Некоммерческое акционерное общество
«Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова»

УДК 669.502.17

На правах рукописи

ЕРЖАН АЙДАНА

Исследование и разработка технологии окускования высокодисперсной пыли ферросплавного производства с целью ее утилизации

8D07203 - Металлургия

Диссертация на соискание степени
доктора философии PhD.

Научные консультанты:

к.т.н., профессор
Квон Св.С.
(Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова)
д.ф-м.н., доцент
Окишев К.Ю.
(Уральский федеральный университет имени Первого Президента Б.Н.Ельцина, РФ)

Республика Казахстан
Караганда, 2026

СОДЕРЖАНИЕ

Нормативные ссылки 4
Определения 5
Обозначения и сокращения 6
Введение 7
1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА В ОБЛАСТИ УТИЛИЗАЦИИ ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ ФЕРРОСПЛАВНОГО ПРОИЗВОДСТВА 13
1.1 Информационный анализ мировых тенденций утилизации техногенных отходов ферросплавного производства 13
1.2 Характеристика основных способов окускования для утилизации высокодисперсной пыли (ВДП) 18
1.3 Обзор методов брикетирования отходов ферросплавного производства 21
1.4 Классификация связующих веществ 24
1.5 Основные проблемы утилизации отходов производства ферросилиция 30
Выводы по разделу и постановка задач исследования 31
2 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ 33
2.1 Характеристика исходных материалов и методы подготовки образцов 33
2.2 Методы исследований 35
2.2.1 Подготовка образцов 35
2.2.2 Определение химического состава 37
2.2.3 Определение фазового состава 38
2.2.4 Определение фракционного состава 39
2.2.5 Определение механических свойств 39
2.2.6 Определение прочности на сброс 40
3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ВЫБОРУ СВЯЗУЮЩЕГО ПРИ БРИКЕТИРОВАНИИ ВДП 41
3.1 Определение гранулометрического состава ВДП 41
3.2 Использование жидкого стекла в качестве связующего при брикетировании ВДП 43
3.3 Использование каустической соды в качестве связующего при брикетировании ВДП 46
3.4 Использование глины в качестве связующего при брикетировании ВДП 48
3.4.1 Математическое планирование экспериментов при брикетировании ВДП с бентонитовой глиной 49
3.4.2 Экспериментальные исследования 55
3.5 Сравнительный анализ влияния типа связующего на свойства опытных брикетов 57
Выводы по разделу 58
4 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЖЕЛЕЗОРУДНОГО КОНЦЕНТРАТА В КАЧЕСТВЕ КОМПОНЕНТА ШИХТЫ ПРИ БРИКЕТИРОВАНИИ ВДП 59
4.1 Теоретическое обоснование использования железорудного

концентрата в качестве компонента шихты при брикетировании 59
4.2 Экспериментальные исследования по использованию железорудного концентрата в качестве компонента шихты при брикетировании ВДП 60
4.3 Электропроводность брикетов в зависимости от содержания железорудного концентрата 67
Выводы по разделу 70
5 РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ БРИКЕТОВ ИЗ ВЫСОКОДИСПЕРСНОЙ ПЫЛИ ФЕРРОСПЛАВНОГО ПРОИЗВОДСТВА 72
5.1 Разработка технологии брикетирования ВДП с использованием железорудного концентрата и бентонитовой глины. 72
5.2 Проведение опытно- промышленных испытаний по выплавке стали с использованием опытных брикетов 75
5.3 Технико-экономическое обоснование внедрения технологии переработки ВДП производства ферросилиция. 79
Выводы по разделу 83
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 84
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ 87
Приложение А. Акт проведения промышленных испытаний 95
Приложение Б. Акт о внедрении технологии 100
Приложение В. Акт внедрения результатов научно-исследовательской работы в учебный процесс 101
Приложение Г. Отзыв о разработанной технологии от потенциальных потребителей 103
Приложение Д. Патенты на полезную модель 105
Приложение Ж. Технологическая карта 107

НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

В настоящей диссертации использованы ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ 1415–93. Ферросилиций. Технические условия.

ГОСТ 28473–90. Ферросплавы, чугун и сталь. Общие требования к методам анализа.

ГОСТ ISO/IEC 17025-2009. Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий.

ГОСТ 32183. Материалы битуминозные полутвердые. Определение плотности пикнометром.

ГОСТ 32233–2013. Методы гранулометрического анализа порошкообразных материалов.

ГОСТ 1497–84. Металлы. Методы испытаний на растяжение.

ГОСТ 4543-2016. Металлопродукция из конструкционной легированной стали. Технические условия.

ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В настоящей диссертации применяют следующие термины с соответствующими определениями:

Высокодисперсная пыль ферросплавного производства (ВДП) — мелкодисперсный техногенный продукт, образующийся в процессе производства ферросплавов.

Ферросилиций — ферросплав железа с кремнием, содержащий, в зависимости от марки, от 20 до 90 % кремния, применяемый в металлургическом производстве в качестве раскислителя и легирующей добавки при выплавке сталей и легированных чугунов.

Жидкое стекло — водный раствор силикатов натрия или калия, часто используемый в металлургических и технологических процессах в качестве неорганического связующего при формовании брикетов и других окускованных материалов.

Железорудный концентрат — дисперсный продукт обогащения железных руд, характеризующийся повышенным содержанием железа и используемый в металлургическом производстве в качестве сырья для получения железа, стали и в составе шихт при окусковании материалов.

