Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет "МИСиС"»
Министерства образования и науки Российской Федерации

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»

Диссертация на соискание
ученой степени кандидата
технических наук

Научный руководитель –
доктор технических наук, профессор
И. Ф. КУРУНОВ

МОСКВА, 2016 г

Оглавление

1 Обоснование выбора технологии жесткой вакуумной экструзии для окускования техногенного и природного сырья, применяемого в экстрактивных процессах черной металлургии ... 11
1.1 Сравнительный анализ основных промышленных технологий брикетирования с точки зрения их влияния на металлургические свойства брикетов ... 13
1.2 Выводы по главе ... 28
2 Методы исследования, используемые в работе ... 30
2.1 Изготовление лабораторных и опытно-промышленных брэксов ... 30
2.2 Исследование металлургических свойств брэксов ... 32
2.2.1 Определение восстановимости железорудных материалов ... 32
2.2.2 Определение горячей прочности железорудных материалов во вращающемся барабане после низкотемпературного восстановления по стандарту ISO 4696-1:1998 и ISO 4696-2:1998 ... 33
2.3 Минералогические исследования ... 35
2.3.1 Оптическая микроскопия ... 35
2.3.2 Термографический метод STA ... 36
2.3.3 Мессбауэровская спектроскопия ... 37
2.3.4 Растровая (электронная) микроскопия ... 38
2.3.5 Рентгеноструктурный анализ ... 39
2.4 Исследование пористости брэксов методами электронной микроскопии и компьютерной томографии с использованием ПО «STIMAN» (МГУ) ... 40
2.4.1 Компьютерная томография ... 40
2.4.2 Растровая электронная микроскопия ... 42
2.5 Математическое моделирование с использованием пакета ABAQUS ... 43
2.5.1 Метод конечных элементов ... 43
2.5.2 Программный комплекс ABAQUS ... 45
2.6 Компьютерное моделирование доменной плавки ... 46
3 Особенности жесткой вакуумной экструзии как способа брикетирования природного и техногенного сырья ... 49
3.1 Подготовка шихтовых материалов для окускования методом ЖВЭ ... 49
3.2 Технологический процесс окускования методом жесткой вакуумной экструзии ... 58
3.3 Транспортировка, складирование и хранение брэксов ... 71
3.4 Выводы по главе ... 79
4 Исследование свойств, оптимизация состава и анализ эффективности и перспектив применения брэксов в доменном производстве ... 80
4.1 Структура, прочность и поведение при восстановлении шламовых и рудококсовых брэксов, как компонентов шихты доменных печей ... 80
4.2 Исследование металлургических свойств промышленных брэксов, применяемых в качестве основного компонента шихты доменной печи ... 89
4.2.1 Физико-механические свойства промышленных брэксов ... 92
4.2.2 Изменение структуры и состава промышленных брэксов в процессе восстановления 95
4.3 Опыт освоения технологии проплавки брэксов при увеличении их доли в шихте ... 98
до 100 % ... 98
4.4 Оценка перспектив использования углеродсодержащих брэксов их железорудного концентрата ... 102
4.5 Выводы по главе ... 105
5 Анализ промышленного применения и опытно-промышленных испытаний брэксов в процессах производства ферросплавов и железа прямого получения ... 107
5.1 Анализ результатов выплавки ферросиликомарганца в промышленной руднотермической печи с использованием в шихте брэксов ... 107

5.1.1 Лабораторные исследования свойств брэксов для выплавки силикомарганца 108
5.1.2 Опытно-промышленная кампания по выплавке силикомарганца с брэксами в рудной части шихты 117
5.2 Анализ результатов применения брэксов в шихте реактора прямого получения железа (процесс Midrex) 124
5.3 Выводы по главе 139
6 Основные научные и практические результаты диссертационной работы 141
Список использованной литературы 142
Приложения 148

ВВЕДЕНИЕ

АКТУАЛЬНОСТЬ ТЕМЫ ИССЛЕДОВАНИЯ:

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, применявшейся до недавнего времени исключительно для производства керамического кирпича. Прикладываемое при этом усилие пресса 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, достигающая 100 тонн в час, существенно превосходит производительности валковых и вибрационных прессов. 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 ^{o}C 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.

Результаты работы позволили разработать рекомендации по усовершенствованию технологии жесткой вакуумной экструзии и по адаптации состава брэксов к условиям их применения в качестве шихтовых материалов в доменных и руднотермических печах, в реакторах прямого получения железа.

Проведенные опытно-промышленные испытания и анализ опыта работы промышленной доменной печи свидетельствуют о том, что жёсткая вакуумная экструзия придает окускованным продуктам высокие металлургические свойства, позволяющие использовать их в шихте доменных и руднотермических печей, реакторов прямого получения железа.

ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

1. Изучить возможности применения технологии жесткой вакуумной экструзии для промышленного брикетирования мелкодисперсных природных и техногенных сырьевых материалов экстрактивных процессов черной металлургии;

2. Изучить влияние специфики жесткой вакуумной экструзии на физико-механические свойства брэксов и особенности их микроструктуры;

3. Установить достижимые пределы использования брэксов в качестве компонентов шихты доменных, руднотермических печей и реакторов прямого получения железа на основе изучения микроструктуры, фазового состава и минералогической структуры сырых и восстановленных брэксов;

4. 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 брэксов в процессе их нагрева в восстановительной атмосфере в условиях доменной печи, руднотермической печи и реактора прямого получения железа (процесс Midrex).

ОСНОВНЫЕ ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ:

1. Результаты лабораторных исследований поведения брэксов при нагреве в восстановительной атмосфере;

2. Результаты адаптации состава брэксов, производимых на промышленной линии жесткой вакуумной экструзии, позволившие довести долю брэксов в шихте малой доменной печи до 100 %;

3. Результаты опытно-промышленных испытаний выплавки силикомарганца с использованием брэксов на основе марганцеворудной мелочи и пылей аспирации производства силикомарганца;

4. Результаты опытно-промышленных испытаний металлизации брэксов из техногенного сырья в реакторе прямого получения железа.

5. Механизм сохранения прочности брэксов из природного и техногенного сырья, содержащего оксиды железа, при их нагреве в восстановительной атмосфере.

6. Практические рекомендации по усовершенствованию процессов подготовки шихтовых материалов для их окускования методом жесткой вакуумной экструзии.

7. Результаты математического моделирования доменной плавки с применением в шихте равных долей окисленных окатышей, суперофлюсованного агломерата и самовосстанавливающихся брэксов из железорудного концентрата и угля.

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 брикетирования по технологии жесткой вакуумной экструзии разработаны рекомендации по подготовке брикетируемых шихтовых материалов и по срокам набора прочности, учитывающие особенности применяемых материалов и связующих.

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 прямого получения железа.

Результаты исследования легли в основу проектирования, строительства и эксплуатации промышленной линии жесткой вакуумной экструзии годовой производительностью 100 тысяч тонн брэксов из техногенного сырья и железорудной мелочи в г. Руркела (Индия, Приложение 1). Результаты исследования использованы при разработке базисного и детального инжиниринга фабрики по производству 700 тысяч тонн брэксов из металлургических железоуглеродсодержащих дисперсных отходов ОАО «НЛМК», при проектировании и строительстве участков по производству 100 тысяч тонн брэксов в ОАО «ЧЭМК» (из рудной мелочи и пыли аспирации производства ферросиликомарганца, Приложение 2) и в АО «Транснациональная компания «Казхром» в г. Актобе (из рудной мелочи и пыли аспирации производства феррохрома, Приложение 3). Результаты исследования использованы при изучении возможности строительства линии жесткой экструзии для окускования техногенных дисперсных материалов, образующихся в процессах прямого получения железа (процесс Midrex) в ОАО «ЛГОК» (Приложение 4), и в процессах металлизации привозных окисленных окатышей, производства ГБЖ, выплавки электростали и прокатного производства на предприятии компании Qatar Steel.

НА ЗАЩИТУ ВЫНОСЯТСЯ:

1. Особенности влияния технологических параметров жесткой вакуумной экструзии на физико-механические свойства брэксов. Практические рекомендации металлургическим предприятиям по подготовке шихты для окускования методом жесткой вакуумной экструзии.

2. Результаты лабораторных и опытно-промышленных испытаний промышленного использования брэксов в шихте доменной и руднотермической печей и реактора прямого получения железа.

АПРОБАЦИЯ РАБОТЫ:

Результаты, представленные в диссертации, докладывались и обсуждались на следующих конференциях и совещаниях:

- «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.

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.

ОБЪЕМ И СТРУКТУРА РАБОТЫ:

Диссертационная работа изложена на 152 страницах, содержит 82 рисунка, 14 таблиц, список использованных источников из 113 наименований.

ЛИЧНЫЙ ВКЛАД АВТОРА

заключается в формулировании цели и задач исследований, выполнении анализа научно-технической и патентной литературы, освоении известных и разработке оригинальных методик проведения лабораторных, опытно-промышленных испытаний и экспериментов, разработке технических решений, адаптированных к технологическим схемам производства брэксов, научном обобщении полученных результатов, формулировке выводов и рекомендаций.

ДОСТОВЕРНОСТЬ

результатов диссертационной работы обеспечивается проведением большого объема лабораторных исследований на современном оборудовании, использованием контрольно-измерительных приборов, прошедших соответствующую поверку. Использованы метрологически достоверные методики. Результаты исследований подтверждены полупромышленными испытаниями и опытом промышленной эксплуатации линий жесткой вакуумной экструзии, построенных с учетом рекомендаций автора, а также эффективными результатами 5-ти летней работы малой доменной печи на шихте из 80-100 % брэксов

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА ПО ТЕМЕ ИССЛЕДОВАНИЯ:

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. Брикеты экструзии (брэксы) для производства ферросплавов // Металлург. 2012. № 12. С. 52–57
6. Бижанов А.М., Курунов И.Ф. и др. Исследование высокотемпературного восстановления рудоугольных брикетов экструзии (брэксов).//Металлург. 2013.№10.С.23-27
7. Бижанов А.М., Подгородецкий Г.С. и др. Опыт применения брикетов экструзии (брэксов) для выплавкиа ферросиликомарганца // Металлург. 2013. № 2. С. 50–55
8. Курунов И.Ф., Бижанов А.М. Брэксы – 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 Midrex. 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 Midrex. 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, №, 2015, с. 3-10
13. Бижанов А.М., Курунов И.Ф., Ивонин Д.В. Механизм миграции мелкой фракции при производстве брикетов экструзии (брэксов**).**//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 C10L. Брикет экструзионный (БРЭКС) топливный / Курунов И.Ф., Бижанов А.М., Ефимов В.И. - Опубл. 10.10.2013. - Бюл. № 28.
2. Пат. 2506327 РФ, МПК C22B B28B B29C. Брикет экструзионный (БРЭКС) шламовый / Скороходов В.Н, Курунов И.Ф., Тихонов Д.Н, Стил Р.Б., Бижанов А.М. - Опубл. 10.02.2014. - Бюл. № 4.
3. Пат. 2499061 РФ, МПК C22B B28B B29C. Брикет экструзионный (БРЭКС) промывочный / Курунов И.Ф., Тихонов Д.Н., Бижанов А.М. Опубл. 20.11.2013. - Бюл. № 32.
4. Пат. 2506326 РФ, МПК C22B B28B B29C. Брикет экструзионный (БРЭКС) компонент доменной шихты / Скороходов В.Н, Курунов И.Ф., Тихонов Д.Н, Бижанов А.М. Опубл. 10.02.2014. - Бюл. № 4.
5. Пат. 2506325 РФ, МПК C22B B28B B29C. Способ получения брикета экструзионного (БРЭКС-а) для выплавки металла / В.Н, Курунов И.Ф., Стил Р.Б., Бижанов А.М . Опубл. 10.02.2014. - Бюл. № 4.
6. Пат. 2502812 РФ, МПК C22 BB28B B29C. Брикет экструзионный (БРЭКС) металлический / В.Н, Курунов И.Ф., Бижанов А.М., Фарнасов Г.А. Опубл. 27.12.2013. - Бюл. № 36.
7. Пат. 2501845 РФ, МПК C10L C22B. Брикет экструзионный (БРЭКС) коксовый / В.Н, Курунов И.Ф., Бижанов А.М. Опубл. 20.12.2013. - Бюл. № 35.
8. Пат. 2012113390 РФ, МПК C22B. Брикет экструзионный (БРЭКС) компонент шихты для выплавки металла в электропечах / В.Н, Курунов И.Ф., Стил Р.Б., Бижанов А.М. ,Фарнасов Г.А. Опубл. 20.10.2013.

9. Пат. 2579706 РФ, МПК C22B. Брикет экструзионный (БРЭКС) компонент шихты шахтных печей прямого получения железа / Бижанов А.М., Уакиль Э.Х., Курунов И.Ф., Малышева Т.Я. Опубл. 10.03.2016.

1 Обоснование выбора технологии жесткой вакуумной экструзии для окускования техногенного и природного сырья, применяемого в экстрактивных процессах черной металлургии

Развитие черной металлургии, увеличение мощности доменных печей и объема потребления руды потребовало разработки технологии окускования мелочи, образующейся при добыче и обогащении руды. Первой технологией окускования, появившейся еще в 19 веке, была технология брикетирования – получение кусков правильной геометрической формы из мелкой руды путем ее прессования под давлением с использованием различных связующих веществ или без них, с последующими сушкой и упрочняющим обжигом полученных брикетов или с упрочняющим вылеживанием на воздухе. Брикетирование берет своё начало с первого коммерчески успешного проекта производства брикетов из мелкой магнетитовой железной руды, реализованного в 1899 г. в Финляндии (проект «Грёндаль», [1]). Брикеты получали из увлажнённого магнетитового концентрата без использования связующего на столовых прессах Сутклиффа для производства кирпича с давлением прессования 30–50 МПа. Расход электроэнергии на производство тонны брикетов составлял 5 кВт·ч, Сырые брикеты (150х150х75 мм) подвергались упрочняющему обжигу в туннельной печи с температурой в зоне горения 1400 °С. Несмотря на большие размеры, эти брикеты успешно применялись в низкошахтной доменной печи производительностью 50–140 т/сутки на заводе в Питкаранта. В процессе окислительного обжига магнетит окислялся до гематита, и из брикетов удалялась сера (на 98 %). Пористые брикеты (пористость 40 %) имели высокую механическую прочность (10 МПа) и высокую восстановимость, что приводило к сокращению расхода кокса и повышению производительности доменной печи. Успех проекта способствовал быстрому распространению такой технологии. В 1913 г. работали уже 38 подобных линий брикетирования (16 в Швеции, 12 в Англии, 6 в США).

В дальнейшем для производства брикетов применялись рычажные, револьверные, кольцевые, конвейерные и валковые прессы. В зависимости от вида прессуемого материала и применяемого связующего (или его отсутствия), брикеты прессовали с низким (50–150 кг/см^2), средним (150–750 кг/см^2) или высоким (свыше 750 кг/см^2) давлением [2]. Низкая

производительность технологических процессов брикетирования и недостаточные прочностные свойства брикетов не позволили занять этой технологии значимую роль в окусковании сырьевых материалов для выплавки самого массового металла – чугуна. Эту роль в настоящее время играют, разработанные уже в начале 20 века технологии агломерации и производства окатышей. Первые патенты на способ агломерации железных руд были получены в Германии в 1902 и в 1905 году, но датой рождения высокопроизводительного процесса агломерации является 1906 год, когда А.Дуайтом и Р.Ллойдом в США была запатентована конвейерная агломерационная машина [3]. Высокая технологичность процесса и возможность утилизации в нем, неизбежных при выплавке чугуна и стали, дисперсных железосодержащих отходов стимулировали развитие этого процесса и до настоящего времени агломерация методом спекания на агломерационной машине является основным технологическим процессом окускования сырьевых материалов в черной металлургии, широко применяемым также и в цветной металлургии. Основным недостатком этой технологии окускования является большое негативное воздействие на окружающую среду. Аглофабрика на металлургическом заводе интегрированного типа является источником более 50 % всех пылевых и газовых выбросов завода.

Увеличение добычи бедных железных руд и производства железорудного концентрата из них потребовало разработки новой технологии окускования мелкодисперсного концентрата. Такой технологией стало окомкование железорудных концентратов или производство окатышей. Патент на эту технологию был получен Андерсеном в Швеции в 1916 году, а промышленное производство окатышей стало стремительно развиваться со второй половины 20 века.

На рубеже 20-го и 21-го веков в черной металлургии снова начинает применяться технология брикетирования, в первую очередь, для утилизации мелкодисперсных железо- и железо-цинксодержащих отходов – шламов, пылей и отсевов. В Германии разработали технологию и реализовали производство брикетов из железо-цинксодержащих шламов для последующей их проплавки в вагранке, работающей на дутье, обогащенном кислородом [4]. Брикеты производят по технологии вибропрессования с использованием в качестве связующего портландцемента. Такие брикеты по своим металлургическим свойствам отвечают требованиям, предъявляемым к доменной шихте. Технологию вибропрессования использовали и на металлургических заводах Швеции, где при работе доменных печей на 100 % окатышей брикетирование стало играть роль утилизационной технологии, осуществляющей рециклинг колошниковой пыли и отсевов окатышей. Брикетирование методом вибропрессования начало применяться в США, России и в других странах, причем не только для утилизации отходов, но и для окускования мелкой руды и железорудного концентрата. При этом добавление в шихту

для брикетирования углеродсодержащего материала обеспечивает получение комплексных, самовосстанавливающихся брикетов, применение которых снижает расход кокса в доменной плавке пропорционально их количеству в шихте.

Кроме технологии вибропрессования для производства брикетов из металлургических отходов применяют и прессование в валках. При этом использование для производства брикетов органического связующего обеспечивает высокую холодную прочность брикетов и позволяет эффективно использовать их в сталеплавильных процессах. Применение таких брикетов в доменных печах возможно лишь в очень ограниченном количестве из-за их разрушения при нагреве. Для обеспечения высокой горячей прочности валковых брикетов требуется применение в качестве связующего цемента и в количестве существенно более высоком, чем при изготовлении брикетов методом вибропрессования.

В начале 21 века на рынке технологий окускования мелкодисперсного техногенного и природного минерального сырья появилась новая технология брикетирования – жесткая вакуумная экструзия, которая в течение многих десятилетий применяется для производства кирпича. Эта технология стала применяться для производства брикетов из мелкой никелевой руды. Дебют шнековой экструзии в области подготовки окускованного сырья для доменных печей состоялся в 90-х годах прошлого столетия, но не получил распространения. Металлургический завод фирмы Bethlehem Steel, где три года проработала линия по производству из шламов и пыли брикетов для проплавки их в доменных печах, был закрыт. В 2011 году внимание и повышенный интерес специалистов по аглодоменному производству к технологии жесткой вакуумной экструзии привлек опыт промышленного производства брикетов экструзии и их использования в качестве основного компонента шихты в доменной печи. Эти брикеты получили в технической литературе название БРЭКС-ы – брикеты экструзионные (BREX – Extrusion Briquette) [5].

1.1 Сравнительный анализ основных промышленных технологий брикетирования с точки зрения их влияния на металлургические свойства брикетов

Брикетирование – создание твердотельной структуры из мелкодисперсных природных и техногенных материалов с использованием связующих материалов и/или термической упрочняющей обработки. Брикеты, как компонент шихты в экстрактивных процессах черной металлургии должны обладать определенными металлургическими свойствами. Важнейшими из них являются: холодная прочность, позволяющая им сохранять целостность и не разрушаться с образованием мелочи при транспортировке, перегрузках и загрузке в печь;

горячая прочность – способность брикетов максимально сохранять целостность без разрушения в процессе нагрева и восстановления; восстановимость.

Теоретический интерес к брикетированию с последующим обжигом сохранялся до недавнего времени. Металлургические свойства таких брикетов основностью 1,4, изготовленных на промышленной линии валкового брикетирования, были изучены в сопоставлении со свойствами окатышей такой же основности [6].

Обжиг брикетов осуществляли в электрической печи в окислительной атмосфере при температурах 1190–1250 ^{o}C. Петрографический анализ выявил близость микроструктуры брикетов и окатышей (рисунок 1.1).

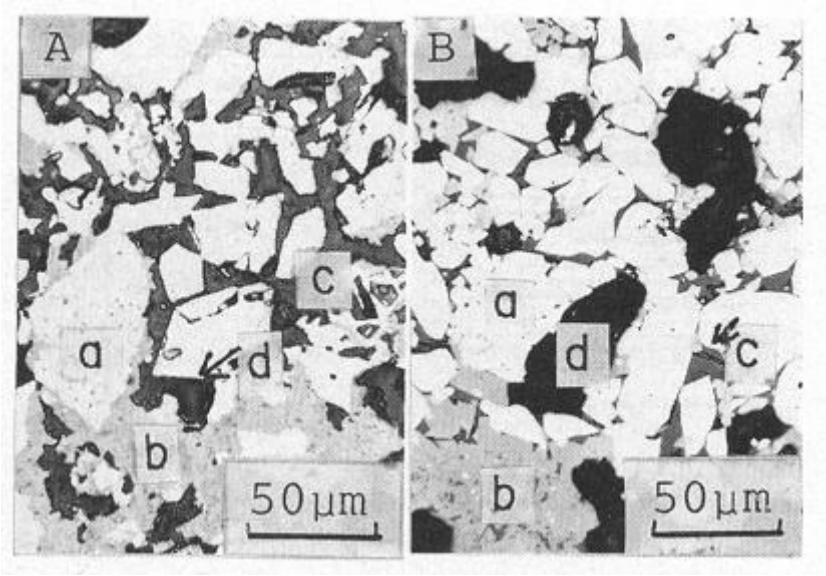


Рисунок 1.1 – Микроструктура брикета «А», обожженного при 1250 ˚С и окатыша - «В» (a – гематит, b – феррит кальция, c – шлаковая фаза, d – пора)

Однако обжиговое брикетирование не получило промышленного применения. Единственными способами термического воздействия на брикеты, применяемыми в настоящее время, являются сушка и тепло-влажностная обработка брикетов вибропрессования. В последнее время проявляется интерес к способу производства углеродсодержащих железорудных брикетов, в котором смесь железорудных материалов и угля нагревается до температур 350–600 °С и прессуется после достижения углём пластического состояния [7].

В 20-е годы прошлого столетия для брикетирования железорудной рудной мелочи и металлургических отходов стали применяться валковые прессы. На станине такого пресса смонтированы одна или две пары валков с закрепленными на них стальными бандажами, на которых в шахматном порядке выфрезованы симметрично расположенные ячейки в виде

полуформ брикетов. Прессование шихты происходит в зазоре между вращающимися навстречу друг другу вальцами. Производительность современных валковых прессов – до 50 тонн в час, а давление прессования – до 150 МПа.

Структура прессуемого в валках материала претерпевает изменения, связанные с упругой и необратимой деформацией, разрушением частиц прессуемого материала и образованием в нем трещин. Высвобождение энергии упругой деформации после снятия сжимающего давления может привести к росту объема брикетов. Краткосрочность процесса сжатия смеси может приводить к «запрессовке» в нее воздуха, что также снижает прочность брикетов. В процессе собственно валкового брикетирования не происходит гомогенизации смеси, и структура брикетов повторяет структуру порции шихтовой смеси, попавшей в формующую ячейку.

Валковое брикетирование сопровождается значительным выходом (до 30 %) оборотных отходов из смеси, не попадающей в формующие ячейки.

Особенностью валкового брикетирования является ограничение влажности сырьевых материалов (не выше 5-10%), что приводит, как правило, к необходимости включения в состав брикетных фабрик участков обезвоживания и (или) сушки. Требуемая низкая влажность шихты ограничивает применение связующего, упрочняющегося гидратацией, например, цемента, либо требует создания комбинированных связующих с увеличенным содержанием цемента в их составе. Недостатками валкового брикетирования являются также неполное закрытие формующих ячеек, приводящее к ухудшению прочностных свойств брикета, и отсутствие выдержки тела брикета под давлением, также ухудшающее его свойства и приводящее к необходимости так называемой «подпрессовки».

Ухудшает технико-экономические показатели валкового брикетирования сложность и высокая стоимость изготовления заменяемых частей, в первую очередь, бандажей. Тем не менее, валковые брикеты в начале 20 века находили достаточное применение в низкошахтных доменных печах и в доменных печах небольшого объема. Их доля в шихте доменных печей (ДП) завода Вест Кальбе достигала 30–40 %, а в низкошахтной ДП завода Макс Хютте (Германия) – 100 %. Эти брикеты изготавливали из железорудной мелочи, известняка и коксовой пыли [8]. В СССР в ДП Кушвинского завода доля брикетов в шихте достигала 25 %. Брикеты в количестве до 100 тыс. т в год применялись в шихте ДП Керченского и Таганрогского металлургических заводов [9].

Интерес к брикетированию возобновился в 60–70 гг. прошлого века вследствие осложнившейся экологической ситуации в районах металлургического производства. В 1961 году в г. Донецк (Украина) была построена «Брикетная фабрика «Донецкая». В 60–70 г.г. были

также введены в строй брикетные фабрики и на Алчевском, Нижне-Тагильском и Магнитогорском комбинатах, на комбинате КМА руда.

В наше время в России развитие технологии валкового брикетирования было обеспечено исследованиями специалистов ГНЦ ОАО «Уральского института металлов» [10-13] и разработками ЗАО НПО «Спайдермаш» [14].

Опыт работы 15 брикетных фабрик, принадлежащих компании Harsco Metals (США) [15], производящих брикеты для доменных печей в США, Европе и Азии (США–7, Европа и Азия – 8; суммарный объем производства – 1,5 миллиона тонн в год), показал, что достижение требуемых металлургических свойств брикетов стало возможным только при использовании сложного многокомпонентного связующего (состав не раскрывается), доля которого в массе брикета достигала 15–18 %. Этим объясняется и низкое содержание таких брикетов в доменной шихте (10–15 кг на тонну чугуна). Столь же низка (1 %) и доля валковых брикетов в доменной шихте предприятия ILVA (Италия), для которого брикеты с применением в качестве связующего извести и мелассы поставляются компанией Primetals (Австрия) [16].

Опыт применения валковых брикетов в доменном производстве не привел к росту масштабов промышленного использования этой технологии в черной металлургии из-за невозможности достичь уровня технико-экономических показателей производства агломерата и окатышей.

В качестве основной причины низкой конкурентоспособности брикетирования обычно называют низкую производительность валковых прессов по сравнению с производительностью аглолент (1500–10000 тонн в сутки) и обжиговых машин (2500–9000 тонн в сутки). Однако, и в ферросплавной отрасли, где требования по производительности и качеству брикетов намного ниже, чем в доменном производстве, валковое брикетирование не получило повсеместного распространения как технология окускования, что, на наш взгляд, связано с указанными выше особенностями такого брикетирования.

Тем не менее, в ферросплавной промышленности был накоплен интересный опыт, показавший перспективность применения брикетов в шихте руднотермических печей. Первый промышленный опыт применения брикетов на основе марганцеворудных концентратов в шихте руднотермической печи был получен в 1961 году, когда изготовленные на Криворожской брикетной фабрике 160 т валковых брикетов из марганцевого джездинского концентрата (30,9 % Mn; 4 % Fe; 0,057 % P; 26,95 % SiO2; P/Mn = 0,0018; 0,33 % S; 1,9 % CaO; 4,05 % BaO) были использованы в шихте в печи мощностью 2500 кВА Зестафонского завода ферросплавов (ЗЗФ) [17]. Результаты плавок показали, что такой вид шихтового компонента достаточно эффективен. В 1966–1967 г.г. на том же заводе были выполнены опытно-промышленные исследования по выплавке ферросиликомарганца в промышленных руднотермических печах с

использованием в шихте рудных брикетов марганцевого концентрата Чиатурского месторождения [18]. Для промышленных опытов брикеты получали на валковом прессе производительностью 5 тонн в час из руды крупностью 5–0 мм на связующем из сульфитно-спиртовой барды (ССБ) плотностью 1,2 г/см^3. При влажности руды 4 % и добавлении 8 % связующего смесь перемешивали в течение 15 минут. На шихте с рудными брикетами выплавляли силикомарганец в трехфазной открытой ферросплавной печи мощностью 16,5 МВА. Печь работала нормально и стабильно, газопроницаемость шихты была хорошей, пламя распределялось равномерно по всему колошнику. После 112 часов опытных плавок был сделан вывод о том, что из марганцевой руды указанной крупности можно получать достаточно прочные брикеты, пригодные для использования в шихте ферросплавных печей. При работе на рудных брикетах увеличивается производительность печи, снижается расход электроэнергии, уменьшается расход восстановителя.

В 1970 году в Днепропетровском металлургическом институте были исследованы показатели выплавки товарного силикомарганца на брикетированной шихте из смеси оксидных марганцевых концентратов I и II сорта Никопольского месторождения в соотношении 1:1 и на агломерате, изготовленном из той же смеси [19]. Для брикетирования смесь концентратов фракции 10–0 мм измельчали до крупности 3–0 мм. Брикеты изготовляли на полупромышленном валковом прессе при давлении 500 кг/см^2, связующее – смесь битума, мазута и ССБ в количестве 10 % веса шихты. Шихту смешивали в емкостях с паровым подогревом. Были приготовлены и проплавлены брикеты двух составов: с избытком восстановителя (уголь ПЖ) в количестве 50 %, вводившегося для создания каркаса в брикете и повышения его прочности (смесь концентратов – 54,5 %, песок речной – 9,1 %, уголь – 27,3 %, смесь битума и мазута – 3,6%, ССБ. – 5,5%), со стехиометрическим количеством восстановителя, необходимым для восстановления кремния и марганца (смесь концентратов – 60,6 %, песок речной – 10,1 %, уголь – 20,2 %, смесь битума и мазута – 3,6 %, ССБ. – 5,5 %). Лабораторные испытания показали, что физические свойства сырых брикетов превосходили таковые для обожженных брикетов. Величины механической прочности и термостойкости были выше у сырых брикетов. Товарный силикомарганец было решено выплавлять на сырых брикетах. Полупромышленную выплавку на брикетах указанного выше состава и на агломерате проводили в трехфазной открытой рудовосстановительной печи мощностью 1,2 МВА при напряжении 81,60 – 85,89 В и силе тока 6000 – 6500 А непрерывным процессом с закрытым колошником. Брикеты с избытком восстановителя обладали повышенной электропроводностью и при проплавлении давали значительный рост токовой нагрузки, что приводило к подъему электродов и раскрытию колошника. Для устранения этого явления к навеске брикетов подшихтовывали 10 % марганцевого концентрата. Таким способом проплавили 14 тонн

брикетов с избытком восстановителя, 1,2 тонны концентрата и 200 кг доломита. Выплавка силикомарганца на брикетах, содержащих стехиометрическое количество восстановителя, проходила без каких-либо осложнений. Нагрузка держалась устойчиво; в печь, кроме брикетов, ничего дополнительно не вводили. Сравнительные данные плавок на различной шихте показали, что выплавку силикомарганца на брикетах следует предпочесть выплавке на агломерате.

В работе [20] приведены результаты разработки и промышленного освоения технологий получения пылерудных брикетов и выплавки из них марганцевых ферросплавов ЗЗФ. Необходимость утилизации пылей и шламов очистки печных газов была обусловлена большим объемом ее образования (50 тысяч тонн ежегодно). С учетом металлургической оценки отходов, их дисперсного состояния и физико-химических свойств было предложено смешивать сухую пыль с предварительно обезвоженными шламами, а затем с марганцевым концентратом третьего сорта и подвергать смесь брикетированию. Установлено, что для получения механически прочных брикетов (удельное усилие раздавливания 8–12 МПа) оптимальными параметрами брикетирования являются: влажность шихты 4–6 %, содержание связующего (ССБ) 6–8 %, количество мелкодисперсного составляющего (пыли, шлама) 30 % и минимальное давление прессования 19,6 МПа. Была исследована сравнительная кинетика восстановления шламопылерудных брикетов и марганцевого агломерата. Было установлено, что наибольшие степени восстановления при разных температурах давали брикеты. Использование марганца и кремния из отходов повышалось за счет присутствия в них тесно связанного углерода и заторможенности, вследствие этого, процессов образования силикатов, что неизбежно при использовании агломерата. Результаты плавок высокоуглеродистого ферромарганца показали, что производительность печи в случае применения брикетов повысилась с 73,33 до 75,67 т/сутки, а удельный расход электроэнергии снизился на 90 кВтч/т. Уменьшился расход коксика на 34 кг/т. Присутствие углеродистого восстановителя в брикетах резко повышает температуру размягчения брикетов до 1250–1400 ^{o}C. Для рудных брикетов, связанных ССБ, интервал размягчения, по данным авторов, 750–850 ^{o}C.

В 70-е годы прошлого века для окускования природных и техногенных материалов черной металлургии стали применять способ вибропрессования. Брикеты по такому способу прессуют при низких давлениях (0,02–01 МПа) и одновременном воздействии на прессуемую смесь вибрации (частота 30–70 Гц, амплитуда 0,2–0,6 мм). Для формования используются многоячейковые пресс-формы с размерами от 20х20х20 мм до 500х1500х1500 мм. Цикл изготовления продолжается не более 30 секунд.

Известно, что при вибрации с частотой, превышающей 50 Гц, в уплотняемом материале резко снижается вязкость брикетируемой смеси и внутреннее трение между частицами, что

облегчает их сближение и уплотнение смеси. Это приводит к достижению большей степени уплотнения при меньших, давлениях прессования, чем при сжатии [21]. При этом происходит вытеснение воздуха и излишков влаги, что позволяет получать плотные брикеты.

Производительность вибропрессов существенно зависит от размера производимых брикетов. Максимальная производительность вибропрессовальной брикетной линии не превышает 30 тонн сырых брикетов в час. Вместе с тем, прочность свежеизготовленных по методу вибропрессования брикетов не позволяет их немедленно транспортировать конвейером на склад, а требует специальных мер по укладке поддонов с такими брикетами на этажерку-накопитель, которая затем транспортируется в пропарочные камеры. В качестве связующего при вибропрессовании обычно применяют цемент, содержание которого в массе брикета может достигать 15 % [22].

Одна из первых промышленных брикетных линий вибропрессования была введена в эксплуатацию на предприятии SSAB в Окселозунде (Швеция) [23]. Брикеты размером 60х60 мм, гексагональной формы в сечении используются в качестве компонента шихты доменной печи (60–100 кг брикетов на тонну чугуна). Состав брикета – 25% колошниковая пыль, 50% смесь из мелочи скрапа, скрапа десульфурации, конвертерного шлама, отсева окатышей и пыль аспирации 5–8 %. Связующее – портландцемент (10–12 %), влажность брикетов 5–8 %. Размер частиц брикетируемой смеси 0–5 мм. В марте 2012 года на предприятии этой же компании в Финляндии (Raahe Works) была введена в строй вибропрессовальная линия для производства брикетов для доменных печей [24]. Решение о строительство брикетной линии было принято после закрытия на предприятии аглофабрики в 2011 году. Брикеты производят из смеси железорудной мелочи, угольной пыли, окалины прокатного производства и скрапа с использованием 10 %–12 % связующего (смесь 60 % быстротвердеющего портландцемента и 40 % шлакопортландцемента). Размер брикетов составляет 60х60 мм, вес 475 г. После 48-часового вылеживания холодная прочность брикетов по барабанной пробе ISO 4696 составила 74 % (доля кусков с размером более 6,3 мм). При расходе брикетов в шихте доменной печи в объеме 120–130 кг на тонну чугуна, достигнуто снижение расхода кокса (6 %) за счет содержащегося в брикете углерода. На другом предприятии компании SSAB вибропрессовальные брикеты на цементной связке производят из смеси отсева окатышей, пылей и шламов доменного и сталеплавильного цехов. Металлургические свойства таких брикетов двух составов (93,5 % – отсев окатышей, 6,5 % – портландцемент и 62,7 % – отсев окатышей, 30,8 % – шламы и пыли и 6,5 % – портландцемент) исследованы в работе [25]. Особенностью таких брикетов является выявленная склонность к значительному разбуханию в процессе восстановления при 950 ^{o}C монооксидом углерода, связанная с хорошо известным проявлением этого свойства у обожженных окатышей [26-28]. Причина катастрофического

разбухания железорудных окатышей связана с ростом железных волосовин при восстановлении вюстита, который усиливается в присутствии CaO [29]. Степень разбухания снижалась при добавлении водорода в восстановительный газ. Отмечено также, что тенденция к разбуханию в присутствии цемента снижается при его содержание в теле брикета, превышающем 10 % (масс.). Наибольшая степень разбухания присуща брикетам с содержанием цемента в диапазоне 4–6 % (масс). Было отмечено, что при высокой температуре преобразованные фазы цемента, оливин и вюстит вступают в реакцию с образованием (Ca,Mg,Fe)2SiO4 (островные силикаты кальция – двухкальциевый силикат, форстерит и фаялит). Свойства этой фазы определяются отношением величин содержания отсева окатышей и цемента. Возможно также образование расплава и при более низких температурах (1150 ^{o}C). Брикеты указанных составов испытывались также и на пилотной установке, имитирующей работу доменной печи. Утверждается, что в отличие от испытаний в лабораторных условиях, в пилотной печи не наблюдалось катастрофического разбухания брикетов. Восстановленные брикеты, после извлечения из пилотной печи имели значительную вюститную сердцевину даже при достаточно глубоком опускании в печь. В качестве объяснения приводятся следующие причины: большой объем брикетов, образование шлаковой системы CaO-SiO2-MgO-Al2O3-FeO и покрытие зерен вюстита расплавленным шлаком.

Симулятор доменной печи был использован для изучения поведения вибропрессовальных брикетов и в работе [30]. Основной компонент брикетов – окалина прокатного производства (41,2 %), различные скрапы (23,4 %), колошниковая пыль (9,5 %), пыль аспирации участков разливки и дозирования (4,8 %), коксовая пыль (6,4 %),отсев окатышей (2,8 %) и остальные техногенные материалы. В качестве связующего использовали три различные комбинации: 10 % портландцемента; 8 % портландцемента + 3 % измельченного граншлака; 8 % портландцемента + 6 % измельченного граншлака. Брикеты были изготовлены на промышленной линии вибропрессования, однако для испытаний в симуляторе доменной печи, образцы брикетов были разрезаны на бруски с сечением в форме треугольника (рисунок 1.2).

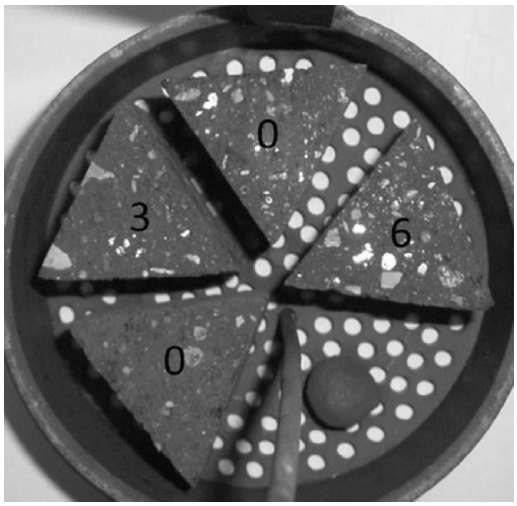


Рисунок 1.2 – Расположение фрагментов брикетов и окатыша в корзине для симулятора доменной печи [30]

Понятно, однако, что в этом случае невозможно получить аутентичные результаты испытаний, поскольку в этом случае удельная поверхность фрагмента брикета выше, чем у исходного брикета, а, значит, и скорость восстановления иная. Были получены следующие результаты: 1) брикеты показали значительно более быстрое восстановление в сравнении с окатышами в диапазоне температур 780 – 1100 °С, что может быть объяснено присутствием углерода в их составе и более высокой пористостью, рост которой, по мнению авторов, обусловлен последствиями фазового перехода гематит-магнетит; 2) наблюдалось разбухание брикетов (25–50 %) во время перехода вюстит-железо при 900–1000 °С.; 3) добавление измельченного граншлака способствовало разбуханию брикетов; 4) брикеты не разрушились, а в сохранении прочности при высоких температур, по мнению авторов, сыграло роль образование двухкальциевого феррита.

В России первая вибропрессовальная фабрика была введена в строй на предприятии ОАО «Тулачермет» в 2003 году [31]. Брикеты начали производиться на автоматической вибропрессовальной конвейерной линии мощностью до 8000 тон брикетов в месяц. Производились и использовались в качестве компонента шихты доменной печи брикеты двух типов: железоуглеродсодержащие (3-х составов) и промывочные (2-х составов). Проектная прочность брикетов на сжатие должна была составлять не менее 6,0 МПа. После сушки ее значения составляли – 3,83 МПа, после тепло-влажностной обработки – 6,9 МПа.

Всего за время существования линии было произведено более 52 тысяч тонн брикетов (около 50 тысяч тонн железоуглеродсодержащих и 2700 тонн промывочных брикетов). При выгрузке брикетов из бункера отмечалось их кострение [32]. Максимальные величины

расходов брикетов составили – для ДП №1 – 32 кг/т чугуна, для ДП №2 – 56 кг/т чугуна. Вынос колошниковой пыли при применении брикетов сократился на 4 кг/т.

Пофакторный анализ показал, что при применении железоуглеродсодержащих брикетов приведенный расход сухого скипового кокса снизился на 14,4 кг/т чугуна, что соответствовало коэффициенту замены кокса коксовой мелочью в составе брикета 1кг/кг. Приведенное производство чугуна увеличилось на 37 т/сутки, что связано с улучшением газопроницаемости столба шихты за счет изменения ее грансостава. Это позволило увеличить расход дутья и, как следствие, интенсивность плавки. Улучшение гранулометрического состава шихты подтверждается снижением выноса колошниковой пыли на 4,2 кг/т чугуна.

После нескольких лет эксплуатации брикетная фабрика прекратила свое существование вследствие изменения экономических условий, повлиявших на доступность пригодных для брикетирования углеродсодержащих материалов (коксовой мелочи требуемого гранулометрического состава). Публикации об исследовании металлургических свойств брикетов ОАО «Тулачермет» не выявлены.

Серия кампаний по использованию вибропрессовальных брикетов различного компонентного состава на цементной связке в шихте доменной печи объемом 1000 м^3 была проведена в 2003 году на ОАО «НЛМК» [33-35]. На первом этапе для оценки эффективности технологической схемы производственного рециклинга железо-цинксодержащих шламов проплавили партию (2500 т) брикеты из смеси 65 % конвертерного шлама, 20 % коксовой мелочи и 15 % портландцемента. Расход брикетов изменялся от 50–70 кг/т в первые 5 суток до 190 кг/т в последние сутки и составил в среднем 121 кг/т чугун. Эффективность применения брикетов оценивалась сравнением полученных результатов работы печи с показателями плавки в базовом периоде, включающем 15 суток работы печи до проплавки брикетов и 7 суток после их проплавки. При проплавке брикетов коэффициент замены кокса коксовой мелочью брикетов составил 0,96 кг/кг.

На втором этапе проплавили партию брикетов (2475 т) из смеси железорудного концентрата, коксовой мелочи и портландцемента, последовательно увеличивая расход брикетов (122, 198, 303 кг/т чугуна). Результаты плавок подтвердили, что такие брикеты являются полноценным самовосстанавливающимся компонентом доменной шихты, применение которого обеспечивает снижение расхода кокса в доменной плавке, пропорциональное их расходу. Доля такого компонента в доменной шихте лишь незначительно ограничивается снижением производительности печи из-за снижения содержания железа в шихте и может достигать 50 % и более.

На третьем этапе партию (2560 т) вибропрессовальных брикетов из смеси доменных шламов (59 %), прокатной окалины (20 %), коксовой мелочи (10 %) и цемента (11 %)

проплавили в доменной печи объемом 2000 $м^{3.}$ При выгрузке брикетов из бункеров наблюдалось их повышенное кострение. Средний расход брикетов за период составил 62 кг/т, при колебаниях по суткам от 36 кг/т до 81 кг/т. Эффективность проплавки шламококсовых брикетов оценили путем сопоставления показателей плавки в опытном и базовом периодах работы печи. Незначительное снижение производительности доменной печи при проплавке брикетов вызвано, главным образом, уменьшением содержания железа в шихте, а также негативным влиянием повышенной основности и вязкости шлаков, образующихся из оксидов пустой породы брикетов. Отмечались также более низкие значения коэффициента замены углерода кокса коксовой мелочью брикетов по сравнению с полученным при проплавке брикетов из конвертерного шлама (0,96 кг/кг).

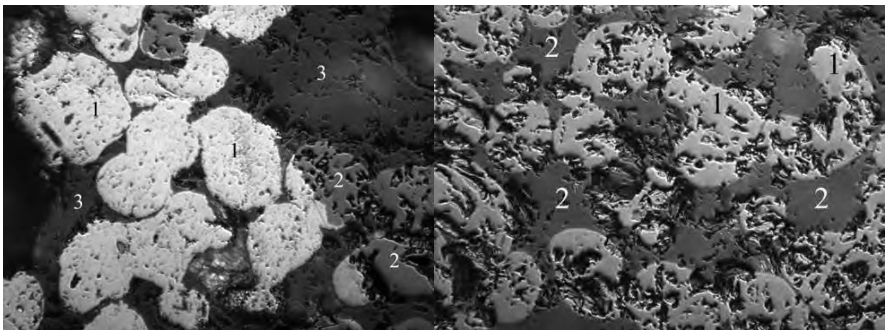
Результаты опытных плавок показали практическую возможность эффективного применения железоуглеродсодержащих брикетов, как нового вида кускового офлюсованного железосодержащего материала в качестве компонента доменной шихты. Благодаря содержащемуся в нем углероду, такие брикеты являются самовосстанавливающимися и их применение приводит к пропорциональному уменьшению расхода кокса. По результатам проведенных кампаний были сделаны следующие основные выводы:

- вибропрессование способно обеспечить требуемые значения величин прочности брикетов из оксидных техногенных и природных железосодержащих материалов на сжатие при использовании цементной связки с содержанием не менее 8–10 % от массы брикета.

