстановлении, поверхностной металлической оболочки-каркаса и за счет образования железосиликатной матрицы, из которой при температурах выше 1100 °С восстанавливается железо за счет углерода коксовой мелочи.

Малые доменные печи могут эффективно работать на шихте, рудная часть которой состоит на 100 % из брэксов.

Работа малой доменной печи на моношихте из 100 % брэксов, изготавливаемых из смеси металлургических отходов и железорудной мелочи демонстрирует уникально низкий расход кокса (490–500 кг/т) при температуре дутья 1000 °С и содержании железа в офлюсованной шихте 45,5 %.

Возможности и эффективность широкомасштабного применения в доменном производстве нового компонента доменной шихты – брэксов, оценена путем математического моделирования доменной плавки с применением математической модели доменного процесса ДОМНА, разработанной в МИСиС Куруновым И.Ф. и Яценко С.Б.. Моделировали

доменную плавку в доменной печи объемом 4297 м³, работающей в условиях ПАО «НЛМК». Учитывая основность брэксов, уровень которой (0,5–0,6) формируется долями связующего и угля, моделировали плавку на шихте, состоящей из 3-х компонентов – агломерата, окатышей и брэксов. Основность агломерата определяется исходя из принимаемой доли замены агломерата брэксами и их основностью. При замене 50 % агломерата в шихте доменной печи брэксами, основность агломерата должна быть в пределах 2,8–3,2, что отвечает более высокому уровню холодной и горячей прочности агломерата по сравнению с агломератом с основностью в диапазоне 1,5–1,7 в котором находится агломерат, производимый в ПАО «НЛМК» [5]. Содержание угля в брэксах определили по методике, разработанной на основе результатов изучения структурного состава брэксов после их нагрева в восстановительной атмосфере до 1400 °С, когда после достижения практически полной металлизации в структуре брэкса оставался неизрасходованные частицы коксовой мелочи из-за ее избыточного содержания в шихте для брикетирования. Разработанная методика определения оптимального содержания углерода в брэксе основана на анализе показателей интенсивно работающих доменных печей с высоким расходом вдуваемого природного газа, в которых степень прямого восстановления железа колеблется в относительно высоких (30–50 %) пределах [6,7].

С учетом этого расход углеродсодержащего материала в шихте для брикетирования рассчитывается исходя из стехиометрического соотношения кислорода и железа в брэксе (O/C) ко времени его прихода в зону когезии, где температура превышает 1100 °С и восстановление идет только с участием твердого углерода. Учитывается также содержание углерода в угле или другом углеродсодержащем материале в долях единицы (C_y), общее содержание железа в железорудном материале ($Fe_{общ}$), принимаемая степень окисленности железа в этом материале ($Y = O/Fe$) при приходе брэксов в зону когезии и % смеси

цемент + бентонит (Ц) в шихте для брикетирования. Последовательность расчета процентного содержания угля в шихте для брикетирования (У) следующая:

1. Расход угля на 100 кг концентрата:

$$M_y = Fe_{\text{общ}} \cdot Y \cdot 12/56 \cdot C_y, \text{ кг/100 кг концентрата};$$

2. Доля угля в смеси уголь+концентрат:

$$D_y = M_y / (100 + M_y);$$

3. Содержание угля в шихте для брикетирования:

$$Y = (100 - Ц) \cdot D_y.$$

Для моделирования доменной плавки использовали расчетные составы агломератов с основностью 1,70 и 3,02 и состав брэксов из концентрата СГОК, доля углерода в котором рассчитана по приведенной выше методике.

Результаты показали, что благодаря углероду, содержащемуся в брэксах на минимальном уровне его оптимального состава, рассчитанного по разработанной методике, расход кокса на выплавку чугуна сокращается по сравнению с базовым вариантом на 10 %. При работе с вдуванием ПУТ работа печи с брэксами позволяет достичь расхода кокса 284 кг/т при вдувании ПУТ всего 160 кг/т.

В отличие от производства агломерата и окатышей, производство брэксов является экологически чистым и полностью безотходным, не имеющим ни газообразных, ни твердых выбросов. Замена 50 % производства агломерата производством брэксов позволит сократить пылевые и газовые выбросы аглофабрики на 50 %.

В пятой главе приведены результаты опытно-промышленных испытаний применения брэксов в качестве компонентов шихты руднотермической печи и реактора прямого получения железа (процесс Midrex).