Бентонитовая глина — природный глинистый минерал, основным компонентом которого является монтмориллонит, обладающий высокой связующей способностью и применяемый при агломерации и брикетировании тонкодисперсных материалов.

Каустическая сода (гидроксид натрия, NaOH) — неорганическое химическое соединение, сильная щёлочь, применяемая в технологических процессах для регулирования щёлочности среды и активации силикатных связующих.

Брикеты — искусственно сформованные окускованные материалы заданной формы и размеров, получаемые путём прессования или формования мелкодисперсного сырья с добавлением связующих веществ с целью улучшения их технологических свойств.

Связующее — вещество, обеспечивающая сцепление частиц шихтовых материалов между собой при формовании и твердении, способствующая получению брикетов с заданными характеристиками.

ОБОЗНАЧЕНИЯ И СОКРАЩЕНИЯ

ВДП – высокодисперсная пыль ферросплавного производства
ФС – ферросилиций
ЖС – жидкое стекло
ЖК – железорудный концентрат
ОЭС – оптико-эмиссионная спектрометрия
ТОО – товарищество с ограниченной ответственностью
ГОСТ – государственный стандарт
АО – акционерное общество
ИСО (ISO) – Международная организация по стандартизации
кН – килоньютон
МРСА – метод рентгеноструктурного анализа
РФА – рентгенофазовый анализ

Введение

В современных условиях развития мировой промышленности всё большее значение приобретают ресурсосберегающие и энергоэффективные технологии. Особое внимание уделяется вопросам рационального использования природных ресурсов, переработки техногенных отходов и снижения негативного воздействия промышленного производства на окружающую среду. Эти направления становятся приоритетными в рамках концепции устойчивого развития и находят широкое применение в промышленно развитых странах.

Наиболее актуальными указанные задачи являются для горно-металлургического комплекса, который характеризуется значительными объемами потребления сырья и образования отходов. В ведущих зарубежных странах активно внедряются технологии, направленные на вовлечение вторичных ресурсов в производственный цикл и повышение эффективности использования минерального сырья. В то же время в отечественной практике сохраняется ряд проблем, связанных с высокой ресурсо- и энергоёмкостью производства, недостаточным уровнем внедрения инновационных решений и накоплением значительных объёмов техногенных отходов.

Сталь в ближайшие десятилетия сохранит своё значение как основной конструкционный материал, широко применяемый в строительстве, машиностроении, транспортной отрасли и других сферах промышленности. Рост объёмов её производства сопровождается увеличением доли легированных и микролегированных сталей, обладающих улучшенными эксплуатационными характеристиками. Это, в свою очередь, обуславливает рост потребности в ферросплавах, среди которых особое место занимает ферросплавное производства, широко используемый в качестве раскислителя и легирующего компонента.

Производство ферросплавов сопровождается образованием значительного количества техногенных отходов, включая пыли, шламы и шлаки. Пыли газоочистных систем представляют собой мелкодисперсные материалы, содержащие ценные компоненты, однако их физико-химические свойства не позволяют эффективно использовать их непосредственно в металлургических процессах. Накопление таких отходов приводит к экономическим потерям и оказывает негативное воздействие на окружающую среду.

Современная металлургия в значительной степени основана на использовании мелкодисперсного сырья, что требует его предварительного окускования для обеспечения необходимой газопроницаемости шихты и стабильности технологических процессов. Мелкие частицы склонны к уплотнению, ухудшают условия прохождения газов и могут уноситься из печи в виде пыли, что снижает эффективность производства. В связи с этим применение методов окускования является необходимым этапом подготовки сырья и отходов к металлургической переработке.

Поскольку промышленность использует много энергии и является одним из основных потребителей природных ресурсов, она сначала вызывает

загрязнение окружающей среды, а также вносит значительный вклад в истощение природных ресурсов, образование большого количества отходов, таких как кислотные дожди и другие нежелательные явления. Таким образом, именно промышленность является одним из основных факторов экологической напряжённости в масштабах планеты.

Связь данной работы с другими научно-исследовательскими работами. Диссертационная работа выполнена в рамках проекта грантового финансирования молодых ученых по научным и (или) научно-техническим проектам на 2023 -2025 годы, финансируемого Комитетом науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (ИРН AP19576811, договор №114-КМУ4 от 17.05.2023 г.), где соискатель являлась ответственным исполнителем.

Актуальность работы. В Республике Казахстан к настоящему времени накоплено значительное количество различных промышленных отходов, при этом их объемы продолжают расти. Эти отходы занимают обширные площади, оказывают негативное влияние на атмосферу, водные ресурсы, почву, тем самым ухудшая экологическое состояние окружающей среды и снижая качество жизни населения. Хранилища отходов, зачастую не оснащённые необходимыми системами защиты, становятся источниками вторичного загрязнения: вредные вещества попадают в атмосферу, а во время дождей и паводков — в водоёмы, такие как реки, озёра и пруды.

В процессе производства ферросплавов образуются различные виды техногенных отходов, одним из которых является высокодисперсная пыль (ВДП). Эта пыль образуется в результате реализации самого технологического процесса при сбросе ферросплавного продукта [1, с. 118].

Высокодисперсная пыль по своему химическому составу близка к ферросилицию и может быть использована как сырье для получения кондиционного продукта [1, с. 118].

Особое внимание заслуживает проблема переработки отходов металлургической промышленности, в частности высокодисперсной пыли ферросплавного производства (ВДП). Эффективная утилизация таких отходов требует их предварительного окускования.