- величина прочности на сжатие составляла для большинства материалов не менее 30 $кгс/см^2$ и обеспечивала их сохранность при перегрузках и транспортировке с выходом мелочи (-10 мм) не более 5–7 %.

Результаты исследования металлургических свойств лабораторных брикетов, изготовленных вибропрессованием, а также брикетов, применявшихся в опытно-промышленных доменных плавках, приведено в работе [36]. В частности, изучалось поведение при нагреве в восстановительной атмосфере безуглеродистых брикетов из магнетитового концентрата (91,2 % и портландцемент М500 – 8,8 %) и из конвертерного шлама (91,9 % и портландцемент М500 – 9,1 %). Поскольку цементная связка обеспечивает сохранение прочности брикета лишь до температуры 750–900 °С, то образование новой прочной микроструктуры брикетов, обнаруженной в опытах, объяснялось физико-химическими процессами, протекающими в теле брикетов при нагреве в восстановительной атмосфере. Такими процессами являются, прежде всего, восстановление оксидов железа и реакции в твердой фазе между вюститом, оксидами цементного камня и пустой породы, железосодержащими компонентами брикетов с образованием железо-кальций-магниевых силикатов. В брикетах из магнетитового концентрата и конвертерного шлама после

восстановления оптически диагностировалась зональная микроструктура с наличием поверхностного слоя металлизованного железа. Этот факт обусловлен достаточно высокой плотностью брикетов, их значительными размерами и отсутствием твердого восстановителя в их составе. В брикете из железорудного магнетитового концентрата четко диагностируется процесс восстановления магнетита до вюстита во всем объеме образца, а на поверхности - слой металлического железа толщиной 3–5 мм, образующий поверхностную оболочку (каркас) брикета (рисунок 1.3, слева). В более глубоких слоях (на расстоянии до 20–25 мм от поверхности брикета) наблюдаются только небольшие зоны с частицами металлического железа по границам вюститных зерен. В центральной части брикета металлическое железо отсутствует и вся железосодержащая фаза представлена только вюститом и железистыми оливинами.. В зависимости от температурно-временных условий пребывания брикета в восстановительной атмосфере в различных участках брикета железосиликатная фаза была либо в пластичном, либо в близком к пластичному состоянии, заполняя пространство между зернами рудных составляющих в виде стеклофазы (рисунок 1.3, справа). За счет значительного содержания SiO_2 в концентрате (6,3 %), наличия примесей Al_2O_3, MgO в составе минеральных фаз цемента, а также вследствие развитой поверхности контакта частиц концентрата (размер частиц 70–120 мкм) и цементного камня большая часть активного вюстита – продукта восстановления магнетита – реагирует с кремнеземом и образует систему Ca_2SiO_4 – Fe_2SiO_4, включающую эвтектику с температурой кристаллизации 1120 °С (диаграмма состояния системы CaO-SiO_2-FeO на рисунок 1.4). Как отмечалось выше, железистосиликатная фаза имеет низкую восстановимость, что совместно с диффузионными трудностями и большим размером брикета объясняет отсутствие металлического железа в его центральной части. Сохранение формы брикета из магнетитового концентрата во время восстановительного нагрева обеспечивается формированием поверхностного каркаса из металлического железа достаточной толщины (3–5 мм), который обеспечивает прочность брикета на стадии дегидратации гидросиликатов кальция цементного камня. По мнению авторов, разрушению брикета при его нагреве до 1150 °С препятствует также образование во всем объеме тела брикета матрицы из железокальциевых оливинов.



слева: 1 – зерна металла, 2 – вюстит, 3 – оливиновая фаза;

справа: 1– вюстит, 2 – оливиновая фаза. Отраженный свет, увеличение х500

Рисунок 1.3 – Микроструктура восстановленного брикета из магнетитового концентрата

Известно, что в системе CaO-SiO_2-FeO имеется эвтектика (25 % $CaO \cdot SiO_2$ и 75 % $FeO \cdot SiO_2$) с температурой кристаллизации 1030 ºС. В системе имеется, также, область составов с температурой кристаллизации близкой к 1150 ºС.

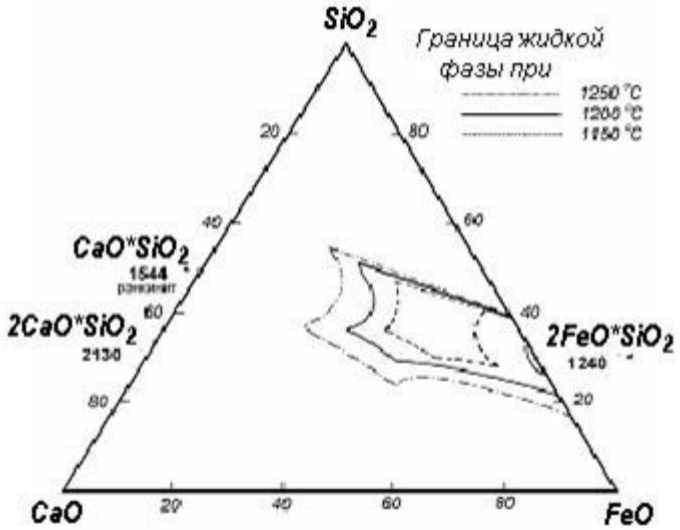


Рисунок 1.4 – Диаграмма состояния системы CaO – SiO_2 – FeO

По-видимому, из-за ограниченного времени пребывания в печи при температуре 1150 ºС и выше, образовавшаяся до этого в теле брикета железистосиликатная фаза не достигала температуры ликвидуса и оставалась в пластичном сосоянии не нарушая целостности брикета в уже образовавщшемя каркасе из металлического железа с температурой плавления выше 1500 ^{o}C.

В 2010 году в ОАО «Косогорский металлургический завод» была введена в эксплуатацию вибропрессовальная фабрика годовой производительностью 120000 т для

производства брикетов из смеси концентрата, рудной мелочи, колошниковой пыли и связующего - портландцемента (не менее 10 % массы брикета). Время выдержки этажерки с брикетами в пропарочной камере ~36 часов. Плотность брикетов 2,0–5,0 г/см^3. Предел прочности на сжатие – не менее 3,5 МПа, влажность – не более 9 %. Доля брикетов в рудной части доменной шихты – 100 кг на тонну чугуна. Отмечалось кострение при загрузке [37]. В совокупности с начала эксплуатации фабрика произвела более 300 тысяч тонн брикетов. В опубликованных литературных источниках отсутствуют данные о систематическом анализе результатов эксплуатации и причинах ее закрытия. С октября 2015 года фабрика практически не эксплуатируется.

Негативным оказался также опыт южноафриканской металлургической компании Xstrata [38], закупившей вибропрессовальное оборудование для шести брикетных фабрик для производства брикетов из хромой руды, ни одну из которых так и не удалось запустить в эксплуатацию из-за неудовлетворительного качества брикетов.

Другая южноафриканская компания - Assmang на протяжении ряда лет эксплуатировала вибропрессовальную линию для производства брикетов из техногенного сырья своего ферросплавного предприятия [39]. В 2016 году вследствие невозможности достичь экономически оправданного использования таких брикетов в шихте руднотермической печи, руководство компании решило обзавестись линией жесткой вакуумной экструзии. При проектировании линии были использованы результаты автора настоящей работы, изложенные в главах 3 и 5. Результаты опытно-промышленных плавок с брэксами, показали, что их доля в рудной части шихты может превысить 38 % при полном соответствии качества выплавляемого ферромарганца предъявляемым требованиям.

Результаты опытно-промышленных испытаний и практического использования вибропрессовальной технологии брикетирования показывают принципиальную возможность достижения требуемого уровня металлургических свойств окускованных продуктов. Вместе с тем такой способ брикетирования создает и некоторые существенные технологические ограничения, преодоление которых либо затруднено, либо приводит к существенному росту себестоимости брикета. По состоянию на начало 2016 года в России брикеты таким способом в промышленных объемах не производятся.

В 50-е годы прошлого столетия была предпринята попытка производства железорудных брикетов с использованием хорошо известной в керамической отрасли технологии вакуумной экструзии. Увлажненная смесь железной руды и бентонита подавалась в камеру вакуумирования и затем в экструдер, из фильеры которого выходили продолговатые цилиндрические брикетов [40]. Однако такой способ не получил в то время своего распространения. Безуспешные попытки использования экструзии для окускования сырья в

черной металлургии предпринимались и в СССР в 60-е годы. Первый успешный опыт производства брикетов для доменных печей из колошниковой пыли и шламов по технологии жесткой вакуумной экструзии (ЖВЭ) имел место на заводе фирмы Bethlehem Steel (США) в 1993 году [41], где была введена в эксплуатацию экструзионная линия брикетирования производительностью 20 тонн сырых брикетов в час. Оборудование линии было поставлено компанией J.C.Steele&Sons,Inc. (США). Брикеты проплавляли в доменных печах. Линия проработала до закрытия завода в 1996 г. В 1993 г. в Колумбии на заводе по производству ферроникеля была введена в эксплуатацию фабрика по производству экструзионных брикетов из пылей аспирации производства ферроникеля и мелочи латеритной никелевой руды годовой производительностью 700 тыс. т. В настоящее время владельцем завода является компания BHP Billiton. Себестоимость производства брэкса составляет 2,1 долл. США за тонну. Сообщения, посвященные этим двум проектам, были опубликованы в материалах конференций Института по брикетированию и окускованию (Institute for Briquetting and Agglomeration, IBA, http://agglomeration.org), распространявшихся по платной подписке среди членов этой ассоциации, большая часть которых представляла компании, производящие оборудование для валкового и вибропрессовального оборудования [41, 94]. Этим, а также, и отсутствием в этих публикациях результатов исследования металлургических свойств брикетов объясняется, то, что успех первых промышленных проектов по экструзионному окускованию не привлек широкого внимания. В литературе, посвященной брикетированию в металлургии, о применении технологии экструзии для окускования металлургического сырья либо вообще не упоминалась [1], либо сфера ее приложения в металлургии ограничивалась производством гранул для окускования агломерационной шихты, а ее применение для брикетирования металлургического сырья для доменных печей считалось неэффективным [42].

В 2010 году автором были предприняты усилия по изучению опыта работы первых промышленных линий жесткой вакуумной экструзии. Основываясь на результатах их эксплуатации и данных, размещенных на официальных интернет-сайтах компаний производителей оборудования для брикетирования, включая валковое и вибропрессовальное, характеристики процесса и свойства брикетов были сведены в сопоставительную таблицу (таблица 1.4).

Таблица 1.4 – Сопоставление технологий брикетирования

Характеристики процесса и свойства брикетов	Агрегаты для брикетирования и их характеристики		
	Вибростол	Валковый пресс	Экструдер
Максимальная	30 т/час	50 т/ч	100 т/час

производительность			
Срок службы (стоимость заменяемых деталей, долл. США/тонна)	1 год (н.д.)	1 год (1,5)	1,5 года (1,0)
Стоимость оборудования, млн.рублей	303	327*	158**
Содержание цемента в брикетах,%	8-10	15-16	4-6
Тепловая обработка сырых брикетов	80 ^{o}C (10-12 часов)	Не требуется	Не требуется
Оборотный цикл	Отсутствует	30 % от произ-ва	Отсутствует
Форма брикетов	призма, цилиндр	подушечка	стержень любого сечения
Размеры брикетов, мм	80x80,	30x40x50	диаметр 5-35 мм
Влажность шихты,%	меньше 5 %	меньше 10 %	12-18 %
Возможность складирования сырых брикетов в штабель	отсутствует	возможно	возможно
Расходы: Электроэнергия Природный газ Тепло Сжатый воздух	 42,6 кВтч/т 47 м^3/т 0,3 Гкал/т 90 м^3/т	 23,0 кВтч/т 0 0 0	 33 кВтч/т 0 0 0

* производительность 60000 т/год
** производительность 700000 т/год

Видно, что технология ЖВЭ превосходит существующие промышленные технологии брикетирования по производительности и экономичности. Ни одна из известных валковых и вибропрессовальных брикетных фабрик не достигла до настоящего времени масштабов производства таких, как упомянутая выше фабрика, принадлежащая BHP Billiton в Колумбии, и введенная в эксплуатацию в 2006 году фабрика для окускования латеритных никелевых руд и пылей аспирации производства ферроникеля в Бразилии (Vale, [43]) – по 700 тысяч тонн брэксов в год. Брикетирование методом ЖВЭ требует более низкого расхода цементного связующего и менее требовательно к уровню влажности шихты, а также позволяет производить брикеты, минимальный размер которых (диаметр) сопоставим с размером кусков агломерата и окатышей.

1.2 Выводы по главе

1. Наиболее широкое распространение для брикетирования природных и техногенных материалов получили способы валкового прессования и вибропрессования.

2. Ограничения на влажность шихты для валкового брикетирования требуют дооснащения линий брикетирования участками обезвоживания и/или сушки и ограничивают возможность использования цементного связующего.

3. Для производства валковых брикетов характерно образование до 30 % оборотных отходов в виде мелких фракций брикетируемой смеси.

4. Поддержание эксплуатационной способности валковых прессов сопряжено с необходимостью закупки и замены дорогостоящих бандажей по мере их износа.

5. Доля валковых брикетов, в случаях их применения в шихте современных доменных печей, ограничена несколькими десятками килограммов на тонну чугуна. При этом требуемая прочность брикетов достигается за счет повышенного расхода связующего.

6. Вибропрессовальная технология брикетирования, помимо собственно формования брикетов, включает в свой состав также технические приемы обеспечения целостности непрочных сырых брикетов путем их транспортировки на поддонах в камеру тепловлажностного упрочнения. Это требует организации достаточно сложной системы транспортировки брикетов от вибростола в камеру упрочнения, из камеры на склад продукции и возврата поддонов к вибростолу, что приводит к удорожанию брикетов и снижает надежность линии брикетирования.

7. Недостатком вибропрессовальной технологии является прямо пропорциональная зависимость производительности линии и обратно пропорциональная зависимость себестоимости и восстановимости брикетов от их размеров. Крупные брикеты гексагональной формы в сечении (60х60х60 мм и более) имеют низкую восстановимость и создают трудности при их выгрузке из бункеров, при загрузке в доменные печи из-за кострения.

8. Металлургические свойства вибропрессовальных брикетов удовлетворяют требованиям доменного процесса (кроме их крупности) и могут рассматриваться в качестве компонентов шихты доменных печей, но повышенное содержание цементного связующего увеличивает их себестоимость и негативно сказывается на вязкости образующихся из них первичных шлаков.

9. Первый опыт применения технологии ЖВЭ для производства компонента доменной шихты не был изучен с точки зрения металлургических свойств брикетов.

10. Результаты эксплуатации фабрик ЖВЭ для окускования латеритных никелевых руд и пыли систем аспирации производства ферроникеля показали возможность достижения высоких уровней производительности линий брикетирования при невысоких капитальных затратах.

11. Технология ЖВЭ обладает рядом особенностей, обусловивших появление специального названия брикетов экструзии – БРЭКС. Влияние этих особенностей на металлургические свойства практически не изучено.

12. Результаты сопоставительного анализа технико-экономических показателей трех применяемых промышленных технологий брикетирования позволяют вполне обоснованно выбрать технологию ЖВЭ в качестве основной технологии брикетирования техногенного и природного сырья, применяемого в процессах экстрактивной металлургии черных металлов.

На основе проведенного анализа сформулированы следующие основные задачи исследования:

- Изучить влияние параметров технологии ЖВЭ на физико-механические свойства получаемых брэксов и разработать рекомендации по оптимизации их компонентного состава и формы;

- Изучить возможности применения технологии ЖВЭ для промышленного брикетирования мелкодисперсных природных и техногенных материалов черной металлургии;

- На основе изучения микроструктуры, фазового состава и минералогической структуры сырых и восстановленных брэксов, математического моделирования и промышленных экспериментов 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;

- Исследовать фазовый состав и особенности микроструктуры сырых и металлизованных брэксов.

2 Методы исследования, используемые в работе

2.1 Изготовление лабораторных и опытно-промышленных брэксов

Брэксы для исследований изготавливали на лабораторном экструдере с компьютерным управлением в лаборатории фирмы J.C. Steele&Sons,Inc. (рисунок 2.1). Смеситель Hobart использовали для перемешивания материалов. Лабораторный экструдер состоит из двух камер с герметичной насадкой между ними. В задней камере расположен 3-х дюймовый

уплотняющий шнек, проталкивающий смесь через герметичную головку. Во второй камере имеется такой же 3-х дюймовый уплотняющий шнек для продавливания смеси через фильеру. В этой камере может создаваться вакуум.



Рисунок 2.1 – Лабораторный экструдер для изготовления образцов брэксов

Промышленные брэксы для доменной печи производились в компании SURAJ PRODUCTS LTD экструдером Steele 25 производительностью до 20 тонн в час. Подготовленная на складе сырья смесь из основных компонентов брэкса подается фронтальным погрузчиком в питатель равномерной подачи Steele 88E. Далее смесь с добавками связующего и пластификатора подается на перемешивание в первичную (открытую) глиномялку, а затем во вторичную глиномялку с вакуумным затвором. Конструктивно эта глиномялка объединена в единый агрегат с экструдером и расположена над ним. Смесь входит в вакуумную камеру, диспергируется и ее частицы падают вниз на лезвия шнека экструдера. Вакуум (100 мм рт.ст.) сохраняется во всем рабочем объема экструдера вплоть до фильеры. Процесс изготовления брэксов завершается в экструдере после выдавливания смеси через отверстия в фильере в виде продолговатых пластичных цилиндров.

Свежеотформованные брэксы из экструдера направляются конвейером к штабеллеру-укладчику. В штабеле брэксы вылеживаются в течение 2–3 суток, откуда забираются в доменный цех или на открытый склад.

Брэксы для опытно-промышленных испытаний по выплавке силикомарганца производились на промышленном экструдере Steele 75 производительностью 50 тонн в час (рисунок 2.2).



Рисунок 2.2 – Изготовление промышленных брэксов для выплавки силикомарганца на экструдере Steele 75

2.2 Исследование металлургических свойств брэксов

2.2.1 Определение восстановимости железорудных материалов

Восстановимость – величина, характеризующая способность оксидов железа железорудных материалов отдавать восстановительному газу кислород. Восстановимость железорудного материала зависит от его структуры, удельной поверхности пор, минералогического состава.

Восстановимость образцов брэксов определяли с использованием стандартной методики (ГОСТ 28657-90 Руды железные. Метод определения восстановимости) [44], в соответствии с которой осуществляется восстановление навески определенного класса в неподвижном слое при температуре 950 °С с применением восстановительного газа, содержащего CO и N_2, взвешивание навески через определенные моменты времени, расчет степени восстановления относительно железа (III) и расчет степени восстановления при соотношении кислород/железо равном 0,9. Навеску помещают в восстановительную трубку так, чтобы поверхность была

ровной, закрывают крышку восстановительной трубки и помещают ее в печь, подвешивая по центру над весами. Затем по восстановительной трубке пропускают поток инертного газа со скоростью примерно 25 дм^3/мин и начинают подогрев. При достижении температуры навески уровня 950 ^{o}C, увеличивают скорость потока инертного газа до 50 дм^3/мин и продолжают нагревание, поддерживая поток инертного газа, пока масса навески и температура не будут постоянными. Вводят восстановительный газ для замены инертного со скоростью 50 дм^3/мин. Записывают массу навески примерно каждые 3 мин в первые 15 мин, а затем через каждые 10 мин. Прекращают восстановление, когда потеря кислорода составит 65 %.

Степень восстановления по истечении времени (R_t) относительно железа (III) в процентах вычисляют по формуле:

$$R_t = \left[\frac{0{,}111W_1}{0{,}430W_2} + \frac{m_1 - m_2}{m_0 - 0{,}430W_2}\right]100 \qquad (1)$$

где: m_0 – масса навески

m_1 – масса навески непосредственно перед началом восстановления, г

m_2 – масса навески после 4 ч восстановления

W_1 – массовая доля окиси железа (II) в контрольной пробе до исследования и рассчитанная по массовой доле железа (II) умножением его на фактор 1,286

W_2 – массовая доля общего железа (II) в контрольной пробе до исследования, %

Газопроницаемость слоя и усадка определялась в соответствии с ГОСТ 21707-76 «Руды железные, агломераты и окатыши. Метод определения газопроницаемости и усадки слоя при восстановлении» [45].

2.2.2 Определение горячей прочности железорудных материалов во вращающемся барабане после низкотемпературного восстановления по стандарту ISO 4696-1:1998 и ISO 4696-2:1998

По стандарту ISO 4696-1:1998 [46] образец для испытаний высушивали в печи при температуре 105 ^{o}C ± 5 ^{o}C на протяжении двух часов. Далее, перед испытанием его охлаждали до комнатной температуры. В соответствии со стандартом, размер кусочков агломерата и брэксов, используемых в испытаниях, составил от 10 до 12,5 мм.

Испытываемая проба (500 г) помещается на фарфоровые окатыши в восстановительной трубке. В центр испытываемой пробы помещается термопара. Трубка заполняется инертным газом (расход аргона 20 л/мин), а испытываемая проба нагревается пока не достигнет

температуры 500 °C + 5 °C. Далее проба в течение 1 часа продувается восстановительным газом (состав: CO – 20 %, CO_2 – 20 %, H_2 – 2 %, N_2 – 58 %) с расходом 20 л/мин, а затем охлаждается до температуры ниже 100 °C потоком инертного газа.

Испытываемую пробу извлекают из восстановительной трубки, определяют ее массу (m_o) и помещают в галтовочный барабан, в котором проба подвергается разрушающим нагрузкам за счет вращения барабана со скоростью 30 оборотов в минуту в течение 10 минут. После этого пробу извлекают из барабана и просеивают вручную на ситах с диаметром ячеек 6,3 мм; 3,15 мм и 500 мкм. Прочность определяется по результатам как минимум двух испытаний.

Индекс горячей прочности (индекс разрушения при восстановлении) RDI-1 рассчитывается как количественное измерение степени дробления материала после восстановления и перемешивания. Материал, размер которого больше 6,3 мм и менее 500 мкм относится к испытательной порции после восстановления и до перемешивания.

Таким образом, индекс горячей прочности RDI – 1 рассчитывается из следующих равенств:

$$\mathrm{RDI}-1=\frac{m_1}{m_o}100 \tag{2}$$

$$\mathrm{RDI}-1_{-3,15}=\frac{m_o-(m_1+m_2)}{m_o}100 \tag{3}$$

$$\mathrm{RDI}-1_{-0,5}=\frac{m_o-(m_1+m_2+m_3)}{m_o}100 \tag{4}$$

где m_o – масса испытываемой пробы после восстановления, но до вращения в галтовочном барабане, г

m_1 – масса надрешетной фракции, оставшейся на сите с ячейкой 6,3 мм, г

m_2 – масса надрешетной фракции, оставшейся на сите с ячейкой 3,15 мм, г

m_3 – масса надрешетной фракции, оставшейся на сите с ячейкой 500 мкм, г

По стандарту ISO 4696-2:1998 [47] пробоподготовку материала проводили аналогично первой части стандарта. Несколько отличался фракционный состав материала, который составлял от 16 до 20 мм. Нагрев образца до температуры 550 °C проводили в инертной атмосфере при расходе газа 15 л/мин. После достижения указанной температуры, пробу в

течение 30 минут продували восстановительным газом (CO – 30 %, N2 – 70 %) с расходом 15 л/мин, а затем охлаждали инертным газом до температуры менее 100 ^{o}C. Охлажденную пробу в течение 30 минут подвергали разрушающим нагрузкам в барабане, вращающемся со скоростью 30 оборотов в минуту. После удаления материала из барабана, его просеивали вручную на сите с отверстиями диаметром 2,8 мм. С каждым образцом проводили не менее двух испытаний. Индекс горячей прочности RDI– $2_{,2,8}$, выраженный как процент массы, рассчитывался из следующего равенства:

$$RDI\ -2_{-2,8} = 100 - \frac{m_1}{m_o}100 \quad (5)$$

где m_o – это масса испытываемой порции после восстановления и перед вращением в барабане, г

m_1 – это масса надрешетного продукта; удержанного на сите 2,8 мм, г

2.3 Минералогические исследования

2.3.1 Оптическая микроскопия

Микроскопические исследования представляют собой одно из важнейших и, в то же время, наиболее простых и доступных средств изучения вещественного состава образцов. Изучение минеральных составляющих исследуемых образцов проводят с помощью микроскопов на полированных шлифах. К числу оптических свойств в этом случае относятся показатель отражения, т.е. способность минерала отражать от своей поверхности определенное количество света, характер двупреломления и цвет минерала [48, 49].

Для изготовления полированных шлифов используются следующие операции [48]:

1) цементирование образца в растворе канифоли путем нагрева раствора до кипения, выдержки в течение 1...2 мин и последующего охлаждения;

2) грубая обработка образцов зеленым электрокорундом до получения нужного размера поверхности;

3) цементирование образца аналогично пункту 1;

4) обработка на ровном диске с добавлением микропорошка электрокорунда до получения ровной поверхности;

5) обработка на ровном стекле с добавлением микропорошка электрокорунда, полировка оксидом хрома и доводка на диске с сукном.

Изготовление шлифов из сыпучих материалов включает дополнительную операцию – прессование, т.е. получение прочных брикетов, из которых можно изготовить полированные шлифы по вышеописанной методике. Для этого используют связующее, с которым смешивают исследуемое сыпучее вещество, помещают в форму, зажимают прессом и подвергают нагреву, в результате которого происходит затвердевание связующего вещества [48].

Изучение микроструктуры всех образцов проводилось на аппаратном комплексе, включающем:

- Лабораторный инвертированный микроскоп Leica DM ILM с оптикой высокого разрешения HC производства фирмы Leica Microsystems (Германия). Данный микроскоп снабжен окуляром с десятикратным увеличением и набором объективов серии N PLAN с пяти-, двадцати-, пятидесяти- и стократным увеличением, размещенных в держателе объективов револьверного типа и позволяющих получать пятидесяти-, двухсот-, пятисот- и тысячекратное общее увеличение. Микроскоп оснащен механическим столиком 247x230 мм (перемещение 60x40 мм) с внутренними отверстиями диаметром 80,40, 30 и 20 мм.
- Цифровую цветную видеокамеру высокого разрешения 1/2 дюйма Leica DC 300, обеспечивающую передачу информации в реальном масштабе времени. Частота съемки – 1...10 кадров в секунду. Разрешающая способность 2048x1526 (3,2 мегапикселей) в стандартном режиме и 7,2 мегапикселей в режиме высокого разрешения, color 12 bit. Автоматическая балансировка белого. Точная цветопередача и передача геометрических размеров.
- Персональный компьютер, оснащенный специальной платой захвата изображений высокого разрешения посредством цифровой камеры, установленной на микроскоп. На компьютер установлено специализированное программное обеспечение, разработанное фирмой Leica Microsystems, позволяющее обрабатывать и сохранять полученное с камеры изображение.

Макроструктура образцов исследовалась на стереомикроскопе с непрерывным изменением увеличения 6,3:1 Leica S6E. Угол наклона тубуса 38 °.

2.3.2 Термографический метод STA

Термический анализ представляет собой метод исследования физико-химических и структурных превращений, происходящих в веществе при изменении его температуры. С помощью этого метода определяют характер термических эффектов происходящих при этом: эндо- или экзотермических, а также температурный интервал их изменения.

Термический анализ, является традиционным методом исследования минерального сырья. Дифференциальный термический анализ (ДТА) основан на регистрации разности температур между исследуемым образцом и термоинертным эталоном в процессе нагревания или охлаждения по заданному режиму. Если превращения в образце отсутствуют, $\Delta T = 0$, кривая ДТА должна иметь вид прямой, совпадающей с нулевой линией, параллельной оси абсцисс. При ее графическом изображении разность температур ΔT откладывают по оси ординат, а температуру Т - по оси абсцисс. Температура образца может изменяться от задаваемого режима в результате фазовых переходов и химических реакций. К таким процессам относятся: плавление, кипение, испарение, сублимация, перестройка или разрушение кристаллической структуры, а также реакции диссоциации, дегидратации, разложения, окисления, восстановления и т. п. На кривой ДТА экзотермические процессы сопровождаются отклонением от базовой линии вверх, а эндотермические – отклонением вниз. Для термического анализа в большинстве случаев используется фракция 0,074 мм. Массу образца выбирают в зависимости от конкретных условий и задач эксперимента, обычно от 10 до 500 мг. Современные аппаратурные разработки позволяют проводить термический качественный и количественный фазовый анализы в полуавтоматическом режиме с обработкой результатов на компьютере [50]. В данной работе термический анализ был выполнен на приборе NETZSCH STA 449C. Нагрев образца со скоростью 20 °C/мин проводили в атмосфере аргона до начала расплавообразования.

2.3.3 Мессбауэровская спектроскопия

Мессбауэровская (ядерный гамма-резонанс, ЯГР) спектроскопия основана на эффекте Мессбауэра, заключающегося в резонансном испускании и поглощении гамма-квантов ядрами изотопов. Основным источник информации в мессбауэровской спектроскопии является спектр, представляющий зависимость интенсивности прошедшего через поглотитель излучения от скорости движения источника излучения. Основными параметрами мессбауэровских спектров являются: изомерный сдвиг, квадрупольное расщепление, магнитные поля на ядрах резонансных элементов, величина резонансного эффекта, пропорциональная площади спектра и содержанию железа в образце [49].

Первичная информация, получаемая из ЯГР-спектров, дает представление: о валентных состояниях ионов железа и характере их химической связи; об особенностях состава минералов; об особенностях их структуры; о магнитной структуре минералов; о минеральных формах железа и количественных их соотношениях. При изучении фазового состава минерального

сырья различия мессбауэровских спектров позволяют проводить не только диагностику минералов железа, но и количественно оценивать распределение валентных и минеральных форм этих элементов в анализируемых образцах. Относительное содержание железа, связанного с каждой минеральной формой, производится по площадям составляющих компонент. Для измерения используются спектрометры электродинамического типа MS-1104Em, ЯГРС-4М и другие. В качестве источника гамма-излучения используется Co^{57} в матрице хрома. Изомерный сдвиг определяется относительно α-Fe. Для измерения использовали пробы навеской 100 мг, измельченные до 0,05...0,07 мм. Чувствительность метода составляет порядка 0,5 % железа. При количественном анализе пробы изготавливаются в виде таблетки путем смешивания пробы с предварительно нагретым парафином и последующим прессованием. Исследуемый образец помещают в измерительный блок между источником излучения и детектором, а затем проводят измерение. При достижении отношения интенсивности резонансного пика к статистическому разбросу 25...30, ЯГР-спектр записывается в виде файла в память персонального компьютера, а затем производится его обработка по программе «Univem MS», разработанной в РГУ (Ростов). Критерием наилучшего разложения мессбауэровского спектра на составляющие является min χ^2 – параметр, оценивающий приближение расчетного спектра к экспериментальному. Суть компьютерной обработки заключается в том, что выбирается несколько моделей разложения спектра в зависимости от числа предполагаемых фаз, валентных состояний ионов железа и числа занимаемых ими позиций. Для этого используется предварительная информация об образцах и визуальный анализ спектра ЯГР [49,51].

2.3.4 Растровая (электронная) микроскопия

Для оптических методов исследований использовалась аппаратура фирмы «Nikon»: поляризационный микроскоп ECLIPSE LV100- POL, оснащенный цифровой фотомикрографической системой DS-5M-L1.

Анализ минеральных фаз в аншлифах-брикетах проводился в аналитической лаборатории НИТУ «МИСиС» на инструментальном автоматическом комплексе MLA 650 (FEI Company), включающем сканирующий электронный микроскоп FEI Quanta 650 SEM, оснащенный системой рентгеноспектрального микроанализа с двумя детекторами.

Основные минеральные фазы определялись рентгеноструктурным анализом с помощью аналитического комплекса ARL 9900 Workstation IP3600 (комбинированная конструкция

«рентгенофлуоресцентный спектрометр с верхним расположением трубки + θ-θ дифрактометр»).

2.3.5 Рентгеноструктурный анализ

Рентгеноструктурный анализ в настоящей работе выполнялся также с использованием рентгеновского дифрактометра Rikagu Miniflex600 (Япония). Рентгеновские дифрактометры предназначены для измерения угловой зависимости интенсивности отраженного от вещества рентгеновского излучения с последующим вычислением параметров кристаллической решетки и оценкой состава и структуры исследуемого объекта. Определение фазового состава образца является наиболее распространённой задачей рентгеноструктурного анализа. Каждая фаза имеет свою кристаллическую решётку, а значит, характеризуется и определённым набором межплоскостных расстояний. Поэтому для решения вопроса о том, какая фаза присутствует в пробе, нет необходимости в определении её кристаллической структуры, а достаточно сравнить полученный из дифрактограммы ряд межплоскостных расстояний с табличными значениями из базы данных (ASTM Diffraction Data File).

Количественный фазовый анализ основан на количественном сравнении интенсивности линий разных фаз друг с другом или с интенсивностью линии эталона, снимаемого в тех же условиях.

Для химического и фазового анализа образцов использовался также аналитический комплекс ARL 9900 Workstation IP3600. В приборе реализована комбинированная конструкция "рентгенофлуоресцентный спектрометр с верхним расположением трубки + θ-θ дифрактометр". В качестве источника излучения для флуоресцентного анализа в данном приборе применяется вертикальная расположенная над образцом рентгеновская трубка мощностью 3600 Вт с Rh-анодом и Be-окном толщиной 0,075 мм. Охлаждение трубки – водяное. Расположение трубки над образцом позволяет предотвратить загрязнение аналитического объема прибора при недостаточной прочности прессованных образцов, а также обеспечить широкую вариативность конструкции. ARL 9900 Workstation укомплектован фиксированными каналами – монохроматорами (7 каналов – Na, K, Ca, Si, Al, S, Fe) для одновременного проведения анализа на ряд элементов и гониометром G45 (2 детектора – FPC и SC, 6 кристаллов – AX16C, AX09, AX03, PET, LiF200, LiF220) для последовательного анализа.

Дифракционная часть прибора включает в себя расположенный в том же аналитическом пространстве компактный θ-θ гониометр. В качестве источника излучения для регистрации дифрактограмм в приборе применяется узкофокусная рентгеновская трубка с Co-анодом

мощностью 1800 Вт. За счет расположения дифрактометра в термостабилизированном вакуумном танке достигается высокая воспроизводимость измерений с одновременным сокращением времени съемки без потери точности. Минимизация поглощения излучения за счет проведения анализа в вакууме приводит к высокой интенсивности аналитического сигнала. Возможна регистрация дифрактограмм в диапазоне углов $2\theta = 8 \div 80°$.

2.4 Исследование пористости брэксов методами электронной микроскопии и компьютерной томографии с использованием ПО «STIMAN» (МГУ) [52,53]

2.4.1 Компьютерная томография

Рентгеновская компьютерная микротомография (μКТ) позволяет визуализировать трехмерную внутреннюю структуру объекта, не нарушая его целостности. Принцип работы компьютерного томографа основывается на просвечивании исследуемого объекта тонким пучком рентгеновских лучей (рисунок 2.3). Проходя через объект, рентгеновские лучи поглощаются различными структурными элементами в разной степени. Затем Х-лучи регистрируются системой детекторов, в результате чего получается теневая проекция, напоминающая медицинский рентгеновский снимок. Путем вращения образца вокруг оси, набирается серия теневых проекций, по совокупности которых проводится реконструкция внутреннего строения объекта. В результате реконструкции получается кубический объем данных, разбитый, как правило, на 512 вокселей в каждом направлении. Способ представления данных может быть различным: ортогональные полутоновые сечения, которые можно проводить в любом месте этого объема, возможно получение объемного представления и др. (рисунок 2.4, б, в). Разрешение или размер пикселя (вокселя) определяется диаметром образца, приведенным на количество пикселей (вокселей) изображения (как правило, 512(x512x512)).

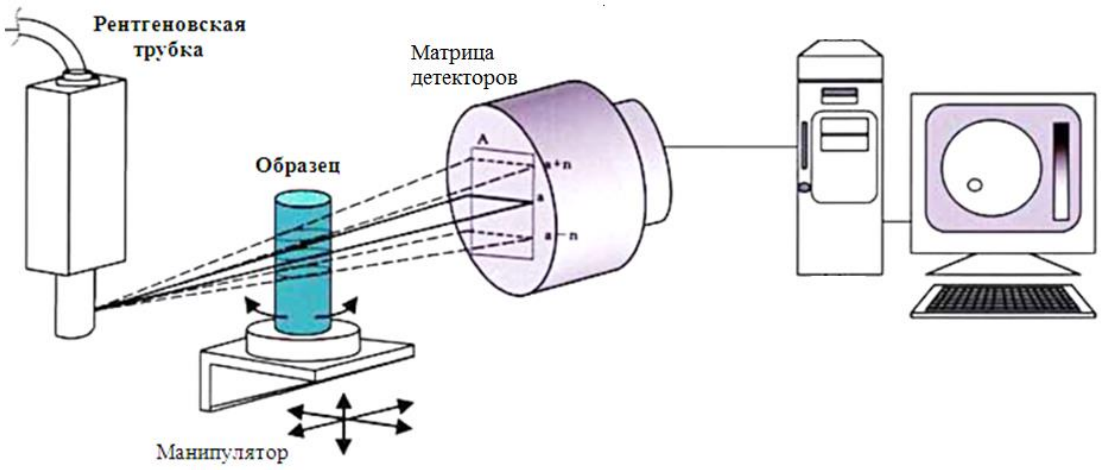
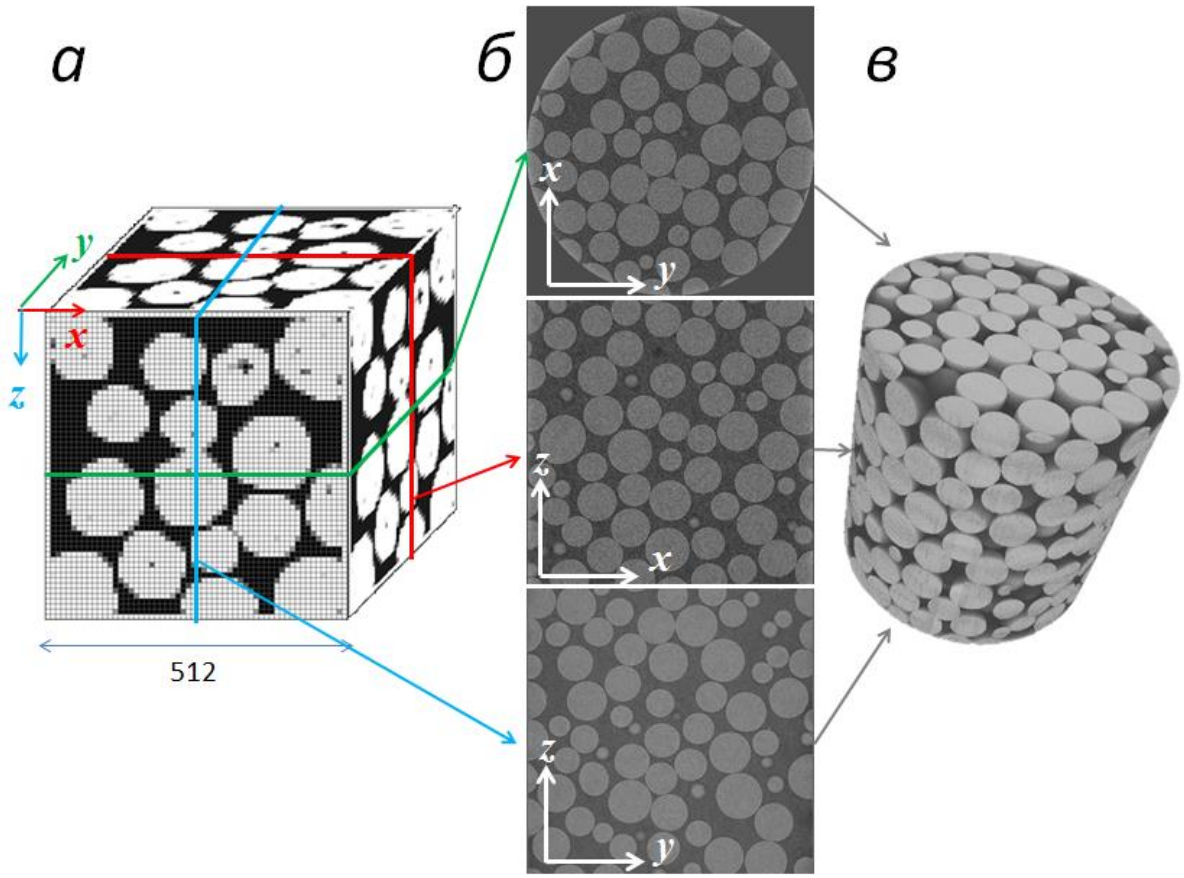


Рисунок 2.3 – Принцип работы и основные узлы компьютерного рентгеновского томографа TDM 1000H-II



а) изначальный реконструированный объем данных, б) ортогональные полутоновые сечения, в) объемное изображение

Рисунок 2.4 – Способы представление данных

Оттенки серого на таких изображениях соответствуют относительному линейному рентгеновскому коэффициенту ослабления, который является функцией плотности, атомного номера и энергии рентгеновских лучей. При оценке сложной структуры измерение её

«рентгеновской плотности» не всегда позволяет с точностью утверждать, какое вещество визуализируется. Обычно можно лишь выделить более плотные (показаны светлым тоном) и более рыхлые (показаны темным тоном) участки образца. Таким образом, границы, например, между поровым пространством и веществом, определяются оператором, путем установления порогового значения уровня серого. После бинаризации изображения по выбранному уровню серого оттенка можно проводить количественные операции, например, оценить процентное содержание любого интересующего компонента.

2.4.2 Растровая электронная микроскопия

Для исследования использовался свежий скол поверхности образца.

Для морфологических исследований микроструктуры использовался 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. Данный режим позволяет получать корректные изображения с более четкими границами между порами и частицами. 2 – комплексный анализ по серии РЭМ-изображений и μКТ-изображений сечений образца, полученных при различных увеличениях.

1. $n_{из}$ – общая пористость, рассчитанная по РЭМ изображению.
2. D_1, D_2,D_3, D_4, D_5 – различные размерные категории пор.
3. D_{max} – максимальный эквивалентный диаметр пор.
4. K_f – коэффициент формы пор. Рассчитывается как соотношение малой и большой полуосей эллипса, вписанного в пору. Для изометричных пор K_f = 0,66–1,00, для анизометричных - K_f = 0,1–0,66, для щелевидных пор K_f < 0,1.

После высушивания образцов необходимо подготовить исследуемую поверхность. Для успешного проведения количественного анализа микростроения брэкса исследуемая поверхность должна быть ровной и лишенной каких-либо «ложных» элементов микрорельефа – выступающих частиц и выколов. Поверхность образца обрабатывается на полировальном круге с применением полировальной пасты. После полировки образец помещают в пробирку с жидкостью, не растворяющей поверхность (дистиллированная вода, ацетон, спирт), и пропускают ультразвук.

Количественный морфологический анализ полученных в РЭМ изображений осуществляется с помощью программного обеспечения «STIMAN». В качестве входной

информации ПО «STIMAN» используются серии разномасштабных РЭМ-изображений, охватывающих весь диапазон размеров структурных элементов. Обычно анализ проводится по сериям, содержащим не менее 8 изображений, полученных при увеличениях, меняющихся в геометрической прогрессии с коэффициентом равным 2. Количественный анализ осуществляется поэтапно. Каждому этапу соответствует специальный программный модуль, составляющий ПО «STIMAN». Схематично модули ПО «STIMAN» представлены на рисунке. 2.5.



Рисунок 2.5 – Схема ПО «STIMAN»

2.5 Математическое моделирование с использованием пакета ABAQUS [54]

2.5.1 Метод конечных элементов [55]

На настоящий момент метод конечных элементов (МКЭ) является одним из наиболее распространенных инструментов математического моделирования для проведения инженерных расчетов. Область применения МКЭ достаточно обширна и охватывает все физические процессы, которые могут быть описаны дифференциальными соотношениями. Популярность

данного метода обусловлена его результативностью, возможностью решения нелинейных задач, а также, наглядностью представления полученных результатов.

Основой физической концепции МКЭ является представление геометрической модели конструкции в виде композиции непересекающихся подобластей простой геометрической формы – конечных элементов (КЭ). Множество КЭ, на которые разбита конструкция, представляет собой конечно – элементную аппроксимацию исходной геометрической формы исследуемого объекта (рисунок 2.6). Механическое поведение каждого КЭ описывается с помощью конечного числа степеней свободы (n) или значений искомых функций во множестве узловых точек.