Были изучены физико-механические свойства и поведение при нагреве брэксов в качестве компонентов шихты для выплавки силикомарганца (таблица 3).

Таблица 3 – Компонентный состав брэксов для выплавки силикомарганца

Составы брэксов	№ 1	№ 2	№3
Марганцеворудный концентрат	47,6	66,7	56
Коксовая мелочь	-	-	15
Пыль аспирации	47,6	28,6	24
Цемент	4,8	4,7	5

В качестве компонента шихты руднотермической печи был выбран брэкс состава №2. Образцы брэкса проявили высокую холодную прочность (до 291 кгс/см²), пористость (18,5 %), термостойкость и горячую прочность.

Изучение фазового состава брэксов (рисунок 7) позволило установить, что горячая прочность брэксов обеспечивается до 750–900 °С цементным связующим, в диапазоне до 1250 °С – плотностью силикатной фазы, а с 1251 °С – легкоплавкими эвтектиками, создающими силикатную и силикатно-оксидную связку.

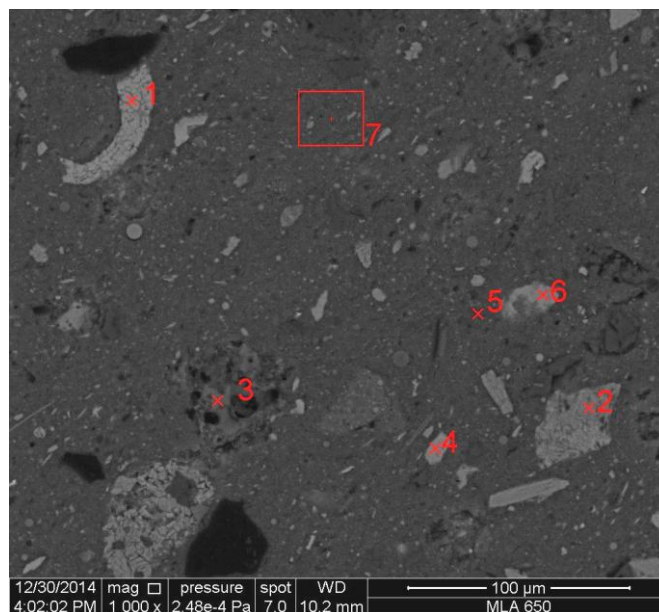


Рисунок 7 – Изображение структуры брэкса №2 в обратно рассеянных электронах. Цифры – точки снятия спектра (1– пиролюзит, 2– гаусманит, 3– диопсид, 4– фаялит, 5– муллит, 6– пиролюзит, 7–твердый раствор $\text{Ca}_2\text{SiO}_4\text{-Mn}_2\text{SiO}_4$)

По рекомендациям автора были изготовлены 2 тысячи тонн брэксов этого состава на промышленной линии жесткой вакуумной экструзии, которые были затем проплавлены в режиме опытной кампании в промышленной руднотермической печи мощностью 27 МВА и с производительность печи – 85 т/сут. Доля брэксов в рудной части шихты руднотермических печей достигла максимального значения 40 % и могла бы быть увеличена при условии наличия достаточного запаса брэксов.

Результаты показали, что кампания опытно-промышленных плавов с использованием брэксов в шихте промышленной руднотермической печи завершилась успешно, продемонстрировав высокую эффективность использования брикетов экструзии в процессе выплавки марганцевых сплавов. Замещение существенной части марганцевой руды в шихте брэксами на основе рудной мелочи и пыли аспирации привело к улучшению технико-экономических показателей процесса в целом. Сама опытно-промышленная кампания прошла без видимых изменений технологического процесса: печь работала ровно, с постоянной токовой нагрузкой, выпуск расплава производился по графику, существенных изменений химического состава металла и шлака не наблюдалось, газопроницаемость колошника печи улучшилась. Удельный расход электроэнергии в опытный период значительно снизился. В базовый период расход электроэнергии на 1 т сплава составлял 4091 кВт·ч. При подаче в рудную часть шихты 40 % марганецсодержащих брэксов удельный расход электроэнергии снизился до 3727 кВт·ч на 1 т сплава. Положительным фактором проведенной кампании стало увеличение доли извлечения из рудной части шихты ведущего компонента – марганца. Если в сравнительном периоде работы печи без брэксов извлечение марганца из рудной части шихты составляло в среднем 80%, то при использовании в рудной части шихты 30% брэксов извлечение марганца достигало 83,5%. При работе с 40% брэксов в рудной части шихты расход кокса составил 0,404 т/б.т. против 0,432 т/б.т. в базовый период.