Проблема утилизации высокодисперсной пыли (ВДП) ферросплавного производства не является новой, но, тем не менее, она фактически не решена в РК.

В настоящее время в РК проблема утилизации ВДП фактически не решена: значительные объемы пыли экспортируются в зарубежные страны (РФ, КНР, Узбекистан) в качестве сырья, после чего реимпортируются обратно в Казахстан в виде брикетированной продукции с высокой добавленной стоимостью. Создание собственных технологий окускования является стратегически важной задачей для обеспечения технологической и экономической эффективности металлургической отрасли страны [1, с. 119].

Высокодисперсная пыль сама по себе представляет экологическую опасность, т.к. требует значительных площадей для хранения, является

источником загрязнения воздушного бассейна и обладает значительной пирофорностью за счет развитой поверхности взаимодействия [1, с. 119].

В настоящее время в мире существует достаточное количество реализуемых технологий утилизации высокодисперсной пыли, но в нашей стране такие технологии широко не используются [1, с. 119]. Это обусловлено тем, что пыль каждого конкретного предприятия обладает уникальными физико-химическими свойствами, гранулометрическим составом и набором примесей. Следовательно, необходима поиск известных методов окускования и разработка новых составов шихты (подбор связующих, расчет фракционного состава), отвечающих требованиям получаемого сырья.

Таким образом, работа, направленная на разработку эффективных режимов окускования ВДП с получением качественного брикетированного продукта, является актуальной и своевременной как с экологической, так и с научно-практической точки зрения.

Объект исследования: брикеты из ВДП производства ферросилиция.

Предмет исследования: химический состав, структура и физико-механические свойства брикетов, полученных из ВДП производства ферросилиция.

Цель работы: разработка технологии окускования высокодисперсной пыли (ВДП), образующейся при производстве ферросилиция с получением кондиционного продукта.

Задачи исследования:

– провести анализ состава и свойств высокодисперсной пыли (ВДП), образующейся при производстве ферросилиция;

– исследовать физико-химические свойства исходной пыли (химический и фазовый составы, фракционный состав) как факторов, определяющих технологию окускования;

– провести экспериментальные исследования по выбору оптимального связующего для процесса брикетирования;

– определить оптимальные технологические параметры процесса брикетирования;

– оценить качество полученных брикетов по комплексу показателей: прочность на сжатие, выход подрешётного продукта, содержание кремния и углерода;

– проведение опытно-промышленных испытаний на производственной площадке по выплавке стали с использованием опытных брикетов.

Научная новизна:

– установлена зависимость между количеством железорудного концентрата в шихте и прочностью готового брикета: при содержании 15% ЖК достигается наибольшая прочность 25 МПа;

– установлена зависимость прочности брикетов от вида и количества связующего: бентонитовая глина в количестве 3–5% обеспечивает прочность на сжатие до 25 МПа, что в 1,4–1,7 раза выше, чем при использовании жидкого стекла или каустической соды;

– определено влияние параметров процесса брикетирования (давление прессованиия, температура и время сушки на свойства брикета из шихты, содержащей ЖК и бентонитовую глину;

– экспериментально доказана возможность полной замены кондиционного ферросилиция марки ФС50 на брикеты из ВДП при раскислении и легировании стали 30ХГС без ухудшения механических свойств и химического состава.

Практическая значимость:

- разработан и экспериментально обоснован новый состав шихты для брикетирования, который включает (мас.%): ВДП – 50–55, железорудный концентрат – 15, мелкодисперсный некондиционный ферросилиций – 25-30, бентонит – 3, вода – 2. Такая композиция обеспечивает повышение плотности брикетов до 4,8–4,9 г/см³, что сопоставимо с кусковым ферросплавом и предотвращает всплывание брикетов в расплаве, ускоряя их растворение. Прочность на сжатие достигает не менее 25 МПа, а доля подрешётного продукта (фракции <10 мм) составляет не более 10%, что соответствует требованиям ГОСТ 1415-93 к механической прочности ферросилиция при транспортировке и загрузке в печь. Химический состав брикетов полностью соответствует марке ФС70 по содержанию кремния (68–74%), углерода (≤0,1%), серы и фосфора;

- определён оптимальный технологический режим брикетирования: давление прессования 50 кН, температура сушки 40–60°С, продолжительность сушки 90 минут, влажность шихты перед прессованием 2%. Эти параметры могут быть непосредственно использованы при оснащении промышленных линий брикетирования на ферросплавных заводах;

- в ходе опытно-промышленных испытаний на ТОО «КМЗ им. Пархоменко» подтверждена возможность полной замены кондиционного ферросилиция ФС50 разработанными брикетами при выплавке стали марки 30ХГС (ГОСТ 4543-2016). Химический состав полученной стали (0,32% C, 1,2% Si, 0,8% Mn, 1,1% Cr, S и P ≤0,035%) полностью соответствует нормативным требованиям.

- разработана и внедрена технологическая карта процесса переработки ВДП в брикеты (Приложение Д), получен акт внедрения, подтверждающий промышленную пригодность предложенного решения.

Методы исследования. В ходе исследования применялись физико-химические методы анализа, включающие определение химического состава исходных материалов и брикетов с использованием оптико-эмиссионной спектрометрии и рентгенофлуоресцентного анализа.

Для установления фазового состава использовались методы рентгенофазового анализа и микрорентгеноспектрального анализа. Оценка фракционного состава и распределения частиц по размерам осуществлялась с применением ситовой и фотоседиментационный методы.