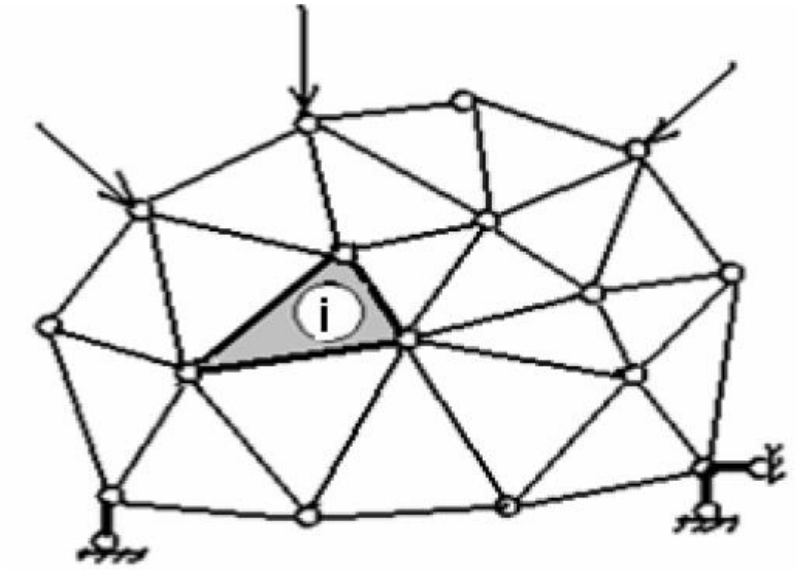


Рисунок 2.6 – Конечно – элементное представление конструкции

Большинство современных конечно – элементных комплексов используют метод перемещений в качестве основного варианта реализации процедуры МКЭ. Узловые перемещения не дают полной характеристики НДС системы. Возникает необходимость найти способ перехода от узловых перемещений к перемещениям, напряжениям и деформациям внутри конечных элементов. Это осуществляется за счет введения интерполирующих функций. Интерполяционные функции обычно формулируются не в общей, а в местной системе координат, отражающей специфику геометрии элемента и не зависящей ни от его размеров, ни от положения.

Таким образом, МКЭ сводит решение общей задачи к решению ряда «локальных» задач для некоторых областей в форме конечных элементов, находящихся под воздействием узловых сил и перемещений. Для описания общего НДС тела необходимо объединить все элементы в единую систему, удовлетворяющую условиям совместности деформации конструкции в целом. Стоит отметить, что тело представлено совокупностью конечных элементов, связанных

конечным числом точек (узлов), поэтому указанные условия необходимо установить именно для этих точек системы. Данная проблема решается на основе энергетических принципов механики деформируемых тел, исходя из того, что энергия системы равна сумме энергии, каждая из которых относится к соответствующему конечному элементу.

2.5.2 Программный комплекс ABAQUS

Семейство продуктов ABAQUS, которое разрабатывается и поддерживается компанией ABAQUS, Inc. (USA) с 1978 года, включает в себя три основных модуля: ABAQUS/Standard, ABAQUS/Explicit, ABAQUS/CAE, и несколько дополнительных модулей для специальных задач – модуль анализа чувствительности конструкции к различным параметрам ABAQUS/Design, модуль для расчета усталостной прочности FE/Safe, модуль ABAQUS/Aqua для расчета конструкций, испытывающих ветровые нагрузки или погруженных в воду, а также интерфейсы с другими программными продуктами.

ABAQUS/Standard – модуль конечно-элементного анализа общего назначения в линейной и нелинейной постановках с возможностью следующих обобщенных типов анализа:

- Статический анализ напряжений / перемещений
- Вязкоупругий / вязкопластический отклик
- Переходный динамический анализ напряжений / перемещений
- Переходной или установившийся анализ теплопередачи
- Переходной или установившийся анализ диффузии массы
- Поток в пористой среде – механика
- Напряжения – диффузия массы (последовательно сопряженное решение)

ABAQUS/CAE – графическая оболочка для моделирования, управления и мониторинга задач ABAQUS, а также для визуализации результатов расчета ABAQUS. Возможности по визуализации результатов ABAQUS/CAE также доступны в виде отдельного модуля ABAQUS/Viewer.

ABAQUS предоставляет широкие возможности как линейного, так и нелинейного анализа. Имеется возможность использования независимой библиотеки материалов и элементов, при этом любые материалы могут быть использованы в любых элементах. ABAQUS не имеет ограничений по количеству материалов и элементов, используемых в модели.

Модели материалов, реализованные в ABAQUS позволяют описывать металлы, чугун, резину, пластмассы, композиционные материалы, упругие и хрупкие пены, бетон, песок, глину. Отклик материала для каждой из этих моделей может быть сильно нелинейным.

Предусмотрены линейные и нелинейные упругие, упругопластические, и упруговязкопластические закономерности. Могут быть смоделированы материалы как изотропные, так и анизотропные.

Существующие модели поведения материалов позволяют решать задачи из области механики разрушения.

2.6 Компьютерное моделирование доменной плавки

Оценку технических эффектов применения в доменной печи брэксов различного компонентного состава выполнили с помощью компьютерного моделирования доменной плавки с использованием математической модели доменного процесса, разработанной в МИСиС И.Ф.Куруновым и С.Б Ященко [56] и реализованной в виде программного продукта Л.А. Фурсовой [57]. Математическая модель является статической, адекватной для стационарных условий, процесса и включает следующие взаимосвязанные блоки:

- Массо - и теплообмен в доменной печи, материальный и тепловой баланс плавки;
- Газодинамика процесса;
- Блок адаптации модели к условиям конкретной доменной печи.

Входными величинами модели являются:

- Геометрические размеры профиля доменной печи, число и диаметр воздушных фурм;
- Компонентный состав доменной шихты;
- Распределение рудной нагрузки по радиусу печи;
- Содержание мелочи (0–5 мм) в железорудной шихте;
- Количество образующейся мелочи в процессе низкотемпературного восстановления;
- Химический состав шихтовых материалов, золы кокса и пылеугольного топлива (ПУТ);
- Химический состав и расход вдуваемого природного газа;
- Технический анализ кокса;
- Технический анализ угля ПУТ с учетом состава летучих веществ;
- Расход вдуваемого ПУТ;
- Температура дутья, содержание кислорода и влаги в нем;
- Давление газа на колошнике;
- Коэффициент газодинамической устойчивости (общий перепад давления);
- Заданное содержание кремния в чугуне;

- Содержание углерода в чугуне.

Выходными величинами модели являются:

- Производительность доменной печи;
- Расход кокса;
- Состав и температура колошникового газа;
- Выход и химический состав шлака;
- Состав чугуна.

Для расчета материального и теплового баланса доменной плавки в модели использована методика известного французского профессора А. Риста, основанная на существовании в шахте доменной печи зоны замедленного теплообмена (изотермической зоны или зоны термического резерва), в геометрических пределах которой существует химически резервная зона. В пределах этой зоны возможно достижение химического равновесия реакции газового восстановления (CO и H_2) железа из вюстита, требующей самого большого расхода восстановителей по сравнению с восстановлением магнетита и гематита.

Стационарный процесс противоточного массообмена в доменной печи в шахте доменной печи описывается уравнением «операционной прямой»:

$$Yк=Y_O-\mu(Xк-X_O) \qquad (6)$$

где: $\mu = n_{(C+H2)} / n_{Fe}$ – расход восстановительного газа, (атом C + моль H_2)/атом Fe

Уо и Ук – начальная и конечная окисленность железа, атом O/атом Fe

Хо и Хк – начальная и конечная окисленность восстановительного газа, (атом O + моль H_2)/(атом C + моль H_2).

Тепловой баланс процесса рассчитывается из вполне справедливого для современных условий плавки (подготовленные сырьевые материалы и отсутствие сырого известняка или гидратной руды в шихте) допущения, что теплопотребность всего процесса в печи определяется теплопотребностью нижней зоны и что тепла газа, выходящего из этой зоны, хватает для удовлетворения потребности в тепле верхней зоны.

Потери тепла в модели не задаются, а рассчитываются в зависимости от геометрических размеров печи с использованием усредненных результатов экспериментального определения потерь тепла с охлаждающей водой по высоте печи [58].

Блок газодинамики процесса построен на использовании уравнения Эгона [59]. В зависимости от поперечного сечения, печи, распределения рудной нагрузки по радиусу,

порозности и газопроницаемости столба шихты, в блоке определяется максимальный расход газа при заданном перепаде давления, расход дутья и производительность печи:

$$П = П_б \cdot П_г \text{ , т/мин} \quad (7)$$

где: $П_б$ – балансовая составляющая производительности или выплавка чугуна в расчете на 1 $м^3$ горнового газа, $т/м^3$

$П_г$ – газодинамическая составляющая производительности или максимальное количество газа, проходящее через печь в единицу времени при заданном перепаде давления, $м^3$/мин. Балансовая составляющая производительности определяется из материально-теплового баланса плавки.

Блок адаптации модели имеет два режима работы – автоматический и ручной. Для адаптации модели задаются средние за месяц или другой период работы доменной печи, но не менее 10–15 суток, входные и выходные величины процесса на этой печи за данный период времени. Настроечными коэффициентами модели являются: коэффициент формы кусков шихты, степень износа кладки, коэффициент интенсивности потерь тепла. При автоматической настройке из имеющейся в базе данных модели выбирается кривая распределения рудной нагрузки, при которой достигается максимальное приближение расчетных значений производительности, расхода кокса и состава колошникового газа к фактическим значениям за этот период работы печи. Более тонкая настройка модели с помощью указанных коэффициентов производится вручную.

Моделирование начинается после адаптации модели.

Разработчики модели проверяли ее адекватность по результатам работы многих доменных печей и оценивают ее как вполне удовлетворительную. Особенностью модели является то, что температура термически резервной зоны в ней принята постоянной (950 ^oC), что не оказывает существенного влияния на погрешность расчетов при работе с вдуванием углеводородов (более 100 $м^3/т$ – природный газ, более 150 кг/т – ПУТ).

3 Особенности жесткой вакуумной экструзии как способа брикетирования природного и техногенного сырья

Жесткая вакуумная экструзии (ЖВЭ) используется для производства керамического кирпича в 64 странах мира, включая США, Великобританию, Германию, Южную Корею, ЮАР и др. страны (всего более 600 экструдеров задействовано в промышленном производстве кирпича по всему миру). Крупнейший в мире завод, работающий по технологии ЖВЭ в Саудовской Аравии, производит миллион штук кирпича в сутки [60].

По классификации, принятой в кирпичной отрасли, «жесткой» считается экструзия, осуществляемая при давлениях в диапазоне от 2,5 до 4,5 МПа и влажностях формуемой массы от 12 до 18 % (таблица 3.1., [61]).

Таблица 3.1.Классификация типов экструзии

Тип экструзии	Низкое давление	Среднее давление	Высокое давление	
Наименование	Мягкая экструзия	Полужесткая экструзия	Жесткая экструзия	
Влажность	10-27	15-22	12-18	10-15
Давление, МПа	0,4-1,2	1,5-2,2	2,5-4,5	До 30

3.1 Подготовка шихтовых материалов для окускования методом ЖВЭ

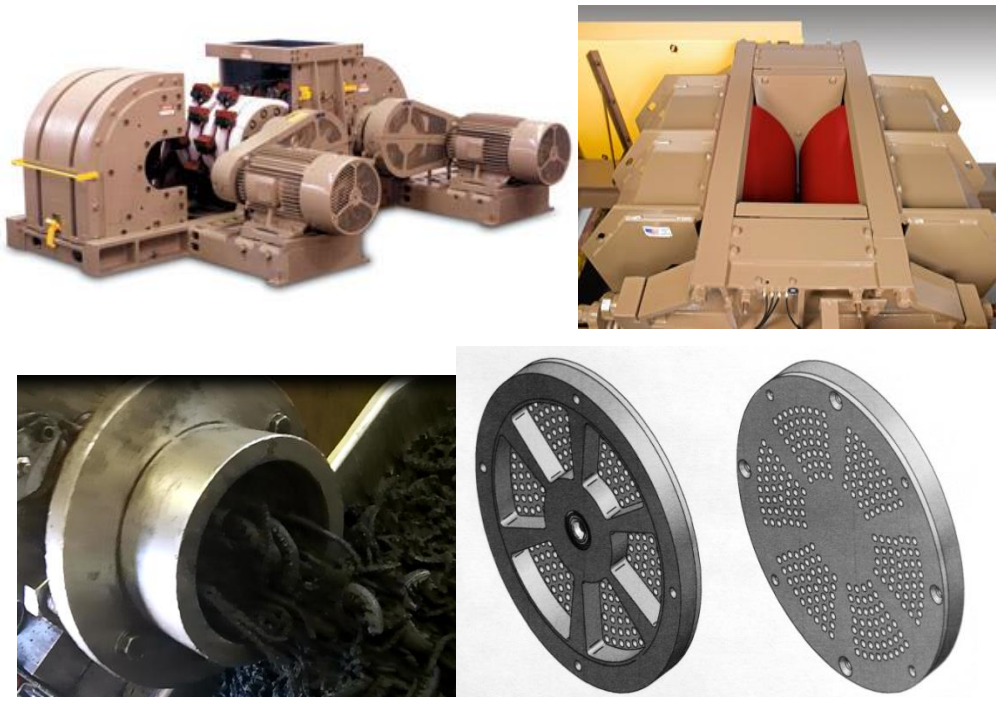
Одним из основных критериев пригодности материала для экструзионного формования является возможность достижения им состояния пластичности, обеспечивающего эффективное продавливание через отверстия в фильере. Необходимым условием достижения состояния пластичности является соответствие гранулометрического состава и влажности материала соответствующим параметрам ЖВЭ. В промышленных линиях жесткой экструзии компании J.C.Steele&Sons,Inc. влажность материала регулируется автоматически. Приведение гранулометрического состава в соответствие с требованиями жесткой экструзии может потребовать доизмельчения брикетируемой смеси.

В отличие от валкового и вибропрессовального брикетирования, существенная роль в формовании методом ЖВЭ принадлежит сдвиговому напряжению. Сдвиговые напряжения имеют место и при обработке формуемой смеси в шнековом питателе, и в глиномялках и при формовании непосредственно в экструдере. В работе [62] на основе сравнения величин пористости угольных брикетов при различных вариантах прессования (сжатия и его комбинации с кручением) было установлено, что более плотная масса брикетируемого

материала (менее пористая) образуется в варианте комбинированного прессования (при одинаковых величинах давлений прессования). При всестороннем сжатии существенная доля энергозатрат расходуется на упругое деформирование самих частиц, в то время как, при наличии сдвигового напряжения, сближение частиц на расстояние активации поверхностных сил осуществляется более эффективно. В условиях всестороннего сжатия плотноупакованных частиц, каждая отдельная частица соприкасается лишь со своими ближайшими соседями, подвергаясь сжимающим усилиям. При сдвиге частицы соприкасающихся слоев подвергаются истирающему воздействию вследствие их контакта неоднородностями поверхностей, что может приводить к их измельчению, раскрытию новых поверхностей и, соответственно, к росту числа контактов частиц отформованной смеси.

С целью выявления возможного влияния сдвиговых напряжений, имеющих место в условиях ЖВЭ, на изменение гранулометрического состава брикетируемого материала нами были сопоставлены результаты доизмельчения коксовой мелочи тремя различными способами: в молотковой мельнице, в валковой дробилке и двойным продавливанием через растирающую пластину в протирочном экструдере (рисунок 3.1).

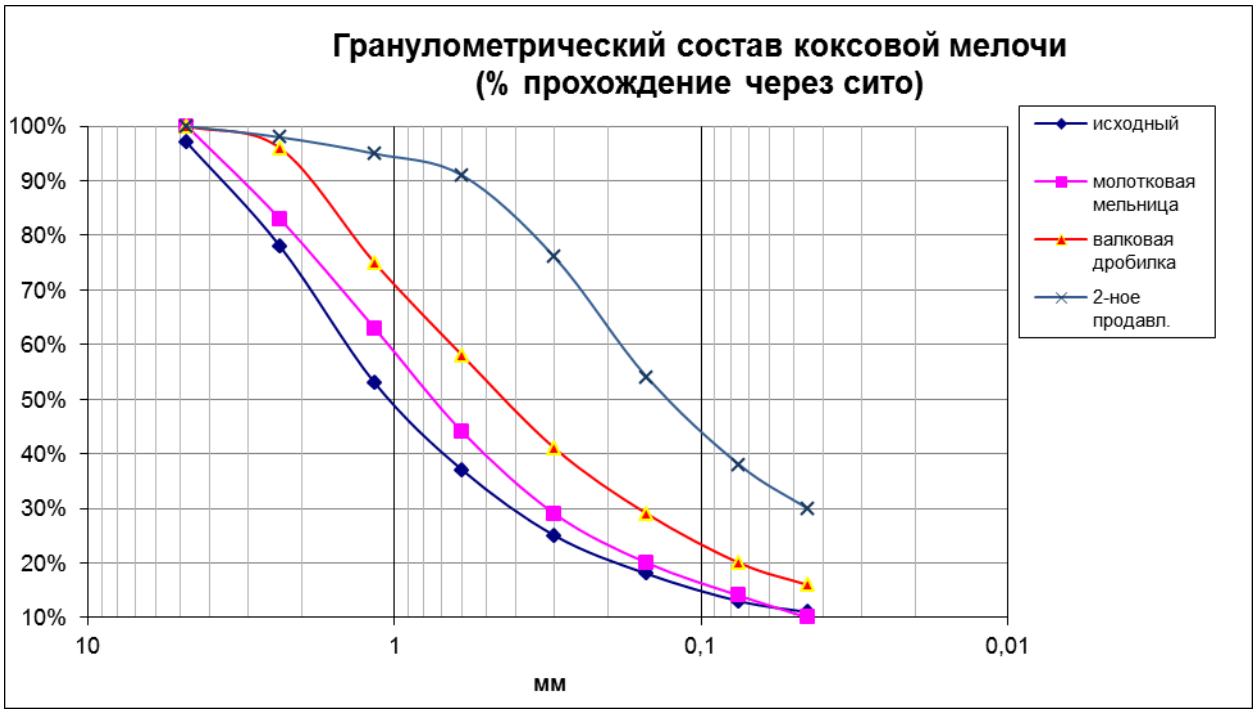
Образцы коксовой мелочи имели следующие свойства: содержание влаги 8,97 %; зола – 13,28 %; летучие – 3,45 %; сера – 0,61 %. Поскольку размеры частиц коксовой мелочи были крупнее, чем обычно требуется для экструдирования, она была доизмельчена.



(вверху слева – молотковая мельница; вверху справа – валковая дробилка; внизу слева – продавливание через растирающую пластину экструдера; внизу справа – растирающая пластина)

Рисунок 3.1 – Оборудование и средства для измельчения материалов для жесткой экструзии

Для гранулометрического анализа измельченного материала использовалось влажное просеивание. Содержание влаги определяли на анализаторе влажности. Калиброванные электронные весы с возможностью измерения плотности применяли для анализа плотности образцов. Полученный материал был проанализирован по размеру с использованием влажных грохотов с отверстиями сит от 6,69 мм до 45 мкм. Результаты гранулометрического анализа полученных материалов приведены на рисунке 3.2.



Размер отверстия сита, мм: № 4 – 4,75; № 8 – 2,36; № 16 – 1,16; № 30 – 0,6; № 50 – 0,3; № 100 – 0,15; № 200 – 0,75; № 325 – 0,045

Рисунок 3.2 – Гранулометрический состав коксовой мелочи

Видно, что наибольшую степень измельчения коксовой мелочи обеспечило двойное продавливание через протирочную пластину в экструдере. Эффект глубокого измельчения достигается в этом случае за счет приложения высоких сдвиговых напряжений, характерных для жесткой экструзии. В валковой дробилке и в молотковой мельнице частицы материала подвергаются ударному и раздавливающему воздействию. Использование молотковой мельницы для измельчения коксовой мелочи оказалось малоэффективным и, в итоге, гранулометрия молотого материала отличалась от гранулометрии исходной коксовой мелочи незначительно.

Основываясь на полученных результатах, было решено изучить влияние способа измельчения также и на прочность брэксов из измельченной тремя различными способами коксовой мелочи. На лабораторном экструдерном комплексе были изготовлены три серии брэксов одинакового компонентного состава: 94 % коксовой мелочи, 5 % портландцемента и 1 % бентонита, отличавшиеся только способом измельчения коксовой мелочи. Соответственно применявшемуся способу измельчения, брэксам были присвоены следующие номера: №1 – коксовая мелочь измельчалась валковой дробилкой; №2 – коксовая мелочь была дважды продавлена шнеком экструдера через растирающую пластину (толщина 3 мм) со множеством отверстий; №3 – коксовая мелочь измельчалась молотковой мельницей. Параметры экструзии и физические свойства брэксов приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Параметры экструзии и физические свойства брэксов из коксовой мелочи

Образец брэкса (способ измельчения)	Влажность, %	Температура ^{o}C	Вакуум, мм.рт.ст.	Плотность, г/см^3	Прочность на сжатие, кгс/см^2
№1 (валковая дробилка)	16,5	30,56	15,24	1,630	37,76
№2 (двойное продавливание)	16,7	33,33	17,78	1,674	34,32
№3 (молотковая мельница)	16,6	55,56	81,28	1,627	20,25

Видно, что экструдирование первых двух смесей сопровождалось близкими значениями параметров процесса, в то время как, продавливание более крупных частиц смеси №3 (молотковая мельница) сопровождалось ростом температуры материала, а в итоге, брэкс из наиболее крупных частиц оказался наименее прочным при испытании на осевое сжатие. С точки зрения энергетических затрат наиболее эффективно экструдировалась смесь №1. Отличная экструдируемость этой смеси могла быть связана со спецификой формы частиц материала после измельчения в валковой дробилке, способствовавшей их плоскопараллельной ориентации.

Различие в величинах прочности на сжатие брэксов №1 и №2 незначительное и может свидетельствовать лишь о более раннем начале развития трещинообразования в брэксе №2. Из приведенных данных также видно, что плотность брэкса из смеси, подвергнутой двойному продавливанию, оказалось на 2,5 % выше плотности брэксов из измельченной и продробленной коксовой мелочи. Очевидно, что плотная упаковка частиц брэкса №2 явилась следствием более

высокой степени измельчения материала. В этом же случае, кстати, не наблюдалось никакого обезвоживания смеси при экструзии, в отличие от брэксов №1 и №3.

Различие в величинах прочности на сжатие брэксов, изготовленных из коксовой мелочи одной партии, но по-разному измельченной, может быть следствием ряда причин, связанных с различием в размере частиц материала, в их форме, а также и в рельефе их поверхности. Форма частиц зависит как от характеристик самого материала, так и от способа измельчения, включая и его продолжительность [63-65]. Известно что материал после измельчения на валковых дробилках состоит преимущественно из частиц угловатой формы, тогда как частицы материала после шаровых и молотковых мельниц, как правило, равноразмерны и округлы. Измельчение в валковых дробилках происходит под действием сжимающих, срезывающих и истирающих сил. В результате образуются шероховатые частицы, имеющие острые выступы со многими ребрами и углами и, соответственно, большую поверхность контактов. В молотковых мельницах вследствие ударных взаимодействий поверхность частиц шлифуется, и они приобретают более округлую форму. Так в работе [66] было изучено влияние типа измельчающего устройства на форму частиц нефтяного кокса двух разновидностей – малопористого с толстыми стенками ячеек без видимых трещин и трещиноватого, величины пористости и толщин стенок ячеек которого распределены в широких диапазонах. Для кокса первого типа способ измельчения не оказал сколько-нибудь заметного влияния на форму частиц с размерами от 200 до 600 микрон. Для пористого же и трещиноватого кокса были выявлены различные зависимости формы частиц от их размеров при измельчении в молотковой мельнице и в валковой дробилке (рисунок 3.3, [66]).

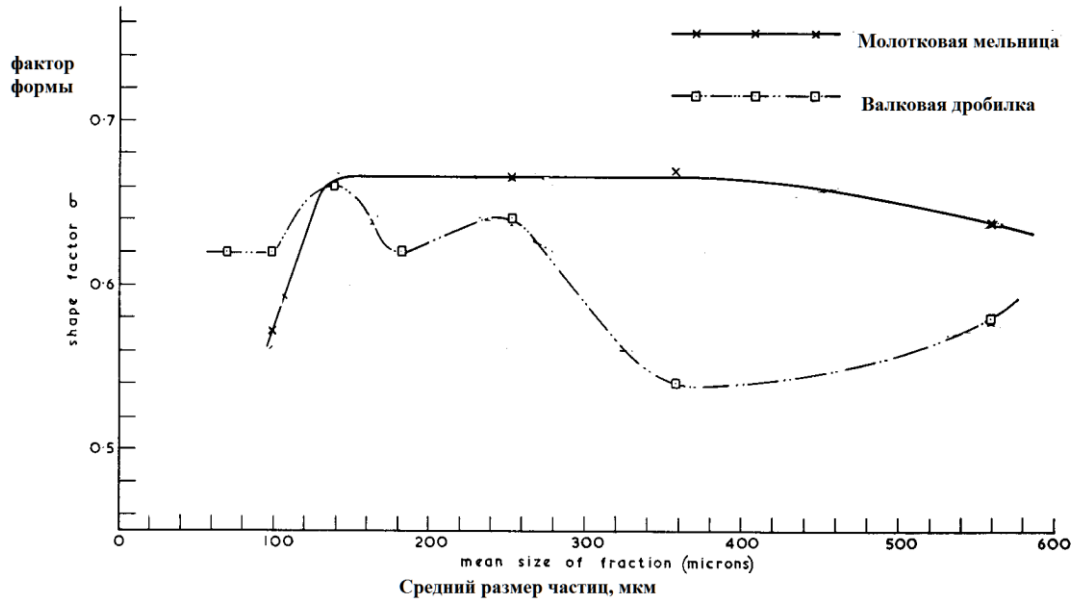


Рисунок 3.3 – Зависимость формы частиц от размера при измельчении в молотковой мельнице (сплошная кривая) и в валковой дробилке (прерывистая кривая) [66]

Приведенные кривые показывают зависимость фактора формы σ (σ =1.1$V^{1/3}N^{1/6}A^{-1/2}$, где V – удельный объем частицы, $см^3/г$; N – число частиц в грамме; A – удельная площадь поверхности, $см^2/г$). Для частиц материала, измельченного в молотковой мельнице, отмечены стабильно высокие значения фактора формы, что свидетельствует о близости формы большинства частиц в рассматриваемом диапазоне значений к округлой. Для частиц материала, измельченного валковой дробилкой, значения величин фактора формы в диапазоне размеров частиц от 140 до 600 микрон ниже и минимальны около 350 микрон, подтверждая в целом вывод о более неоднородной форме частиц после измельчения в валковой дробилке.

Образцы брэксов были далее испытаны нами на прочность на растяжение при раскалывании на настольной одноколонной электромеханической испытательной машине Instron 3345 с нагружающей способностью 5кН. На рисунке 3.4 приведены результаты испытания специально подготовленных образцов брэксов №1, №2 и №3 (диаметр 25 мм, высота 20 мм, цилиндрическая форма).

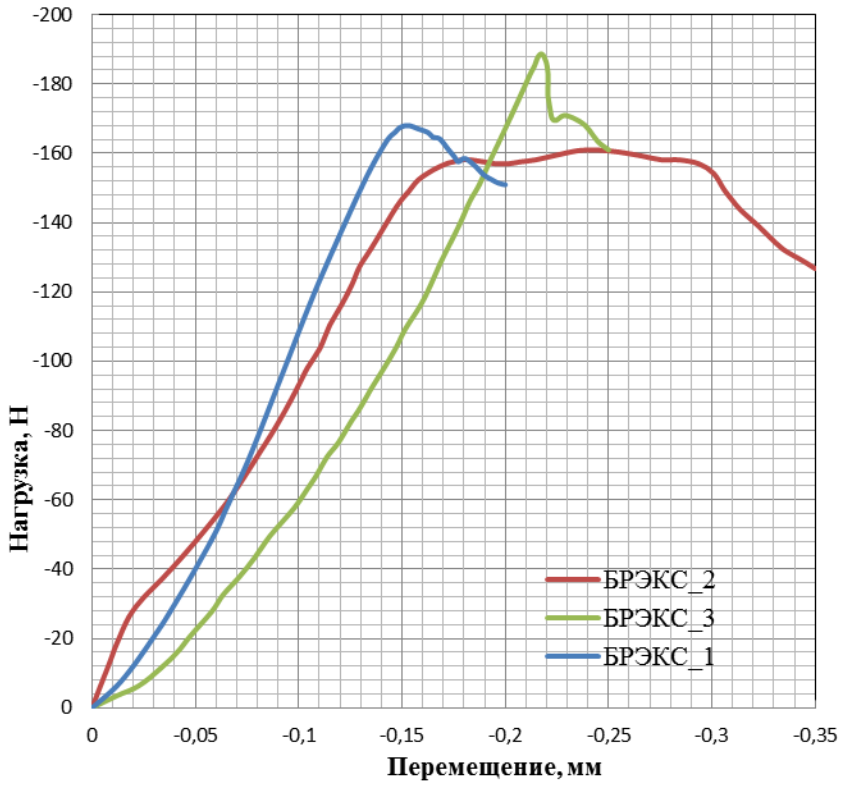


Рисунок 3.4 – График «нагрузка-перемещение» при испытании брэксов на прочность на растяжение при раскалывании

Видно, что при примерно одинаковой несущей способности, брэксы по-разному реагировали на внешнюю нагрузку. Брэксы №2 продемонстрировали вязкий характер разрушения, о чем свидетельствует наличие «площадки текучести» (горизонтальная составляющая кривой). Такое явление, на наш взгляд, может быть объяснено с позиций соотношения Холла-Питча [67] «эстафетным» характером передачи скольжения от зерна к зерну. Граница зерен, в этом случае, является барьером для продвижения дислокаций, которое, в свою очередь, вызывает зарождение и развитие дислокаций в соседнем зерне. Другими словами, чем большее количество таких барьеров необходимо преодолеть, тем менее динамично распространение дислокаций и тем больше сопротивление развитию трещины. Вероятно, существует пороговое значение среднего размера частиц, ниже которого возможно полное блокирование распространения трещин в брэксе. Очевидно, что гранулометрический состав смеси для изготовления брэксов №2 способствует именно такому сценарию в силу самого высокого содержания, в сравнении с другими смесями, тонких частиц. Нами наблюдалось сохранение целостности брэкса №2 даже после прекращения теста. Для брэкса №2, следовательно, можно ожидать большей ударной прочности. При данном типе нагрузок локальные зоны разрушения в таком брэксе не будут приводить к полному разрушению образца и образованию мелочи. Для брэксов №1 и №3 после инициализации трещины, происходит заметное падение кривой «сила-перемещение», что свидетельствует о более хрупком разрушении образцов. При этом в брэксе №1 хрупкое разрушение будет развиваться все же медленней, чем в брэксе №3 в силу более низких значений среднего размера частиц. Заметим, что данные обстоятельства являются чрезвычайно важными для практики брикетирования. Зачастую даже в пределах одного предприятия доставка брикетов до печи может потребовать нескольких операций погрузки-выгрузки, сопряженных с их сбрасыванием с высоты. Увеличение ударной прочности окускованного продукта способно существенно упростить и, следовательно, удешевить логистику его доставки до места использования, в том числе, отдаленного. Для практики жесткой экструзии важно, что указанного эффекта изменения типа поведения брэкса при внешнем механическом воздействии удалось достичь с использованием того же самого оборудования, которое применяется для окускования.

Результаты исследования влияния на свойства экструдируемой смеси ее продавливания через протирочную фильеры позволили использовать эффект воздействия сдвигового напряжения и для гомогенизации смеси перед ее окускованием методом ЖВЭ.

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 свойств смеси для последующего формования. В ряде случаев механическая прочность брэксов из предварительно гомогенизированной шихты может существенно возрастать. Расход пластификатора при окусковании гомогенизированной шихты, в сравнении с шихтой без предварительной гомогенизации, заметно снижается.

Нами было предложено предварительно продавливать смесь через протирочную фильеру экструдера перед ее гомогенизацией. Для демонстрации эффекта влияния такой операции на гомогенизацию смеси нами были сопоставлены величины прочности на сжатие брэксов на основе марганцеворудной мелочи с добавлением пыли аспирации производства силикомарганца в вариантах с гомогенизацией и без гомогенизации шихты, предварительно продавленной через протирочную фильеру.

Гранулометрический состав компонентов брэксов приведен в таблицах 3.2. Компонентный состав брэксов – в таблице 3.3.

Таблица 3.2 – Гранулометрический состав компонентов брэксов

Материал	Фракция, мм / Выход, масс.%					
	-20…+10	-10…+5	-5…+2	-2…+1	-1…+0,5	-0,5
Марганцеворудная мелочь, %	3,42	25,42	32,58	18,95	9,70	9,93
Пыль аспирации производства силикомарганца	пыль мелкодисперсная, фракция менее 0,063 мм					

Таблица 3.3 – 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

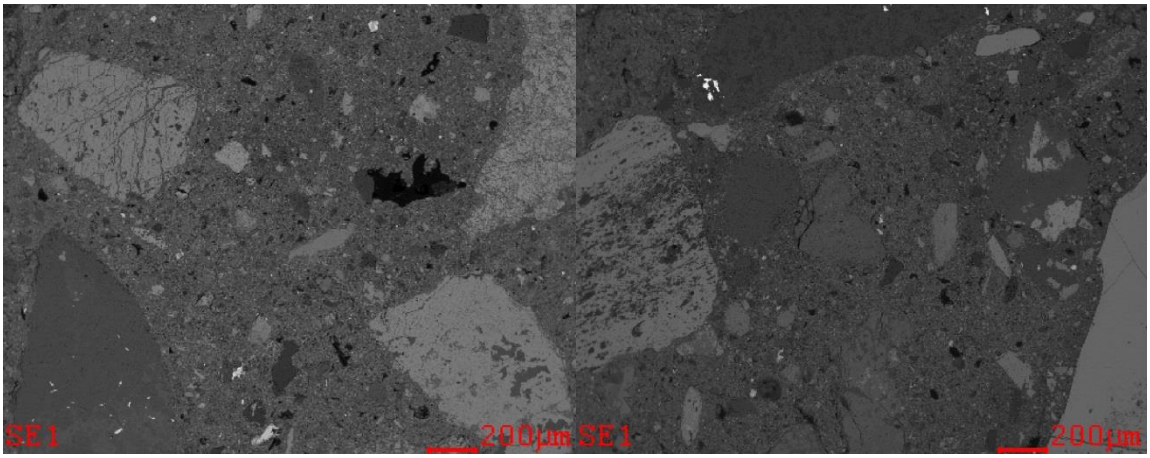
Брэксы были изготовлены на лабораторном экструдерном комплексе. Продолжительность гомогенизации после продавливания через протирочную пластину – 4 часа.

В таблице 3.4 приведены результаты измерения прочности на сжатие брэксов №1 – №3 в вариантах с гомогенизацией и без нее. Рост прочности на сжатие спустя неделю после изготовления составил: 14,2 % для брэкса №1; 7,62 % для брэкса №2 и 54,5 % для брэкса №3.

Таблица 3.4 – Прочность на сжатие брэксов №1–3

Прочность/ брэкс№	№1	№1 – гомоген.	№2	№2 – гомоген.	№3	№3 – гомоген.
День 1 (МПа)	2,9647	2,7579	2,6890	5,7571	4,0955	6,1708
День 3 (МПа)	4,8608	4,8608	6,0674	7,8255	6,1019	10,2042
День 7 (МПа)	6,6741	7,6187	13,1345	14,3411	10,1698	15,7200

Исследование структуры брэксов методом электронной микроскопии позволило выявить различие в структуре распределения и в размерах пор. На рисунке 3.5 представлена структура брэкса №2.



Слева – без гомогенизации; справа – с гомогенизацией в течение 4 часов после продавливания через протирочную пластину. Поры – области черного цвета

Рисунок 3.5 – Сканирующая электронная микроскопия структуры брэкса №2

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

Полученные нами результаты, свидетельствуют в пользу применения протирочного экструдера для подготовки формуемой массы к гомогенизации и были использованы при проектировании линии жесткой вакуумной экструзии для окускования марганцеворудной мелочи и пыли аспирации производства силикомарганца в ОАО «Челябинский электрометаллургический комбинат» и при строительстве введенной в эксплуатацию в августе 2016 года линии жесткой вакуумной экструзии в Мидлтауне, США (рисунок 3.6).



Рисунок 3.6 – Подача формуемой смеси в бункера гомогенизации

3.2 Технологический процесс окускования методом жесткой вакуумной экструзии

Типичная компоновка линий брикетирования по технологии ЖВЭ представлена на рисунке 3.7.

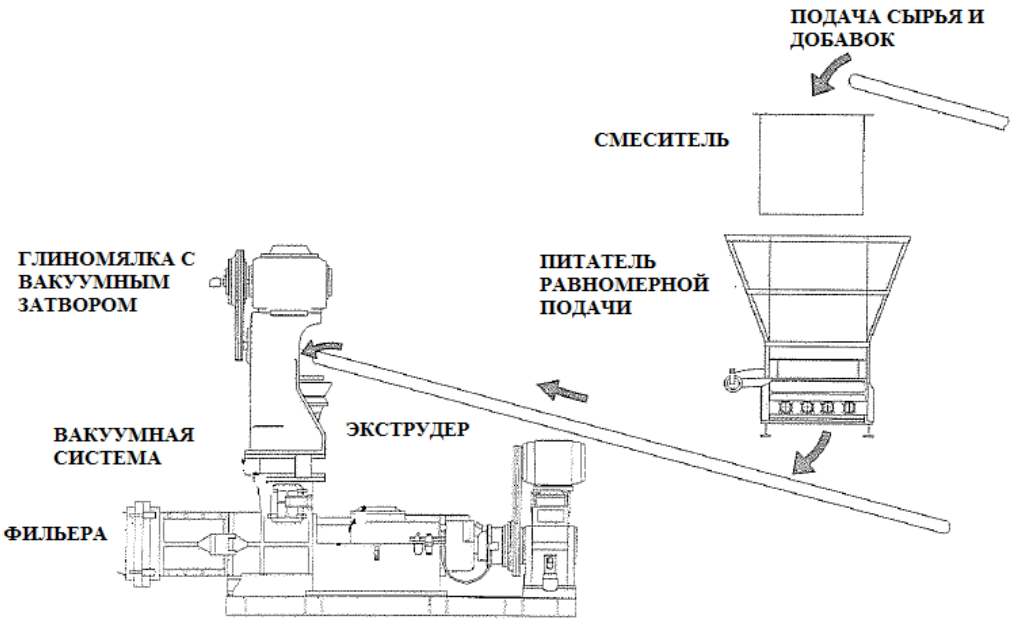


Рисунок 3.7 – Схема линии ЖВЭ

Подготовленная на складе сырья смесь из основных компонентов брэкса подается фронтальным погрузчиком в питатель равномерной подачи (рисунок 3.8), укомплектованный износостойкими спиральными чугунными элементами шнека, изготовленными из хромистого сплава.



Рисунок 3.8 – Питатель равномерной подачи для смешивания компонентов шихты для производства брэксов

Далее подготовленная смесь, в которую добавлена также смесь связующего и пластификатора, подается на перемешивание в глиномялку с вакуумным затвором. В составе линии может также присутствовать и первичная открытая глиномялка. Глиномялка состоит из большой открытой части и уплотняющего узла. Открытая часть (рисунок 3.9) состоит из корыта и системы лопаток для перемешивания. Лопатки крепятся к валу на стальных стержнях болтовыми зажимами, что делает возможным поворот лопатки для регулировки угла атаки, чтобы изменить производительность машины.



Рисунок 3.9 – Перемешивание смеси в открытой части глиномялки

Уплотняющий и измельчающий узел имеет уплотняющий шнек для отделения вакуумной камеры от наружного воздуха и продвижения материала из открытой глиномялки через измельчитель и фильеру с ножами в вакуумную камеру (рисунок 3.10).

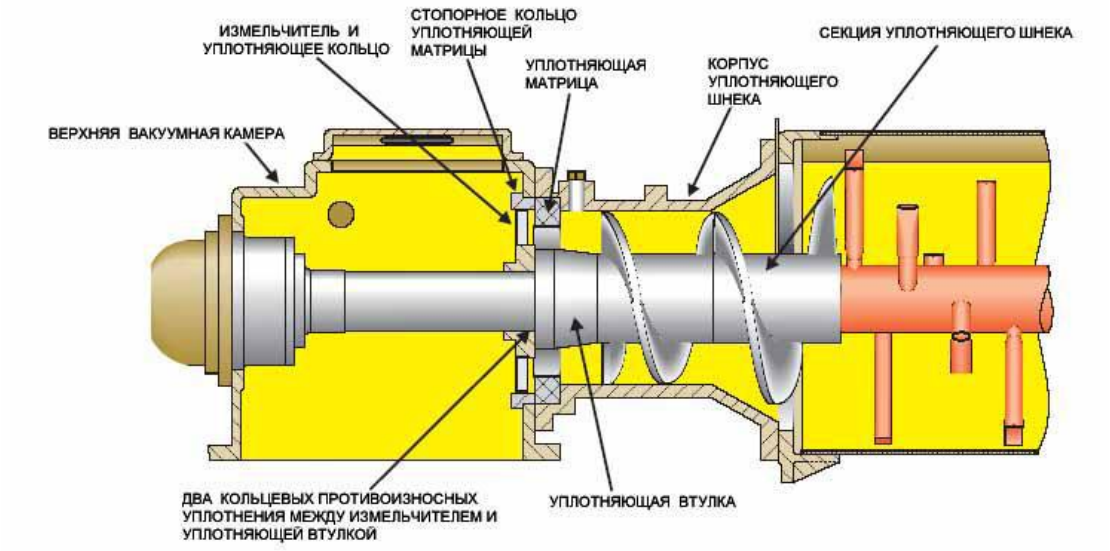


Рисунок 3.10 – Схема глиномялки с вакуумным затвором

Конструктивно эта глиномялка объединена в единый агрегат с экструдером и расположена над ним (рисунок 3.11).



Рисунок 3.11 – Внешний вид экструдера (снизу) и глиномялки с вакуумным затвором.

Смесь входит в вакуумную камеру частично окускованной (рисунок 3.12) и из-за наличия высокого вакуума внутри камеры и удаления воздуха и влаги, куски смеси немедленно крошатся на изолированные частицы, которые падают вниз на лезвия шнека экструдера. Известно [68], что воздух, адсорбированный поверхностью частиц пластичного материала в виде полимолекулярных слоев, удерживаемых ван-дер-ваальсовыми силами, замедляет смачивание их водой, препятствует равномерному уплотнению массы, способствует

повышению упругих деформаций при пластическом формовании, образуя расслоения, а также микротрещины, выявляемые при сушке и обжиге изделий. Заполняя поры, воздух также препятствует проникновению в них влаги, разъединяет частицы массы, действуя как отощитель. Вакуумирование приводит к удалению воздуха из пор и способствует более тесному контакту частиц.



Рисунок 3.12 – Частичное окускование материала смеси на выходе из глиномялки с вакуумным затвором

Вакуум сохраняется во всем рабочем объеме экструдера вплоть до фильеры. Уровень вакуума, по меньшей мере, 100 мм рт.ст. (в абсолютной величине). Зона вакуума в рабочей камере экструдера и глиномялки с вакуумным затвором изображена на рисунке 3.13. Сочетание высоких значений механического давления нагнетания смеси шнеком и вакуумирования рабочего объема экструдера, позволяющее удалить практически весь сжимаемый воздух из материала, прежде чем он окажется под высоким давлением, приводит к высоким значениям прочности свежесформованных брэксов, что позволяет немедленно их транспортировать по конвейерам и штабелировать, практически, без образования мелкой фракции. Кроме того, как известно, в вакууме несколько понижается вязкость цементного теста, что упрощает его равномерное распределение в формуемой массе и улучшает взаимодействие с водой [69]. Это обстоятельство в сочетании с более высокой плотностью формуемой массы, вследствие удаления из нее воздуха, и приводит к снижению расхода цементного связующего.