Результаты опытно-промышленной кампании были учтены при принятии решения о строительстве и использованы при проектировании линий жесткой вакуумной экструзии на ОАО «Челябинский электрометаллургический комбинат», АО «Транснациональная компания «Казхром» в г.Актобе и на предприятии компании Assmang (ЮАР) в Малайзии.

Во второй части главы приводятся результаты использования брэксов в шихте промышленного реактора прямого получения железа (процесс Midrex). Были изучены физико-механические свойства и поведение в восстановительной атмосфере брэксов трех составов, отличавшихся лишь типом использованного связующего (таблица 4).

Таблица 4 – Компонентный состав брэксов для процесса Midrex.

Компоненты шихты	02–01	02–02	02–03
Отсев окатышей	50,0	50,0	50,0
Шлам	25,0	25,0	25,0
Окалина	15,0	15,0	15,0
Пыль ЭСПЦ	5,0	4,75	5,0
Гашеная известь	5,0	-	-
Портландцемент	-	5,0	-
Магнезиальное связующее	-	-	5,0
Бентонит	-	0,25	-

Благодаря наличию так называемой «холодной выгрузки» в реакторе, удалось изучить состояние и свойства брэксов после извлечения из проницаемых для газа-восстановителя и деформируемых стальных пакетов по завершении процесса (рисунок 8). Наибольшую целостность и степень металлизации (96,71%) продемонстрировали брэксы на магнезиальном связующем (на основе гептагидрата сульфата магния – $MgSO_4 \cdot 7H_2O$).



Рисунок 8 – Сырые (вверху слева) и восстановленные брэксы после извлечения из стальных пакетов

Результаты изучения поведения брэксов при нагреве в восстановительной атмосфере в промышленном реакторе процесса Midrex показывают, 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. Было установлено, что:

1. Имеет место различие в характере изменения пористости исходных и восстановленных брэксов в зависимости от типа применяемого связующего. В брэксах на магниальном связующем, сохранивших свою прочность и не образовавших мелочи, процесс металлизации сопровождался образованием металлического каркаса с исчезновением мелких пор и увеличением размеров крупных пор.

2. 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».

3. 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 СО и Н₂ в получаемом газе. Именно этот параметр и будет определять допустимое содержание таких брэксов в шихте печи металлизации.

РЕКОМЕНДАЦИИ

На основании проведенных исследований сформированы следующие рекомендации для работы линий жесткой вакуумной экструзии:

1. Для подготовки брикетируемой шихты к гомогенизации целесообразно применять ее предварительное продавливание через протирачную фильеру экструдера.

2. В состав шихты брэксов из техногенного сырья с невысоким содержанием железа необходимо включать природные или техногенные компоненты с высоким содержанием железа.

3. Содержание углерода в брэксах для доменной плавки, вносимое углеродсодержащими компонентами шихты брэксов, не должно превышать оптимальные пределы содержания углерода более, чем на 5 – 10 %.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Установлен особый характер набора прочности брэксов на цементно-бентонитовом связующем, приводящий к наличию локального максимума прочности на сжатие спустя 48 часов упрочняющего вылеживания;

2. Внедрено в практику жесткой вакуумной экструзии использование экструдера с протирачной фильерой для подготовки брикетируемой шихты к гомогенизации;

3. Установлено, что брикетирование по технологии жесткой вакуумной экструзии является конкурентоспособной технологией окускования, могущей служить частичной или полной заменой агломерации;

4. Разработана методика расчета содержания углеродсодержащего компонента шихты брэксов, позволяющая обеспечивать оптимальное содержание углерода в брэксах в зависимости от химического состава всех компонентов шихты.

5. 3-х летний опыт работы малой доменной печи продемонстрировал возможность и эффективность доменной плавки на 100% брэксов в шихте.

6. Опытно-промышленными экспериментами показана возможность достижения высоких значений содержания брэксов в рудной части руднотермических печей.