Физико-механические свойства образцов определялись посредством испытаний на прочность при сжатии, определения плотности, пористости, а также прочности на сброс, характеризующей устойчивость брикетов при

транспортировке. Исследование структуры и морфологии частиц проводилось с использованием оптической и электронной микроскопии.

Дополнительно выполнялись определение электропроводности.

Для оптимизации состава шихты и параметров процесса брикетирования применялись методы математического планирования эксперимента. Заключительным этапом являлись опытно-промышленные испытания брикетов при выплавке стали 30ХГС с последующей оценкой химического состава и механических свойств.

Положения, выносимые на защиту:

- возможность использования железорудного концентрата в качестве компонента шихты в процессе брикетирования;
- зависимость между содержанием железорудного концентрата и бентонита в шихте для брикетирования и прочностью брикета;
- состав брикетов из ВДП производства ферросилиция;
-технологические параметры получения брикетов из ВДП с использованием железорудного концентрата и бентонитовой глины.

Место выполнения научно-исследовательской работы. Работа выполнялась на кафедре «Металлургии и новые материалы» НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова», на базе Международного центра материаловедения и Испытательной лаборатории инженерного типа «КОРМС» данного университета, а также в лабораториях Уральского Федеральный Университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (г. Екатеринбург, Российская Федерация) и Навоийского государственного горно-технологического университета (г. Навои, Республика Узбекистан).

Апробация работы. По результатам исследований, были опубликованы 13 статей, в том числе:

- 2 статьи в журнале «Metallurgija» (Хорватия), входящий в базу Scopus (Scopus процентиль – 32);
-1 статья в международном журнале «Acta metallurgica slovaca» (Словакия), входящий в базу Scopus (Scopus процентиль – 52);
- 3 статьи в журналах, рекомендованных КОКСНВО МНВО РК («Труды Университета» №3, 2023; «Труды Университета» №4, 2024); («Наука и техника Казахстана» №3, 2025) – второй список;
- получены 2 патента на полезную модель № 9155 от 12.02.2024 «Способ брикетирования пылевидных отходов, образующихся при производстве ферросилиция»; № 10925 от 25.07.2025 «Способ брикетирования высокодисперсной пыли производства ферросплавов с использованием железорудного концентрата».
- 5 докладов на отечественных и международных научно-практических конференциях:

1. XV Международная научно-практическая конференция «Интеграция науки, образования и производства – основа реализации Плана нации»

(Сагиновские чтения №15), посвящённая 70-летию университета, 17–19 июня 2023 г.

2. XVI Международная научно-практическая конференция «Интеграция науки, образования и производства – основа реализации Плана нации» (Сагиновские чтения №16), 13–14 июня 2024 г.

3. XXIII Международная научно-техническая Уральская школа-семинар металловедов — молодых учёных, Екатеринбург, 03–07 февраля 2025 г.

4. XVII Международная научно-практическая конференция «Интеграция науки, образования и производства – основа реализации Плана нации» (Сагиновские чтения №17), 26–27 июня 2025 г.

5. Международная научная конференция, опубликованная в журнале Mechanical Engineering: An International Journal (MEIJ), 2025, № 1/2 (Vol. 12), pp. 9–17. DOI: 10.5121/meij.2024.12201.

Были получены акты:

- внедрения технологии в ТОО «КМЗ имени Пархоменко».
- о проведении промышленных испытаний в ТОО «КМЗ имени Пархоменко»;
- о проведении испытаний в филиале НЦ КПМС «ХМИ имени Ж. Абишева»;
- о проведении испытаний в ТОО «НПО «Марганец».

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, основной части, состоящей из 5 разделов, заключения и приложений. Объем диссертации составляет 108 страницы машинописного текста, работа содержит 35 рисунка, 31 таблиц, список использованных источников, включающий 115 наименования.

1 СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА В ОБЛАСТИ ПЕРЕРАБОТКИ ТЕХНОГЕННЫХ ОТХОДОВ ФЕРРОСПЛАВНОГО ПРОИЗВОДСТВА

1.1 Информационный анализ мировых тенденций утилизации техногенных отходов ферросплавного производства

Ферросплавы представляют собой железосодержащие сплавы с высоким содержанием одного или нескольких легирующих элементов — таких как марганец, хром, кремний, молибден и др., в основном используемые в черной металлургии [1].

Основными виды ферросплавов является ферросилиций, ферромарганец, феррохром, а также ферровольфрам, ферромолибден, феррованадий, ферротитан и другие.

Ферросилиций (FeSi) является одним из наиболее распространенных ферросплавов. Жидкий ферросилиций, извлекаемый из печи, сначала разливается в слитки, после дальнейшего затвердевания и охлаждения разделяется на 100 мм и более мелкие кусочки. При дроблении на части ферросилиций разбрызгивается по фракциям и образуется высокодисперсная пыль, пригодная для вторичной переработки. Эти отходы складируются в специальные барабаны, покрываются крышками и хранятся на складах [2]. Он используется в сталелитейной промышленности в качестве раскислителя и для легирования при производстве кремнийсодержащих сталей. Кремнийсодержащие стали широко используются в промышленности для изготовления шарикоподшипников, металлических сердечников силовых трансформаторов и т.д. Это связано с тем обстоятельством, что кремний в составе стали способствует увеличению предела прочности, текучести и упругости, снижает ударную вязкость и усиливает устойчивость стали к окислению.

Марки, состав и требования, предъявляемые к ферросилицию устанавливаются по ГОСТу 1415-93 (ИСО 5445-80) [3].