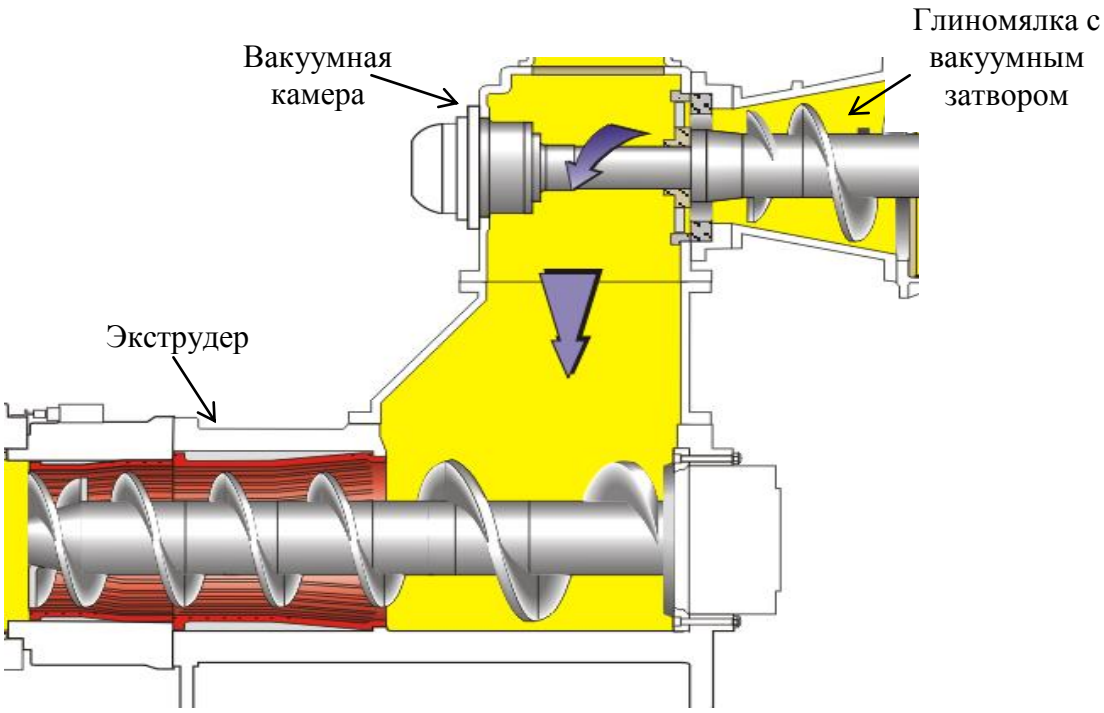
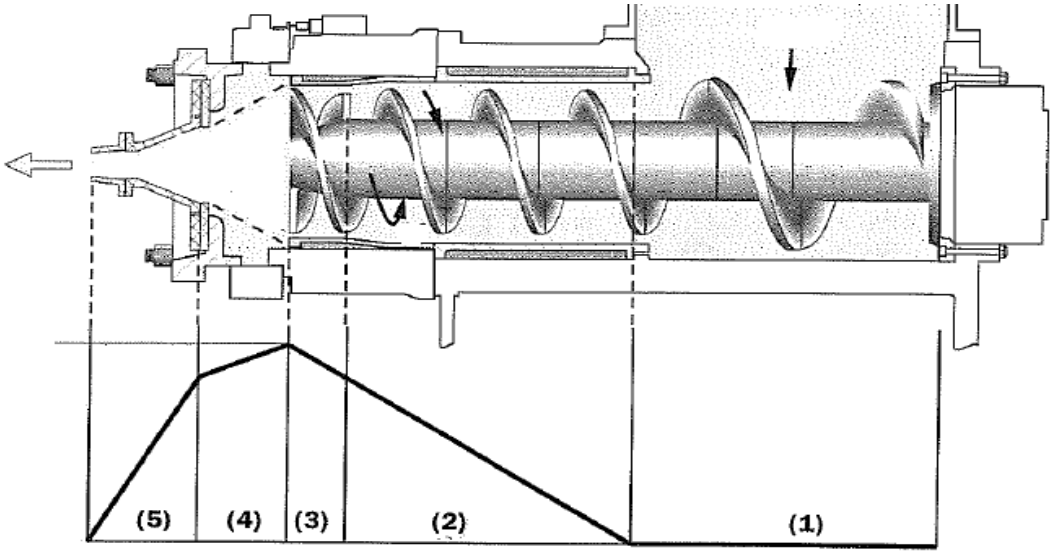


Рисунок 3.13 – Зона вакуума в экструдерном агрегате

В рабочей камере экструдера, вследствие вращения лопастей шнека, формуемая масса совершает поступательное и вращательное движение, замедляемое стенками корпуса (рисунок 3.14).



1 – зона подачи без уплотнения, 2 – зона сжатия, 3 – зона гомогенизации,
4 – зона формования, 5 – выход из фильеры

Рисунок 3.14 – Стадии уплотнения в рабочей зоне экструдера

В зоне 1 осуществляется подача смеси на рабочие лопасти шнека и ее перемещение без уплотнения. В зоне 2 смесь уплотняется. По мере продвижения смеси к фильере ее вращение замедляется, в то время как периферийные слои движутся с большей скоростью. В зоне 3 происходит выравнивание неоднородностей плотности, возникших в зоне 2 вследствие неравномерного движения формуемой массы. Выравнивание достигается особой геометрией лопастей выпорного шнека и их взаимным расположением. В зоне 4 происходит дальнейшее выравнивание неоднородностей движения. В зоне 5 происходит собственно выдавливание брэксов из отверстий в фильере (рисунок 3.15), что завершает процесс формования брэксов.



Рисунок 3.15 – Сырые брэксы на выходе из экструдера

Обращает на себя внимание значительная длина брэксов на выходе из фильеры. В работе [70] нами была выполнена конечно-элементная имитация процесса выхода удлиненного брэкса из экструдера с использованием программного комплекса Simulia Abaqus [71]. Моделирование позволило удовлетворительно описать механизм разламывания удлиненного брэкса на несколько брэксов меньшей длины. Дело в том, что при изгибании удлиненного брэкса под действием собственной тяжести, в его теле образуются зоны максимальных напряжений и области инициирования дальнейшего разламывания. На рисунке 3.16 приведены результаты моделирования различных стадий разламывания продукта экструзии, как при выходе из экструдера, так и при падении на опорную поверхность (пол, лента конвейера и т.д.).

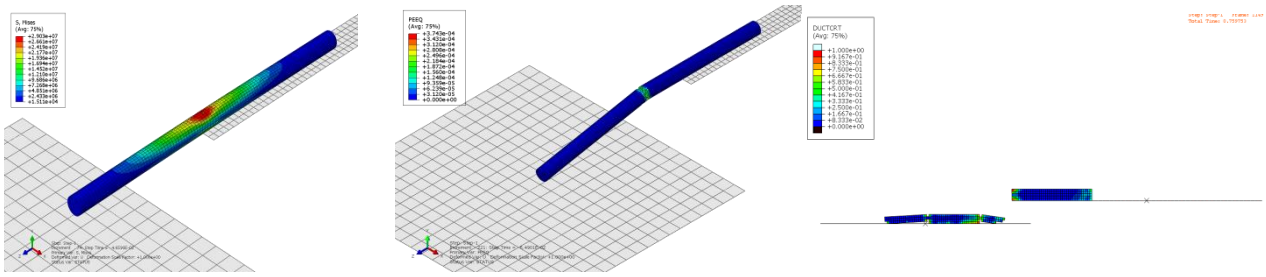


Рисунок 3.16 – Моделирование напряжений в удлиненном брэксе (слева) и его разламывания на выходе из экструдера (посередине) и при падении на опорную поверхность (справа)

В экструзионном окусковании возможно придание брэксу практического любой формы сечения, что достигается простым изменением формы отверстия фильеры. Ранее нами было исследовано влияние геометрии поперечного сечения брэкса на его прочностные характеристики [72]. Было показано, что величины прочности на раскалывание брэксов круглого и овального сечений, полученных из одной и той же шихты, существенно разнятся. Величина прочности на раскалывание брэкса овального сечения зависит от направления приложения нагрузки. При приложении раздавливающих усилий вдоль малой оси эллипса могут потребоваться почти вдвое большие значения давления для достижения таких же уровней напряжения, что и при приложении нагрузки вдоль большой оси. Можно предположить, что различие в величинах разрушающей нагрузки вызвано различием площадей контактной поверхности при раздавливании. Для брэкса круглого поперечного сечения пятно контакта имеет меньшую площадь, чем для овального, при наложении нагрузки вдоль малой оси. Таким образом, при равенстве нагрузки действующие напряжения в брэксе овального сечения при его раздавливании вдоль короткой оси меньше, чем в брэксе круглого сечения. Ясно также, что при раздавливающем усилии, направленном вдоль длинной оси овала, величины напряжений будут соответственно выше. Нами была выполнена конечно-элементная имитация натурного эксперимента по раздавливанию брэкса с использованием вычислительных ресурсов программного комплекса SIMULIA Abaqus. Исследовали брэксы круглого и овального профилей поперечного сечения одинаковой площади. Отношение длины большой и малой осей овала равно двум. Конечно-элементное моделирование производили с использованием линейно-упругой модели материала. В результате математического моделирования получено распределение эквивалентных напряжений по Мизесу в поперечном сечении брэкса (рисунок 3.17). Если принять прочность на раскалывание брэкса круглого сечения за 1, то относительные прочности на раскалывание брэкса овального сечения составили 1,33 и 0,67 при давлении вдоль малой и большой оси, соответственно.

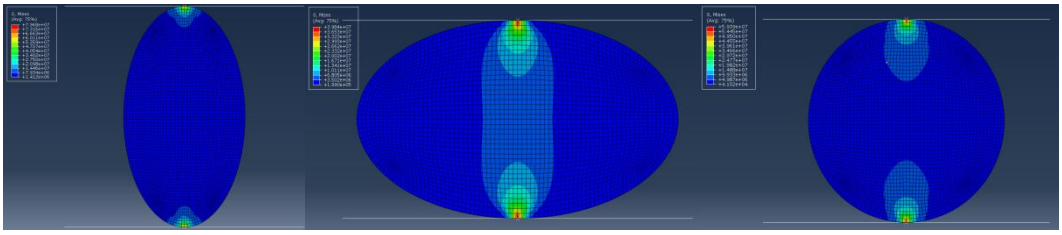


Рисунок 3.17 – Варианты нагружения брэксов овального (слева и посередине) и круглого сечения и распределение эквивалентных напряжений в теле брэкса

Для брэкса №1 прочность на раскалывание составила 4,9 кгС/см^2, для брэкса №2 – 5,9 кгС/см^2 и для брэкса №3 – 2,4 кгС/см^2. Таким образом, действительно, придание брэксу овальной формы позволило увеличить его прочность на растяжение при раскалывании при приложении нагрузки вдоль малой оси овала.

Экструзионное оборудование J.C.Steele&Sons,Inc. позволяет придавать продуктам экструзии не только требуемое сечение (овал, квадрат и т.п.), но и изготавливать их полыми внутри. Увеличение площади поверхности брэкса, достигаемое таким способом, может благоприятно сказаться на процессах металлизации брэксов. Используя возможности программного комплекса Simulia Abaqus, мы выполнили конечно-элементное моделирование раскалывания полого брэкса в сравнении с полнотелым. В модели брэкс зажат между двумя абсолютно жесткими пластинами. Нижняя пластина ограничена по всем степеням свободы, неподвижна. К верхней пластине приложена сила, направленная вертикально вниз. Между поверхностями определены контактные взаимодействия. В расчётах использовалась упруго-пластическая модель материала, полученная на основании результатов, изложенных в работе [73]. Упругая модель материала - модуль Юнга – 30 ГПа, коэффициент Пуассона – 0,3; пластичность – идеальная без упрочнения с пределом текучести 30 МПа.

Результаты моделирования показывают, что с увеличением радиуса отверстия полый брэкс становится более деформируемым [71]. Уровни напряжений для всех расчётных случаев примерно одинаковы, однако, меняется сам характер распределения. Если для сплошного брэкса характерны концентрации напряжений в приповерхностных зонах контакта [72], то в полых - концентраторы напряжений «размазываются» по объему и, помимо зон контакта, появляются также на боковой грани отверстия.

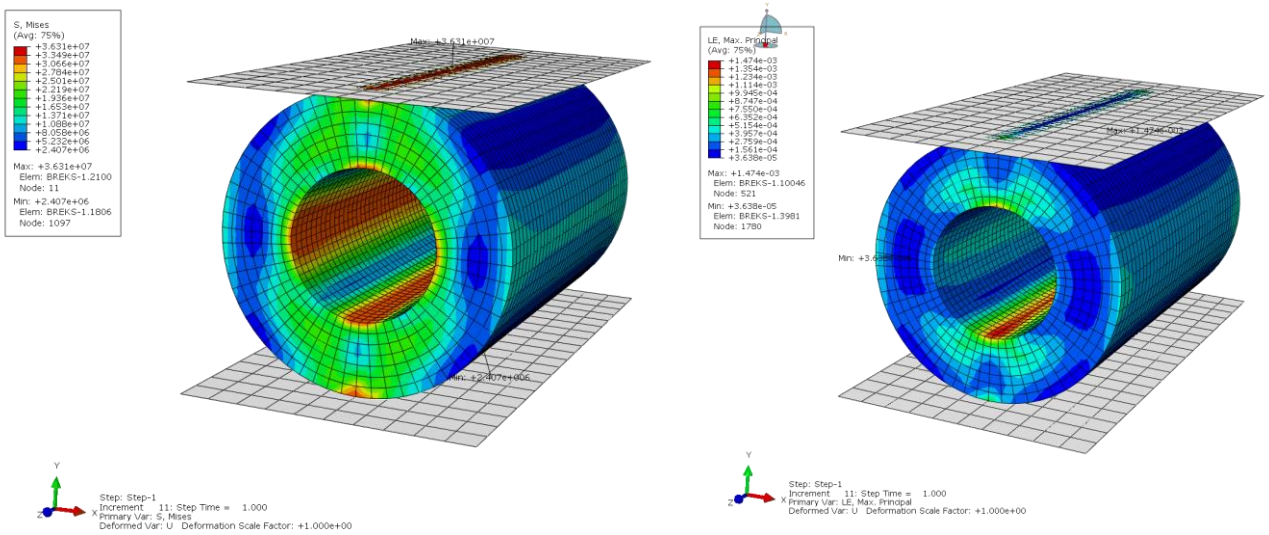


Рисунок 3.18 – Поля напряжений (слева) и деформаций (справа) при раздавливании полого брэкса

Выявленная разница может говорить о различиях также и в характере разрушения таких брэксов. По нашему мнению, для сплошного брэкса характерно постепенное разрушение приповерхностных зон, в то время как для полого - раскол вдоль линии максимальных растягивающих напряжений.

Еще одной особенностью ЖВЭ является возможность выдавливание мелкой фракции шихтовой смеси при формовании брэкса на его поверхность, что иллюстрируются фотографиями брэкса, изготовленного из смеси углеродсодержащего материала и мелочи строительных материалов (рисунок 3.19, слева). Хорошо видно, что углеродсодержащая часть смеси образовала внешний слой брэкса. На правом фото изображен коксовый брэкс, связанный эпоксидной смолой, мельчайшие частички которой выдавлены в процессе экструзионного окускования.



Слева: уголь (поверхностный слой) и мелкая фракция строительных материалов; справа – коксовый брэкс с эпоксидной смолой в качестве связующего)

Рисунок 3.19 – Брэксы со слоем мелкой фракции на поверхности

Выдавливание мелкой фракции может приводить к образованию приповерхностных слоев, обогащенных связующим с соответствующим эффектом их армирования. Для понимания процессов, происходящих при движении смеси крупных и мелких частиц, нами предложена упрощенная гидродинамическая модель, описывающая движения крупных частиц в жидкости. Подобная модель разработана для сепарации частиц в системах пылеочистки [74]. При применении гидродинамической модели мы сделали упрощение, согласно которому более мелкая фаза заменяется жидкостью. В действительности поведение твердой мелкой фазы отличается от поведения жидкости главным образом потому, что твердая фаза трудно деформируема и не может перетекать так же легко, как жидкость, и так же легко обтекать препятствия. Для полноты рассмотрения необходимо учитывать влияние формы частиц и ряда других факторов. Однако для общего понимания принципов движения частиц и сил, влияющих на частицы, такое упрощение допустимо.

При движении формуемой массы в канале отверстия фильеры формируется профиль течения, напоминающий профиль Пуазейля для течения воды в трубах (рисунок 3.20). Характерной особенностью таких профилей является большой градиент скорости течения у стенки и нулевой ее градиент в центре (трубы).

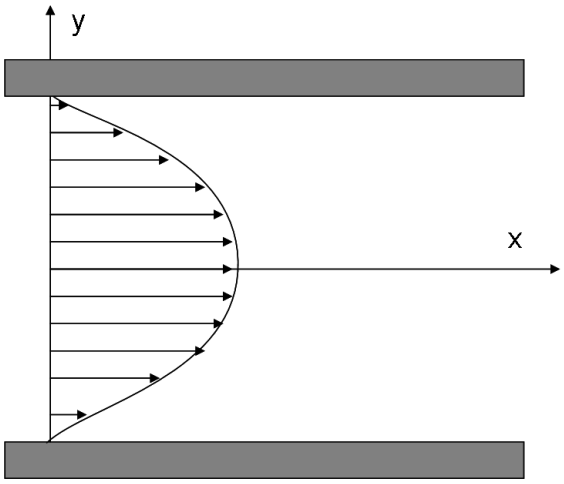


Рисунок 3.20 – Профиль течений Пуазейля

При движении частиц конечных размеров в градиентном течении в обычной (ньютоновской среде) возникает подъемная сила аналогично возникновению подъемной силы, действующей на крыло самолета. Последняя образуется из-за разности давлений в потоке под плоскостью крыла самолета и над ней ([75] и рисунок 3.21).

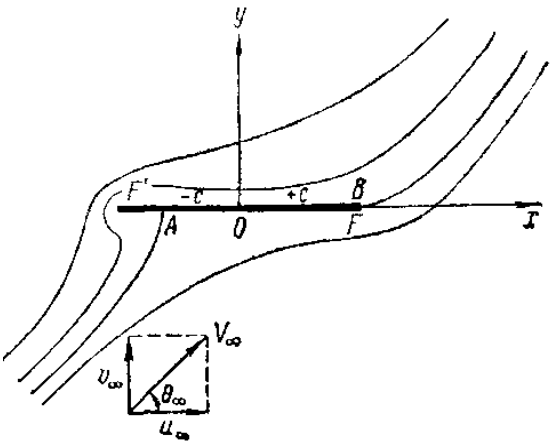


Рисунок 3.21 – Обтекание пластины [75]

Согласно закону Бернулли, вдоль линии тока идеальной жидкости сохраняется давление, равное сумме гидростатического и динамического давлений (так называемый «интеграл Бернулли») [75]

$$p + \frac{\rho u^2}{2} = const \tag{8}$$

Поскольку снизу крыла воздух движется медленнее, то гидростатическое давление должно быть больше, чтобы сохранить постоянным интеграл Бернулли (8). Сверху крыла –

наоборот. Для частицы, находящейся в потоке с градиентом скорости (рисунок 3.22, *а*), возникает аналогичная ситуация – давление снизу частицы будет больше, чем сверху. При этом частица может быть приведена во вращение градиентом скорости. Тогда дополнительно возникает подъемный «эффект Магнуса», который имеет место при обтекании потоком вращающейся частицы (рисунок 3.22, *б*).

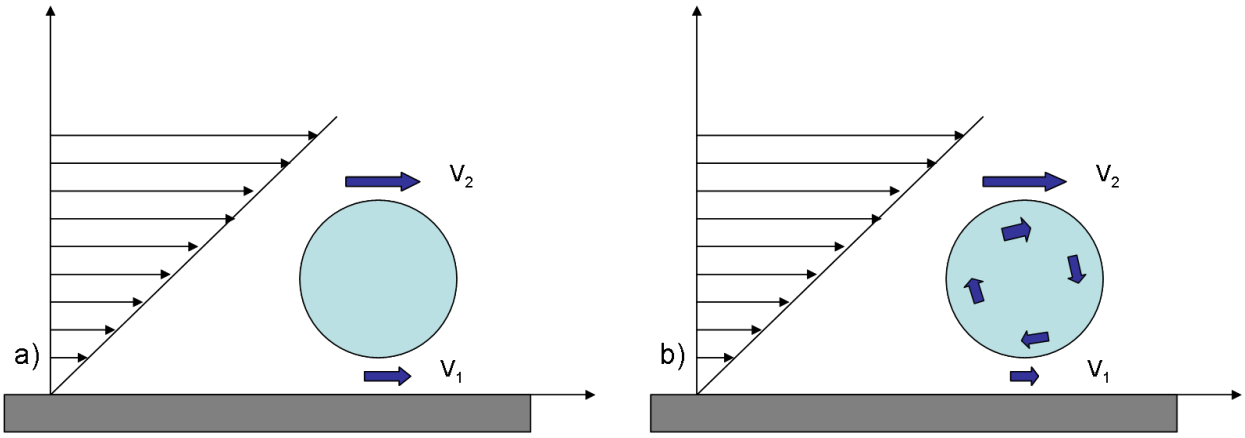


Рисунок 3.22 – a) Обтекание частицы потоком у стенки канала отверстия;
b) Частица вращаемая потоком

Согласно теореме Жуковского, подъемная сила определяется плотностью потока ρ, циркуляцией скорости вокруг частицы J и скоростью набегающего потока u (считаем, что поток имеет горизонтальную компоненту скорости u, а вертикальная $\upsilon = 0$) [16]:

$$F_{Magnus} = \rho J u. \tag{9}$$

Циркуляция потока вокруг частицы при ее вращении в потоке определяется выражением

$$J = \frac{\pi r^2}{2} r \frac{du}{dy}, \tag{10}$$

где πr^2 – миделевое сечение частицы,

r – линейный размер частицы,

du/dy – градиент скорости потока (ось y направлена вертикально вверх).

В результате подъемная сила Магнуса пропорциональна кубу размера круглой частицы, скорости набегающего потока и градиенту скорости потока [74]

$$F_{Magnus} \sim \rho \frac{\pi r^3}{2} u \frac{du}{dy}. \tag{11}$$

В действительности необходимо учесть, что частица увлекается потоком и имеет горизонтальную скорость U (т.е. относительную скорость $u–U$). Поэтому окончательно имеем

$$F_{Magnus} = \rho\frac{\pi r^3}{2}(u-U)\frac{du}{dy}. \quad (12)$$

Как видно из формулы (12), величина подъемной силы больше для более крупных частиц. Сила также возрастает с ростом градиента скорости. Последний достигает максимального значения у стенки и равен нулю в центре потока. Поэтому наибольшие смещения крупных частиц к центру потока будут наблюдаться около стенки и меньшие вдали от стенки. За счет этого и должен формироваться профиль неравномерного распределения частиц: крупные – в центре, мелкие – у стенки.

При медленном движении частицы относительно «жидкости» (в нашем случае, относительно мелкой фазы) возникает сила сопротивления Стокса [75]

$$F_{Stokes,x} = 6\pi\mu r(u–U), \quad (13)$$

где μ – вязкость жидкости (аналог силы трения мелких частиц о крупные),

$(u–U)$ – относительная горизонтальная скорость движения частицы относительно потока.

Аналогично в вертикальном направлении сила Стокса имеет компоненту $F_{Stokes,y}$

$$F_{Stokes,x} = 6\pi\mu rV, \quad (14)$$

где V – вертикальная скорость движения частицы.

Из баланса подъемной силы Магнуса и вязкой силы сопротивления Стокса $F_{Magnus} = F_{Stokes,y}$. получаем формулу для оценки скорости поперечного (вертикального) перемещения частицы

$$V = \frac{\rho}{12\mu}(u-U)\frac{du}{dy}r^2. \quad (15)$$

Из этой формулы видно, что скорость смещения пропорциональна квадрату размера частицы.

Теперь можно провести качественную оценку относительных смещений больших и малых частиц. Можно сказать, что в формуле (15) разность $(u–U)$ характеризует скорость

малых частиц относительно больших. Градиент скорости потока d*u*/d*y* одинаков и для малых и для больших частиц. Для примера рассмотрим частицы «*large*» и «*small*», размеры которых отличаются в три раза ($r_{large} = 3r_{small}$). Поскольку $V \approx r^2$ и все остальные множители равны, то поперечные скорости больших и малых частиц будут отличаться в девять раз

$$V_{large} = -\frac{r_{large}^2}{r_{small}^2} V_{small} = -9V_{small} . \quad (16)$$

Знак «минус» возникает из-за разнонаправленного движения больших и малых частиц согласно формуле (15). По сути, можно считать, что малые частицы остаются на месте, а большие выдавливаются к центру потока. Скорости относительного поперечного движения частиц пропорциональны квадрату отношения размеров этих частиц.

Показано, что в рамках предлагаемого гидродинамического подхода с использованием частиц двух разных размеров получает свое объяснение явление миграции мелкой фракции.

3.3 Транспортировка, складирование и хранение брэксов

Высокая плотность свежеотформованных брэксов позволяет немедленно доставлять их конвейерами к месту складирования, либо загружать их на самосвалы (рисунок 3.23) для перевозки на склад.



Рисунок 3.23 – Погрузка свежеотформованных брэксов на самосвал и его выгрузка через 5 минут

В силу вязко-пластичного характера реакции массы брэкса на внешнее механическое воздействие, описанное в разделе 3.1., связанное с гранулометрическим составом шихты и присутствием бентонита, брэксы проявляют достаточно высокую ударную прочность. В технологическом цикле производства брэксов для выплавки ферромарганца компании Assmang (ЮАР), брэксы состава 12,4 % – пыль аспирации производства ферромарганца, 40,8 % – марганецсодержащие шламы, 43,4 % – отсев марганцеворудных окатышей и 3,4 % бентонита выдерживают сбрасывание с высоты более 5 метров на бетонный пол бункера (рисунок 3.24).



Рисунок 3.24 – Выгрузка свежеотформованных брэксов в бункер с высоту более 5 метров

В рамках программного комплекса SIMULIA Abaqus возможно имитационное моделирование процесса выгрузки брэксов, что позволило определить статистику ориентации брэксов в штабел (рисунок 3.25). Анализ результатов серии расчетов показал, что 56,25 % брэксов имеют ориентацию «плашмя» (длинная ось овала параллельна горизонту), 12,5 % – ориентированы длинной осью перпендикулярно поду, 12,5 % – стоят на основании и 18,75 % – на «ребре». Таким образом, нам удалось показать, что ориентацию, при которой раздавливающее усилие было бы направлено вдоль длинной оси овала, будут иметь менее 13 % брэксов в штабеле. Заметим также, что при переходе к овальной форме увеличивается и площадь свободной поверхности (для брэкса с отношением длин осей 1:2 рост площади составит 5,8 %), что положительно влияло бы на процесс его восстановления.

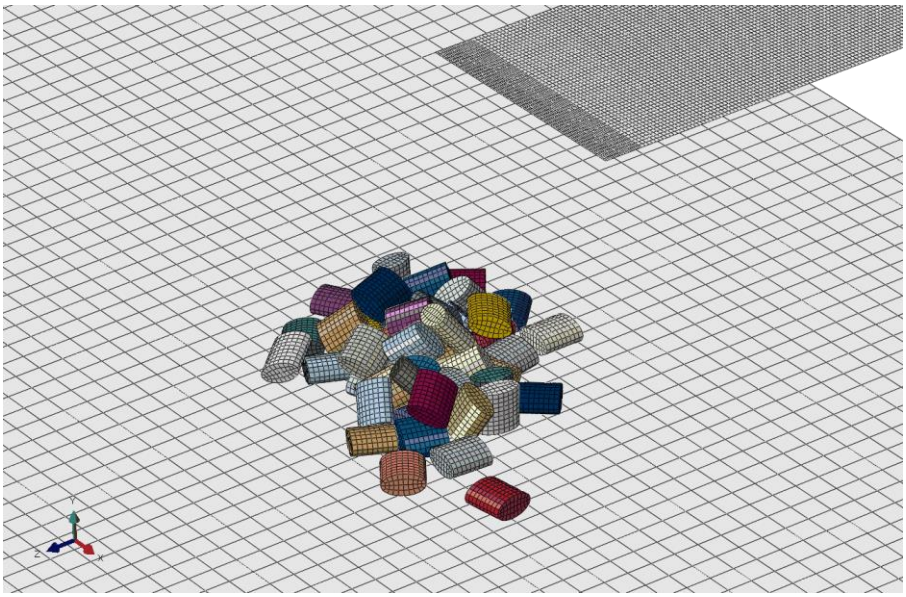


Рисунок 3.25 – Имитационное моделирование укладки брэксов овального сечения на под печи

В соответствии с ГОСТ 2787 [76] для определения осыпаемости брэксов производят трехкратное сбрасывание их (свободным падением) с высоты 1,5 м на металлическую или бетонную плиту, при этом они не должны осыпаться более чем на 10 %. Из сбрасываемых пяти брэксов испытание должны выдержать не менее четырех брэксов. При неудовлетворительных результатах испытания из повторно сбрасываемых 10 брэксов испытание должны выдержать восемь брэксов. Для моделирования процесса разрушения брэксов при ударной нагрузке мы рассматривали падение брэксов на абсолютно жесткую плоскую поверхность с высоты 1,5 м. Исследовали варианты падения брэкса цилиндрической формы: на боковую поверхность, на торцевую поверхность и на грань (рисунок 3.26).

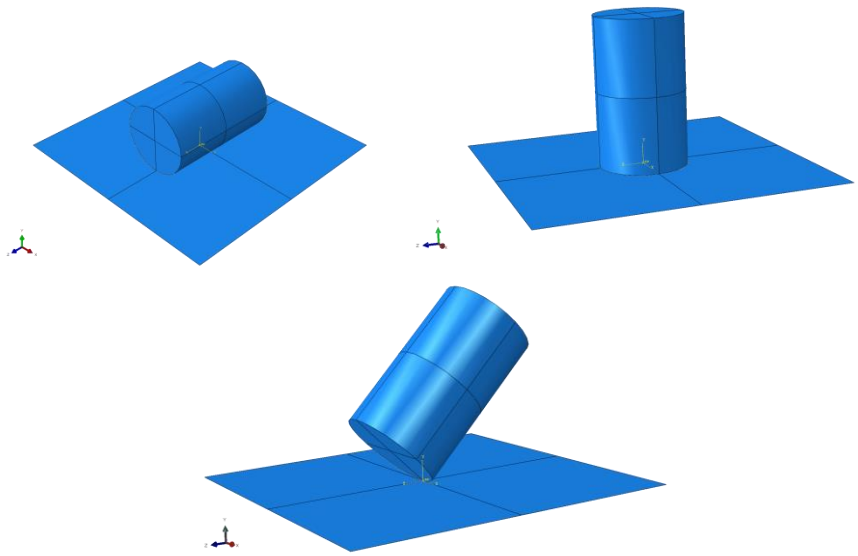
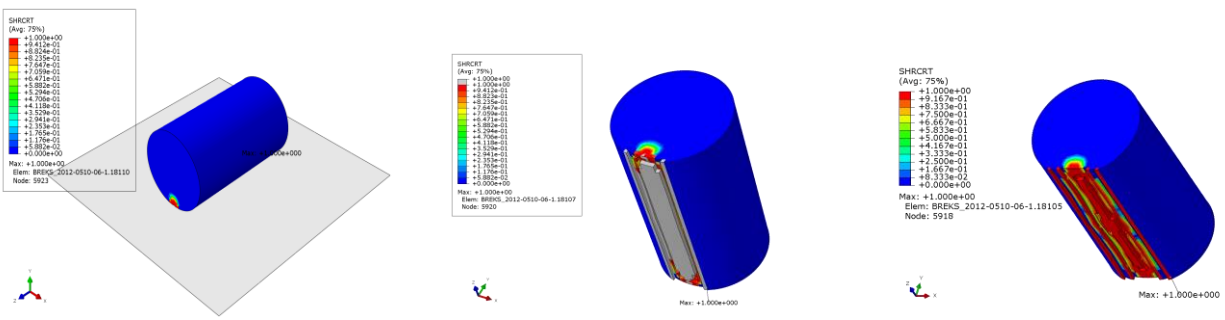


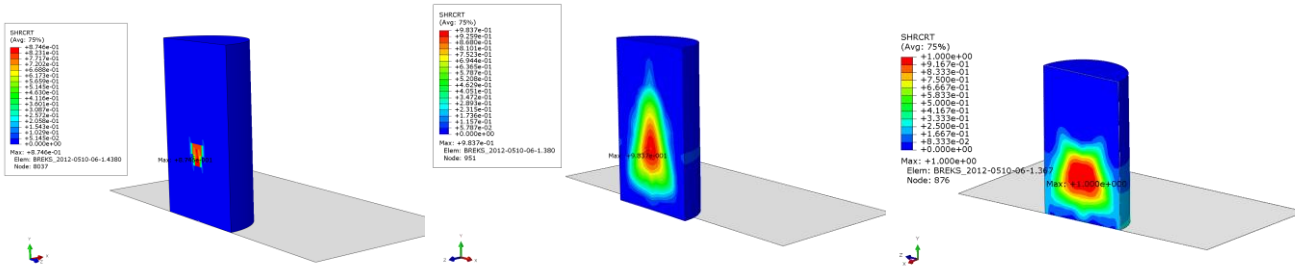
Рисунок 3.26 – Варианты падения брэкса на плоскость

Моделирование проводили в рамках упруго-пластической модели поведения брэкса с возможностью его разрушения в рамках программного комплекса SIMULIA Abaqus. Физико-механические параметры материала были получены в результате обработки экспериментальных данных образцов брэксов следующего состава, масс.%: хромоворудный концентрат 15; уголь 15; пыль аспирации производства феррохрома 67; портландцемент 3. В физическом эксперименте на настольной одноколонной электромеханической испытательной машине Instron 3345 (США) с нагружающей способностью 5 кН были определены следующие свойства материала: модуль Юнга 123 МПа, коэффициент Пуассона 0,3; предел прочности 2,1 МПа. Результаты моделирования приведены на рис. 3.27–3.29. Для сравнения параметра повреждаемости приведены также результаты для случая падения брэксов с высоты 0,5 м и 2,0 м. Под параметром повреждаемости понимается условная величина, характеризующая степень поврежденности материала (0 – для неповрежденного, 1 – для полностью разрушенного). В приведенных расчетных случаях в теле брэкса наблюдаются области необратимых (неупругих) деформаций в зоне контактных взаимодействий. Падение с высоты 0,5 м приводит к полному разрушению кромки брэкса только в случае его падения на грань. Это объясняется малой площадью контактных взаимодействий и, как следствие, более высокой степенью и уровнем механических напряжений в модели. В остальных расчетных случаях падение приводит к необратимой деградации прочностных параметров брэкса в зоне контакта без наступления прогрессирующего разрушения элементов. При падении с высоты 1,5 м наблюдается разрушение тонких приповерхностных слоев брэкса практически во всех расчетных случаях. Стоит отметить, что при падении брэкса на торец (рисунок 3.28) наблюдается локализация параметра повреждаемости в центре брэкса (без разрушения). Этот факт объясняется интерференцией волн сжатия–растяжения в модели при ударе. Примененная методика математического моделирования процесса разрушения брэкса при ударной нагрузке позволяет получать адекватное результатам физического эксперимента представление о механизме разрушения брэксов и прогнозировать ударную прочность брэкса при его падении.



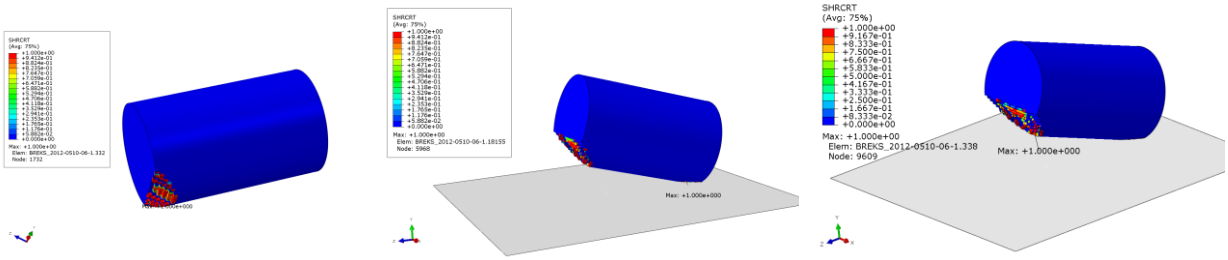
Тип удара: боковая поверхность. Высота падения – 0,5 м (слева) 1,5 м (посередине) и 2,0 м (справа).

Рисунок 3.27 – Распределение параметра повреждаемости в брэксе цилиндрической формы



Тип удара: торец. Высота – 0,5 м (слева), 1,5 м (посередине) и 2,0 м (справа)

Рисунок 3.28 – Распределение параметра повреждаемости в брэксе цилиндрической формы



Тип удара: грань. Высота падения – 0,5 м (слева), 1,5 м и 2,0 м (справа)

Рисунок 3.29 – Распределение параметра повреждаемости в брэксе цилиндрической формы

На рисунке 3.30 приведены результаты рассева фракций брэкса №2 (таблица 3.5) после 4-х кратного сбрасывания с высоты 1,5 метра. Видно незначительное образование мелочи размером менее 5 мм (менее 2 %) и единственный фрагмент размером крупнее 12,5 мм.



Рисунок 3.30 – Результаты теста на 4-х кратное сбрасывание с высоты 1,5 метра брэкса №2

В соответствии с ГОСТ 25471-82 [77] для определения прочности на сбрасывание железных руд, агломератов и окатышей применяют троекратное сбрасывание с высоты 2 метров. Испытание по этой методике рудошламовых брэксов (железорудный концентрат – 27 %, шламы – 34 %, пыли – 32 %, портландцемент – 6 %, бентонит – 1 %) показали, 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 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 3.31). 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 ^{o}C) в течение 7 суток [78]. Важная особенность окускования методом ЖВЭ состоит в том, что в течение первых 4-х суток твердения брэксы проявляют вязко-пластичный характер разрушения, что является свидетельством их достаточно высокой ударной прочности. Кроме того, как показано в главе 4, именно спустя 48 часов вылеживания брэксы на цементно-бентонитовом связующем имеют локальный максимум прочности на сжатие.



Рисунок 3.31 – Рассев брэксов (48 часов вылеживания) после 5-кратного сбрасывания с 2-х метровой высоты

Одним из существенных недостатков ЖВЭ, проявляющих себя в климатических условиях низких температур холодного периода года, является необходимость поддержания температуры здания, в котором размещено основное экструзионное оборудование, на уровне не менее 5 ^{o}C. В противном случае сама экструзия влажной массы будет затруднена, либо

невозможна вовсе, а, при использовании в качестве связующего портландцемента, упрочнение брэксов будет замедленно, либо остановлено.

С целью оценки температурного режима в штабеле свежеотформованных брэксов в течение двух суток хранения, нами было выполнено решение задачи нестационарной теплопроводности в условиях естественного конвективного теплообмена с окружающей средой с учетом физического нагрева брэксов при экструдировании и без учета теплоты, выделяемой при гидратации цемента.

Было рассмотрено три варианта температур окружающей среды 0 °С, 5 °С и 10 °С. Начальная температура брэкса в момент складирования 25 °С.

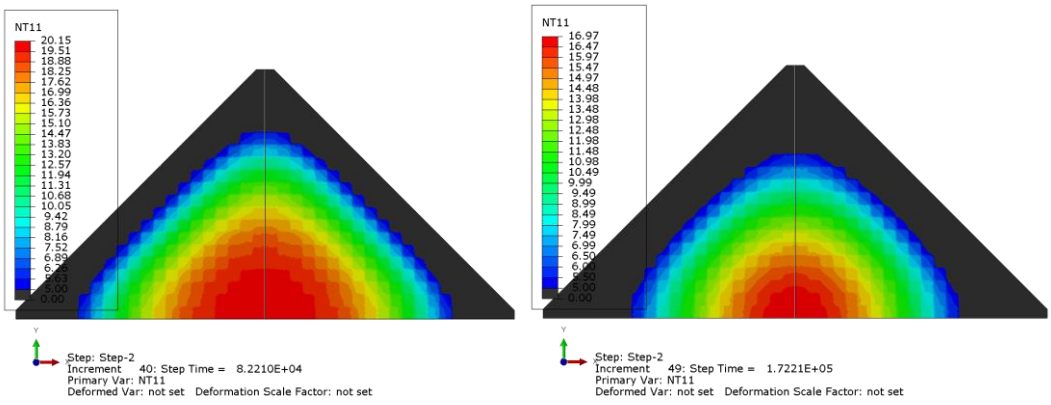
Использованные теплофизические свойства материалов, представлены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Теплофизические свойства материалов

Материал	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Теплоемкость, Дж/кг·К	Плотность, кг/м^3
Брэкс	10	620	2500
Воздух	0,026	1005	1,18

Оценка тепловых полей завалки брэксов проводится на протяжении 5 дней (432000 секунд) при неизменных внешних условиях. По технологическим условиям работы линии жесткой вакуумной экструзии в составе доменного цеха, брэксы забираются после двух суток хранения.

На рисунке 3.32 приведено распределение температур в штабеле брэксов при температуре в помещении 0 °С спустя 24 и 48 часов хранения.



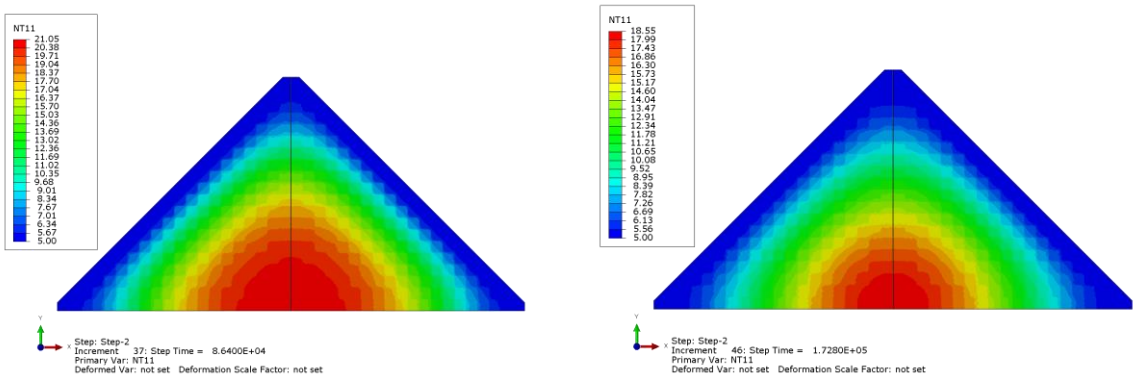
Слева – 1-й день, справа – 2-й день

Черным цветом выделена область с температурой ниже 5 °С

Температура в помещении – 0 °С.

Рисунок 3.32 – Распределение поля температур

На рисунке 3.33 приведено распределение температур в штабеле брэксов при температуре в помещении 5 °С спустя 24 и 48 часов хранения.

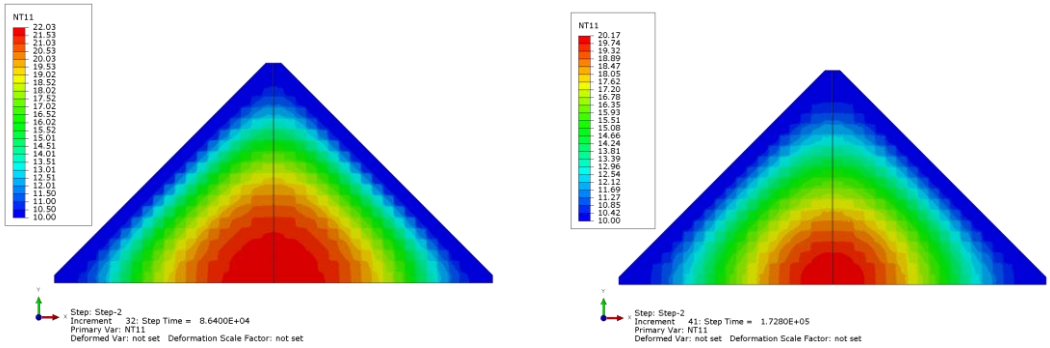


Слева – 1-й день, справа – 2-й день

Температура в помещении 5 °С

Рисунок 3.33 – Распределение поля температур

На рисунке 3.34 приведено распределение температур в штабеле брэксов при температуре в помещении 10 °С спустя 24 и 48 часов хранения.



Слева – 1-й день, справа – 2-й день

Температура в помещении 10°С.

Рисунок 3.34 – Распределение поля температур

Видно, что начиная с температуры в помещении 5 °С, физическое тепло брэксов в штабеле способствует поддержанию температур, достаточных для гидратации цемента. Для проверки справедливости такого вывода нами было проведено испытание на прочность путем

сбрасывания с высоты 2-х метров брэксов, набиравших прочность при температуре 5 ^{o}C в течение 48 часов в холодильной камере. Количество мелочи (менее 5 мм), образовавшейся после 3-кратного сбрасывания брэксов, спустя 24 часа вылеживания при 5 ^{o}C составило 7%, спустя 48 часов 4,3%, а спустя 72 часа – 4,2%. При заборе брэксов в шихту доменной печи по истечении 48 часов упрочнения при температуре в помещении 5 °C, величина прочности на сбрасывание таких брэксов при испытаниях по методике, принятой для агломерата, имеет значение, приемлемое для доменных брикетов.

При температурах, близких к нулю, значительное количество брэксов в поверхностных слоях охладится в течение первых 48 часов вылеживания до температур замедления или остановки гидратации.

3.4 Выводы по главе

1. Способ измельчения коксовой мелочи может влиять на размер, форму и рельеф поверхности частиц. Степень такого влияния зависит от особенностей структуры материала (пористости, прежде всего).
2. Гранулометрический состав коксовой мелочи влияет не только на величину прочности на сжатие, но и определяет характер разрушения коксового брэкса при статичных и динамических нагрузках.
3. В зависимости от степени измельчения, хрупкий характер разрушения может смениться вязко-пластичным, что приводит к росту ударной прочности брэксов.
4. Для достижения необходимой тонины измельчения коксовой мелочи может быть использован экструдер с протирочной фильерой.
5. Рекомендовано использовать экструдер с протирочной фильерой для подготовки брикетируемой шихты к гомогенизации.
6. Процесс разламывания продолговатых брэксов удовлетворительно описывается с помощью пакета Simulia Abaqus.
7. 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.
8. Предложена гидродинамическая модель, удовлетворительно объясняющая возможность миграции мелкой фракции к поверхности брэкса.
9. Возможности пакета Simulia Abaqus позволяют моделировать статистику распределения ориентаций брэксов при их штабелировании.

10. 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.

11. Возможности пакета Simulia Abaqus позволяют удовлетворительно моделировать остывание штабеля брэксов.

12. При 48-часовом вылеживании сырых брэксов на цементном связующем при температуре 5 ^{o}C, прочность брэкса на сбрасывание удовлетворяет требованиям, предъявляемым к доменным брикетам.

4 Исследование свойств, оптимизация состава и анализ эффективности и перспектив применения брэксов в доменном производстве

4.1 Структура, прочность и поведение при восстановлении шламовых и рудококсовых брэксов, как компонентов шихты доменных печей

Исследование металлургических свойств брэксов, предназначенных для применения в доменных печах в качестве компонента, реализующего рециклинг металлургических отходов, и/или в качестве основного компонента доменной шихты, выполнены применительно к условиям и потребностям ПАО «НЛМК» и фирмы Suraj PL (Индия). Основными сырьевыми материалами, пригодными для окускования по технологии ЖВЭ с целью получения железоуглеродсодержащих брэксов для использования в шихте доменных печей ПАО «НЛМК», являются железорудный концентрат, колошниковая пыль, доменные и конвертерные шламы, окалина и коксовая мелочь (таблица 4.1).