7. Показана возможность достижения высоких степеней металлизации брэксов на магнизиальном связующем в реакторе прямого получения железа в процессе Midrex.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО МАТЕРИАЛАМ ДИССЕРТАЦИИ

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. и др. Исследование механической прочности брэкса. Часть 1 // *Металлург.* 2012. № 7. С. 32–35
3. Бижанов А.М., Курунов И.Ф., Дуров Н.М. и др. Исследование механической прочности брэкса. Часть 2 // *Металлург.* 2012. № 10. С. 36–40
4. Курунов И.Ф., Бижанов А.М., Тихонов Д.Н., Мансурова Н.Р. Металлургические свойства брэксов // *Металлург.* 2012. № 6. С. 44–48

5. Бижанов А.М., Подгородецкий Г.С. и др. Брикетты экструзии (брэкссы) для производства ферросплавов // *Металлург*. 2012. № 12. С. 52–57
6. Бижанов А.М., Курунов И.Ф. и др. Исследование высокотемпературного восстановления рудоугольных брикетов экструзии (брэкссов).//*Металлург*. 2013.№10.С.23–27
7. Бижанов А.М., Подгородецкий Г.С. и др. Опыт применения брикетов экструзии (брэкссов) для выплавки ферросиликомарганца // *Металлург*. 2013. № 2. С. 50–55
8. Курунов И.Ф., Бижанов А.М. Брэкссы – новый этап в окусковании сырья для доменных печей.//*Металлург*. 2014.№3.С.49–53
9. Бижанов А.М., Курунов И.Ф., Уакиль Э.Х. Поведение брикетов экструзии (БРЭКСОВ) в реакторе Мидрекс. Часть 1.//*Металлург*. 2015.№4.С.16–20
10. Бижанов А.М., Курунов И.Ф., Уакиль Э.Х., Мишра Б. Поведение брикетов экструзии (БРЭКСОВ) в реакторе Мидрекс. Часть 2.//*Металлург*. 2016.№3.С.112–115
11. Бижанов А.М., Курунов И.Ф., Дашевский В.Я. О механической прочности брикетов экструзии. I. *Металлы*. №2, 2015, с. 19–25
12. Бижанов А.М., Курунов И.Ф., Дашевский В.Я. О механической прочности брикетов экструзии. II. *Металлы*, № 3, 2015, с. 3–10
13. Бижанов А.М., Курунов И.Ф., Ивонин Д.В. Механизм миграции мелкой фракции при производстве брикетов экструзии (брэкссов)//*Металлург*. 2013. № 7. С. 24–285
14. Бижанов А.М., Курунов И.Ф. и др. Исследование механизма разрушения брэкса при статичной и ударной нагрузке.//*Металлург*. 2014.№8.С.26–31
15. A.Bizhanov, A.Pavlov, O. Chadaeva, Y.Dalmia, B.Mishra, S.Mishra. High Temperature Reduction of the Stiff Vacuum Extrusion Briquettes under the ITmk3 Conditions. *ISIJ International*, vol. 54 (2014),No. 6 , pp. 1450–1452

16. A.Bizhanov, I.Kurunov, G.Podgorodetskyi, V.Dashevskyi, A.Pavlov, O.Chadaeva Extruded Briquettes – New Charge Component for the Ferroalloys Production. ISIJ International, vol. 54 (2014), No. 10, pp. 2206–2214

17. A.Bizhanov, I.Kurunov, Y.Dalmia, B.Mishra, S.Mishra. Blast Furnace Operation with 100% Extruded Briquettes Charge. ISIJ International, vol. 55 (2015), No. 10, pp. 175–182

18. Ivan Kurunov, Aitber Bizhanov, Dmitrii Tikhonov, Natalia Mansurova Investigation of the Metallurgical Properties of the BREX (extrusion briquettes). Technical contribution to the 6th International Congress on the Science and Technology of Ironmaking – ICSTI, 42nd International Meeting on Ironmaking and 13th International Symposium on Iron Ore, October 14th to 18th, 2012, Rio de Janeiro, RJ, Brazil

19. Курунов И.Ф., Филатов С.В., Бижанов А.М. Выбор технологии рециклинга дисперсных металлургических отходов, Сб. трудов конгресса с международным участием и элементами школы молодых учёных «Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований» (Техноген 2014), Ид. «Уральский рабочий», Екатеринбург, 2014, с. 267–271

20. Бижанов А.М., Курунов И.Ф., Дуров Н.М., Нуштаев Д.В., Рыжов С.А. Брикет экструзионный (БРЭКС) – исследование прочности. Инженерные системы: Труды Международного форума, Москва, 10–11 апреля 2012 г., М.:МАКС Пресс, 2012, 224 с.