Тем не менее, в металлургическом производстве важной отраслью является отрасль производства ферросплавов, которая сопровождается образованием большого количества техногенных отходов, оказывающих негативное влияние на окружающую среду и здоровье человека.

При плавке ферросплавов можно отметить такие виды, как шлаки, пыль и выбросы газа, отходы, содержащие тяжелые металлы, отходы огнеупорных материалов. Эти отходы накапливаются в тоннах и представляют серьезную экологическую угрозу.

При выплавке ферросплавов, применяемых в черной металлургии для раскисления и плавки металлов, образуются пылевые отходы двух видов [4, с. 79].

Пылевые отходы 1-ого типа образуются как побочный продукт, состав которого отличается от состава ферросплава. К ним можно отнести

пылевидные продукты, содержащие большое количество оксидов какого-либо химического элемента: кремния, марганца, хрома и др. Этот продукт не имеет раскислительного характера и, соответственно, не может использоваться для раскисления или легирования в сталеплавильном или литейном производствах [4, с. 79].

Пылевидные отходы 2-ого типа образуются в результате подготовки кондиционного ферросплава к продаже, он имеет такой же состав, как кондиционный ферросплав, но отличается высокой дисперсностью и большой поверхностью взаимодействия. Такие отходы могут использоваться в качестве сырья для производства кондиционного продукта, по свойствам сходного с производимым ферросплавом [4, с. 79].

Надо отметить, что пылевидные отходы очень вредны для человека и природы. Пыль от отходов загрязняет воздух и окружающую среду, ухудшает здоровье сотрудников и условия работы на предприятии. К тому же для хранения такой пыли нужны огромные территории, что создает дополнительную нагрузку на экологию региона [4, с. 79].

Очевидно, что для устранения негативного влияния пылевидных отходов, образующих при производстве ферросплавов на человека и окружающую среду, необходима их утилизация [4, с. 79].

Среди твёрдых отходов ферросплавного производства наибольший объём занимают шлаки, представляющие собой сплав оксидов кальция, кремния, алюминия, магния и марганца [5]. Шлаки характеризуются высокой плотностью, занимают значительные площади при складировании, но могут содержать остатки металлов и ценные компоненты, пригодные для вторичного извлечения [5].

Пылевые и газообразные выбросы образуются на всех высокотемпературных стадиях плавки. Пылевые отходы представляют собой мелкодисперсные частицы (размером от долей до сотен микрон) металлов и их оксидов. Газообразные выбросы включают CO, SO_2, фтористые и хлористые соединения. Без эффективной газоочистки эти выбросы служат источником загрязнения атмосферы и угрозы здоровью персонала [2]

Отходы, содержащие тяжёлые металлы (соединения Mn, Cr, Ni и др.), обладают способностью накапливаться в почве и водоёмах, что требует особых условий их хранения или переработки. Отходы огнеупорной футеровки после износа содержат оксиды Al_2O_3, MgO, ZrO_2 и могут рассматриваться как вторичные сырьевые ресурсы [5–7].

К числу основных экологических проблем, сопровождающих производство ферросплавов, относятся:

– загрязнение почв и водных объектов тяжёлыми металлами за счёт выветривания и размыва отвалов;

– эмиссия вредных газов и аэрозолей при хранении и транспортировке пылевидных отходов, а также в процессе плавки, что ухудшает качество воздуха и способствует коррозии сооружений;

– сложность переработки отходов из-за их нестабильного и гетерогенного состава, а также сочетания ценных и токсичных компонентов, что требует предварительной сортировки и сложных технологических решений.

При выветривании и размывании отходов происходит поступление токсичных элементов в почву, что может привести к нарушению микрофлоры, снижению урожайности, гибели растений, а также к загрязнению водоёмов и подземных вод. Инфильтрация дождевых и талых вод через отваленные техногенные материалы способствует выносу загрязняющих веществ в водные объекты, создавая угрозу для водных экосистем и источников питьевого водоснабжения.

Значительную угрозу представляют также пылевые и газовые выбросы в атмосферу. При хранении и транспортировке пылевидных отходов, а также в процессе плавки выделяются вредные газы и аэрозоли, ухудшающие качество воздуха, способствующие развитию респираторных заболеваний и коррозии зданий и сооружений.

Некоторые отходы содержат как ценные, так и опасные компоненты, что затрудняет их комплексную переработку и требует сложных технологических решений и предварительной сортировки.

Таким образом, эффективное управление отходами ферросплавного производства, в частности высокодисперсной пылью (ВДП) ферросилиция, требует комплексного подхода, включающего разработку и внедрение экологически безопасных технологий переработки. Переход к принципам циркулярной экономики и рациональное использование вторичных ресурсов, таких как ВДП, являются ключевыми направлениями устойчивого развития отрасли. Как показывает многие работы [25, 63, 89], брикетирование как один из методов окускования позволяет не только утилизировать отходы ВДП, также получить кондиционный продукт, пригодный для повторного использования в производстве металлургии.

В Казахстане ежегодно накапливается около миллиарда тонн промышленных отходов [7], доля которых примерно 70% приходися на горнодобывающие предприятия, а еще около 16% создают заводы обрабатывающего сектора. При этом ключевыми потребителями ферросплавов в стране выступают гиганты металлургической отрасли: как АО «Qarmet» и ТОО «KSP Steel», где их используют для раскисления и легирования стали, представители цветной металлургии, включая АО «Казахмыс», АО «Kazzinc» и заводы крупные объекты горно-металлургического комплекса, какие так АО «ССГПО» и ОАО «ТНК Казхром» [9]. В таблице 1 представлены данные по количеству и виду потребляемых ферросплавов в РК.