Таблица 4.1 – Химические составы материалов для брикетирования

Наименование компонентов	$Fe_{общ.}$	FeO	Fe_2O_3	K_2O+Na_2O	Al_2O_3	CaO	MgO	MnO	SiO_2	ZnO	S	C
Доменный шлам	35,8	11,1	44,6	0,17	0,8	6,4	1,2	0,05	7,8	0,6	0,4	27,3
Колошниковая пыль	48,1	9,0	58,7	0,4	0,8	4,45	1,04	0,05	5,9	1-2	0,1	17,0
Конвертерный шлам	56,3	52,0	22,7	-	0,3	12,0	1,3	0,05	2,0	1,5-2,5	0,1	2,3
Железорудный концентрат	66,3	27,9	63,7	0,108	0,18	0,26	0,48	-	7,22	0,003	0,02	-
Окалина	73,5	65,1	32,7	1,07	0,1	0,36	0,02	-	0,6	-	2	0,5

Коксовая мелочь	1,7	-	-	2,24	3,2	1,0	0,5	-	7,5	-	0,5	85,6

Колошниковая пыль успешно утилизируется в агломерационном процессе, не оказывая большого негативного влияния на качество агломерата и производительность агломашин. Применение доменных шламов в составе аглошихты ограничено объемом не более 90000 т в год (6–7 кг/т агломерата) из-за повышенного содержания в них цинка, Но и это количество ухудшает качество агломерата, а мелкодисперсный углерод, содержащийся в шламе, при спекании агломерата не работает как топливо. Разработанная в 2000 г и прошедшая позднее промышленную проверку концепция утилизации всех доменных и конвертерных цинксодержащих шламов предусматривала их брикетирование и проплавку в одной доменной печи объемом 1000 м^3 по специальной технологии [79-83].

В связи с этим, в данной работе исследовали металлургические свойства брэксов, изготовленных именно из этих шламов [84], а также железоуглеродсодержащих брэксов из железорудного концентрата Стойленского ГОКа и коксовой мелочи (таблице 4.2), которые также рассматривали как перспективный компонент шихты доменных печей [85].

Таблица 4.2 – 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

Опытные партии брэксов были изготовлены на лабораторном компьютеризированном экструдерном комплексе, полностью воспроизводящем технологию ЖВЭ, которая рассматривается нами как перспективная технология подготовки железорудного сырья к доменной плавке, могущая быть частичной или полной альтернативой агломерации [86].

Брэксы имели круглое сечение диаметром в 25 мм и длиной в диапазоне 1,5–2,0 их диаметра. Влажность свежеотформованных брэксов составила 12,4 % (№2) и 11,9 % (№4). Вакуум в рабочей камере экструдера при производстве брэксов был на уровне 20,32 мм рт.ст. (№2) и 45,72 мм рт.ст (№4). Температура брэксов на выходе из фильеры была 30–31 ^{o}C.

Для оценки прочности на раздавливание из брэксов приготовили цилиндрические образцы длиной 30 мм. Нагрузку прикладывали вдоль оси образцов. Испытания проводили до и после их термообработки в восстановительной атмосфере (50 % водорода + 50 % азота) при

нагреве до 1150 °С со скоростью 500 °С в час (временной градиент температуры аналогичен градиенту в шахте доменной печи) с последующим охлаждением в атмосфере азота. Использовали по 5 образцов каждого типа. Все термообработанные образцы сохранили свою форму и размеры. Несмотря на существенно разный компонентный и химический состав шламовых брэксов и брэксов из концентрата и коксовой мелочи их прочность перед термообработкой была практически одинаковой, соответственно: 89,4–166,3 кгс/см^2 (в среднем по 5 брэксам 119,3 кгс/см^2) и 103,8–124,7 кгс/см^2 (в среднем по 5 брэксам 111,4 кгс/см^2). После термообработки в восстановительной атмосфере прочность указанных брэксов уменьшилась, соответственно на 8,2 % и на 14,5 %. В связи с избыточным содержанием углерода в брэксах №2 и №4 и одинаковым режимом восстановления (брэксы двух типов обрабатывались одновременно в одной печи) достигнутая степень металлизации ($\eta_{мет}$) у них также практически одинаковая (таблица 4.3).

Таблица 4.3 – Химический состав сырых и металлизованных брэксов

Брэксы	$Fe_{общ.}$	$Fe_{мет.}$	$\eta_{мет}$	FeO	CaO	MgO	Al_2O_3	SiO_2	C	п.п.п.	Основность
№2 сырой	37,40	-		18,6	15,50	1,26	1,64	7,04	15,7	19,1	2,2
№2 металлизованный	64,5	51,6	0,8	16,8	-			-	9,66		
№4 сырой	49,20			21,0	6,89	0,58	1,14	8,78	11,6	12,2	0,8
№4 металлизованный	82,6	67,1	0,82	18,9	-			-	7,80		

За базовую методику определения восстановимости принята методика по ГОСТ 28657-90 [44] и ГОСТ 21707-76 [45]. Более высокая скорость и степень восстановления у брэкса из железорудного концентрата (рисунок 4,1) объясняется повышенной концентрацией кислорода оксидов железа в этом брэксе (24,6 %) по сравнению со шламовым брэксом (18,1 %). Это позволяет заключить, что при низкотемпературном восстановлении (до 900–950 °С, когда углерод еще не принимает участия в восстановлении) восстановимость этих двух видов брэксов практически не отличается.

Полученные результаты позволили сделать принципиальный вывод об оптимальном содержании углерода как в рудококсовых, так и в шламовых брэксах. Это содержание должно отвечать стехиометрическому атомарному соотношению C/O = 0,3–0,5 по отношению к кислороду вюстита, который остается в брэксах после восстановления высших оксидов железа до вюстита. Чрезмерно избыточный углерод частиц коксовой мелочи или угля по сравнению с этим соотношением может оставаться невостребованным в шлаке, образующемся из пустой

породы компонентов брэкса, и повышать его вязкость, ухудшая показатели работы печи, что отмечалась и в исследованиях О.Г. Большаковой [34-35].

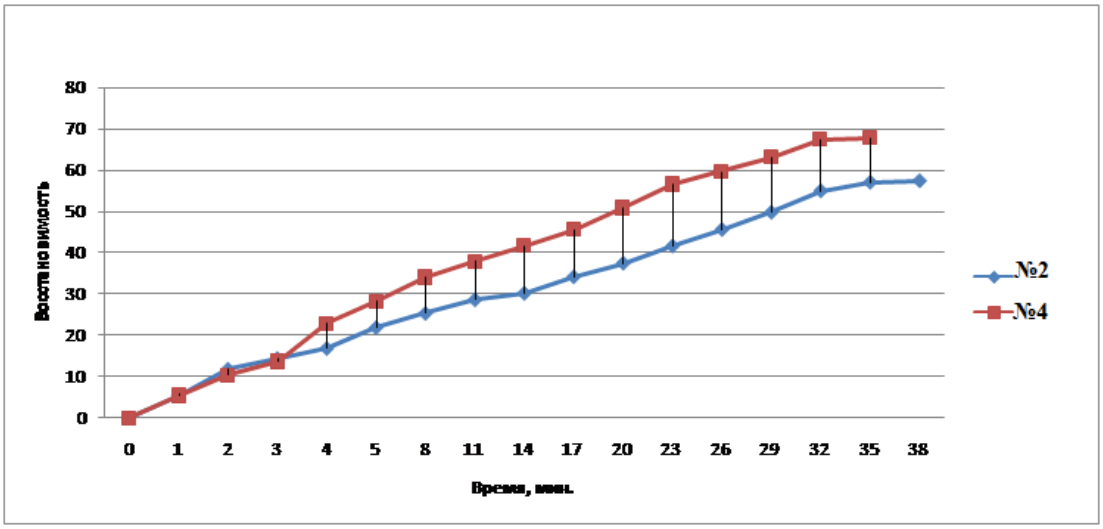


Рисунок 4.1 – Кривые восстановимости брэксов №2 и №4

Испытания шламовых брэксов и брэксов из концентрата на горячую прочность по стандарту ISO 4696 выявили большое преимущество брэксов из концентрата (показатель $RDI_{+6,3}$ равен 96,5 %) по сравнению со шламовыми брэксами (показатель $RDI_{+6,3}$ равен 61,8 %), что объясняется отсутствием в первых брэксах какого-либо гематита и, напротив, присутствием в шламовых брэксах вторичного гематита (в частицах как доменных, так и конвертерных шламов), кристаллическая решетка которого при низкотемпературном и медленном восстановлении перестраивается с увеличением геометрических параметров, что вызывает возникновение механических напряжений и дезинтеграцию кусков материала, содержащих гематит.

Для сопоставления одновременно оценили по тому же стандарту горячую прочность агломератов с основностью [(CaO+MgO)/(Al_2O_3+SiO_2)] 1,2, 1,4 и 1,6, полученных из обычной для ПАО «НЛМК» шихты. Горячая прочность шламовых брэксов сопоставима с горячей прочностью агломерата с основностью 1,2 и 1,4 (64 % и 60 %), что объясняется близкими содержаниями в этих материалах вторичного гематита. Горячая прочность агломерата с основностью 1,6 (77 %) выше горячей прочности шламового брэкса в связи с тем, что при основности 1,6 в агломерате уже появляется новая фаза - ферриты кальция, упрочняющая структуру агломерата и снижающая дезинтеграцию его при низкотемпературном восстановлении. В то же время показатель горячей прочности брэкса из концентрата и коксовой мелочи значительно превосходит соответствующие показатели всех испытанных агломератов.

Экспериментально 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. Это является важным аргументом в пользу рассмотрения таких брэксов в качестве основного компонента доменной шихты.

Минералогическое исследование структуры сырых и восстановленных брэксов проводились на полированных шлифах в отраженном свете. Фазовый анализ брэксов осуществлялся на лабораторном микроскопе Leica DM IL с оптикой высокого разрешения HC производства фирмы Leica Microsystems (Германия).

Структура сырого брэкса №4 представлена зернами магнетита, кварца и коксовой мелочи, связанными цементным камнем (рисунок 4.2). Основной носитель прочности сырого брэкса – цементный камень. Равномерность распределения частичек материалов во всем объеме среза брэкса от периферии к центру была достигнута хорошим смешиванием шихты.

Микроструктура восстановленного образца №4 (рисунок 4.3) представлена системой из спеченных между собой зерен металлического железа и частично раскристаллизованной стеклофазы железооливинового состава, а также включениями непрореагировавшей коксовой мелочи. Носителем прочности частично восстановленного брэкса №4 является не только железосиликатная фаза, но и каркас из металлического железа, образовавшийся из спекшихся зерен металла в периферийной части брэкса.

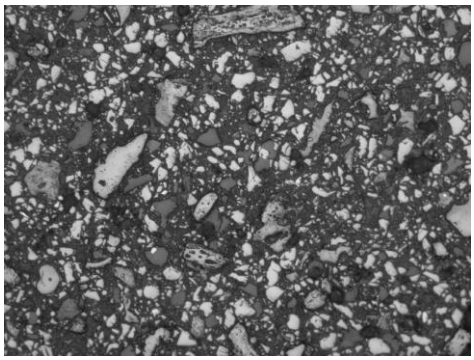


Рисунок 4.2 – Микроструктура сырого брэкса №4. Отраженный свет, увеличение x100

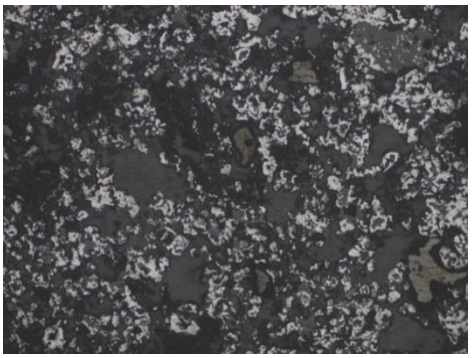
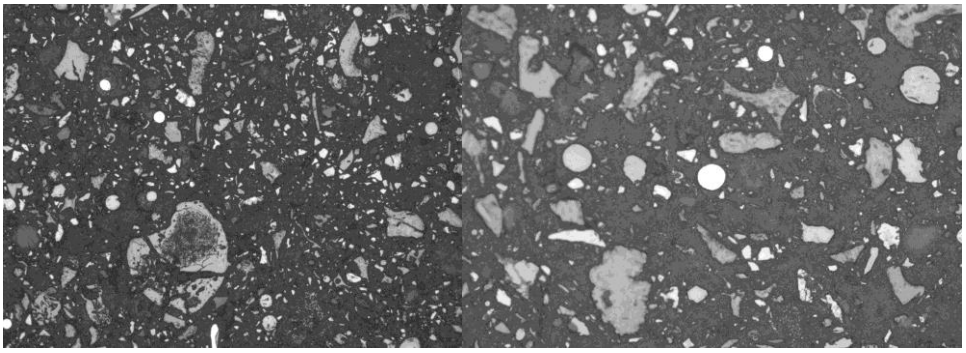


Рисунок 4.3 – Микроструктура восстановленного брэкса №4: отраженный свет, увеличение х100

В сыром шламовом брэксе (№2) кроме частичек агломерата, кокса, окатышей и шлака присутствуют шарообразные корольки металла, обособленно расположенные в цементном камне наравне с названными выше частицами доменного и конвертерного шламов (рисунок 4.4).



Отраженный свет. Слева – увеличение х100, справа – х200

Рисунок 4.4 – Микроструктура сырого шламового брэкса

Структура восстановленного брэкса №2 представлена разрозненными мелкими зернами металлического железа, вюстита, кокса и силикатной фазой (рисунок 4.5). Явно выраженный металлический каркас, наблюдаемый в восстановленном брэксе из концентрата, в поверхностном слое шламового брэкса отсутствует. Это связано с пониженным содержание железа в шламовом брэксе и с более высоким содержанием более дисперсной коксовой мелочи и, как следствие, более высоким содержанием остаточного углерода (таблица 4.3).

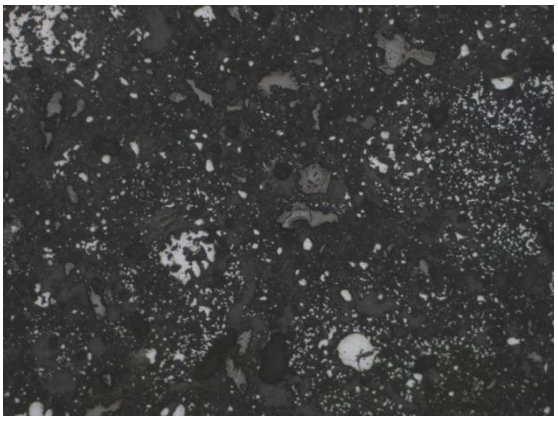


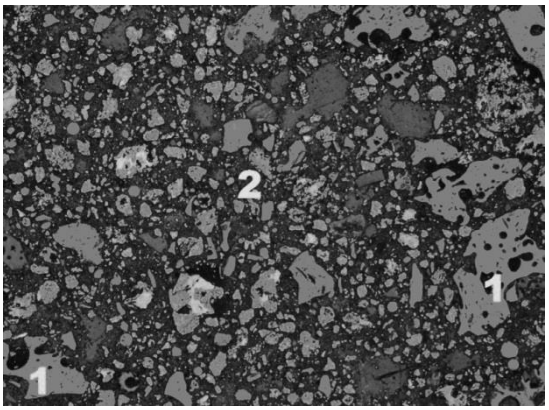
Рисунок 4.5 – Микроструктура восстановленного шламового брэкса

Носителем прочности такого брэкса, как и брэкса №4, 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. В центральной части брэкса из железорудного концентрата присутствуют только разрозненные зерна металлического железа.

Для сравнения нами были изучены металлургические свойства рудококсового брэкса на основе гематитовой гидроруды Белгородского железорудного района, получаемой методом гидродобычи (гидроруда – 79 %, коксовая мелочь – 15 %, портландцемент – 5,55 %, бентонит – 0,45 %). Частицы этой богатой руды ($Fe_{общее}$ – 67,5; SiO_2 – 1,5; $A1_2O_3$ – 0,3; CaO – 0,2; MgO – 0,3; S – 0,05; P_2O_5 – 0,05) имеют пластинчатое строение, что, при ее применении в аглошихте, сильно ухудшает ее комкуемость и снижает качество агломерата. Но это свойство руды при ее брикетировании не оказывает негативного влияния на качество получаемых из нее брэксов и позволяет рассматривать эту руду как перспективное сырье для производства рудококсовых или рудоугольных брэксов.

Минералогические исследования показали, что основная масса рудных минералов представлена гематитом (Fe_2O_3), реже сростками гематита с магнетитом (Fe_3O_4). Силикаты чаще всего наблюдаются в сростках с железосодержащими минералами. На рисунке 4.6 представлена микроструктура сырого брэкса, компонентный состав которого приведен выше.

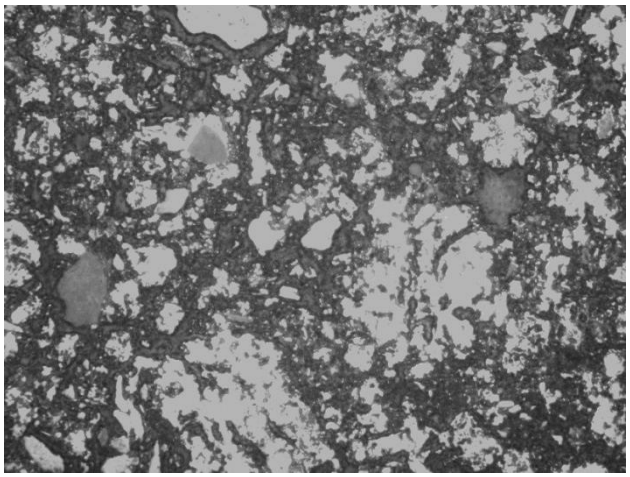


1 – коксовая мелочь; 2 – зерна гидроруды (белое) в цементной связке (серое)

Рисунок 4.6 – Микроструктура рудококсового брэкса, отраженный свет, увеличение ×50

С целью оценки хода процесса восстановления рудококсовых брэксов были изучены аншлифы образцов брэксов после их нагрева в восстановительной атмосфере до температур: 900 ºС, 1100 ºС, 1200 ºС.

В центральной части брэкса, восстановленного при нагреве до температуры 900 ºС, железосодержащая фаза представлена в основном вюститом и магнетитом (рисунок 4.7), а в периферийной части брэкса можно видеть связанные между собой частицы металлического железа с небольшими включениями силикатной фазы (рисунок 4.8).



светло-серое – обособленные участки восстановленного вюстита и магнетита; серое – силикатные фазы

Рисунок 4.7 – Микроструктура центральной части восстановленного брэкса при температуре 900 °С, отраженный свет, увеличение ×100

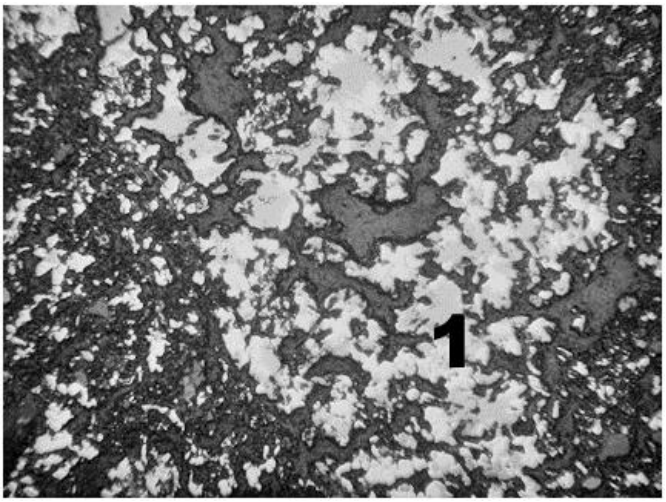
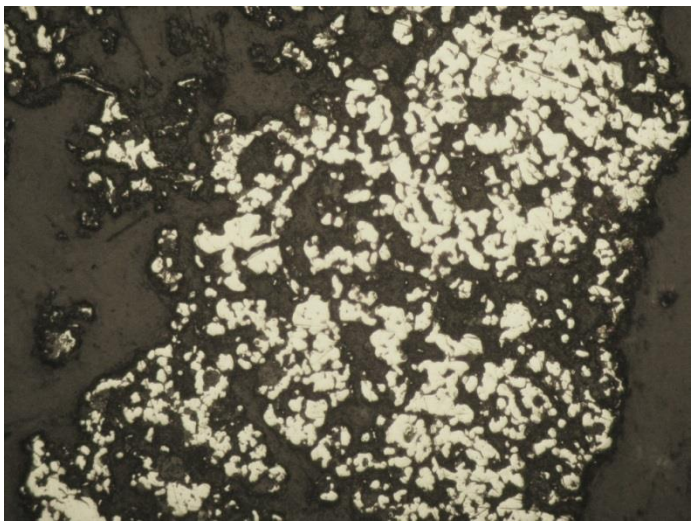


Рисунок 4.8 – Образование металлического каркаса на месте крупных зерен гематита гидроруды (1) по периферии брэкса (Т = 900°С), отраженный свет, увеличение ×200

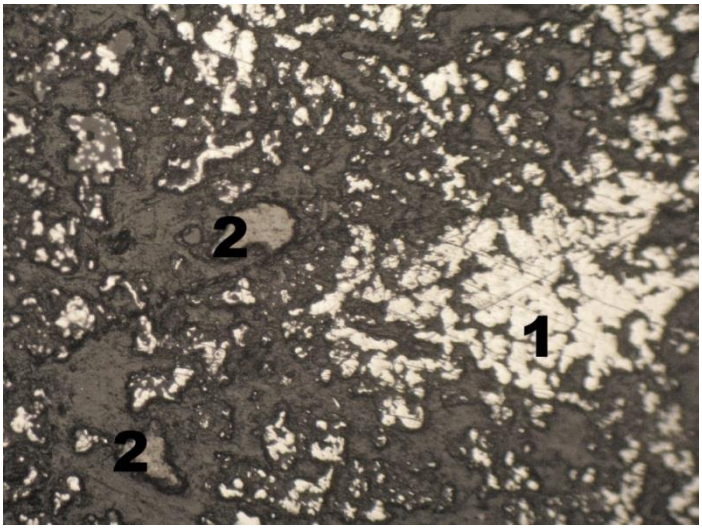
В периферийной части образца брэкса, нагретого до 1100 °С, оксиды железа полностью восстановлены до металла и четко виден образовавшийся металлический каркас (рисунок 4.9).



белое – металл, серое – преобразованные минеральные фазы цементной связки

Рисунок 4.9 – Микроструктура периферии восстановленного брэкса при температуре 1100 °С, отраженный свет, увеличение ×200

Дальнейший нагрев брэкса до температуры 1200 °С завершает процесс восстановления железа во всем его объеме. В центральной части брэкса основная часть железа представлена металлом и лишь частично в виде вюстита. Незначительное количество включений частиц неусвоенной коксовой мелочи (рисунок 4.10) свидетельствуют о ее избытке в шихте для производства брэксов даже при богатой руде (67,5 % Fe).



1- металл; 2 – коксовая мелочь; серое - преобразованные минеральные фазы цементной связки

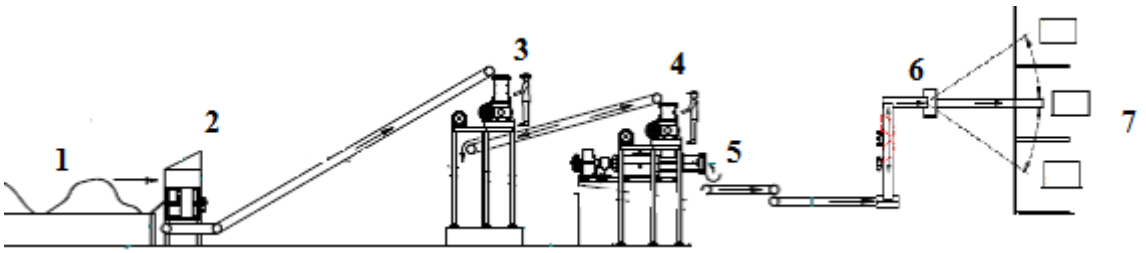
Рисунок 4.10 – Микроструктура центра восстановленного брэкса при температуре 1200 °С, отраженный свет, увеличение ×200

Таким образом, с увеличением температуры выше 900–1000 ^{o}C основную роль в восстановлении оксидов железа в теле брэкса начинает играть углерод коксовой мелочи, в периферийной части брэкса при этом уже формируется каркас из металлического железа, образовавшегося в реакциях восстановления его оксидов газом. На основе результатов выполненных исследований сделаны выводы и рекомендации о необходимости включения в состав брэксов из техногенного сырья с невысоким содержанием железа природного или техногенного компонента с высоким содержанием железа. Присутствие частиц коксовой мелочи в брэксе после его нагрева в восстановительной атмосфере до 1200 ^{o}C подтверждает сделанный вывод о необходимости поддерживать содержание углерода в брэксах в соответствии со стехиометрическим атомарном соотношением C/O равным или незначительно превышающим 0,3–0,5 по отношению к атомарному содержанию кислорода в оксидах железа брэксов после их восстановления до вюстита.

4.2 Исследование металлургических свойств промышленных брэксов, применяемых в качестве основного компонента шихты доменной печи

В апреле 2011 года заводе фирмы Suraj PL в г. Руркела (Западная Бенгалия, Индия) была введена в эксплуатацию промышленная линия брикетирования, производящая по технологии жесткой вакуумной экструзии брэксы для их использования в доменной печи (рисунок 3.11). В

основу проекта строительства экструзионной брикетной линии в составе доменного цеха металлургического завода указанной компании легли результаты изучения опыта производства брикетов по различным технологиям из техногенного и природного сырья в России и в Германии и их применения в черной металлургии, а также многолетний опыт применения технологии ЖВЭ для брикетирования мелкой никелевой руды и пыли газоочистки производства ферроникеля. Руководством компании было решено реализвать проект производства брикетов способом ЖВЭ из смеси конвертерного шлама, колошниковой пыли, портландцемента и бентонита (таблица 4.4). Принятию этого решения способствовало также знакомство с результатами исследований (с участием автора) металлургических свойств брэксов [70,72, 105-112, Приложение 1] а также результаты компьютерного моделирования доменной плавки в малой доменной печи на шихте из брикетов, выполненного профессором Куруновым И.Ф. по просьбе владельца сомпании Suraj PL. Основная цель проекта заключалась в повышении экономической эффективности работы малой доменной печи за счет замены проплавляемой покупной руды дешевыми брэксами, получаемыми из колошниковой пыли и сталеплавильных шламов. Схема построенной и пущенной в 2011 году экструзионной линии представлена на рисунке 4.11.



1– склад сырья, 2 – питатель равномерной подачи с участком смешивания связующего и пластификатора, 3 – первичная глиномялка, 4 – глиномялка с вакуумным затвором, 5 – экструдер, 6 – штабеллер, 7 – участок набора прочности

Рисунок 4.11 – Схема экструзионной линии компании Suraj PL (Индия)

Свежеотформованные брэксы из экструдера направляются конвейером к штабеллеру-укладчику. В штабеле брэксы вылеживаются в течение 2–3 суток, откуда направляются в доменный цех или на открытый склад для хранения. Из-за высокого давления экструзии и удаления воздуха из брикетируемой в вакуумной камере экструдера, свежеотформованные брэксы имеют на выходе из экструдера плотную структуру, пластичность, и достаточную для их транспортировки и складирования механическую прочность. Вследствие пластичности

брэксов, операции транспортировки и складирования не сопровождаются образованием мелких фракций. При двухсменной работе отделение брикетирования производит 200 т брэксов в сутки. Кроме обычных брэксов, как основного компонента шихты доменной печи, на участке брикетирования производятся промывочные брэксы из мелочи марганцевой руды.

Производимые брэксы используются в настоящее время в качестве основного и единственного компонента моношихты на малой доменной печи объемом 50 $м^{3.}$ До строительства этой линии доменная печь работала на 100 % богатой гематитовой руды с применением в качестве флюсов известняка и доломита. Технологический консалтинг по оптимизации шихтовых условий доменной плавки за счет применения брэксов и компонентного состава шихты для брикетирования, а также технологии доменной плавки осуществлялся с участием автора и руководителя диссертационной работы, доктора технических наук, главного доменщика ПАО «НЛМК».

Таблица 4.4 – Химический состав компонентов брикетируемой шихты и брэксов

Компоненты брэкса и их доля, %,	Fe_2O_3	FeO	$Fe_{общ}$	ппп	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	TiO_2	K_2O+ Na_2O	C
Железная руда,18,9	88,53	-	62,0	4,37	2,71	0,3	-	3,51	0,22	0,2	-
Колошниковая пыль, 28,3	53,0	-	37,1	-	6,3	4.9	0.2	5.1	-	-	30,5
Конвертерный шлам, 47,2	17,9	65,4	63,4,0	-	1,3	8,6	4.9	0,3	-	-	1,5
Портландцемент, 4,7	4,2	-	-	1,5	20,5	63,2	2,1	4,5	-	0,6	-
Бентонит, 0,9	10,0	-	-	9,4	58,4	0,8	0,3	12,6	-	4,4	-
Брэксы, 100	40,4	30,7	52,1	1,4	4,7	8,3	2,5	2,6	0,1	0,13	9,2

4.2.1 Физико-механические свойства промышленных брэксов

Компонентный состав брэксов, производимых на предприятии Suraj PL промышленно, - по 42,5% - конвертерный шлам (LD) и колошниковая пыль, 10% -железорудная мелочь и 5% цементно-бентонитовое связующее, представляющее собой смесь 80% цемента и 20% бентонита, приготовляемую отдельно. Физико-механические свойства промышленных брэксов исследовали с позиций требований, предъявляемых к шихтовым материалам доменной плавки. К этим свойствам относятся механическая прочность и пористость брэксов, определяющие их восстановимость и поведение при перегрузках на пути в доменную печь и при опускании столба шихты в печи в противотоке с горновым газом. Прочность брэксов на сжатие измеряли на установке "Tonipact 3000" (Германия) в соответствии со стандартом DIN 51067. Открытая пористость измерялась в соответствии со стандартом DIN 51056 вакуумным способом жидкостенасыщения.

Распределение пор в объеме брэкса изучали на рентгеновском микротомографе Phoenix V|tome|X S 240, оснащённом двумя рентгеновским трубками: микрофокусной с максимальным ускоряющем напряжением 240kV/мощностью 320W и нанофокусной с максимальным ускоряющем напряжением 180kV/мощностью 15W. Для первичной обработки данных и создания объёмной (воксельной) модели испытуемого образца на базе рентгеновских снимков (проекций) использовалось ПО Datos|x reconstruction. Для визуализации и анализа данных по элементам объёмного изображения использовалось ПО VG Studio MAX 2.1 и Avizo Fire 7.1. Исследование показало равномерное распределение пор в объема брэкса, рисунок 4.12).

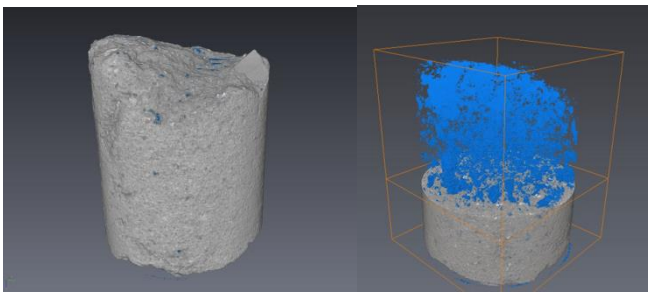


Рисунок 4.12 – Распределение пор размером более 5 мкм в объеме брэкса

Исследовали также динамику изменения плотности, пористости и прочности брэксов в процессе их упрочняющего вылеживания (таблица 4.5, рисунок 4.13).

Таблица 4.5 – Изменение физических свойств брэксов Suraj Products Ltd в процессе набора прочности

Время набора прочности, сутки	Открытая пористость%	Плотность ($г/см^3$)	Прочность на сжатие ($кг/см^2$)
1	31,5	2,42	24
2	25,4	2,66	45
3	32	2,43	63
4	27	2,44	52
5	27,2	2,45	56
6	26,2	2,45	57
7	26,8	2,46	59
8			75
9			80

Видно, что график набора прочности брэксов имеет выраженный локальный максимум на третьи сутки, сменяемый разупрочнением в течение последующих суток и завершающийся дальнейшим ростом прочности. При этом прочность брэкса непосредственно перед разупрочнением составляет около 88 % от прочности брэкса после недельного упрочняющего вылеживания. Характер изменения открытой пористости практически повторяет характер изменения прочности, за исключением первых суток упрочнения. Снижение пористости в это время очевидно связано с разбуханием бентонита, заполняющего поровое пространство [87].

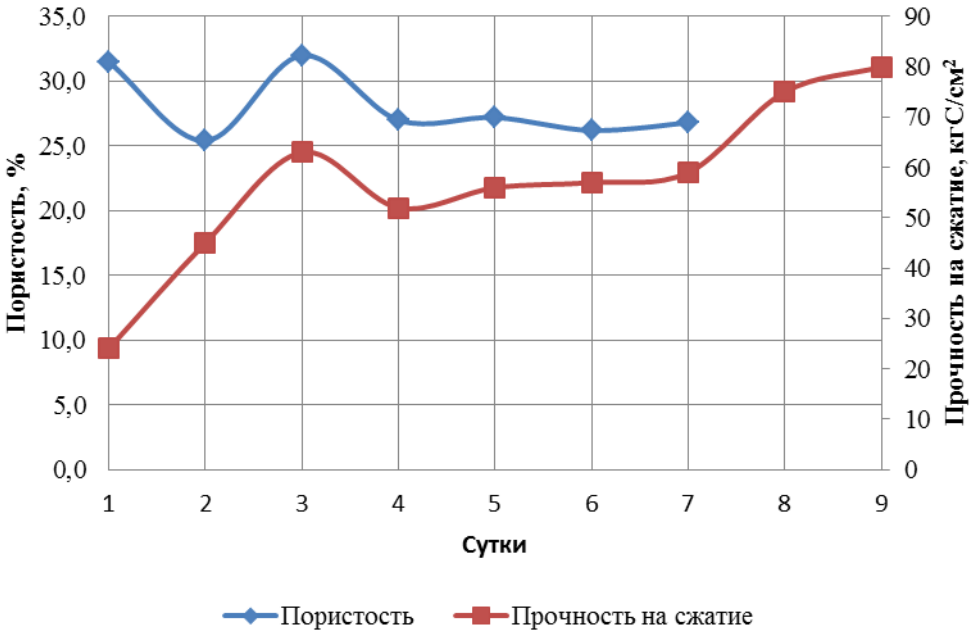


Рисунок 4.13 – Изменение прочности и пористости брэкса во время упрочняющего вылеживания

Образцы брэкса при испытании на сжатие и на раскалывание на третьи сутки набора прочности сохраняли свою целостность вплоть до прекращения теста, проявляя вязко-пластичный характер разрушения (рисунок 4.14). Несмотря на почти полное развитие трещины при испытании на прочность при раскалывании на третьи сутки упрочнения, обе половины брэкса продолжали оставаться сцепленными (слева внизу на рисунке 4.14). Видно также, что сжатие (слева вверху на рисунке 4.14) и раскалывание брэкса приводило к выделению влажной субстанции в нижней его части. Подобные выделения отсутствовали при сжатии брэкса на седьмые сутки упрочнения. При испытаниях на сжатие и на раскалывание на седьмые сутки упрочнения, разрушение брэксов в значительной степени утрачивало вязко-пластичный характер.



Слева – на третьи и справа – на седьмые сутки набора прочности

Рисунок 4.14 – Тест на осевое сжатие (верхний ряд) и на растяжение при раскалывании (нижний ряд) брэкса Suraj Products Ltd

Подобный эффект немонотонного упрочнения брикетов на цементном связующем с наличием локального максимума прочности, сопровождающийся вязко-пластичным поведением при разрушающей нагрузке, ранее не наблюдался и не был описан в литературе. Упрочнение мономинерального цементного камня и бетона, как известно, носит монотонный характер [88]. В то же время немонотонный характер набора прочности брикетов, изготовленных на иных связующих материалах или без связующего вообще, известен [42]. В

описанном нами явлении, существенным является то обстоятельство, что при немонотонном характере повышения прочности брэксов на сжатие в первые 4 суток вылеживания сохраняется вязко-пластичный характер разрушения и снижается вероятность хрупкого разрушения, при котором образуется мелочь. Именно это обстоятельство и способствовало высоким значениям ударной прочности рудошламовых брэксов при 3-х кратном сбрасывании с высоты 2-х метров спустя всего лишь 48 часов вылеживания, описанным в главе 3.

На наш взгляд такое поведение брэксов объясняется свойствами цементно-бентонитового связующего и является результатом образования коагуляционных структур в системе цемент-бентонит-вода, приводящего к модификации свойств связующего. Такие же структуры, как известно, образуются в гельцементных растворах, применяемых для цементации стволов нефтяных скважин [89]. Полученные нами результаты изучения динамики набора прочности промышленных брэксов Suraj PL послужили основной для внедрения в производство таких брэксов практики предварительного приготовления смеси цемента и бентонита в указанных выше пропорциях (80% и 20%, соответственно), и ее последующего применения в качестве связующего, что позволило сократить суммарную массовую долю цемента в брэксе до 4,8% массы брэкса.

4.2.2 Изменение структуры и состава промышленных брэксов в процессе восстановления

Изменение структуры и состава промышленных брэксов при их нагреве до 1500 ^{o}C в атмосфере CO изучали в сопоставлении с изменением структуры и состава богатой гематитовой железной руды. Образцы руды и брэксов подвергались нагреву до 1500 ^{o}C с шагом в 100 °C. Каждый тест длился 2 часа.

Химический состав образцов руды и брэксов приведен в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Химический состав железной руды и брэкса, %

Элемент	Железная руда	Брэкс
Fe_2O_3	88,53	40,4
FeO	2,85	30,7
SiO_2	2,71	4,7
CaO	0,3	8,3
MgO	-	2,5
Al_2O_3	3,51	2,6

TiO_2	0,22	0,1
$K_2O + Na_2O$	0,20	0,13
C	-	9,2
ппп	1,6	1,4

Фазовый состав компонентов брэкса и образцов железной руды был выполнен с использованием рентгеновского диффрактометра (ARL 9900 XRF series with integrated XRD capability, Япония).

Фазовый состав компонентов брэкса: железной руды – гематит, гётит, Гиббсит, пироксен, каолин; колошниковой пыли – магнетит, гематит, вюстит, графит, кварц, двукальциевый феррит; конвертерного шлама – магнетит, вюстит, Волластонит, кальцит.

Степень восстановления определялась по формуле (17):

$$\text{Степень восстановления (\%)} = \left(\frac{M_i - M_f}{M_o} \right) \times 100 \qquad (17)$$

где M_i – вес образца до нагрева, г

M_f – вес образца после нагрева, г

M_o – общее количество кислорода в оксидах железа исходного образца, г

Степень металлизации образцов железной руды и брэксов определяли по отношению содержания металлического железа к общему содержанию железа. Восстановимость и степень металлизации образцов руды и брэксов определяли при их нагреве до 1500 ^oC, отбирая образцы из печи после достижения температуры в ней 1000 ^oC, 1100 ^oC, 1200 ^oC, 1300 ^oC, 1400 ^oC и 1500 ^oC. При всех температурах восстановимость и степень металлизации образцов брэксов превышала восстановимость и степень металлизации железной руды (таблица 4.7). При восстановлении в температурном интервале 500–1000 ^oC это объясняется более высокой пористостью брэксов (33,7 % при 500 ^oC и 37,4 % при 1000 ^oC) по сравнению с рудой (19,4 % и 29,2 % соответственно). При температурах выше 1000 ^oC присутствующий в составе брэксов углерод активно участвовал в восстановлении, обеспечивая их более высокую восстановимость [90].

Таблица 4.7 – Степень металлизации и восстановимость железной руды и брэксов

T, ^oC	Fe общ. %	Степень металлиз.,%	Восстановимость, %

	Руда	Брэкс	Руда	Брэкс	Руда	Брэкс
1000	67,48	60,5	3,2	23,5	35,0	48,0
1100	69,52	61,7	18,25	33,0	52,0	62,0
1200	70,25	63,7	25,10	47,6	61,0	72,0
1300	73,3	65,6	41,3	68,0	65,8	80,0
1400	80,8	67,46	66,5	77,2	82,0	88,1
1500	90,4	80,87	93,2	97,0	93.0	99,0

Минералогическое исследование осуществлялось методами световой микроскопии с использованием лабораторного инвертированного микроскопа Leica DM ILM с оптикой высокого разрешения HC производства фирмы Leica Microsystems (Германия) и методами растровой микроскопии с использованием поляризационного микроскопа ECLIPSE LV100-POL, оснащенного цифровой фотомикрографической системой DS-5M-L1.

На рисунках 4.15–4.16 приведены изображения структуры брэкса после восстановления при температуре 1400 °С, в которых металлическое железо образует своеобразную сетку, внутри которой встречаются микрозоны вюстита. Металл выделился из стеклофазы, раскристаллизованной до силикатов. Сплошные поля металла и стеклофазы. Стеклофаза различается по составу.

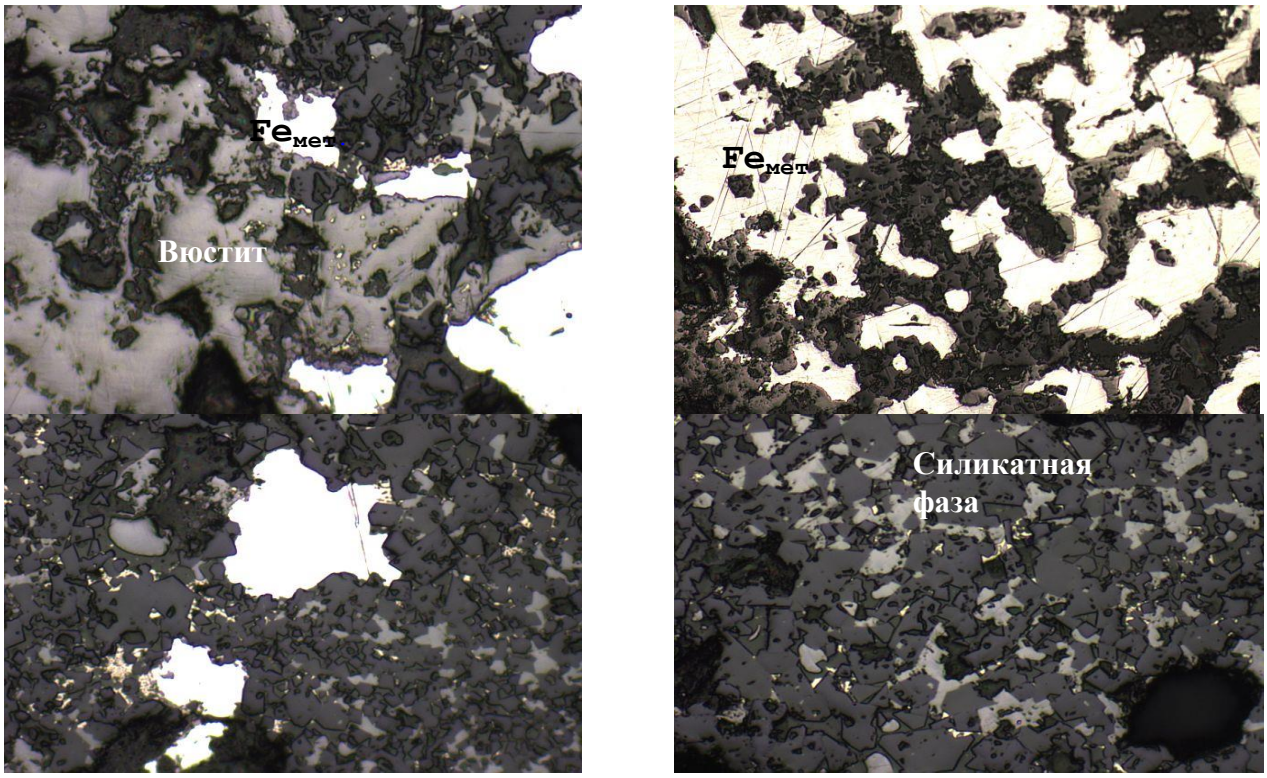
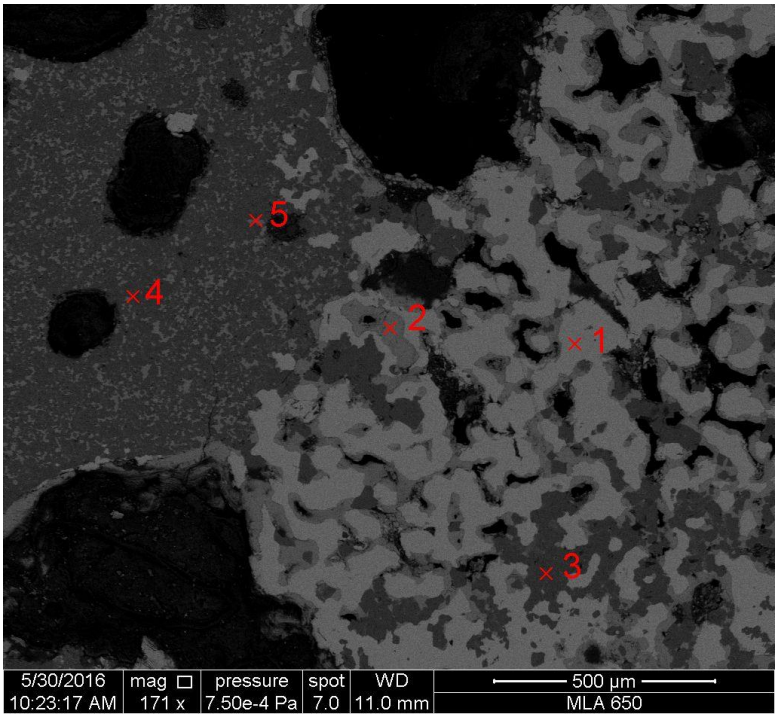


Рисунок 4.15 – Световая микроскопия брэкса после нагрева в восстановительной атмосфере при 1400 °С (увеличение 200)



1 – α-железо, 2 – вюстит, 3,4 – стеклофаза, 5 – вюстит

Рисунок 4.16 – Растровая микроскопия брэкса после восстановительного нагрева при 1400 °С

Таким образом, обеспечение горячей прочности брэкса, 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 ^{o}С восстанавливается железо за счет углерода коксовой мелочи.