21. Курунов И.Ф., Филатов С.В., Бижанов А.М. Оценка эффективности применения рудоугольных брэксов в доменной плавке путем математического моделирования. //Металлург (в печати).

ПАТЕНТЫ:

1. Пат. 2495092 РФ, МПК С10L. Брикет экструзионный (БРЭКС) топливный / Курунов И.Ф., Бижанов А.М., Ефимов В.И.. - Оpubл. 10.10.2013. - Бюл. №28

2. Пат. 2506327 РФ, МПК С22В В28В В29С. Брикет экструзионный (БРЭКС) шламовый / Скороходов В.Н, Курунов И.Ф., Тихонов Д.Н, Стил Р.Б., Бижанов А.М. - Оpubл. 10.02.2014. - Бюл. № 4
3. Пат. 2499061 РФ, МПК С22В В28В В29С. Брикет экструзионный (БРЭКС) промывочный / Курунов И.Ф., Тихонов Д.Н., Бижанов А.М. Оpubл. 20.11.2013. - Бюл. № 32
4. Пат. 2506326 РФ, МПК С22В В28В В29С. Брикет экструзионный (БРЭКС) компонент доменной шихты / Скороходов В.Н, Курунов И.Ф., Тихонов Д.Н, Бижанов А.М. Оpubл. 10.02.2014. - Бюл. № 4
5. Пат. 2506325 РФ, МПК С22В В28В В29С. Способ получения брикета экструзионного (БРЭКС-а) для выплавки металла / В.Н, Курунов И.Ф., Стил Р.Б., Бижанов А.М. . Оpubл. 10.02.2014. - Бюл. № 4
6. Пат. 2502812 РФ, МПК С22 ВВ28В В29С. Брикет экструзионный (БРЭКС) металлический / В.Н, Курунов И.Ф., Бижанов А.М., Фарнасов Г.А. Оpubл. 27.12.2013. - Бюл. № 36
7. Пат. 2501845 РФ, МПК С10L С22В. Брикет экструзионный (БРЭКС) коксовый / В.Н, Курунов И.Ф., Бижанов А.М. Оpubл. 20.12.2013. - Бюл. № 35
8. Пат. 2012113390 РФ, МПК С22В. Брикет экструзионный (БРЭКС) компонент шихты для выплавки металла в электропечах / В.Н, Курунов И.Ф., Стил Р.Б., Бижанов А.М. ,Фарнасов Г.А. Оpubл. 20.10.2013
9. Пат. 2579706 РФ, МПК С22В. Брикет экструзионный (БРЭКС) компонент шихты шахтных печей прямого получения железа / Бижанов А.М., Уакиль Э.Х., Курунов И.Ф., Малышева Т.Я. Оpubл. 10.03.2016

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. БРЭКС. Свидетельство на товарный знак (знак обслуживания) № 498006, заявка № 2012706053 от 02.03.2012. Правообладатель А.М.Бижанов

2. Соколов В.Н., Юрковец Д.И., Разгулина О.В. Определение коэффициента извилистости поровых каналов с помощью компьютерного анализа РЭМ изображений. // Известия Акад. Наук, сер. физич. 1997. Т. 61. № 10. С. 1898-1902
3. Электронный ресурс <http://www.thesis.com.ru> Abaqus User Manual, Version 6.12 Documentation
4. Дорофеев Г.А. О выборе рационального способа окускования мелкофракционных материалов техногенного и природного происхождения/ Г.А. Дорофеев, Е.А.Барсукова// Черная металлургия.—2015.-№12—С. 73-79
5. Справочник Доменное производство. М. «Металлургия». Том 1. 1989 г
6. Филатов С.В., Курунов И.Ф., Тихонов Д.Н., Басов В.И. Влияние интенсивности плавки на производительность доменной печи и расход кокса. Металлург №7, 2016 г, с.20-24
7. M. Geerdes, R. Chaigneau, I. Kurunov, O. Lingiardi, J. Rikkets. Modern Blast Furnace Ironmaking. IOS Press BV. Amsterdam 2015