Таким образом, совокупное потребление ферросплавов крупнейшими предприятиями Казахстана оценивается на уровне 55–80 тыс. тонн в год, что сопровождается формированием значительных объёмов вторичных ресурсов. Это обосновывает необходимость разработки технологий утилизации техногенных отходов, в частности пыли ферросилиция, являющихся ценным вторичным сырьём.

Таблица 1 – Оценка потребления ферросплавов в Казахстане [8]

Предприятие	Основная продукция	Объем выпуска	Типовые ферросплавы	Удельный расход	Оценки годового потребления
АО «Qarmet»	Сталь, прокат	~4 млн. т стали	FeSi, FeMn, FeCr	FeSi: 4-6 кг/т, FeMn: 5-7 кг/т, FeCr: 2-4 кг/т	40-60 тыс. т
ТОО «KSP Steel»	Бесшовные трубы (сталь)	~1 млн. т стали	FeSi, FeMn, FeCr	Аналогично выше	10-15 тыс. т
АО «Казахмыс»	Медеплавка	~300 тыс. т меди	FeSi (раскисление)	2-3 кг/т меди	0,6-1 тыс. т
АО «Kazzinc»	Zn, Pb, Cu, Au	~300 тыс. т цинка медь/свинец	FeSi (раскислитель)	2-5 кг/т цветных металлов	1-2 тыс. т
АО «Қазақстан алюминийі»	Алюминий	~250 тыс. т Al	FeSi (в сплавах)	5-10 кг/т Al	1,2-2,5 тыс. т

Примечание: эти значения являются инженерной оценкой. Здесь объем потребления зависит от марок стали и цветных металлов, технологии плавки и применяемых смесей.

При выплавке ферросплавов, применяемых в черной металлургии для раскисления и легирования сталей, образуются пылевые остатки двух видов. В одном случае они не носят раскислительного характера (например, пыль, образующаяся в рудно-термической печи и содержащая преимущественно оксиды кремния, марганца, хрома и других элементов) и поэтому не могут использоваться в качестве раскислителей в сталеплавильном и литейном производстве [10,11].

Во втором случае порошкообразный продукт, полученный при подготовке ферросплава к реализации (дробление, фракционирование), сохраняет металлургические свойства и может использоваться как раскислитель [12].

Механизм воздействия указанных отходов на человека и окружающую среду различен. Пыль, образующаяся в рудно-термической печи, оказывает негативное влияние вследствие выбросов мелкодисперсных частиц в атмосферу [13]. Пылевидные отходы, образующиеся при переработке готового

ферросплава, ухудшают санитарно-гигиенические условия труда и требуют применения специальных систем переработки [14].

Для устранения негативного воздействия данных видов отходов необходима их переработка с вовлечением в повторный производственный цикл. При разработке технологии рециклинга порошкообразных отходов целесообразно создавать продукцию с потребительской стоимостью (брикетированные или окомкованные материалы) [15, 16].

Техногенные отходы ферросплавного производства представляют серьёзную экологическую и экономическую проблему, требующую комплексного подхода [17]. Утилизация накопленных и текущих отходов (шлаков, шламов, пыли) с применением методов окомкования и агломерации позволяет улучшить технико-экономические показатели производства и снизить экологическую нагрузку [12, 18].

Сырьевой базой металлургической промышленности на современном этапе являются мелкозернистые руды, концентраты и техногенные отходы, не предназначенные для переработки. Причина возникновения необходимости их повторного использования обусловлена наличием в составе ценных компонентов и сокращением традиционных месторождений [19, 20].

Любые отходы будут связаны с использованием сырья в металлургическом производстве. Поэтому снижение качества сырья природным минеральным составом, уменьшение в нем питательных элементов приводит к потере стоимости материалов и отходов. Так как это относится к производству ферросплавов [20], то использование в небольших количествах плодородных элементов сплавов здесь связано с выделением потерь на всех этапах производства сырья. Отходы скапливаются на территории металлургической промышленности, поэтому это создает возможность возникновения больших экологических опасностей

Анализ информации показал, что на стадии рециркуляции ферросплавов образуется большое количество отходов, состоящих из высокодисперсной пыли, а также не кондиционированных ферросплавов и других материалов. Их переработка и использование позволит снизить потребление основного сырья, а также повысить эффективность производства, снизить важнейшее загрязнение окружающей среды.

При этом надо подчеркнуть, что применительно к высокодисперсной пыли ферросплавного производства, окускование является необходимой стадией переработки, так как порошкообразные материалы не могут быть эффективно переработаны без предварительного уплотнения.

Окускование представляет собой технологический процесс преобразования мелкодисперсных материалов в более крупные агрегаты (брикет, окатыш, агломерат), пригодные для последующего использования в плавильных агрегатах.

1.2 Характеристика основных способов окускования для утилизации отходов высокодисперсной пыли

В настоящее время известны различные способы подготовки и окускования шихтовых материалов перед плавкой: агломерация, окомкование и брикетирование. Выбор метода окускования определяется прежде всего свойствами исходных материалов, требованиями технологического процесса плавки и качеством готовой продукции [21]. Одним из наибольших экологических рисков металлургического производства представляют техногенные отходы ферросплавного производства. Они представляет собой образования в виде пылей различной дисперсности.