4.3 Опыт освоения технологии проплавки брэксов при увеличении их доли в шихте до 100 %

Малая доменная печь (объем 45 м^3) предприятия Suraj PL оснащена: скиповым подъемником с объемом скипа 0,5 м^3, двухконусным загрузочным устройством, гидравлическим оборудованием для обслуживания летки, воздухонагревателями рекуперативного типа, двухступенчатой системой сухой газоочистки (пылеуловитель + семь модулей рукавных фильтров), установкой грануляции шлака. Печь имеет наружное водяное охлаждение и 8 воздушных фурм. Выплавляемый литейный и передельный чугун разливается

на разливочной машине. Суточная производительность доменной печи составляет 100–130 т чугуна.

Эксплуатация экструзионной линии в составе доменного цеха началась в мае 2011 года с применением в шихте доменной печи 10 % брэксов. Постепенно доля брэксов в шихте была доведена до 80 %, а последние три года доменная печь работает на шихте из 100 % брэксов. Показатели работы доменной печи предприятия Suraj Products Ltd в г. Руркела (Индия) с использование брэксов представлены в таблице 4.8.

Таблица 4.8 – Показатели работы доменной печи Suraj PL

Показатели работы доменной печи	100 % руды	80 % брэксов	100 % брэксов
Расход, кг/т:			
железной руды	1500	372	-
брэксов	-	1425	1960
известняка	150	-	-
доломита	144	-	29
скрапа	132	-	-
кварцита	-	-	13
брэксов из Mn руды	-	19	75
кокса*	680	530	490
$Fe_{общ.}$ в офл. шихте, %	57,6	50,4	45,5
Производительность, т/м^3 в сут.	1,9	1,62	2,0
Температура дутья, ºС	925	900	1000
Давление дутья, кг/см^2	0,5	0,34–0,38	0,38–0,42
[Si], %	1,0–1,8	1,0–1,5	0,8–1,1
[Mn], %	0,2	0,4–0,5	0,7–0,8
[C], %	3,8–4,0	3,75–3,90	3,80–3,95
[S], %	0,050–0,060	0,038–0,050	0,038–0,042
Темп-ра чугуна, ^oC	1380–1440	1400–1450	1410–1450
(CaO), %	34,86	33,12	38,0–39,0
(SiO_2), %	31,98	30,23	30,0–32,0
(Al_2O_3), %	23,87	17,98	16,0–18,8
(MgO), %	9,46	9,48	8,0–9,5

(FeO), %	1,01	1,26	0,6–1,15
(MnO), %	0.35	0,75	1,3-1

*Крупность 15–25 мм

Из приведенных данных видно, что при работе на шихте из 80 % брэксов и 20 % руды расход кокса сократился на 150 кг/т чугуна (22 %) по сравнению с ее работой на 100 % железной руды. Сокращение расхода кокса произошло как за счет углерода, содержащегося в брэксах, так и за счет вывода из шихты известняка и доломита. Понижение производительности при работе на шихте из 80 % брэксов связано в основном со снижением содержания железа в этой шихте на 7,2 % (абс.) по сравнению с шихтой из руды и сырых флюсов. Переход печи на моношихту привел в итоге к дальнейшему снижению расхода кокса как за счет дополнительного прихода углерода с брэксами, так и за счет повышения температуры дутья на 100 ^{o}C. Кроме того, применение промывочных брэксов из марганцевой руды снизило вязкость шлаков и улучшило отработку продуктов плавки. В итоге производительность печи увеличилась за счет улучшения структуры столба шихты, снижения вязкости первичных шлаков и повышения общего перепада давления. Снижение удельных потерь тепла при этом также способствовало сокращению расхода кокса.

В процессе освоения технологии доменной плавки с применением нового компонента доменной шихты пришлось перейти на новый более низкий уровень засыпи шихты в печи в связи с возникшими трудностями в работе сухой газоочистки. Постепенное увеличение доли брэксов в шихте привело к увеличению влажности колошникового газа и к снижению его температуры. В результате рукавные фильтры начали забиваться влажной пылью, а регенерация их обратными импульсами давления не достигала эффекта. Понижение уровня засыпи повысило температуру колошникового газа и залипание рукавных фильтров прекратилось. Понижение уровня засыпи практически не повлияло на показатели работы доменной печи в связи с тем, что восстановление низшего оксида железа (FeO) в брэксах происходит преимущественно прямым путем за счет углерода кокса, содержащегося в брэксах, а высокий восстановительный потенциал горнового газа и его температура обеспечивали восстановление высших оксидов железа до вюстита.

Как видно, несмотря на высокие удельные тепловые потери, из-за малого объема доменной печи, и невысокую температуру дутья, расход кокса при работе доменной печи на моношихте из брэксов не превышает 500 кг/т, что соответствует результатам работы современных высокоэффективных доменных печей на шихте с содержанием железа 58–59 % с температурой дутья 1200 ^{o}C и при избыточном давлении газа на колошнике 180–250 кПа. Это достигается благодаря тому, что применяемые на упомянутой доменной печи брэксы

являются самовосстанавливающимися, благодаря присутствию в них мелкодисперсных частиц кокса колошниковой пыли, находящихся в тесном контакте с дисперсными частицами руды и сталеплавильных шламов, содержащих оксиды железа, а также, благодаря высокой основности брэксов, обеспечивающей получение необходимой основности доменного шлака без применения известняка. Для корректировки основности шлака и содержания магнезии в нем применяются добавки кварцита и доломита. В результате расход кокса на выплавку чугуна при работе на 100 % брэксов сократился почти на 200 кг/т по сравнению с работой на 100 % богатой железной руды с использованием известняка и доломита.

Результаты более 5-ти лет промышленной эксплуатации экструзионной линии жесткой вакуумной экструзии в составе доменного цеха показали, что брэксы, получаемые из природных и техногенных дисперсных сырьевых материалов, имеют оптимальные и регулируемые размеры, управляемый химический состав и высокие металлургические свойства, являются новым видом окускованного и офлюсованного компонента шихты доменных печей. В отличие от агломерата и окатышей производство брэксов является экологически чистым и полностью безотходным, не имеющим ни газообразных, ни твердых выбросов. В процессе погрузочно-разгрузочных работ и загрузки брэксов в печь мелочь практически не образуется (рисунок 4.17). 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 ^{o}C и содержании железа в офлюсованной шихте 45,5 %.



Рисунок 4.17 – Брэксы в скипе доменной печи компании Suraj Pl

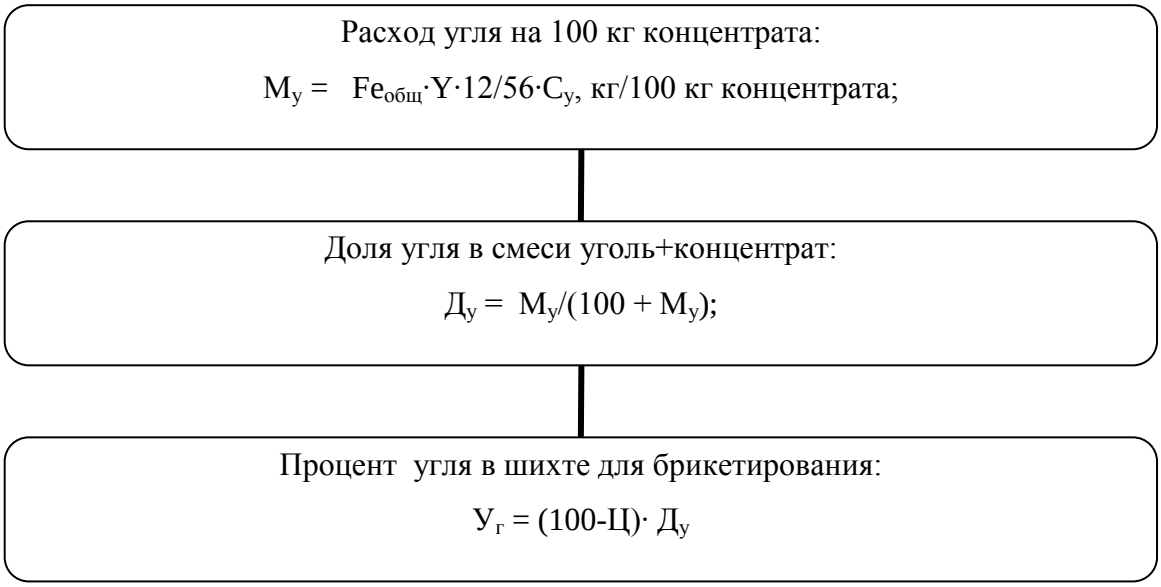
4.4 Оценка перспектив использования углеродсодержащих брэксов их железорудного концентрата

Выполненные исследования металлургических свойств брэксов различного состава, а также уникальный опыт работы малой доменной печи на моношихте из брэксов, послужили основанием для исследования в данной работе возможности и эффективности широкомасштабного применения в доменных печах нового компонента доменной шихты – брэксов. Исследования выполнили путем математического моделирования доменной плавки с применением математической модели доменного процесса и программы ДОМНА, разработанных в МИСиС. Моделировали доменную плавку в доменной печи объемом 4297 м^3, работающей в условиях ПАО «НЛМК» [113]. Учитывая основность брэксов, уровень которой формируется долями применяемых в качестве связующего цемента и в качестве пластификатора - бентонита, моделировали плавку на шихте, состоящей из 3-х компонентов – агломерата, окатышей и брэксов. Доля окатышей определяется мощностью строящейся в ПАО «НЛМК» фабрики окомкования (6 млн. т окатышей в год). Основность брэксов из концентрата и угля марки СС определяется исходя из содержания в шихтовой смеси брэксов цемента (6 %) и бентонита (1 %), принятой на основе испытаний брэксов из такой шихты и такого содержания связующего, а также с учетом содержания угля в шихтовой смеси. При указанных содержаниях цемента и бентонита, основность брэксов (В2) составляет 0,50 – 0,55. Основность агломерата определяется, исходя из принятой концепции 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. Следует заметить, что при такой основности, в структуре агломерата преобладают фазы, обеспечивающие повышение его прочности по сравнению с агломератом с основностью в диапазоне 1,5–1,7 в котором находится агломерат, производимый в ПАО «НЛМК» [91]. Содержание угля в брэксах определили по методике, разработанной на основе результатов изучения структурного состава брэксов после их нагрева в восстановительной атмосфере до 1400 ^{o}С, когда после достижения практически полной металлизации в структуре брэкса оставались непрореагировавшие 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, степень прямого восстановления железа (по М.А. Павлову) в которых остается на относительно высоком уровне (30–50 %) [92, 93].

С учетом этого, расход углеродсодержащего материала в шихте для брикетирования рассчитывается, исходя из стехиометрического соотношения кислорода и железа в брэксах

(O/Fe) к моменту их прихода в зону когезии, где температура превышает 1100 ^{o}C и восстановление идет только с участием твердого углерода. Учитывается также содержание углерода в угле или другом углеродсодержащем материале в долях единицы ($C_у$), 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 доля смеси цемент + бентонит (Ц) в шихте для брикетирования. Алгоритм расчета процентного содержания угля (Уг) в шихте для производства брэксов из железорудного концентрата и угля приведен ниже.

:



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 (таблица 4.9).

Таблица 4.9 – Составы сырьевых материалов, агломератов и брэксов

	FeO	Fe_2O_3	SiO_2	Al_2O_3	CaO	MgO	C	SO_3
Цемент	-	4,71	20,64	4,98	63,58	1,15	-	2,55
Бентонит	0,5	4,37	59,25	14,27	2,07	3,62	-	0,14
Уголь СС	-	1,2	2,7	1,5	0,4	0.1	68,9	0,36
Окатыши СГОК	1,51	90,31	7,04	0,32	0,22	0,45	-	0,12

Концентрат СГОК	29,2	62,3	6,62	0,18	0,26	0,1	-	0,05
Агломерат (1,70)	11,81	66,0	6,70	0,72	11,37	2,51	-	0,05
Агломерат (3,02)	10,0	60,8	6,30	0,7	19,0	3,0	-	0,06
Брэкс	24,83	53,28	7,67	0,71	4,09	0,19	5,5	0,22

Моделирование проводили для одного и того же состава чугуна и его температуры ([Si] = 0,4 %; [C] = 4,8 %; Тчуг.=1500 ^{o}C) и для одинаковой эффективности восстановления (степень приближения состава газа к равновесному в зоне восстановления вюстита). Результаты показали, что благодаря углероду, содержащемуся в брэксах, (рассчитан по разработанной методике), расход кокса на выплавку чугуна сокращается по сравнению с базовым вариантом на 10 %. При работе печи с вдуванием ПУТ с расходом 160 кг/т. достигается расход кокса 284 кг/т, а при вдувании природного газа с расходом 125 м^3/т достигается расход кокса 354 кг/т (Таблица 4.10).

Таблица 4.10 – Результаты моделирования доменной плавки на традиционной шихте и шихте на треть состоящей их железоуглеродсодержащих брэксов

Показатели работы печи	База	Вариант 1	Вариант 2
Расход агломерата В2 = 1,7 , кг/т	1109	-	-
Расход агломерата В2 = 3,0 , кг/т	-	557	575
Расход окатышей СГОК, кг/т	546	557	541
Расход брэксов, кг/т	-	557	575
Расход руда СГОК, кг/т	-	17	-
Содержание Fe в шихте, %	58,2	57,45	57,15
Расход кокса, кг/т	391	354	284
Расход природного газа, нм3/т	125	125	35
Расход ПУТ, кг/т	-	-	160
Расход дутья, м^3/мин	7483	7568	7340
Температура дутья, ^{o}C	1240	1240	1240

Содержание O_2 в дутье, %	30,5	30,5	30,5
Влажность дутья, г/м^3	10	10	20
Выход колошникового. газа, м^3/т	1545	1540	1470
Давление колошникового. газа, кПа	240	240	240
Содержание CO,%	24,4	24,9	26,2
Содержание CO_2, %	23,2	22,6	23,9
Содержание H_2, %	9,7	9,9	8,2
Выход шлака, кг/т	318	314	323
Основность шлака, B2	1,01	1,01	1,02
Производительность, т/сутки	12465	12624	12708
Производительность, т/м^2·сутки	92,48	93,66	94,3
Эффективность восстановления,%	94,2	94,2	94,2

4.5 Выводы по главе

1. Определено оптимальное содержание углерода как в рудококсовых, так и в шламовых брэксах. Это содержание должно отвечать стехиометрическому соотношению C/O = 0,3–0,5 по отношению к кислороду вюстита, который остается в брэксах после восстановления высших оксидов железа до вюстита.

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

3. 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.

4. Установлено, что сохранение целостности шламового брэкса при его нагреве в восстановительной атмосфере обеспечивается образованием матрицы из железосиликатной фазы.

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

6. Низкая комкуемость гидроруды Белгородского железорудного района не влияет на качество брэксов из нее, что позволяет рассматривать эту руду как перспективное сырье для производства рудококсовых или рудоугольных брэксов.

7. Сделаны вывод и рекомендация о необходимости включения в состав шихты брэксов из техногенного сырья с невысоким содержанием железа природного или техногенного компонента с повышенным содержанием железа.

8. Промышленные брэксы из колошниковой пыли, конвертерного шлама и железорудной мелочи на цементно-бентонитовом связующем имеют достаточно высокую и равномерно распределенную пористость.

9. Установлено наличие локального максимума прочности промышленного брэкса из колошниковой пыли, конвертерного шлама и железорудной мелочи на цементно-бентонитовом связующем спустя 48 часов вылеживания в естественных условиях. При этом в течение первых четырех суток вылеживания брэксы демонстрируют вязко-пластичный характер разрушения.

10. Обеспечение горячей прочности промышленных брэксов из колошниковой пыли, конвертерного шлама и железорудной мелочи на цементно-бентонитовом связующем достигается за счет образования еще при их восстановлении газом поверхностной металлической оболочки-каркаса и за счет образования железосиликатной матрицы, из которой при температурах выше 1100 ^{o}C железо восстанавливается углеродом колошниковой пыли.

11. Многолетняя эффективная работа малой доменной печи на шихте из 100 % брэксов, изготавливаемых из смеси металлургических отходов и железорудной мелочи, на дутье с температурой 1000 ^{o}C и с расходом мелкофракционного (15–25 мм) кокса не более 500 кг/т позволяет заключить, что брэксы являются новым компонентом доменной шихты, который может быть частичной или полной альтернативой агломерату.

12. Результаты математического моделирования доменной плавки с использованием брэксов из железорудного концентрата и угля показали высокую эффективность частичной (на 50 %) замены производства агломерата производством брэксов с сокращением расхода кокса на 10 % и снижением на 50 % газообразных и пылевых выбросов при производстве агломерата.

5 Анализ промышленного применения и опытно-промышленных испытаний брэксов в процессах производства ферросплавов и железа прямого получения

5.1 Анализ результатов выплавки ферросиликомарганца в промышленной руднотермической печи с использованием в шихте брэксов

Первый успешно реализованный проект с использованием технологии ЖВЭ в ферросплавной промышленности относится к производству брэксов и их применению в шихте для выплавки ферроникеля на предприятии BHP Billiton в Cerro-Matoso (Монтелибано, Колумбия [94]. Первоначально на этом предприятии, работающем с 1992 г., для окускования мелочи латеритной никелевой руды и пыли газоочистки электропечей применяли окомкование и валковое брикетирование. В 1996 г. после проведения ряда сопоставительных испытаний различных способов окускования и переработки этих материалов (окомкование, агломерация, плазменные печи и ЖВЭ) был сделан окончательный выбор в пользу технологии ЖВЭ, которая позволила получать окускованный продукт требуемого размера и формы с холодной и горячей прочностью достаточной для сохранения целостности брэксов при их обработке в трубчатых печах и при плавке в электропечах. При этом достигалась высокая производительность при минимальной себестоимости получаемого продукта. На предприятии были установлены три экструдера Steele-90 для получения 700 тыс. т брэксов в год из мелкой пылеватой латеритной никелевой руды и последующей их металлизации во вращающихся трубчатых печах, а затем использования в качестве компонентов шихты для выплавки ферроникеля в электропечах. Характерной особенностью окускования латеритной никелевой руды по технологии ЖВЭ является возможность получения прочных брэксов без применения связующего. По результатам промышленной эксплуатации экструзионных линий в 2004–2010 гг. полная себестоимость изготовления 1 т брэксов не превысила 2,1 долл. США. Основное оборудование линий экструзии работает уже 20 лет без замены. Производство никеля в ферроникеле предприятием BHP Billiton в Cerro-Matoso составляет 50000 т в год, из которых 10000 т привнесено брэксами. Содержание никеля в товарной продукции составляет 35 % [95]. Успешные результаты этого промышленного использования технологии ЖВЭ привлекли внимание и другой крупнейшей горнорудной компании мира – VALE. На ее предприятии в Онка-Пума (Бразилия) также установлены три экструзионные линии для окускования мелких фракций латеритных никелевых руд. Годовое производство брэксов – 700 тыс. т.

Для окускования марганцевых и хромовых руд и ЖВЭ ранее не применялась. Первая попытка ее использования для таких целей имела место по инициативе автора настоящей работы в 2010 году. Было решено провести полномасштабные опытно-промышленные

испытания этой технологии с использованием брэксов в шихте промышленной руднотермической печи. Целесообразность проведения опытно-промышленной кампании была обусловлена необходимостью выбора оптимального способа использования мелкой фракции марганцевых руд и рециклинга образующихся в процессе производства марганецсодержащих пылей сухих газоочисток. Использование мелкодисперсного сырья в руднотермических печах нарушает нормальный ход процесса, приводит к повышенному выносу пыли, к снижению производительности и степени извлечения металла, к повышенной аварийности, к росту числа горячих простоев и, в итоге, к ухудшению технико-экономических показателей работы печи в целом.

5.1.1 Лабораторные исследования свойств брэксов для выплавки силикомарганца

В качестве сырьевых материалов для производства брэксов были использованы Чиатурский окисный марганцеворудный концентрат и пыль системы аспирации производства силикомарганца. Химический состав окисного марганцеворудного концентрата и пыли систем аспирации производства силикомарганца, уловленной рукавным фильтром, приведены в таблице 5.1. Основные минералы окисного концентрата – пиролюзит, псиломелан, манганит. Пиролюзит в Чиатурской марганцевой руде имеет мелкосферолитовове (оолитовое) и обломочное брекчевидное строение. Размеры обломков сферолитов не превышают 0,25 мм. Местами пиролюзит перекристаллизован с укрупнением зерен до сотых долей миллиметра. Температура начала размягчения Чиатурского оксидного концентрата по данным [96] – 1049 °С. На 85 % пыль аспирации состоит из частиц размером менее 10 мкм. Первичные частички имеют сферическую форму вследствие фазовых переходов при их образовании.

Таблица 5.1 – Химический состав марганцеворудного концентрата и пыли аспирации

Материал	Mn	MnO	Fe_2O_3	FeO	Al_2O_3	SiO_2	CaO	MgO	P
Концентрат	35,0-45,0	-	1,2-2,2	-	2,0-3,5	14,0-25,0	2,0-3,5	0,86	0,20
Пыль аспирации	-	29,74-31,41	-	0,30	0,01	30,0-34,0	1,67-2,42	1,50	-

Для брикетирования по технологии ЖВЭ были предоставлены два вида заранее подготовленных смесей указанных выше материалов: 1 – смесь из равного массового количества (50 : 50) концентрата и пыли и 2 – 70 % концентрата и 30 % пыли. Гранулометрический состав смеси второго типа приведен на рисунке 5.1.

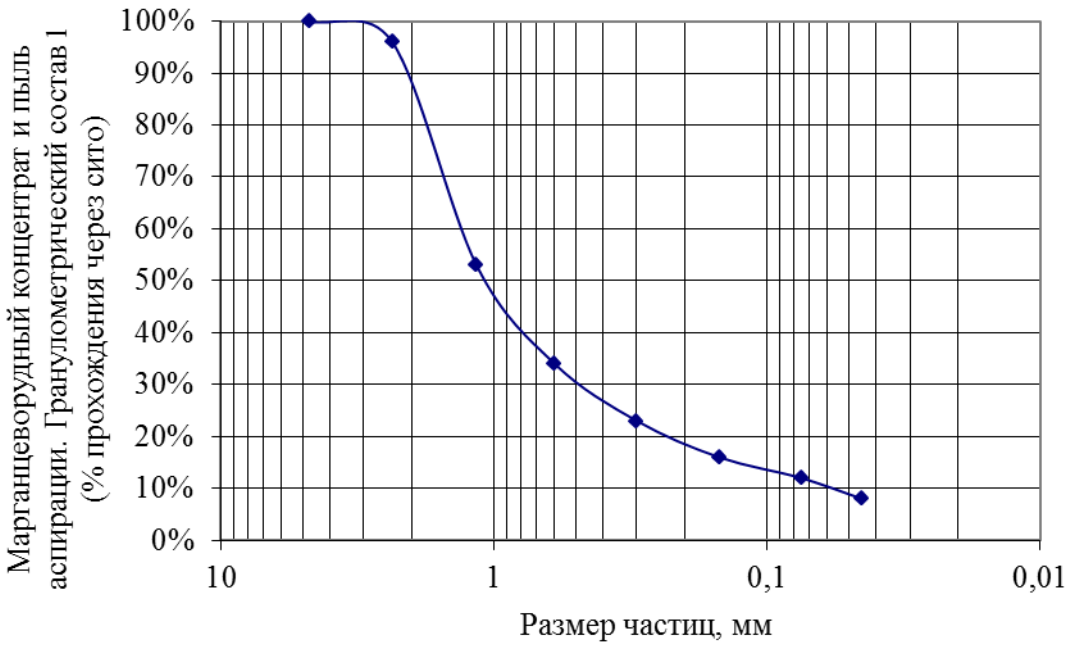


Рисунок 5.1 – Гранулометрический состав смеси для производства брэксов

В качестве восстановителя использовалась коксовая мелочь, предоставленная компанией-владельцем ферросплавного предприятия. Содержание углерода в коксовой мелочи 68,72 %; летучих – 7,53 %; золы – 23,75 %; 88,46 % частиц коксовой мелочи имеют размер менее 0,635 мм. Влажность – 9,86 %. Для испытаний использованы 3 состава брэксов с низким содержанием связующего (таблица 5.2).

Таблица 5.2 – Компонентный состав брэксов

Компоненты	№ 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

Опытные партии брэксов были изготовлены на лабораторном экструдерном комплексе, полностью моделирующем промышленную технологию ЖВЭ. Брэксы имели круглое сечение диаметром в 2,5 мм и длину в диапазоне 1,5–2,0 диаметра. Средняя влажность свежеотформованных брэксов составила 11 %. Вакуум в рабочей камере экструдера поддерживался на уровне 38 – 48 мм рт.ст. При испытаниях образцов брэксов (диаметр 25 мм,

длина 20 мм) для всех испытанных составов брэксов после их 3-х суточного вылеживания достигнута высокая механическая прочность (таблица 5.3).

Таблица 5.3 – Механическая прочность брэксов, **(**кгс/см^2)

Брэкс №	Прочность на раскол	Прочность на сжатие
1	18,3	160,8
2	28,6	291,2
3	13,1	124,6

Впоследствии образцы промышленно изготовленных брэксов состава №2 были испытаны на прочность на сжатие в независимой лаборатории «L.ROBERT KIMBALL & ASSOCIATES, INC.» в США. Прочность на сжатие образца диаметром 32,3 мм и длиной 57,7 мм составила 206 кгс/см^2. Полученные величины прочности брэксов на сжатие существенно превосходят требуемое значение их прочности для применения в руднотермических печах. В связи с этим при изготовлении партии брэксов для опытно-промышленных испытаний содержание связующего было уменьшено до 3 %.

Пористость брэкса была исследована методами электронной микроскопии с применением микроскопа LEO 1450 VP (Carl Zeiss, Германия) с разрешением 3,5 нм в сочетании с методами рентгеновской компьютерной томографии с применением томографа Phoenix V|tome|X S 240 (General Electric, США). Методом компьютерной томографии определялась пористость образца в диапазоне размеров пор выше 100 мкм. Метод электронной микроскопии применялся для оценки доли пор размерами менее 100 мкм. Данные микроскопических исследований интерпретировали с использованием компьютерной программы STIMAN [52]. Было установлено, что при суммарной пористости брэксов 18,5 %, доля пор крупностью более 100 мкм составила 30,27 %, а доля более мелких пор – 69,73 %. Впоследствии пористость промышленно изготовленных брэксов с таким же содержанием основных компонентов (с 3 % портландцемента) была измерена в независимой лаборатории «L.ROBERT KIMBALL & ASSOCIATES, INC.» (США) и составила 18,7 %.

Термические исследования с использованием порошковых проб массой 50 – 70 мг., проведенные на установке STA 449 C (Германия) в атмосфере аргона, в диапазоне температур 20–1400 °C при скорости нагрева 20 °/мин, позволили определить характер фазовых превращений в брэксах при их нагреве и показали, что тепловые эффекты на ДСК кривой для брэксов №1 и №2 почти идентичны (Рисунок 5.2).

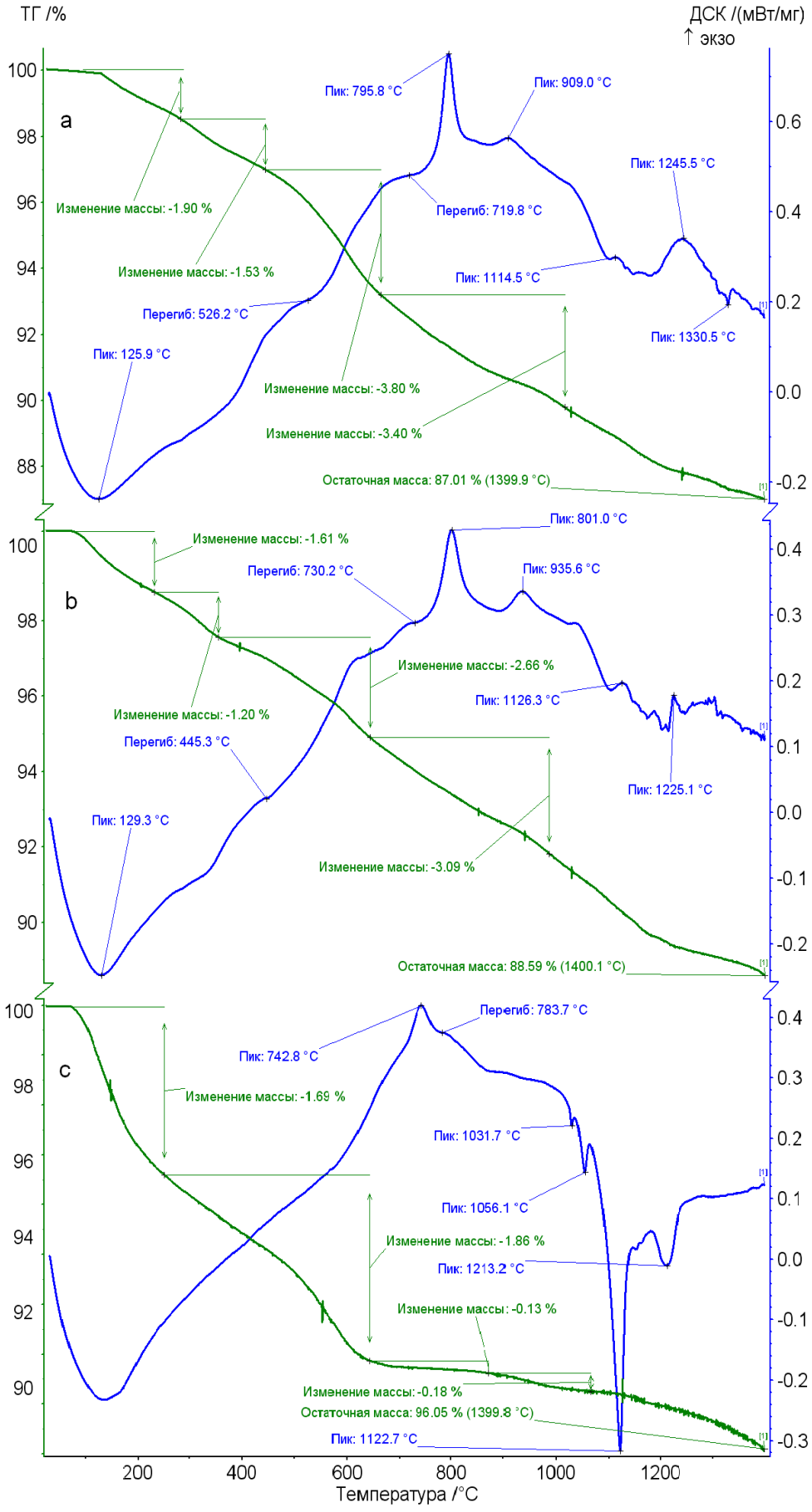


Рисунок 5.2 – Термограммы брэксов №1 – (a), №2 – (b) и №3 – (c)

В интервале температур 300–450 ^{o}C происходит дегидратация манганита (MnO(OH)) с образованием пиролюзита или β-курнакита ($2MnOOH = Mn_2O_3 + H_2O$). При температуре выше 400 ^{o}C псиломелан марганцевой руды, переходит в голландит или гаусманит. Экзотермические пики с максимумом при 795,8 °C в брэксе № 1 и 801,0 °C в брэксе № 2 вероятнее всего связаны с разложением пиролюзита и образованием β-курнакита с выделением кислорода и потерей массы. Такой же пик на дериватограмме брэкса №3 при температуре 742,8 ^{o}C не сопровождается потерей массы, что можно объяснить эффектами перекристаллизации, или раскристаллизации аморфных фаз. В диапазоне температур 900–1050 ^{o}C имеет место разложение β-курнакита с образованием β-гаусманита [50]. В диапазоне 1080–1250 ^{o}C β-гаусманит полиморфно превращается в γ-гаусманит.

В брэксе №3 эндотермический пик в диапазоне 150 – 200 °C сопровождается потерей массы из-за удаления сорбционной влаги. В диапазоне 300 – 500 °C выраженных эндотермических пиков не наблюдается, но происходит потеря массы, связанная с восстановлением MnO_2 до Mn_2O_3. В этом же диапазоне происходит фазовое превращение манганита (MnOOH) в курнакит (Mn_2O_3). Эндотермический эффект с максимумом при 1031,7 °C связан с восстановлением Mn_3O_4 до MnO, поскольку он сопровождается потерей массы, а эффект при 1056,1 °C – с фазовыми превращением в железосодержащей фазе. Для определения фазового состава железосодержащих компонентов исходного брэкса и продуктов его термической обработки, а также уточнения расшифровки полученной термограммы были проведены мессбауэровские исследования. На рисунке 5.3 приведены мессбауэровские спектры сырого брэкса и образцы после термического анализа при различных температурах, а в таблице 5.4 полученные результаты после обработки спектров по программе «Univem».

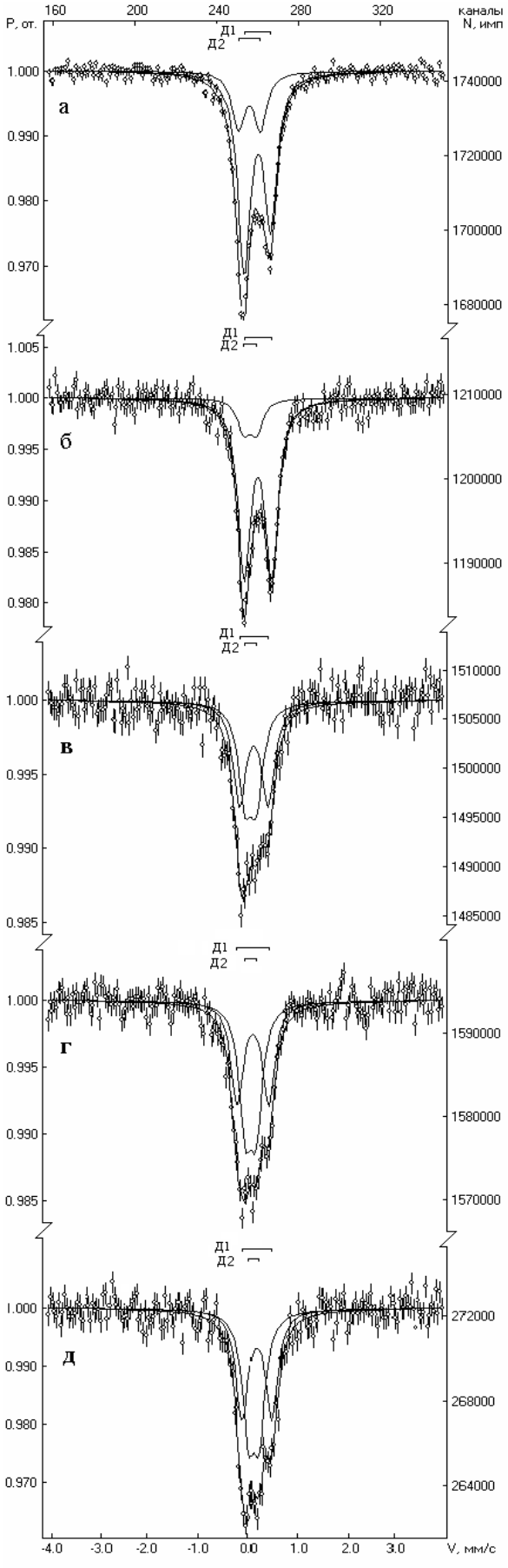


Рисунок 5.3 – Мессбауэровские спектры брэкса №3 сырого и после нагрева в условиях СТА до температур: а – сырой; б – 850 ^{o}C; в – 1065 ^{o}C; г – 1175 ^{o}C; д – 1250 ^{o}C

Таблица 5.4 – Мессбауэровские параметры брэкса №3 сырого и после термического анализа при различных температурах

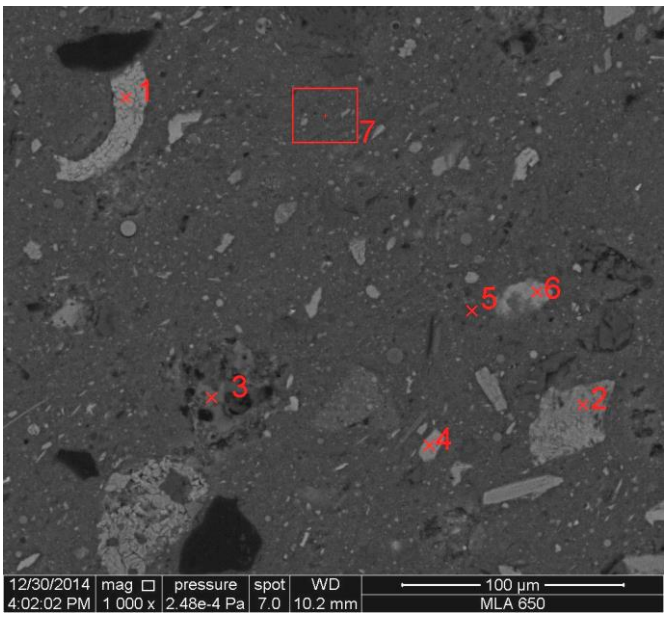
Образец	Компонента спектра	Изомерный сдвиг δ, мм/с	Квадрупольное расщепление Δ, мм/с	Площади компонент, S, %
Исходный	Д1	0,22	0,56	74,04
	Д2	0,07	0,30	25,96
850 °С	Д1	0,23	0,56	84,83
	Д2	0,07	0,27	15,17
1065 °С	Д1	0,17	0,59	52,98
	Д2	0,11	0,24	47,02
1175 °С	Д1	0,17	0,65	46,80
	Д2	0,13	0,22	53,20
1250 °С	Д1	0,19	0,61	48,83
	Д2	0,13	0,21	51,17

Мессбауэровский спектр образца исходного брэкса (рисунок 5.3 а) представляет собой суперпозицию двух дублетов, причем изомерный сдвиг дублетов меньше, чем у оксидов и гидроксидов железа. Эти дублеты можно отнести к интерметаллическому соединению железа с марганцем. Дублет Д2, согласно близкому значению изомерного сдвига к 0 и небольшому квадрупольному расщеплению, можно отнести к атомам железа, локализованным в кубической гранецентрированной решетке. Эти атомы не имеют в своем окружении атомов марганца, а дублет 1 тогда относится к ионам железа, в координационной сфере которых находятся атомы марганца, вследствие чего квадрупольное расщепление этого дублета существенно выше.

Мессбауэровский спектр образца исходного брэкса нагретого до 850 °С и охлажденного в условиях СТА (рисунок 5.3 б) существенно не отличается от исходного. Изомерный сдвиг и квадрупольное расщепление дублетов практически не изменились (таблица 5.4), изменилось только соотношение площадей дублетов, из чего следует, что в образце могло быть только небольшое изменение распределения атомов железа и марганца по позициям. Наблюдаемые термические эффекты на кривой ДСК, следовательно, связаны не с железосодержащей фазой, а с марганцевой. Изменения в спектрах произошли лишь после термических эффектов при 1031,7 и 1056,1 °С, что отражено на спектре после нагрева до температуры 1065 °С в условиях СТА. При этом уменьшилось квадрупольное расщепление дублета Д1 и его площадь, увеличились соответствующие параметры дублета Д2, что можно связать с фазовым превращением образца и изменением заселенности структурных позиций. После фазовых превращений при этих температурах, в спектрах существенных изменений не произошло. Следовательно, термические эффекты, наблюдаемые при температурах 1122,7 и 1213,2 °С, связаны с фазовыми превращениями марганцевой составляющей брэкса.

Эндотермический пик с максимумом при 1122,7 °С объясняется образованием карбида марганца Mn_3C, углерод которого восстанавливает марганец из MnO. Присутствие в брэксе коксовой мелочи обеспечивает интенсивное восстановление железа и марганца, что фиксируется эндотермическими пиками при 1122,7 и 1213,2 °С.

Структуру брэксов исследовали методами электронной микроскопии. На рисунке 5.4 приведено изображение структуры брэкса №2.



Цифры – точки снятия спектра (1– пиролюзит, 2 – гаусманит, 3 – диопсид, 4 – фаялит, 5 – муллит, 6 – пиролюзит, 7 – твердый раствор Ca_2SiO_4-Mn_2SiO_4)

Рисунок 5.4 – Изображение структуры брэкса №2 в обратно рассеянных электронах

Известно, что портландцемент утрачивает свои вяжущие свойства при 750 – 900 °С. Поэтому важно понять что обеспечивает горячую прочность брэксов в диапазоне температур выше этих значений. В работе [97] было изучено поведение образца пиролюзита Чиатурского марганцевого концентрата при нагреве в восстановительной среде (гелий – 40 % и водород – 60 %, темп нагрева 20 °С в минуту). Наблюдалось постепенное термическое расширение кубического образца размерами 5х5х5 мм на значительную величину до 0,8 мм, сопровождавшееся его растрескиванием. Первые трещины появились при 500 °С, причем количество трещин по мере нагрева возрастало. Образовавшаяся в ходе опытов трещиноватость, характеризуется определенной закономерностью ориентировки. В пределах сферолитов встречаются трещины радиальные и концентрические. Трещины случайного направления обнаруживаются в межсферолитовой цементирующей массе. Несмотря на такое

трещинообразование, образец сохранял целостность при нагреве до 800 °С, после чего началось его медленное и необратимое сжатие. Цементирующей массой, препятствовавшей разрушению образца, на наш взгляд, являлась плотная по структуре силикатная фаза (оливиновая или волластонитовая), образование которой в указанном диапазоне температур соответствует хорошо известным диаграммам состояния систем Ca_2SiO_4-Mn_2SiO_4 и Ca_2SiO_3-Mn_2SiO_3 (рисунок 5.5 и рисунок 5.6 [98]). В промежутках между зернами оксидных фаз образца Чиатурского концентрата была обнаружена стеклофаза и силикаты марганца (тефроит – Mn_2SiO_4 и родонит – $MnSiO_3$).

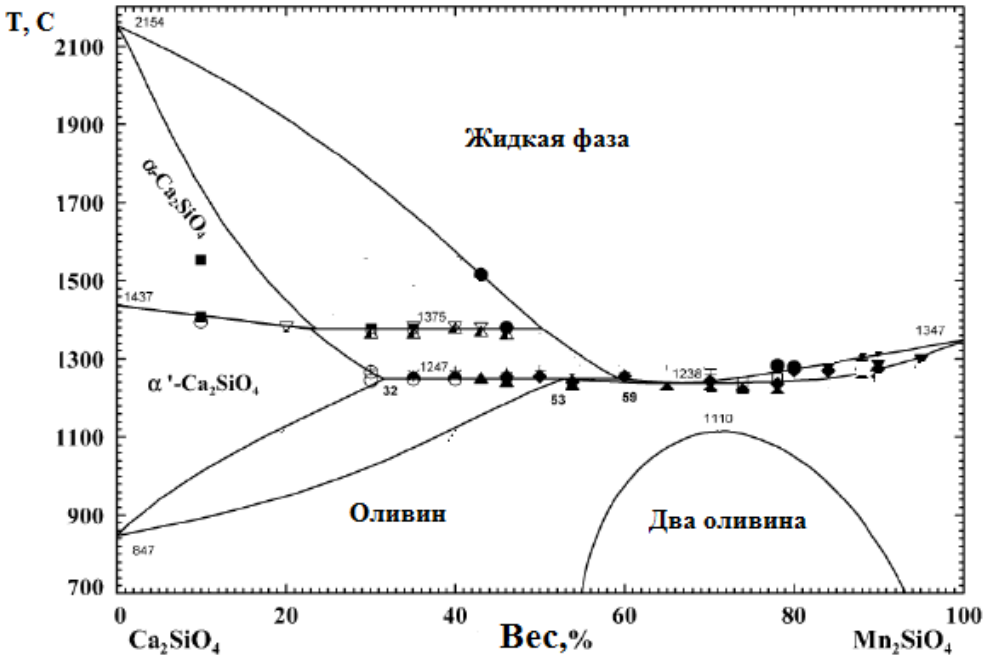


Рисунок 5.5 – Диаграмма системы Ca_2SiO_4-Mn_2SiO_4

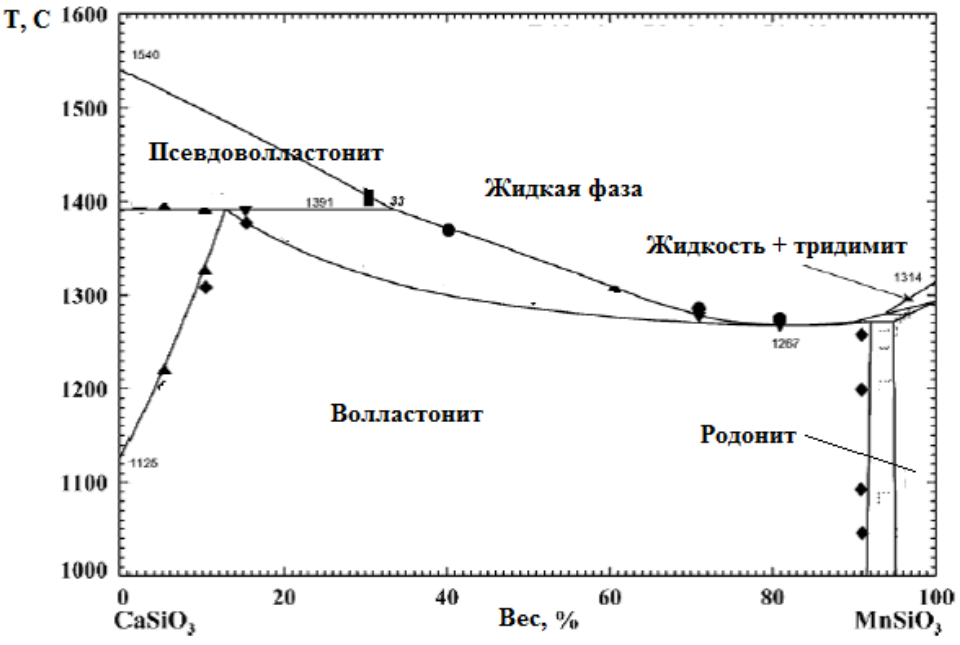


Рисунок 5.6 – Диаграмма системы Ca_2SiO_3-Mn_2SiO_3

До температуры 1250 °С прочность брэкса обеспечивается плотной структурой указанных выше силикатных фаз, а выше этой температуры в системе MnO-SiO_2 образуются две эвтектики: тефроит + родонит + жидкость (1251 °С) и тефроит + манганозит + жидкость (1315 °С), что и способствуют сохранению прочности брэкса (рисунок 5.7) [99], вследствие появления жидкой связки.

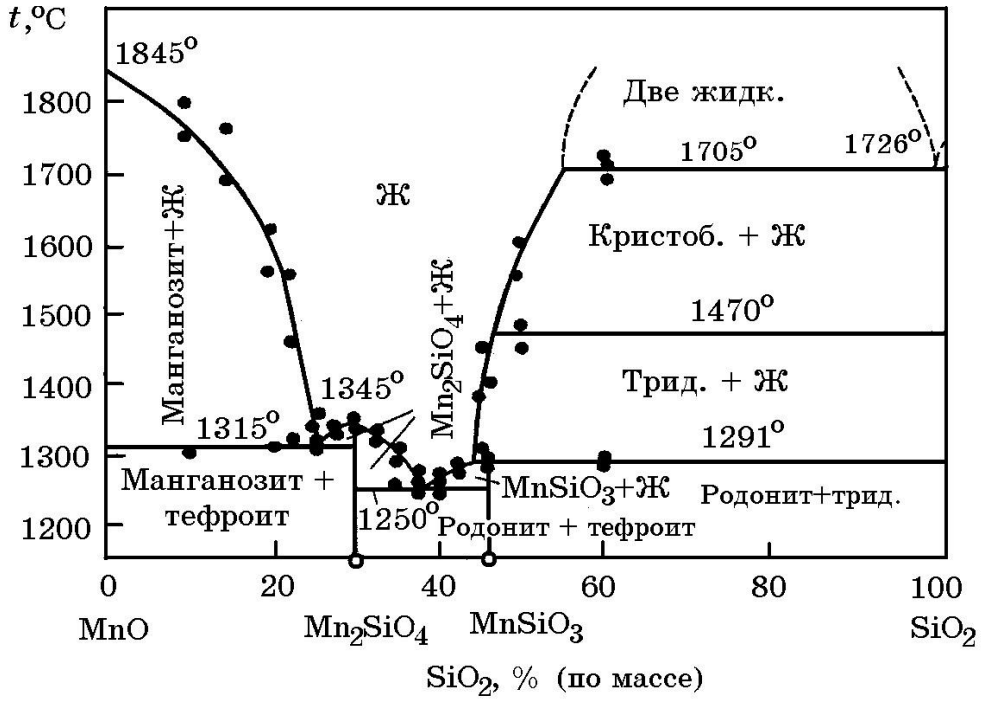


Рисунок 5.7 – Диаграмма состояния системы MnO-SiO_2

На основании приведенных выше результатов исследования физико-механических свойств брэксов, их поведения при нагреве и измерений удельного электрического сопротивления было решено выбрать брэкс №2 в качестве компонента шихты промышленной руднотермической печи.

5.1.2 Опытно-промышленная кампания по выплавке силикомарганца с брэксами в рудной части шихты

Для опытно-промышленных испытаний на промышленной установке брикетирования по технологии ЖВЭ на базе экструдера Steele 75 была изготовлена опытная партия брэксов (2000 т) из 1400 т окисного Чиатурского марганцевого концентрата и 600 т пыли аспирации

производства силикомарганца. Компоненты шихты смешивались на рудном дворе фронтальным погрузчиком и подавались на экструзионную линию.

При изготовлении этой партии было решено, как отмечалось ранее, ограничить долю связующего (портландцемента) в шихтовой смеси величиной 3 %, что оказалось достаточным для обеспечения прочности брэксов, которые выдержали 20 перегрузок на пути от фабрики брикетирования до ферросплавного завода: экструдер – конвейеры – самосвал – штабели – фронтальный погрузчик – грузовик – штабель в порту погрузки – фронтальный погрузчик – бункер – грейфер – баржа – грейфер в порту выгрузки – бункер – конвейеры – самосвал – штабель на рудном дворе ферросплавного завода – фронтальный погрузчик – бункер – печь. Совокупное образование мелочи (менее 6 мм) при этом не превысило 10 %.

Для проведения опытной кампании была выбрана стабильно работавшая промышленная рудно-термическая печь мощностью 27 МВА. Производительность печи – 85 т/сут. Удельный расход электроэнергии составлял в среднем 4200 кВт·ч/т. Степень восстановления марганца 80 %. Содержание марганца в отвальном шлаке 12–14 %.

Химический состав марганцевых компонентов шихты приведен в таблице 5.5.

Таблица 5.5 – Химический состав шихтовых компонентов

Наименование материалов	Содержание элементов, % масс.						
	Mn	SiO_2	CaO	MgO	Al_2O_3	Fe	P
Руда 1	49,5	13,0	0,7	0,5	1,0	4,0	0,05
Руда 2	29,0	20,2	5,9	5,2	2,1	0,9	0,06
Брэксы	31,37	24,32	6,10	2,05	2,79	1,36	0,12
Скрапы	23,3-38,6	н.д	н.д	н.д	н.д	н.д	н.д
Брикеты из отсевов ферросиликомарганца	53	18	4	н.д	н.д	10,5	0,15

Скрап представлен отходами собственного производства, образующимися при скачивании шлака с поверхности металла в ковше, а также от зачистки ковшей и лётки печи, переборки шлака на отвалах и при разливке ферросиликомарганца. Брикеты из отсевов ферросиликомарганца (некондиционная мелочь фракции 0–6 мм) производятся по технологии вибропрессования с использованием 10 % портландцемента в качестве связующего.

Был проведен предварительный расчет состава шихты для достижения стабильного содержания марганца в рудной части шихты (таблица 5.6).

Таблица 5.6 – Состав шихты (чистая тонна)

Компонент шихты	Периоды кампании						
	Базовый	1	2	3	4	5	6
Руда 1	0,526 (30 %)	0,525 (30 %)	0,525 (30 %)	0,525 (30 %)	0,525 (30 %)	0,525 (30 %)	0,525 (30 %)
Руда 2	1,205 (70 %)	1,120 (65 %)	1,030 (60 %)	0,855 (50 %)	0,705 (41 %)	0,600 (35 %)	0,525 (30 %)
Брэксы	-	0,087 **(5 %)**	0,175 **(10 %)**	0,350 **(20 %)**	0,500 **(29 %)**	0,605 **(35 %)**	0,690 **(40 %)**
Расчетный вес калоши	1,730	1,732	1,730	1,730	1,730	1,730	1,740
Задано марганца с:							
Руда 1	0,262 (43 %)	0,262 (42,6%)	0,262 (42,6 %)	0,262 (42,4 %)	0,262 (42,2 %)	0,262 (42,1 %)	0,262 (41,8%)
Руда 2	0,350 (57 %)	0,325 (53 %)	0,299 (48,6%)	0,224 (40,1 %)	0,205 (32,8%)	0,174 (27,9%)	0,152 (24,2%)
Брэкс	-	0,027 (4,4 %)	0,054 (8,8 %)	0,109 (17,5%)	0,160 (25 %)	0,188 (30 %)	0,214 (34 %)
Вес марганца калоши	0,612	0,614	0,614	0,619	0,622	0,624	0,628
Средний марганец, %	35,4	35,5	35,6	35,8	36,0	36,1	36,1

Для корректного сопоставления результатов работы печи без использования брэксов и с ними был выбран период работы печи продолжительностью около месяца. В качестве базового был выбран недельный период работы печи без брэксов, непосредственно предшествовавший началу кампании.

Было решено начать с 5 % брэксов в рудной части шихты для получения первого опыта работы на такой шихте. В течение трех дней работы видимых изменений в технологическом процессе выплавки ферросиликомарганца не наблюдалось, печь работала ровно, с постоянной и равномерной токовой нагрузкой в течение всего периода использования брэксов. Незначительное снижение извлечения марганца (на 0,3 %) в этот период было вызвано простоем печи, связанным с ремонтом леточного узла (простой в течение 1,5 ч).

Затем в течение четырех дней доля брэксов в рудной части шихты поддерживалась на уровне 10 %. Визуально отмечалось улучшение работы колошника печи. Появились языки пламени по всей площади колошника, что свидетельствовало об улучшении газопроницаемости столба шихтовых материалов и равномерном распределении температуры по поверхности колошника. Наблюдалась глубокая посадка электродов, без образования свищей в распаде электродов и вокруг них. Спекания шихты в распаде электродов не наблюдалось.

Далее в течение трех последующих дней доля брэксов в рудной части шихты была увеличена до 20 %. Печь работала ровно, посадка электродов была глубокой, токовая нагрузка без видимых отклонений и толчков, газопроницаемость шихты хорошая по всей площади колошника.

В течение всей следующей недели доля брэксов в рудной части шихты была увеличена до 29 %. Печь работала хорошо. Отмечалось увеличение скорости схода шихты в области

распада электродов, особенно во время выпусков расплава, что свидетельствовало об увеличении скорости плавления шихты в активной зоне печи. Колошник работал ровно, без свищей, токовая нагрузка постоянная, ровная, без толчков и перепадов. Расплав выходил хорошо, металл и шлак были достаточно прогреты. Однако в этот же период имел место простой печи в течение 4 ч вследствие причин, не связанных с наличием брэксов в шихте (проблемы с трансформатором).

Начало следующего этапа кампании, когда доля брэксов возросла до 35 % (взамен Руды 2), было отмечено проблемой, связанной с отсутствием перепуска леточного электрода, что привело к его укорочению и ухудшению выхода расплава. Основная масса шлака оставалась в печи. Это повлекло за собой увеличение расхода кокса и вывод из состава шихты скрапа и брикетов из отсевов ферросиликомарганца. В этот период наблюдалось ухудшение технико-экономических показателей работы печи, а именно: рост удельного расхода электроэнергии и удельного расхода марганцеворудного сырья, а также снижение извлечения марганца. Для введения печи в нормальный режим была повышена мощность печи для разогрева в печи шлака и его нормального выпуска.

В заключительный период кампании (неделя) печь работала с долей брэксов в рудной части шихты, составлявшей 40 %. Работа печи характеризовалась хорошей токовой нагрузкой, газовыделение на колошнике было ровным, без свищей и обвалов шихты, расплав выходил хорошо.

По мере повышения доли брэксов в рудной части шихты пропорционально уменьшали долю Руды 2, что является равноценной заменой по количеству вносимого марганца, поскольку среднее содержание марганца в брэксах составляло 31 %, а в руде – 29 %. Для корректного сопоставления результатов в период работы печи с использованием брэксов (около месяца) в качестве базового использовали недельный период работы печи без брэксов, непосредственно предшествовавший началу опытной кампании (таблицы 5.7 и 5.8).

Таблица 5.7 – Параметры работы печи в базовый и в опытные периоды кампании

Показатель		Период кампании						
		базовый	1	2	3	4	5	6
Фактическое производство металла за период времени, т	т	816,323	298,4	277,1	196,6	570,6	397,2	757,2
	б.т	839,670	300,7	285,8	199,5	584,75	393,2	767,8
Фактическая работа печи, %		98,9	97,6	97,4	99,7	96,2	98,6	93,6
Расход электроэнергии, МВт		3339,27	1078,2	1085,4	734,7	2120,8	1536,3	2821,48
Удельный расход электроэнергии, кВт*ч/б.т		3977	3586	3798	3682	3627	3908	3675
Руда 2	т(29%Mn)/б.т	1,106	0,933	0,892	0,714	0,635	0,626	0,492
	т(48%Mn)/б.т	0,668	0,563	0,539	0,431	0,383	0,378	0,297

Руда 1	т(49,5%Mn)/б.т	0,565	0,505	0,482	0,509	0,480	0,524	0,484
	т(48%Mn)/б.т	0,582	0,520	0,497	0,525	0,495	0,540	0,499
Брэксы	т(31,37%Mn)/б.т	0	0,077	0,164	0,273	0,387	0,571	0,605
	т(48%Mn)/б.т	0	0,050	0,107	0,178	0,252	0,373	0,395
Общий расход марганцево-рудного сырья	т/б.т	1,671	1,515	1,538	1,496	1,502	1,721	1,581
	т(48%Mn)/б.т	1,250	1,133	1,143	1,134	1,130	1,291	1,191
Кокс, т/б.т		0,432	0,341	0,420	0,400	0,381	0,418	0,404
Кварцит, т/б.т		0,419	0,499	0,524	0,465	0,529	0,456	0,475
Брикеты из отсевов ферросиликомарганца, т/б.т		0,158	0,082	0,103	0,092	0,120	0,110	0,094
Скрапы (содержание Mn в скрапах, %), т/б.т		0,358 (23,3)	0,601 (29,9)	0,462 (33,0)	0,477 (35,3)	0,461 (32,0)	0,455 (25,8)	0,373 (38,6)
Электродная масса, т/б.т		0,034	0,032	0,030	0,035	0,028	0,033	0,028
Извлечение марганца из рудной части, %		80,1	79,8	80,7	80,7	83,6	79,1	79,9

Таблица 5.8 – Содержание основных элементов в базовый и в опытные периоды кампании

Период кампании	Содержание основных элементов, %масс.								
	в металле				в шлаке				
	Mn	Si	Fe	P	MnO	MgO	SiO_2	CaO	Al_2O_3
Базовый	66,64	17,71	14,06	0,127	10,50	7,38	44,28	21,43	15,29
1	66,33	16,30	14,25	0,128	12,70	7,14	45,33	20,31	13,46
2	66,90	17,69	14,18	0,098	12,89	6,52	44,78	18,67	13,80
3	66,77	16,45	14,21	0,12	11,30	6,77	44,57	19,86	15,07
4	68,02	16,02	14,01	0,14	11,79	6,39	45,11	19,42	15,13
5	65,98	15,22	14,30	0,16	15,08	5,73	46,20	26,11	15,71
6	66,08	17,07	14,25	0,18	10,8	5,17	45,30	19,83	15,35

Из приведенных результатов видно, что кампания опытно-промышленных плавок с использованием брэксов в шихте промышленной рудно-термической 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 (рисунок 5.8).

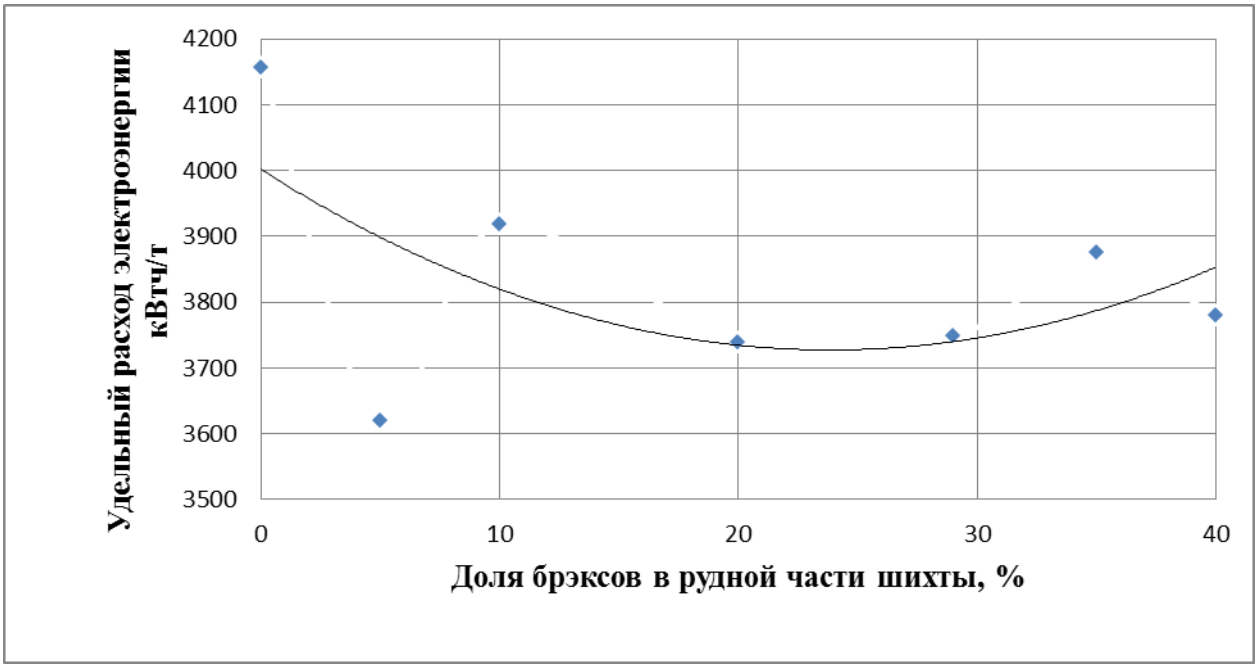


Рисунок 5.8 – Зависимость удельного расхода электроэнергии от доли брэксов в рудной части шихты

Следующим 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 % (рисунок 5.9).

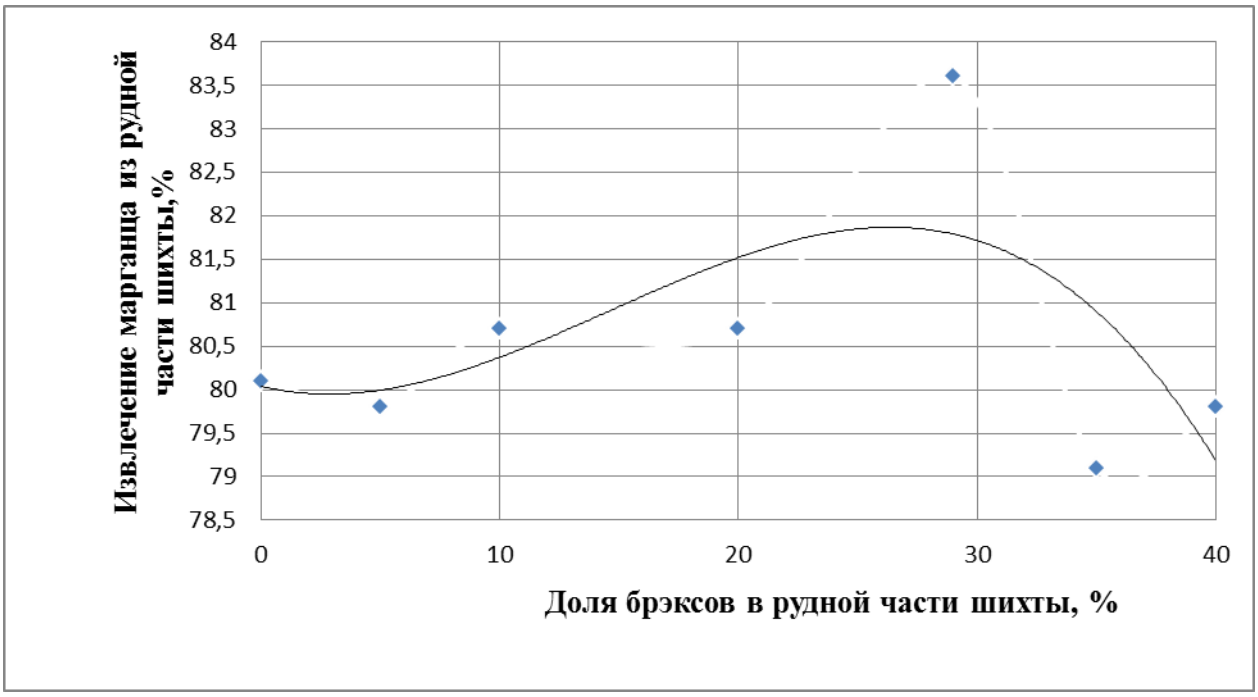


Рисунок 5.9 – Зависимость извлечения марганца от доли брэксов в рудной части шихты

Ухудшение параметров его извлечения в период, предшествовавший заключительному, не связано с наличием брэксов в шихте и явилось следствием простоя печи и проблем с электродом. Снижение расхода кокса иллюстрируется рисунком 5.10.

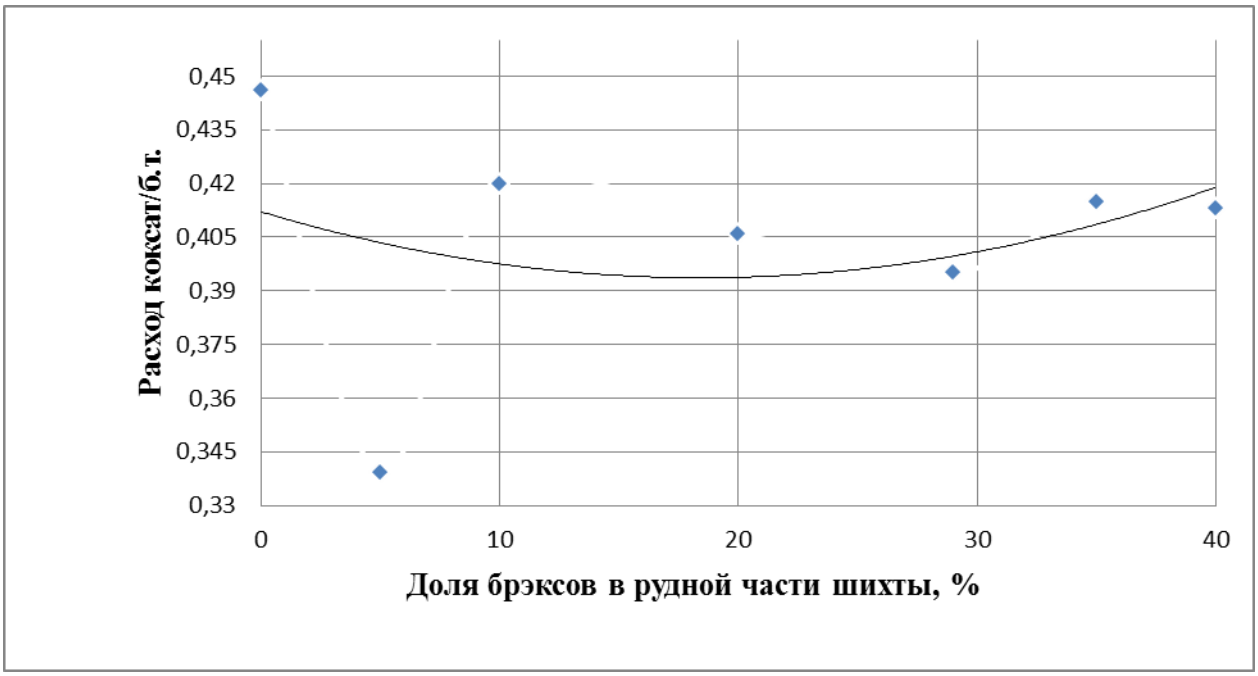


Рисунок 5.10 – Зависимость расхода кокса (приведенной к 1МВт введенной электроэнергии) от количества брэксов в рудной части шихты

5.2 Анализ результатов применения брэксов в шихте реактора прямого получения железа (процесс Midrex)

Технологическая схема мини-заводов, производящих прокатную продукцию, используя в качестве исходного сырья окисленные окатыши, включает производство металлизованных окатышей в реакторах прямого получения железа, производство горячебрикетированного железа (ГБЖ), выплавку стали в электропечах и ее непрерывную разливку и прокатное производство. На таких предприятиях, импортирующих ежегодно большие объемы железорудных окатышей для производства ГБЖ, во время разгрузки, складирования и последующей загрузки окатышей в реакторы металлизации, выгрузки металлизованных окатышей и их брикетирования ежегодно образуются десятки тысяч тонн мелкодисперсных железосодержащих отходов. Оксидную мелочь окатышей и шламы ГБЖ, как правило, захоранивают, а пыли ДСП и прокатную окалину продают. Предварительные оценки показывают, что вовлечение таких материалов во вторичный оборот в виде брикетов позволило бы дополнительно выплавлять дополнительные объемы стали и освободить значительные территории, занимаемые складируемыми отходами. Утилизация этих отходов позволила бы генерировать дополнительные доходы, превосходящие выручку от прямой продажи отходов.

Основными целями исследования являлись:

1. Разработать экономически целесообразную методику утилизации оксидных материалов и отходов производства ГБЖ и пыли аспирации ДСП для улучшения экологической ситуации на предприятии.

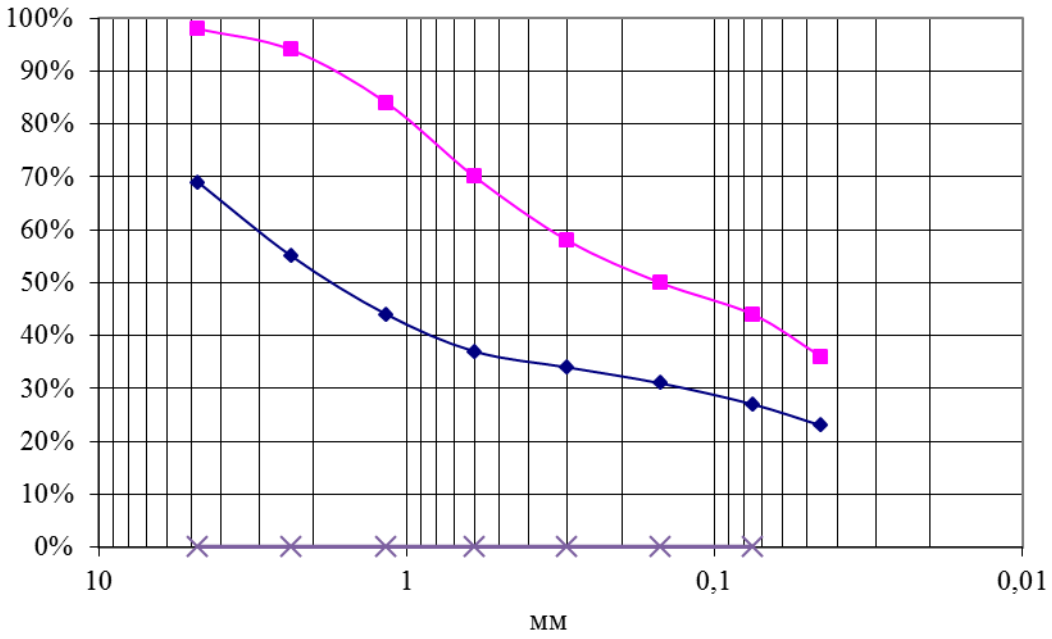
2. Выбрать эффективное связующее для брикетирования указанных материалов, способствующее достижению максимально высоких степеней металлизации брэксов в печах прямого получения железа.

Нами была изучена возможность применения жесткой вакуумной экструзии для получения окускованных продуктов, пригодных для использования в качестве шихтовых компонентов реакторов прямого получения железа. Исследовалось восстановление брэксов в условиях промышленного реактора процесса Midrex. Брэксы помещались вовнутрь деформируемых стальных пакетов, проницаемых для восстановительного газа, которые по окончании процесса могли быть извлечены из печи, что позволяло визуально определить состояние восстановленных брэксов и изучить их химический состав и свойства. Такой способ ввода брэксов в шихту реактора позволял адекватно моделировать их поведение в реальных условиях, включая механическое давление окружающей традиционной шихты и воздействие восстановительного газа. Внешний вид стальных пакетов приведен на рисунке 5.11.



Рисунок 5.11 – Стальные пакеты для ввода брэксов в шихту реактора прямого получения железа

Для испытаний была предоставлена подготовленная смесь, состоявшая из отсева окатышей (52,6 %), металлизированного шлама (26,4 %), окалины прокатного производства (15,8 %) и 5,2% пыли электросталеплавильного цеха (ЭСПЦ). Гранулометрический состав исходной смеси и после ее доизмельчения на лабораторной валковой дробилке приведен на рисунке 5.12.



Нижняя кривая – исходная смесь;
верхняя – после доизмельчения на валковой дробилке)

Рисунок 5.12 – Гранулометрический состав смеси материалов для брикетирования (в процентах прохождения через сита)

Рассев предоставленных дополнительно образцов отсева окатышей и окалины прокатного производства позволил определить крупность частиц этих материалов: 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 % мельче 0,15 мм. Химический состав компонентов смеси приведен в таблице. 5.9.

Таблица 5.9 – 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_2O_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_2O+K_2	0,034	–	0,33	1,42

Опытные брэксы были изготовлены в лаборатории компании J.C.Steele&Sons, Inc. Для смешивания шихты с водой использовали лабораторный смеситель Hobart, адекватно моделирующий обработку шихты в открытом объеме глиномялки с вакуумным затвором. Лабораторный экструдер, применявшийся для производства образцов брэксов, полностью воспроизводил процесс продавливания материала через решётки дегазатора в вакуумную камеру, а затем и саму экструзию. Были изготовлены три партии брэксов, отличавшихся только типом использованного связующего (таблицы 5.10 и 5.11), что повлияло на физико-механические свойства брэксов (таблица 5.12). Магнезиальное связующее было изготовлено на основе гептагидрата сульфата натрия ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$).

Таблица 5.10 – Компонентный состав брэксов

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	

Таблица 5.11 – Химический состав брэксов

Элементы и оксиды	02-01	02-02	02-03
Fe_t	62,47	61,3	62,61
C	1,49	1,40	1,05
CaO	9,24	8,41	4,30
MgO	3,61	3,07	6,24
SiO_2	2,45	4,91	2,76
Al_2O_3	1,29	1,81	0,99
TiO_2	0,104	0,12	0,119
V_2O_5	0,076	0,073	0,079
MnO	0,343	0,36	0,349
P_2O_5	0,074	0,087	0,062
S	0,075	0,0816	0,502
Na_2O+K_2O	0,193	0,926	0,831
Cl	0,035	0,028	0,019
ZnO	0,362	0,4	0,346

Таблица 5.12 – Физико-механические свойства брэксов

Свойства	02-01	02-02	02-03
Плотность, г/см^3	3,5	3,48	3,66
Прочность на сжатие, Н/мм^2	4,8	11,1	4,4
Прочность на растяжение при раскалывании, Н/мм^2	1,5	1,4	1,2
Пористость, %	29,7	24,7	25,1
Влажность, %	8,4	8,4	8,6

Одним из наиболее важных свойств брэкса, определяющих в существенной степени его восстановимость, является пористость. Изучение структуры пористости образцов было выполнено с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) LEO 1450 VP (Carl Zeiss, Германия) с гарантийным разрешением 3,5 нм в сочетании с количественным анализом РЭМ-изображений, полученных в режиме отраженных электронов с помощью программного обеспечения “STIMAN” [52-53], что позволяет, наряду с получением собственно величин пористости (в диапазоне величин радиусов пор от 0,002 до десятков мкм), определять микроструктуру образцов и морфологию пористости. Для исследования использовался свежий

скол поверхности образца. Для морфологических исследований микроструктуры использовался режим вторичных электронов, позволяющий получать высококачественные полутоновые изображения в широком диапазоне увеличений. Методика “STIMAN” позволяет получать корректные изображения с более четкими границами между порами и частицами. Система промышленной рентгеновской микротомографии Phoenix V|tome|X S 240, оснащенная двумя рентгеновским трубками: микрофокусной с максимальным ускоряющем напряжением 240kV/мощностью 320W и нанофокусной с максимальным ускоряющем напряжением 180kV/мощностью 15W, была использована для анализа распределения пор в диапазоне крупных и сверхкрупных (от 1 до 100 мкм и больше). Первичную обработку данных и создание объёмной модели образца на базе рентгеновских снимков (проекций) выполнили с помощью программного обеспечения «datos|x reconstruction», а визуализацию и анализ данных по элементам объёмного изображения – с помощью программного обеспечения «VG Studio MAX 2.1» и «Avizo Fire 7.1». Съёмку проводили при ускоряющем напряжение 100 кВ и токе 200 мА. Разрешение при съёмке – 5,5 мкм. Визуализация распределения пор в виде 3D модели для образцов 02-01 и 02-03 представлена на рисунке 5.13.

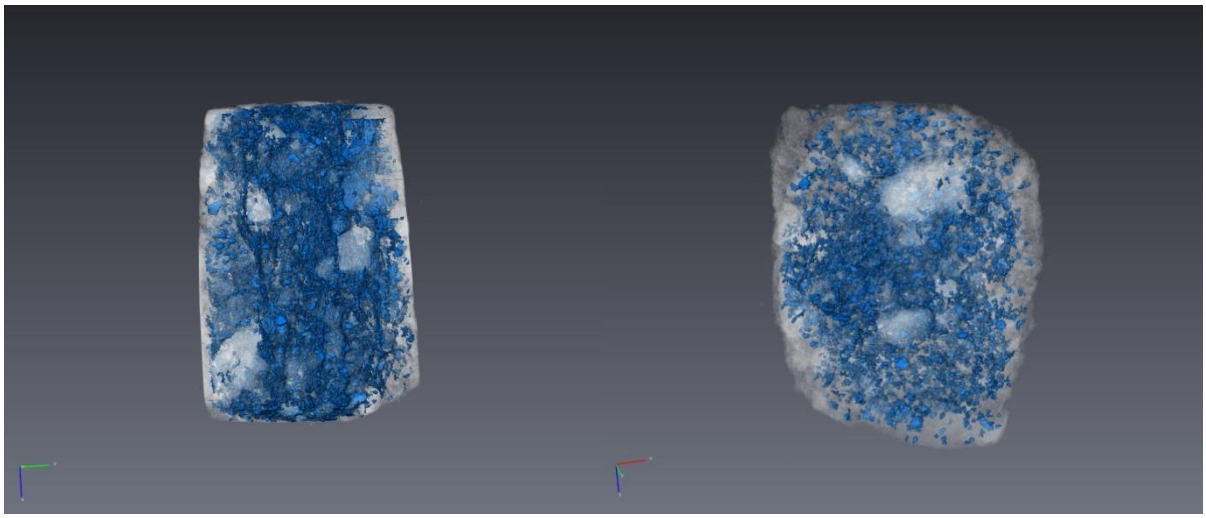


Рисунок 5.13 – 3D модель порового пространства брэкса
02-01(слева) и брэкса 02-03 (справа)

Разница в величинах пористости для этих образцов в указанном диапазоне размеров пор (1 – 100 мкм) между образцами превышает 50 %. В образце 02-01 преобладает открытая пористость (поры сообщаются), а в образце 02-03 – в основном закрытая пористость. Другими словами, проницаемость образцов брэксов сильно разнится. Такое различие в структуре пористости брэксов проявило себя и на самом этапе их изготовления. Образец 02-03 оказался

единственным, чье изготовление не сопровождалось частичным обезвоживанием экструдируемой смеси.

Для исследования поведения и восстановимости в условиях промышленного реактора Midrex, брэксы, помещенные в деформируемые газопроницаемые стальные пакеты (рисунок 5.13), загрузили в реактор вместе с окатышами. По окончании процесса пакеты были извлечены из реактора, что позволяло визуально определить состояние восстановленных брэксов (рисунок 5.14) и изучить их химический состав и свойства. Такой способ ввода брэксов в шихту реактора позволил адекватно промоделировать их поведение в реальных условиях процесса металлизации, включая механическое воздействие на брэксы движущего слоя окатышей, температуры и восстановительного газа.



Рисунок 5.14 – Сырые (вверху слева) и восстановленные брэксы
после извлечения из стальных пакетов

Видно, что наибольшую целостность продемонстрировали брэксы на магнезиальном связующем. Наибольшую степень образования мелочи продемонстрировали брэксы на цементном связующем. Брэксы на известковом связующем разрушались в заметно меньшей степени.

Величины механической прочности восстановленных брэксов определялись в тестах на растяжение при раскалывании и составили для брэксов 02-01 – 0,4 Н/мм^2 и 1,2 Н/мм^2 для брэксов 02-03. Видно, что прочность брэксов на магнезиальном связующем практически не изменилась по сравнению с ее исходной величиной (таблица 5.12). Таким образом, наименее прочные в «холодном» состоянии брэксы, проявили высокую горячую прочность. Соответственно и степень металлизации этих брэксов оказалась наибольшей из всех испытанных образцов. Снижение степени металлизации брэксов на известковом и цементном связующем связано с нарушением газопроницаемости пакетов вследствие закупоривания мелкими фракциями разрушившихся брэксов. Химический состав восстановленных брэксов и степень их металлизации представлена таблицей 5.13.

Таблица 5.13 – Химический состав и металлизация восстановленных брэксов

Элементы и оксиды	02-01	02-02	02-03
Fe_t	74,86	69,02	86,86
Fe_{met}	49,11	18,66	84
Металлизация,%	65,6	26,96	96,71
C	1,75	0,89	1,02
CaO	9,11	6,71	5,07
MgO	2,93	2,24	7,81
SiO_2	3,41	4,35	4,04
Al_2O_3	1,57	1,45	2,13
TiO_2	0,11	0,12	0,12
V_2O_5	0,072	0,075	0,07
MnO	0,34	0,43	0,39
P_2O_5	0,076	0,074	0,0134
S	0,0256	0,093	0,26
Na_2O+K_2O	0,48	0,51	0,74
Cl	0,018	0,013	-
ZnO	0,18	0,3	0,045

В реакторе прямого получения железа компании ArcelorMittal в Гамбурге были испытаны валковые брикеты следующего состава: 35 % – отсев окатышей, 41 % – металлизированные шламы, 12 % – отсев ГБЖ, 6 % – пыли аспирации, 6 % – связующее на основе извести и мелассы. Общее содержание железа в исходных брикетах составило 66 %, в восстановленных 82 %. Степень металлизации брикетов после извлечения из деформируемых стальных корзин – 94 % [16]. Брэксы на магнезиальном связующем показали более высокую степень металлизации при исходном более низком содержании общего железа (62,61 %) и меньшем содержании связующего (5 %).

Структура восстановленных образцов брэксов была изучена методами световой микроскопии с использованием аппаратура фирмы «Nikon» (поляризационный микроскоп ECLIPSE LV100- POL, оснащенный цифровой фотомикрографической системой DS-5M-L1). Анализ минеральных фаз в аншлифах-брикетах проводился в аналитической лаборатории НИТУ «МИСиС» на инструментальном автоматическом комплексе MLA 650 (FEI Company), включающем сканирующий электронный микроскоп FEI Quanta 650 SEM, оснащенный системой рентгеноспектрального микроанализа с двумя детекторами. Основные минеральные фазы определялись рентгеноструктурным анализом с помощью аналитического комплекса ARL 9900 Workstation IP3600 (комбинированная конструкция «рентгенофлуоресцентный спектрометр с верхним расположением трубки + θ-θ дифрактометр»).

Для испытаний использовались образцы брэксов на магнезиальном связующем и сохранившие целостность образцы брэксов на цементном и известковом связующем.

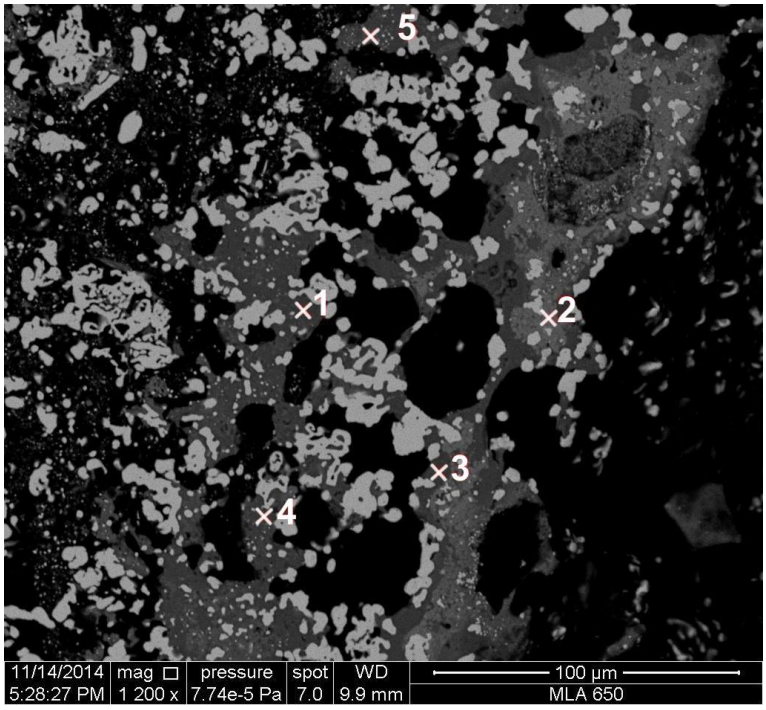
Оптически в составе брэксов отсев зональных окатышей низкой основности (CaO/SiO_2 = 0,3 – 0,5) представлен обломками разного минерального состава: ядрами в виде остатков магнетита со стеклофазой и оболочками, состоящими из сростков гематита с ферритами кальция. Окалина имеет состав магнетита – твердый раствор $(Fe,Mn)O \cdot Fe_2O_3$. Особую роль в составе брэксов играет пыль электропечей (пыль ЭСПЦ), в составе которой присутствуют главные расплавообразующие компоненты шихты: CaO, MgO, SiO2, MnO и Na_2O.

В восстановленных и сохранивших целостность брэксах на цементном связующем, до металла, частично восстановились железосодержащие минералы обломков окатышей и окалины. Заметим, что ранее нами были проведены испытания с подачей брэксов на цементном связующем в жестких корзинах, препятствовавших их механическому разрушению [100]. Внешний вид жестких корзин и брэксов на цементном связующем после извлечения из реактора приведен на рисунок 5.15. Металлизация таких брэксов после извлечения из реактора оказалась равной 94,21 %. В отсутствие внешнего механического воздействия поверхность брэксов на цементной связке растрескалась, что и привело к их разупрочнению. Известно, что брикеты из отсевов окатышей на цементной связке с содержанием цемента в диапазоне 4–8 % массы брикета, так же как и сами окатыши, демонстрируют при восстановлении аномальное разбухание [28].



Рисунок 5.15 – Жесткие стальные корзины для ввода брэксов в реактор (слева) и внешний вид брэксов на цементном связующем после извлечения из реактора

В преобладающей части брэксов на цементном связующем, извлеченных из деформируемых стальных пакетов, наблюдаются области состава, близкого к минеральным фазам бинарных метасиликатов $2Na_2O{\cdot}CaO{\cdot}3SiO_2$ (N_2CS_3) и $Na_2O{\cdot}2CaO{\cdot}3SiO_2$ (NC_2S_3) при отсутствии в них оксидов железа (рисунок 5.16).



1,3,4 – бинарные метасиликаты; 2 – кремнийсодержащий феррит кальция; 5 – двукальциевый силикат

Рисунок 5.16 – СЭМ-изображение восстановленного образца брэкса №02-02

N_2CS_3 плавится инконгруэнтно (начало плавления при 1141 ^oC (выше температур процесса в реакторе Midrex) с образованием 78,5 % расплава и 21,5 % NC_2S_3, конец расплава

при 1203 °С) [101]. NC_2S_3 плавится конгруэнтно с обширным полем первичной кристаллизации (рисунок 5.17).

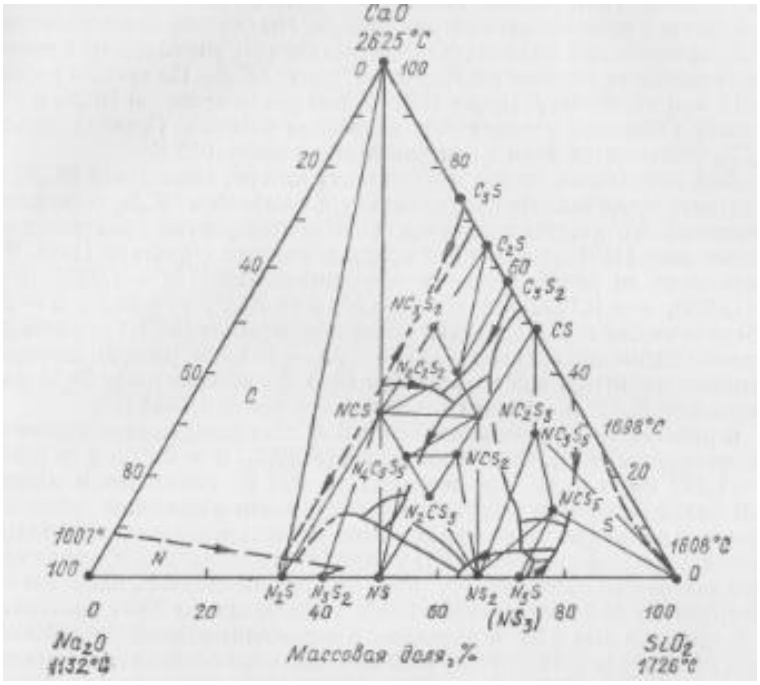


Рисунок 5.17 – Диаграмма состояния системы Na_2O-CaO-SiO_2 [101]

В диапазоне температур процесса Midrex диаграмме на рисунке 5.17 соответствуют только две эвтектики: 755 °С – N_3S_8 + NCS_5 +S (N_2O – 22 %; CaO – 3,8%; SiO_2 – 74,2 %); 827 °С – N_2CS_3 + NC_2S_3 + NS_2 (N_2O – 36,6 %; CaO – 1,8 %; SiO_2 – 60,7 %). В обнаруженных методом рентгено-спектрального микрозондирования фазах содержание CaO превышает 10 %, что говорит об отсутствии образования расплава в указанных областях. Обнаруженные фазы при температурах в диапазоне 870–950 °С могут находиться в пластичном состоянии с незначительным содержанием жидкой фазы, что иллюстрируется рисунком 5.18.