Наиболее распространённые способы окускования включают:

Агломерация – спекание мелких частиц при высокой температуре без использования связующих. Процесс энергозатратен, но эффективен при переработке металлических отходов с высоким содержанием железа.

Брикетирование – формование материала с применением давления и связующих веществ. Метод характеризуется универсальностью, возможностью переработки различных отходов и получением брикетов с высокой плотностью и механической прочностью.

Окомкование – используется в основном для железорудных материалов. Представляет собой формование шарообразных гранул (окатышей) с последующим обжигом. Применение возможно при наличии оборудования и термической обработки.

На рисунке 1.1 показана основные методы окускования мелкодисперсных материалов.

Каждый из способов имеет свои технологические особенности, как показана на рисунке 1.1 есть преимущества и ограничения. Выбор метода определяется физико-химическими свойствами отходов, доступностью оборудования, экологическими и экономическими требованиями [21].

Агломерация представляет собой технологический процесс окускования мелкодисперсного железорудного сырья (концентратов, шламов, пыли), при котором в результате спекания формируются пористые прочные куски — агломерат, пригодный для использования в доменном производстве [22, с. 12–18; 23, с. 95–102].

Это один из основных методов окускования в черной металлургии, наряду с брикетированием и окомкованием.

Процесс агломерации включает в себя подготовку шихты, смешивание с флюсами и топливом (например, коксом), увлажнение, формирование слоя на агломерационной машине и термическую обработку – спекание. В результате происходит частичное плавление поверхности частиц, связывание в монолитные пористые куски, способные выдерживать механические нагрузки и высокие температуры. В процессе горения происходит частичное расплавление поверхностей частиц и их связывание в прочную пористую структуру [22, с. 45–60; 24, p. 213–220].

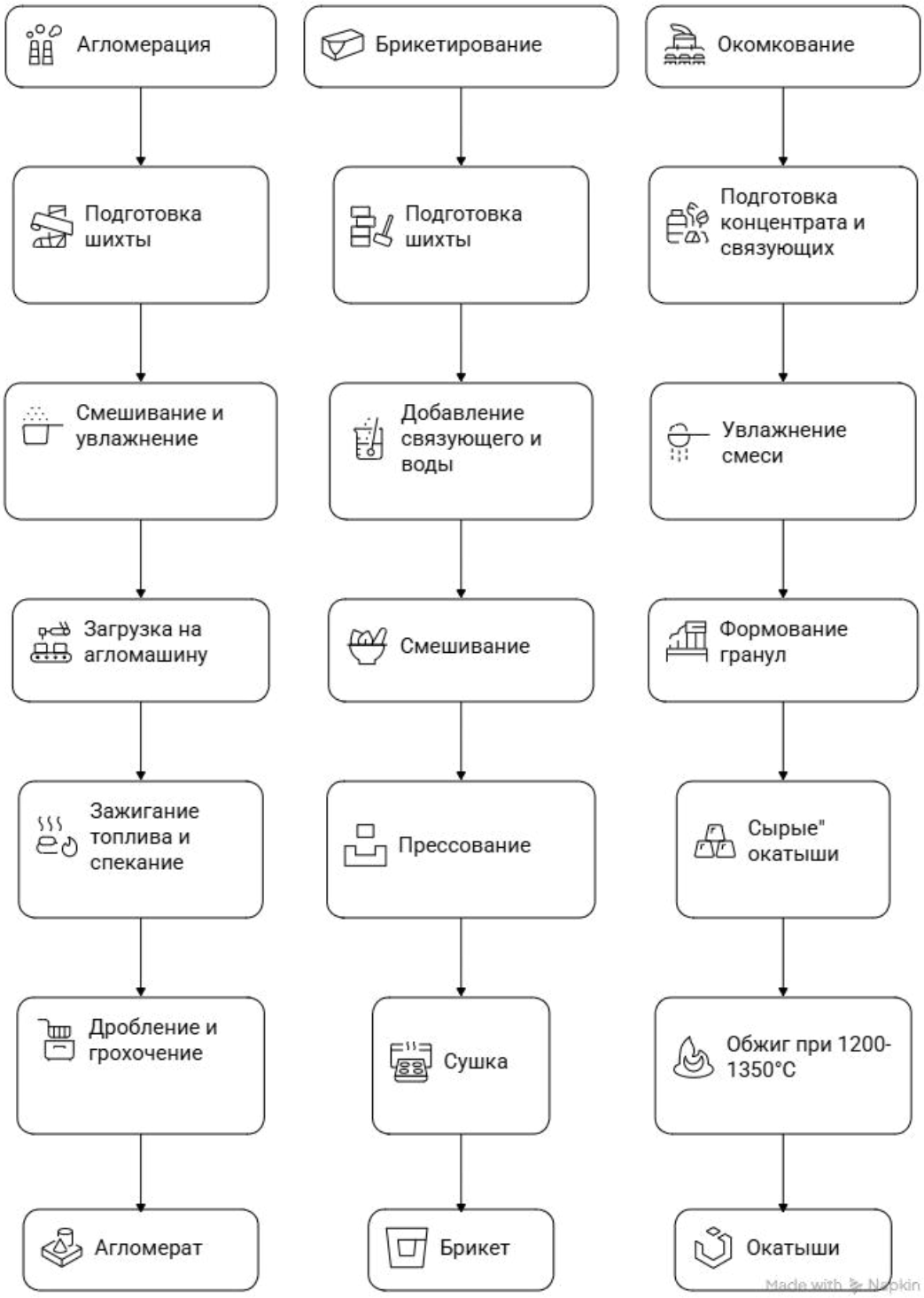


Рисунок 1.1 - Основные методы окускования мелкодисперсных материалов

Агломерация широко применяется для переработки железорудной окатышей и металлургических отходов, содержащих железо и другие ценные компоненты (Fe, Mn, Cr и др.) [23, с. 110-118].