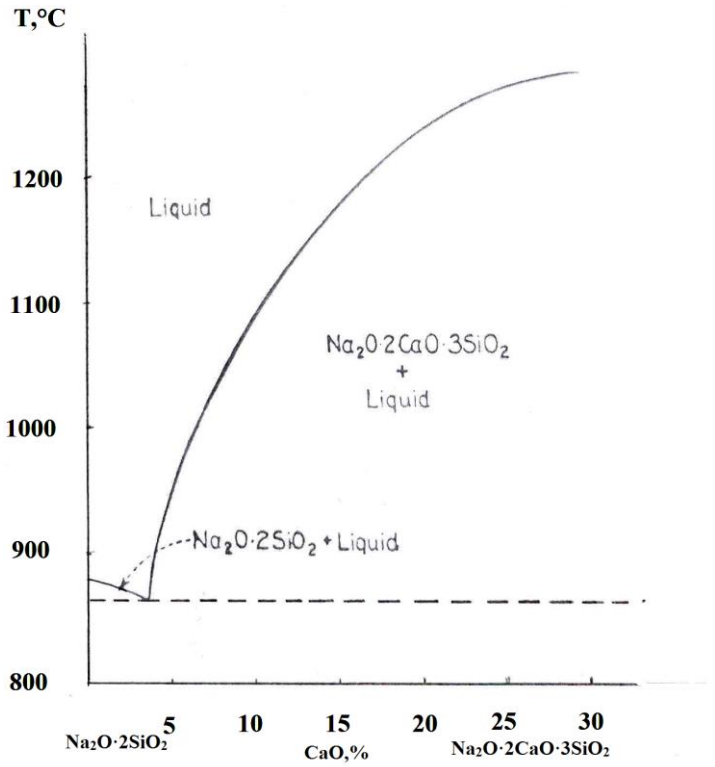


Рисунок 5.18 – Система $Na_2O{\cdot}2SiO_2$- $Na_2O{\cdot}2CaO{\cdot}3SiO_2$

В составе брэксов, упрочненных цементом, щелочно-силикатная фаза преимущественно ассоциируется с самыми мелкими, пылеватыми фракциями шихты, содержащими в своем составе щелочи. Отсутствует повсеместно развитая силикатная связка. При оптическом исследовании в отдельных образцах восстановленных брэксов фиксируются осколки кристаллов двукальциевого силиката (Ca_2SiO_4) – высокотемпературной фазы, входящей в состав цемента.

Брэксы с известью в качестве связующего имеют более высокую степень металлизации и более глубокое взаимодействие компонентов шихты. По результатам испытаний в жестких стальных корзинах степень их металлизации составляла 96,65 %. Для образцов брэксов, извлеченных из деформируемых стальных пактов, характерно непостоянство состава железосиликатной фазы в разных частях тела брэксов. Наиболее часто наблюдаются сочетания силикатной фазы с металлическим железом. Первичная железосиликатная фаза по своему составу близка к составу оливиновых фаз и отличается повышенной основностью (CaO/SiO_2 = 0,8 – 0,9), в ее составе в различных частях объема брэкса содержание Na_2O колеблется от 1,0 до 10 %, а содержание оксидов магния и марганца не превышает 1,0 – 2,0 масс %.

При существующих в реакторе Midrex условиях восстановления в теле брэкса на контакте обломков окатышей с расплавом образуются система металлических волосовин (рисунок 5.19).

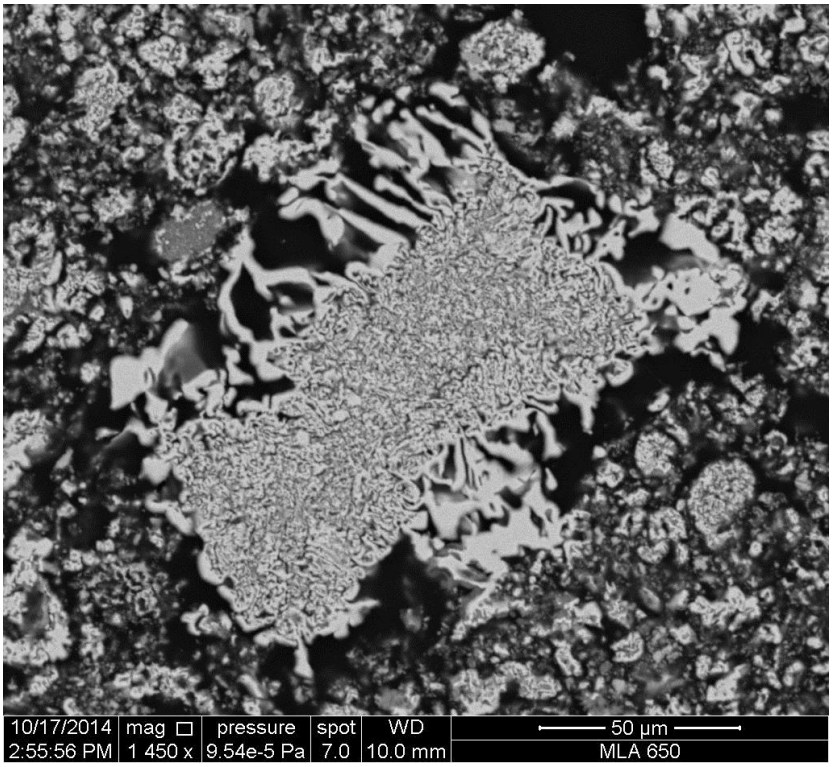


Рисунок 5.19 – Образование волосовин на контакте обломков окатышей и расплава

Реже в брэксах на известковом связующем встречаются минеральные образования с высоким содержанием оксида кальция (в разных участках до 40 масс %), содержание оксида кремния 25–26 масс % и столько же двухвалентного железа. В составе аморфных высококальциевых железокальциевых новообразований практически не обнаружены другие оксиды. Состав новообразований может быть близок к мелилитовой фазе ($Ca_2FeSi_2O_7$).

Особый интерес представляет преобладающая в брэксах мелкая фракция шихты. Она состоит из комбинации металлического железа с кальциевым ферритом. По-видимому, в мелкой осыпи окатышей, состоящей из комбинации гематита с ферритом кальция, в процессе восстановления первым восстановился гематит, не нарушив контакта с ферритом.

Брэксы с магнезиальным связующим имели самую высокую степень металлизации. Впервые в настоящем исследовании обнаружено, что в процессе металлизации не сохраняется микроструктура исходного брэкса. Брэкс близок к состоянию двухфазной системы: металл и силикатная фаза. Однако состав силикатной части остается непостоянным в близких объемах прореагировавшей мелкой фракции. По данным рентгеноспектрального микрозондирования, среди изученных фаз преобладают два минеральных вида, близких к оливиновой и мелилитовым составам (рисунок 5.20), но каждый из них различается по содержанию оксидов железа, магния и марганца.

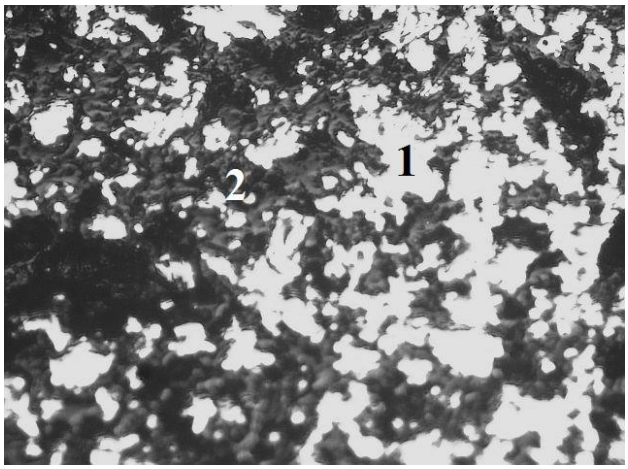


Рисунок 5.20 – Световая микроскопия восстановленного брэкса 02-03
(1– железо, 2 – мелилит; увеличение 200)

Таким образом, видно, что механизм упрочнения исследованных образцов брэксов в каждом случае имеет свою специфику. Для брэксов на цементном связующем недостаточная прочность при нагреве в восстановительных условиях связана с их разбуханием и ограниченным образованием силикатной связки. Прочность брэксов на известковом связующем в процессе восстановления обеспечивается образованием в твердой фазе железокальциевых силикатов, близких по состава к оливиновой фазе с низкой температурой плавления. В брэксах на магнезиальном связующем наблюдается наиболее высокая степень образования, по окончании процесса металлизации, двухфазной системы «металл-силикатная фаза».

В процессе восстановления брэксов, помещенных в деформируемые стальные пакеты, по-разному изменялась и их пористость. С целью изучения характера такого изменения были сопоставлены величины пористости исходных и восстановленных брэксов. Микроструктуру образцов исследовали, используя свежий скол поверхности образца, с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) 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). Результаты морфологических исследований приведены в таблице 5.14.

Таблица 5.14 – Таблица морфологических параметров брэксов до и после металлизации

БРЭКС	Пористость РЭМ/РЭМ+КТ	Вклад пор разных размерных категорий в общую пористость ($n_{из}$), %. Диаметры в микронах.					Максимальный диаметр, мкм
	n, %	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	Dmax
		<0,1	0,1-1,0	1,0-10	10-100	>100	
02-01	31,6	0,6	8,6	25,6	65,2	0,0	57,6
	37,3	0,5	7,2	21,4	66,8	4,1	407,2
02-01 восст.	32,9	0,2	9,0	38,4	52,4	0,0	70,94
	38,3	0,1	7,7	32,4	49,8	10,0	504,49
02-02	31,2	0,6	8,0	30,1	61,3	0,0	45,78
	35,7	0,5	7,0	26,2	61,3	5,0	299,96
02-02 восст.	37,9	0,2	9,3	31,1	59,1	0,3	100,51
	40,4	0,2	8,9	29,5	55,2	6,2	583,77
02-03	31,8	0,6	5,8	28,4	65,2	0,0	62,92
	32,9	0,5	5,5	27,2	65,3	1,5	191,89
02-03 восст.	32,8	0,2	3,2	35,7	60,9	0,0	71,75
	39,3	0,2	2,6	28,9	58,0	10,3	736,41

где $n_{из}$ – общая пористость, рассчитанная по РЭМ изображению

D_1, D_2,D_3, D_4, D_5 – различные размерные категории пор

D_{max} – максимальный эквивалентный диаметр пор

В процессе металлизации суммарная пористость брэксов на магнезиальном связующем увеличилась на 19,5 %, брэксов на цементном связующем на 13,15 %, а брэксов на известковом связующем только на 2,6 %. Причем пористость возросла за счет крупных и сверхкрупных пор (более 100 мкм по классификации, принятой в порошковой металлургии [102]): для брэксов на магнезиальном связующем – в 6,9 раза, а для брэксов на известковом связующем – только в 2,43 раза. В брэксах на цементной связке рост доли крупных пор составил всего 1,24 раза. Максимальный диаметр пор в брэксах на магнезиальном связующем увеличился почти в 3 раза, а в брэксах на известковом связующем – в 1,23 раза. Различие в характере изменения пористости исходных и восстановленных брэксов хорошо видно также и на снимках, сделанных компьютерным томографом (рисунок 5.21). В брэксах на извести и магнезиальном связующем (в наибольшей степени) наблюдается развитие внутренних трещин, способствовавшее образованию связной пористой системы и росту темпа восстановления.

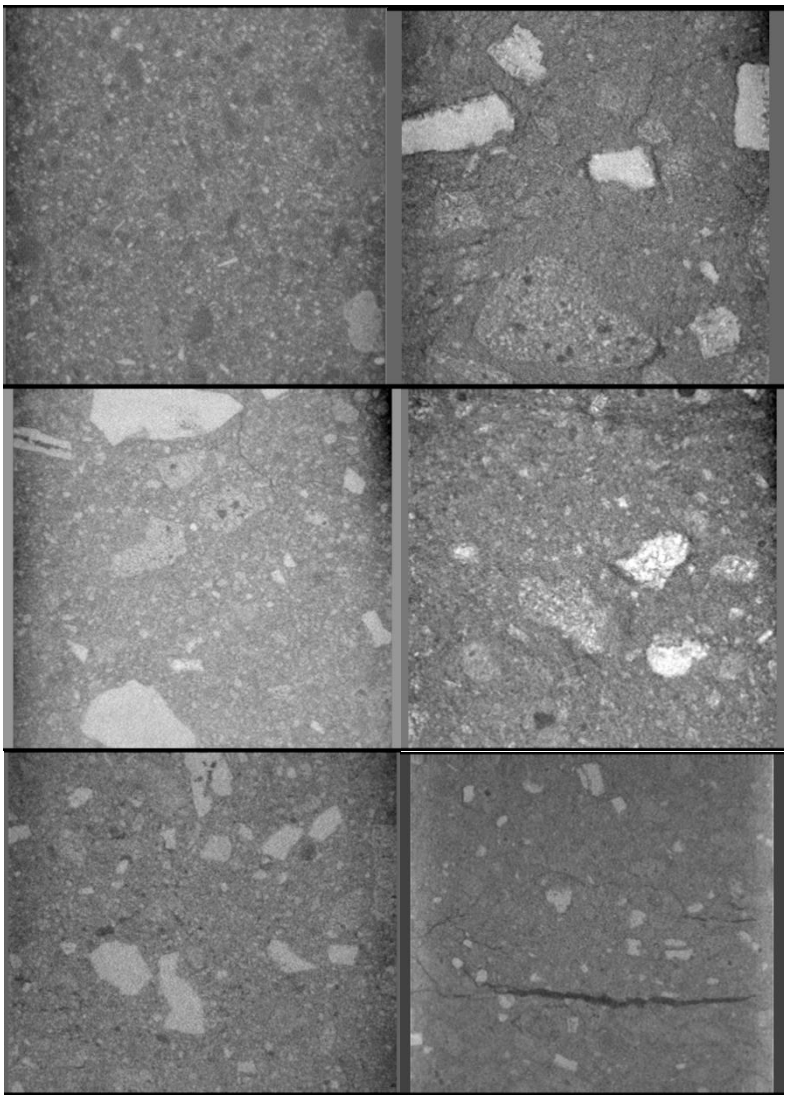


Рисунок 5.21 – Сопоставление распределения пор в исходных (слева) и в восстановленных брэксах (вверху брэкс 02-01, известь; посередине – брэкс 02-02, цемент; внизу – брэкс 02-03, магнезиальное связующее); компьютерная томография, увеличение в 64 раза

Можно предположить, что движущим механизмом развития пористости в рассматриваемых брэксах явились изменения типа кристаллической решетки при фазовых превращениях гематит-магнетит (при температурах сохраненного действия рассматриваемых связующих материалов), сопровождающиеся увеличением объема брэкса. Такое увеличение объема сопровождается механическими напряжениями, что может привести к частичному разрушению брэкса. Частичное разрушение брэкса вследствие увеличения объема приводит к росту доли крупных и сверхкрупных пор и к образованию внутренних трещин. Чем прочнее брэкс механически, тем в меньшей степени он подвержен такому частичному разрушению.

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 H_2 в получаемом газе. Именно этот параметр и будет определять допустимое содержание таких брэксов в шихте печи металлизации.

Испытания в промышленном реакторе Midrex брэксов, полученных с использованием магнезиального связующего из дисперсных отходов производства металлизованных окатышей и выплавки стали, показали возможность достижения высокой степени металлизации брэксов с сохранением их целостности. Степень металлизации брэкса на магнезиальном связующем (96,71 %) сопоставима со степенью металлизации основного продукта реакторов прямого получения железа – металлизованных окатышей. Результаты испытаний позволяют считать возможным применение жесткой вакуумной экструзии для реализации рециклинга указанных отходов путем их брикетирования и металлизации брэксов совместно с окатышами. На брэкс на магнезиальном связующем, как на компонент шихты реакторов прямого получения железа, выдан патент Российской Федерации №2579706 [103].

5.3 Выводы по главе

Приведенные выше результаты промышленных и опытно-промышленных экспериментов позволяют сделать следующие выводы:

1. Марганцеворудные концентраты и пыли аспирации производства силикомарганца эффективно окусковываются по технологии ЖВЭ с получением высокопрочных брэксов при содержании цемента в брикетируемой шихте не более 5 %. Пористость полученных брэксов сопоставима с величинами пористости коммерческих марганцевых руд и способствует их хорошей восстановимости.

2. При использовании в шихте для выплавки силикомарганца в руднотермической печи в количестве до 40 % брэксы из марганцевого концентрата и пыли системы газоочистки проявили высокую термостойкость и способствовали стабильной и ровной работе ферросплавной печи.

3. Горячая прочность брэксов обеспечивается до 700–800 °С цементным связующим, в диапазоне 800–1250 °С – плотностью образовавшейся силикатной фазы.

4. Полученные положительные результаты опытно-промышленных испытаний брэксов на основе мелочи марганцевой руды и пыли газоочисток в качестве одного из основных компонентов рудной части шихты для выплавки ферросиликомарганца в руднотермической печи были использованы при проектировании и строительстве линий брикетирования по технологии ЖВЭ на ферросплавных предприятиях в России, Казахстане и Малайзии.

5. Исследование свойств брэксов из дисперсных отходов мини-заводов, производящих прокат и использующих в качестве сырья окисленные окатыши, и изучение поведения этих брэксов при нагреве в восстановительной атмосфере в промышленном реакторе процесса Midrex позволяет заключить, что технология ЖВЭ позволяет реализовать полный и эффективный рециклинг указанных отходов.

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

7. Брэксы на магнезиальном 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».

8. Ограничением для использования брэксов на магнезиальном связующем является повышенное содержание серы в связующем, которая частично будет переходить в колошниковый газ и при отсутствии сероочистки колошникового снижать качество катализатора. Именно этот параметр и будет определять допустимое содержание таких брэксов в шихте печи металлизации.

6 Основные научные и практические результаты диссертационной работы

Настоящая работа посвящена исследованию возможности широкомасштабного промышленного применения нового способа окускования способом ЖВЭ, адаптированного по инициативе автора к требованиям процессов производства чугуна, ферросплавов и железа прямого получения. По результатам проведенных исследований:

1. Показано, что оптимальное содержание углерода как в рудококсовых, так и в шламовых брэксах должно отвечать стехиометрическому соотношению C/O = 0,3–0,5 по отношению к кислороду вюстита, который остается в брэксах после восстановления высших оксидов железа до вюстита;

2. Разработана методика расчета оптимального содержания углеродсодержащего материала в шихте для производства самовосстанавливающихся углеродсодержащих брэксов из железорудного концентрата и/или железорудной мелочи.

3. Установлено, что 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;

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

5. Внедрено в практику технологии ЖВЭ использование экструдера с протирочной фильерой для подготовки брикетируемой шихты к гомогенизации;

6. Установлено, что технология ЖВЭ может быть конкурентоспособной технологией окускования дисперсного железорудного сырья, способной служить частичной или полной заменой агломерации;

7. На промышленном опыте 3-летней эксплуатации продемонстрирована возможность экономически эффективной работы малых доменных печей на 100 % брэксов.

8. Опытно-промышленными экспериментами показана возможность применения в шихте руднотермических печей для выплавки ферромарганца до 40 % брэксов из рудной мелочи и пыли газоочистки этих печей.

9. Путем проведения экспериментов в промышленном реакторе Midrex показана возможность рециклинга образующихся на мини-заводах отсевов окисленных окатышей, прокатной окалины, пыли газоочистки ДСП и металлизованных шламов путем изготовления из них брэксов на магнезиальном связующем и использования их в вместе с окатышами в реакторе прямого получения железа с достижением высокой степени металлизации брэксов.

Список использованной литературы

1 Pietsch W. Agglomeration in Industry. Occurrence and Applications Wiley, 2005. 375 p.

2 Л. Юзбашев. Горный журнал. 1901 г, т.2, №6, с. 257-288

3 Доменное производство. Справочник. Т.1. М. «ГНТИ по черной и цветной металлургии». 1963 г. 647 с.

4 http://www.kuettner.com

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

6 H.Koizumi, A.Yamaguchi, T.Doi, F.Noma: Tetsu-to-Hagane Vol. 74(1988), No. 6, 962.

7 Y.Matsui, M.Sawayama, A.Kasai, Y.Yamagata, F.Noma: ISIJ Int., 43 (2003), 1904

8 Равич Б.М. Брикетирование в цветной и черной металлургии. М. : Металлургия, 1975. 232 с.

9 Астахов А.Г., Мачковский А.И., Никитин А.И. и др. Справочник агломератчика. Киев: Техника, 1964. 448 с.

10 Пузанов В.П., Кобелев В.А. Структурообразование из мелких материалов с участием жидких фаз. Екатеринбург: УрО РАН. 2001-634 с.

11 Полянский Л.И., Пузанов А.П., Кобелев В.А.//Новые огнеупоры. – 2007 - №4, с. 44

12 Пузанов А.П., Полянский Л.И., Машенко В.Н., Кобелев В.А.//Новые огнеупоры. – 2007 - №8, с. 31

13 Кобелев В.А., Пузанов В.П., Полянский Л.И Типы контактов мелких частиц и прочность образованных из них структур// Бюллетень научно-технической и экономической информации «Черная металлургия» №4, 2012, с. 56-70

14 http://www.spidermash.ru

15 Jim Torok "Briquetting for the Steel Industry: Then and Now", 32nd Biennale Conference of the Institute for Briquetting and Agglomeration, 25-28 September 2011, Curran Associates (2013),20

16 J. Schwelberger , Ch. Brunner, A. Fleischanderl Recycling of Ferrous By-Products in the Iron and Steel, 34th Biennale Conference of the Institute for Briquetting and Agglomeration, 8-11 November 2015 (в печати)

17 Хазанова Т.П. Производство марганцевых сплавов из бедных окисных и карбонатных руд/ Т.П. Хазанова, Г.Б. Ширер, Н.П. Лякишев // Развитие ферросплавной промышленности СССР. – Киев. – 1961. С. 122

18 Хвичия А.П. Выплавка силикомарганца из рудных брикетов в печи мощностью 16,5 МВА / А.П. Хвичия, С.М. Мазмишвили // Сталь. – 1970. – №2. –С. 138

19 Сухоруков А.И. , Соседко П.М., Хитрик С.И. // Сталь. – 1970. – №2. –С. 135

20 Мазмишвили С.М. Разработка и промышленное освоение технологий получения пылерудных брикетов и выплавки из них марганцевых ферросплавов /С.М. Мазмишвили, З.А. Симонгулашвили // Известия Вузов. – 1992. – №12. – С.43

21 Гузман И.Я. (ред.). Химическая технология керамики. Учеб. пособие для вузов - М.: ООО РИФ "Стройматериалы", 2003. - 496 с

22 Курунов И.Ф., Большакова О.Г., Щеглов Э.М. и др./ Металлург № 6, 2007, с.36-39

23 De Bruin T., Sundqvist L. ICSTI/Ironmaking Conference Proc., pp.1263-1273, 1998

24 Timo Paananen, Erkki Pisilä, Improved raw material efficiency in hot metal production; Düsseldorf, 15 – 19 June 2015, METEC-ESTAD, pp. 1-8

25 T. Sharna, et al.: ISIJ Int., 31 (1991), 312

26 T. Sharma, et al.: ISIJ lnt. 32 (1992), 812.

27 T. Sharma, et al.: ISIJ lnt., 32 (1994), 960

28 Singh, M., and Bjorkman, B., 1999, “Cold bond agglomerates of iron and steel plant by-products as burden material for blast furnaces,” Proc. REWAS 99:Global Symposium on Recycling, Waste Treatment and Clean Technology,San Sebastian, Spain, Vol. 2, pp. 1539-1548

29 R. Nicolle and A. Rist: *Metall. Trans. B*, 10 (1979), 429.

30 A. Kempainen, M. Iljana, E.-P. Heikkinen, T. Paananen, O. Mattila and T. Fabritius: ISIJ Int., 54 (2014), 1539

31 Титов В.В., Мурат С.Г., Киселев Н.И./Экология и промышленность №1, 2007, с. 16-21

32 http://briket.ru/metallurg6.shtml

33 Брикетирование - новый этап развития технологии окускования сырья для доменных печей / Курунов И.Ф., Канаева О.Г. / Бюллетень научно-технической и экономической информации «Черная металлургия» №5, 2005, с. 27-32

34 Исследование металлургических свойств брикетов из техногенного и природного сырья и оценка эффективности их применения в доменной плавке. Часть 1. /Курунов И.Ф., Щеглов Э.М., Кононов А.И., Большакова О.Г. и др.//Бюллетень научно- технической и экономической информации «Черная металлургия» №12, 2007, с.39-48

35 Исследование металлургических свойств брикетов из техногенного и природного сырья и оценка эффективности их применения в доменной плавке. Часть 1. /Курунов И.Ф., Щеглов Э.М., Кононов А.И., Большакова О.Г. и др.//Бюллетень научно- технической и экономической информации «Черная металлургия» №1, 2008, с.8-16

36 Исследование фазового состава железорудных брикетов с целью оценки их поведения в доменной печи / Курунов И.Ф., Малышева *Т.Я.,* Большакова О.Г./ Металлург №10, 2007, с.41-46

37 http://www.kmz-tula.ru/articles-20100728.html

38 Naiker, O. and Riley, T., “Xstrata Alloys in Profile”. Southern African Pyrometallurgy 2006, International Conference”, Johannesburg, 5-8 March 2006, pp 297-305

39 Davey, K.P., The development of an agglomerate through the use of FeMn waste (2004) Proceedings of Tenth International Ferroalloys Congress, INFACON-X: Trans- Formation through Technology, Cape Town, South Africa, pp. 272-280

40 Tupkary R.H, Tupkary V.R., 2013. An Introduction to Modern Iron Making, Khanna Publishers, Delhi.

41 Steele R.B. Agglomeration of Steel Mill By-products via Auger Extrusion. Proc. 23d Biennial Conference. IBA, Seattle, WA, USA, p. 205-217, 1993.

42 Ожогин В.В. Основы теории и технологии брикетирования измельченного металлургического сырья: монография. - Мариуполь: ПГТУ, 2010. - 442 с

43 Бижанов А.М., Курунов И.Ф., Подгородецкий Г.С. и др. Брикеты экструзии (брэксы) для производства ферросплавов // Металлург. 2012. № 12. С. 52.

44 ГОСТ 28657-90 Руды железные. Метод определения восстановимости.

45 ГОСТ 21707-76 «Руды железные, агломераты и окатыши. Метод определения газопроницаемости и усадки слоя при восстановлении»

46 ISO 4696-1:1998 Железная руда - статистическое испытание на восстановление - распад при низких температурах. Часть 1. Реакция с CO, $C0_2$, H_2

47 ISO 4696-1:1998 Железная руда - статистическое испытание разрушения после низкотемпературного восстановления. Часть 2. Реакция с CO

48 Малышева Т.Я. Железорудное сырье : упрочнение при термообработке.М.: Наука, 1988.- 199 с

49 Вашуль Х. Практическая металлография. Методы изготовления образцов. Перевод с нем:- М.:Металлургия, 1988.- 320 с

50 Иванова В.П., Касатов Б.К., Красавина Т.Н. Термический анализ минералов и горных пород.- Л.: Недра, 1974, 399 с

51 Коровушкин В.В. ЯГР-спектроскопия в практике геолого-минералогических работ.- М.: АО «Геоинформмарк», 1993.-39 с

52 В.Н.Соколов, Д.И.Юрковец, О.В.Разгулина. Определение коэффициента извилистости поровых каналов с помощью компьютерного анализа РЭМ изображений. // Известия Акад. Наук, сер. физич. 1997. Т. 61. № 10. С. 1898-1902.

53 Соколов В.Н., Юрковец Д.И., Разгулина О.В., Мельник В.Н. Изучение характеристик микроструктуры твердых тел с помощью компьютерного анализа РЭМ-изображений // Изв. РАН. Сер. физическая. 2004. Т. 68, № 9. С. 1332–1337

54 Электронный ресурс http://www.tesis.com.ru Abaqus User Manual, Version 6.12 Documentation.

55 Зенкевич О., Морган К. Конечные элементы и аппроксимация. Пер. с англ.- М.: Мир, 1986. – 318 с.

56 Курунов И.Ф., С.Б. Ященко. Методика расчета технико-экономических показателей доменной плавки. Научные труды Московского института стали и сплавов. № 152, 1983 г.

57 Курунов И.Ф., Ященко С.Б., Фурсова Л.А. Теория, технология и оборудование металлургического производства. Расчет показателей домен ной плавки на ЭВМ. Учебное пособие для курсового и дипломного проектирования. Москва МИСиС. 1986 г. 86 с.

58 Домна в энергетическом измерении / А.В. Бородулин, А.Д. Горбунов, Г.И. Орел и др. Кривой Рог: Издательство СП «Мира». – 2004. – 436 с.

59 Металлургия чугуна. /Вегман Е.Ф., Жеребин Б.Н., Похвиснев А.Н., Юсфин Ю.С. – М.: Металлургия, 2004, с. 184-204

60 Bender, Willy and Haendle, Frank. (1985). Brick and tile making, Procedures and operating practice in the heavy clay Industries. Bauverlag GMBH, Berlin, Germany

61 Extrusion in Ceramics. Frank Händle (Ed.) // Springer. 2007. 468 C.

62 R. Gregory. Briquetting coal without a binder. – Colliery Guardian, 1960, 201, № 5191.

63 Kaya, E. Particle shape modification comminution / E. Kaya, R. Glogg, S.R. Kumar // Kona. 2002. V.20. P.185—195.

64 Ulusoy, U. Role of shape properties of calcite and barite particles on apparent hydrophobicity / U. Ulusoy, C. Hicyilmaz, M. Yekeler // Chem. Eng. Process. 2003. V.43. P.1047—1053.

65 Ulusoy, U. Determination of the shape, morphological and wettability properties of quartz and their correlations / U. Ulusoy, M. Yekeler, C. Hicyilmaz // Mineral Eng. 2003. V.16. P.951—964.

66 Beirne, T. The shape of ground petroleum coke particles Brit / T. Beirne, J. M Hutcheon // J. Appl. Phys. 1954. ¹3. P.576.

67 Малыгин, Г.А. ФТТ. 2007. Т.49. Вып.6. С.961—982.

68 Мороз И.И. Технология строительной керамики. - Москва: Эколит, 2011. – 384 С.

69 Ружинский С. и др. Все о пенобетоне. – 2-е изд., улучшенное и дополн. – Спб, ООО «Строй Бетон», 2006, 630 с.

70 Бижанов А.М., Курунов И.Ф., Дуров Н.М. и др. Исследование механической прочности брэкса. Часть 2 // Металлург. 2012. № 10. С. 36–40.

71 Электронный ресурс http://www.tesis.com.ru Abaqus User Manual, Version 6.12 Documentation.

72 Бижанов А.М., Курунов И.Ф., Дуров Н.М. и др. Исследование механической прочности брэкса. Часть 1 // Металлург. 2012. № 7. С. 32–35.

73 Meyers M.A., Meyers P.P. Compressive strength of iron ore agglomerates // Transactions of Society of Mining Engineers AIME. 1983. Vol. 274. P. 1875–1884

74 Соболев А.А., Мельников П.А., Тютюнник А.О. Движение частиц в воздушном потоке // Вектор науки ТГУ. № 3(17), 2011. С. 82–86.

75 Лойцянский Л.Г. Механика жидкости и газа // Москва. 1973. 848 С.

76 ГОСТ 2787-75 Металлы черные вторичные. Общие технические условия.

77 Руды железные, агломераты и окатыши. Метод определения прочности на сбрасывание.

78 Дорофеева 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.

79 Лисин В.С, Скороходов В.Н., Курунов И.Ф., Чижикова В.М. Современное состояние и перспективы рециклинга цинкосодержащих отходов металлургического производства// Черная металлургия. Бюллетень института технико-экономических исследований и информации в черной металлургии. Приложение 6, 2001г. 32

80 Курунов И.Ф., Кукарцев В.М., Яриков И. С., Емельянов В. Л., Титов В.Н. Производственный рециклинг железоцинксодержащих шламов путем их окускования и проплавки в доменной печи (опыт ОАО НЛМК)// Сталь. – 2003. - №10. – С. 15.

81 Курунов И.Ф., Греков В.В., , Яриков И. С., Григорьев В. Н., Кузнецов А. С., Емельянов В. Л., Титов В. Н. Производство и проплавка в доменной печи агломерата из железоцинксодержащих шламов // Черная металлургия.—2003.-№9—С. 33.

82 Лисин В.С, Скороходов В.Н., Курунов И.Ф., Чижикова В.М, Самсиков Е.А. Ресурсо-экологические решения по утилизации отходов металлургического производства. // Черная металлургия.—2003.-№10—С. 64.

83 Курунов И.Ф., Титов В.Н, Большакова О.Г. Анализ эффективности альтернативных путей рециклинга железосодержащих металлургических отходов./ Металлург №11 , 2006, с. 39-42

84 Патент РФ № 2506327 Заявл. 18.05.2012 Опубл..10.02.14 Бюл.№4

85 Патент РФ №2506326 Заявл. 18.05.2012.Опубл.10.02.14 Б.№4.

86 Патент РФ № 2506325 Заявл. 18.05.2012 Опубл.10.02.14 Бюл.№4

87 Komine Hideo. [S.t.] / Komine Hideo, Ogata Nobuhide // Can. Geotech. J. 2003. V.40. P.460—475

88 Дворкин Л.И. Строительные минеральные вяжущие материалы/ Дворкин Л.И., Дворкин О.Л. –М.: Инфра-Инженерия, 2011. 544 с.

89 Булатов А.И., Макаренко П.П., Проселков Ю.М. Буровые промывочные и тампонажные растворы: Учебн. пособие для вузов.- М.: ОАО Издательство "Недра", 1999-424 с.

90 Matsui et al: ISIJ Int., vol.43(2003), No.12, p1904

91 Справочник Доменное производство. М. «Металлургия». Том 1. 1989 г.

92 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

93 M. Geerdes, R. Chaigneau, I. Kurunov, O. Lingiardi, J. Rikkets. Modern Blast Furnace Ironmaking. IOS Press BV. Amsterdam 2015

94 Duarte A., Lindquist W.E. Recovery of Nickel Laterite Fines by Extrusion. Proc. 27th Biennial Conference. IBA, USA, p. 205-217, 1999.

95 Игревская Л.В. Тенденции развития никелевой промышленности. Мир и Россия. М.: Научный мир, 2009. 268 с.

96 Жданов А. В. Изучение восстановимости марганцеворудного сырья / А.В. Жданов, О. В. Заякин, В. И. Жучков // Электрометаллургия. №4. 2007.С. 32-35.

97 Толстунов В.Л., Петров А.В. // Изв. Вуз. Черная металлургия 1989, № 4, С. 9-14

98 Glasser F.P. The ternary system CaO-MnO-Si02. / F. P. Glasser // Journal
Amer. Ceram. Soc. - 1962. - v.45. - # 5. - p. 242

99 Гасик М. И. Марганец / М. И. Гасик. - М., 1992. - 608 с.

100 Бижанов А.М., Курунов И.Ф., Халид У.Э. Поведение брикетов экструзии (брэксов) в реакторах Midrex. Ч. 1 // Металлург. 2012. № 4. С. 16–20.

101 Бережной А.С. Многокомпонентные щелочные оксидные системы – Киев: Наук. Думка, 1988.- 200 с.

102 Morey G.W., Bowen N.L.: J.Soc.Glas.Technol., 9, 249 (1925).

103 Лебедев М.П. Пористость деталей, полученных технологиями порошковой металлургии. М.: Academia, 2011. 79 с.

104 Пат. 2579706 РФ, МПК C22B. Заявл. Опубл. 10.03.2016.

105 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.

106 Курунов И.Ф., Бижанов А.М., Тихонов Д.Н., Мансурова Н.Р. Металлургические свойства брэксов // Металлург. 2012. № 6. С. 44–48

107 Курунов И.Ф., Бижанов А.М. Брэксы – новый этап в окусковании сырья для доменных печей.//Металлург. 2014.№3.С.49-53.

108 Бижанов А.М., Курунов И.Ф., Дашевский В.Я. О механической прочности брикетов экструзии. I. Металлы. №2, 2015, с. 19-25.

109 Бижанов А.М., Курунов И.Ф., Дашевский В.Я. О механической прочности брикетов экструзии. II. Металлы, №, 2015, с. 3-10.

110 Бижанов А.М., Курунов И.Ф., Ивонин Д.В. Механизм миграции мелкой фракции при производстве брикетов экструзии (брэксов)//Металлург. 2013. № 7. С. 24–285

111 Бижанов А.М., Курунов И.Ф. и др. Исследование механизма разрушения брэкса при статичной и ударной нагрузке.//Металлург. 2014.№8.С.26-31.

112 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.

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

Приложения

Приложение 1. Письмо компании Suraj PL (Индия)

SURAJ PRODUCTS LIMITED
Registered Office & Works : *CIN : L269420R1991PLC002865*
Vill. : Barpali, P.O. : Kesramal, Rajgangpur, Dist. : Sundargarh, Odisha, India, PIN : 770017
Tel : +91-94370 49074, e-mail : info@surajproducts.com, suproduct@gmail.com
www.surajproducts.com

To Whom So Ever It May Concern

We are a sponge iron & pig iron manufacturing company near Rourkela, Odihsa, India. We have installed a Stiff Extrusion unit for Briquetting of ore fines and industrial waste to further use in our blast furnace. Since 2011 together with Mr. Aitber Bizhanov and Prof. Ivan Kurunov we have been investigating the metallurgical properties of the extrusion briquettes (BREX) and their behaviour under the reducing atmosphere. These results obtained both in India and in Russia helped to realize first industrial Stiff Vacuum Extrusion agglomeration project for Blast Furnace. It has been demonstrated that the BF can operate efficiently with 100% of BREX in its charge.

The research of the BREX applicability for the Ferro Alloys production has also been implemented. The results of this research are being used at present in the framework of the cooperation with largest Indian ferro alloys producers.

We confirm and appreciate Mr. Aitber Bizhanov's personal contribution to the success of the Stiff Vacuum Extrusion project implemented by Suraj Products Limited.

Yours Faithfully
For Suraj products Limited

SURAJ PRODUCTS LTD. RAJGANGPUR BARPALI

Gagan Goyal
Executive Director
Date: 10.08.2016

Приложение 2. Письмо ОАО «ЧЭМК»

АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО
«ЧЕЛЯБИНСКИЙ ЭЛЕКТРОМЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЙ КОМБИНАТ»
(АО «ЧЭМК»)

454081, Челябинская область, г.Челябинск, улица Героев Танкограда, 80-П, строение 80.
Телефон (351) 772-63-10, факс (351) 772-63-73. E-mail: info@chemk.ru, http://www.chemk.ru
ОКПО 00186507, ОГРН 1027402319361, ИНН 7447010227, КПП 742150001

12 /08/2016 № 4-15-81

Для АО «Челябинский электрометаллургический комбинат» внедрение безотходных технологий производств ферросплавов является приоритетной задачей. Строительство современных высокоэффективных газоочистных сооружений позволило практически полностью ликвидировать безвозвратные потери – мелочь марганцевой руды и возгоны марганца электротермических печей, которые требуется вовлечь в производство.

Анализ современных промышленных технологий окускования сырья показал, что на сегодняшний день наиболее эффективной технологий является жёсткая вакуумная экструзия. Опыт промышленного производства брикетов экструзии (брэксов), отражённый в многочисленных публикациях Бижанова А.М. показал перспективность внедрения в условиях АО «ЧЭМК» данной технологии. Проведенные по заказу АО «ЧЭМК» Айтбером Бижановым предварительные лабораторные исследования подтвердили целесообразность разработки и внедрения данной технологии для условий крупнотоннажного производства марганцевых сплавов на нашем предприятии. Полученные с личным участием Бижанова результаты, относящиеся к способам подготовки шихты и к выбору наиболее подходящего связующего, были использованы в процессе разработки детального инжиниринга проекта строительства участка жесткой экструзии.

В настоящее время наши специалисты в рамках сотрудничества с производителем оборудования жесткой вакуумной экструзии “J.C.Steele & Sons” (США) и проектной организацией “Direxa Engineering” (США) осуществляют пуско-наладочные работы на участке производства брэксов.

Настоящим свидетельствуем об активном личном участии Айтбера Бижанова в исследовании и оптимизации технологии жёсткой экструзии из материалов ОАО «ЧЭМК»

Главный технолог **Д.И. Ракитин**

Расчетный счет № 40 702 810 972 190 002 208 в Калининском ОСБ № 8544
Челябинского ОСБ № 8597 г.Челябинск, кор. счет № 30 101 810 700 000 000 602, БИК 047501602

Приложение 3. Письмо АО ТНК «Казхром»

«ҚАЗХРОМ»
Трансұлттық компаниясы»
Акционерлік қоғамы

KAZCHROME

Акционерное общество
«Транснациональная компания
«КАЗХРОМ»

Қазақстан Республикасы, 030008
Ақтөбе қаласы, М. Мәметова к-сі, 4А
Т: +7 7132 900100
Ф: +7 7132 900900
E: kazchrome@erg.kz
www.erg.kz

4A M. Mametova Str., Aktobe city
030008, Republic of Kazakhstan
T: +7 7132 900100
F: +7 7132 900900
E: kazchrome@erg.kz
www.erg.kz

Республика Казахстан, 030008
г. Актобе, ул.М. Маметовой, 4А
Т: +7 7132 900100
Ф: +7 7132 900900
E: kazchrome@erg.kz
www.erg.kz

ИСХ № 12-2593
«10» АВГ 2016 20__г.

Информационное письмо

«На предприятиях АО «Транснациональная компания «Казхром» значительное внимание уделяется вопросам экологической безопасности производства и рециклингу техногенных материалов. Компания является одним из мировых лидеров по объему инвестиций на соответствующую модернизацию производства. В 2011-2012г.г. Бижановым А.М. в рамках сотрудничества нашей компании с производителем оборудования жесткой вакуумной экструзии J.C.Steele&Sons (США) было выполнено исследование свойств экструзионных брикетов из природных и техногенных материалов, используемых и образующихся в ферросплавном производстве. При выборе в качестве возможного варианта брикетирования указанных материалов технологии жесткой вакуумной экструзии нами были приняты во внимание ранее опубликованные статьи Бижанова, посвященные анализу результатов опытно-промышленной выплавки силикомарганца с применением брикетов экструзии в качестве компонентов шихты.

Из предоставленных для исследования материалов с участием Бижанова были изготовлены образцы брикетов экструзии и отработаны их составы для предполагаемых технологических режимов нашего производства. Результаты изучения механической прочности брикетов, их фазового состава, пористости и поведения при нагреве были учтены при принятии решения о строительстве на одном из предприятий АО «Транснациональная компания «Казхром» линии жесткой вакуумной экструзии.

В настоящее время идет подготовка к пуско-наладочным работам на этом объекте.

Подтверждаем личный вклад Бижанова А.М. в подбор оптимальных составов брикетов экструзии, изучение их свойств и отработку режимов их производства.

Первый заместитель Президента
Вице-президент по произ-ву и ТВ **Привалов О.Е.**

Приложение 4. Письмо ОАО «ЛГОК».

Металлоинвест
Лебединский ГОК

Акционерное общество
«Лебединский горно-обогатительный комбинат»

Дирекция строящегося комплекса ЦГБЖ-3

г. Губкин

«_09_» __08__ 2016 г.

ОТЗЫВ

На АО «Лебединский ГОК» при производстве ГБЖ образуются различные виды металлизованных и оксидных материалов, рециклинг которых является важнейшей задачей, решению которой уделяется на комбинате особое внимание. Поиск наиболее подходящей схемы рециклинга подобных техногенных материалов показал, что одним из перспективных является способ брикетирования. Сравнительный анализ применимости различных видов брикетирования показал, что для окускования оксидных материалов (пылей, шламов, отсевов окатышей) может успешно применяться жесткая вакуумная экструзия, которая была относительно недавно изучена в работах Бижанова А.М., опубликованных в отечественных и зарубежных журналах. В частности, представляют определенный интерес выполненные Бижановым А.М. исследования результатов применения брикетов в качестве компонентов шихты для шахтной печи Мидрекс.

В рамках сотрудничества нашей компании с производителем оборудования жесткой вакуумной экструзии J.C.Steele&Sons (США), с личным участием Бижанова А.М. в 2011г. было выполнено исследование свойств экструзионных брикетов из материалов АО «Лебединский ГОК». Полученные результаты в совокупности с упомянутыми выше результатами работ, могут быть использованы в дальнейшем при принятии решения о реализации проекта рециклинга железосодержащих побочных продуктов технологии ЗГБЖ.

Начальник строящегося цеха ЦГБЖ-3 С. А. Громов