Преимущества:

- Повышение содержания полезного компонента;

-Утилизация отходов;

- Улучшение газопроницаемости шихты;

-Повышение производительности доменных печей.

Недостатки:

- Высокая энергоемкость (сжигание топлива для спекания);

-Выбросы вредных газов и пыли;

- Требует дорогосостоящего оборудования.

Агломерация это энергозатраты, и учитывая экологические издержки, она остается методом переработки мелких частиц. Современные технологии направлены на устранение выбросов и увеличение доли отходов, пригодных для повторного использования, что делает агломерацию важной частью этой металлургии.

Брикетирование – это метод холодного прессования, при котором измельченные материалы уплотняются в брикеты с помощью высоким давлением и связующих добавок. Данный способ широко используется в основном металлургической, угольной и химической промышленности для утилизации отходов, а также при изготовлении топливных брикетов и строительных материалов [24, 26, С. 9-17].

Процесс брикетирования включает в себя сначала приготовление шихты, то есть смешивание основного материала с водой и связующим, прессование гидравлическим или другим типом пресса, дальнейшую сушку и упаковку готовых брикетов. В качестве основного многоразового связующего можно использовать известь,глину, цемент, жидкое стекло, органические полимеры и др. [25-26].

Брикеты находят применение в доменном, индукционном и дуговом производстве стали и ферросплавов, строительстве и др. Особенно перспективно использование брикетов из отходов — это снижает нагрузку на окружающую среду и экономит сырьевые ресурсы [26].

Преимущества:

- Простата технологии;

- Низкие энергозатраты

- Утилизация промышленных отходов;

- Улучшение условий транспортировки и хранения.

Недостатки:

- Ограниченная термостойкость;

- Зависимость прочности от типа связующего;

- Требуется защита от влаги при хранении.

Брикетирование является одним из наиболее перспективных и экономически эффективных методов утилизации мелкодисперсных отходов.

Современные исследования в области переработки вторичных железосодержащих материалов подтверждают, что брикетирование является одним из наиболее перспективных направлений утилизации отходов, обеспечивающим снижение экологической нагрузки и возврат ценных компонентов в металлургический цикл [27, с. 304-307].

С развитием технологий и появлением новых связующих его применение становится все более востребованным как в Казахстане, так и во всем мире.

Окомкование (или грануляция) – это метод холодного или полугорячего окускования, при котором из мелкодисперсного железорудного материалы формируются шарообразные гранулы (окатыши). Этот способ ширкок применяется в черной металлургии для подготовки сырья к последующей плавке в доменных или агрегатах прямого восстановления [28, 29].

Процесс окомкования включает: подготовку сырья (железорудный концентрат, флюсы, связующие), увлажнение и формование гранул на дисковых или барабанных окомкователях. Полученные «сырье» окатыши затем обжигаются при температуре 1200 -1350 ^{0}С в специальных печах для придания им прочности [28].

Окатыши используются как высококачественное сырье в доменном производстве чугуна, в установках прямого восстановления железа, а также в электродуговом производстве. Их высокая плотность, прочность и однородный химический состав обеспечивают стабильность производственного процесса и повышают выход металла [28, 30].

Преимущества:

- Высокая прочность и термостойкость окатышей;
- Улучшенная газопроницаемость в доменной печи;
- Возможность использования бедных и пылевидных руд;
- Меньшее загрязнение окружающей среды по сравнения с агломерацией.

Недостатки:

- Высокие капитальные и энергетические затраты на обжиг;
- Необходимость подготовки и увлажнения концентрата;
- Требование к стабильности химического состава шихты.

Рассматривая все виды окускования, в условиях ферросплавного производства, где преобладают отходы, характеризующиеся очень высокодисперсной пыли, наиболее рациональным методом можно использовать брикетирование с использованием различных связующих и добавок, улучшающих прочностные характеристики и устойчивость брикетов при транспортировке и складировании.

1.3 Обзор методов брикетирования отходов ферросплавного производства

Как было рассмотрено в предыдущем подразделе 1.2, для высокодисперсной ферросплавной пыли наиболее перспективной технологией переработки является брикетирование обеспечивающих формирование прочных брикетов.

Следует отметить, что, несмотря на значительный прогресс в области ресурсосбережения, масштабы переработки отходов ферросплавного производства остаются относительно невысокими. Пылевидные и шламовые

отходы, образующиеся при выплавке ферросплавов требуют окускования для их повторного использования в металлургическом процессе [31-33].

На многих предприятиях вторичные материалы в виде пыли ферросплавов используются как раскислители и легирование, но такие применение не всегда выгодно экономически, так как по требованиям по химическому составу и характеристикам ограничено [31, 34].

Утилизация отходов ферросилиция, включая ВДП, позволит увеличить сырьевую базу металлургической отрасли и улучшить экологическую обстановку. Среди технологий окускования именно брикетирование отличается меньшими энергетическими и производственными затратами по сравнению агломерацией и окатышей. Использование брикетов в ферросплавном производстве позволяет эффективно вовлекать техногенные отходы технологический процесс, которая позволяет расход окатышей, кокса и шлакообразующих материалов, а также частично заменять агломерат без существенного ухудшения технологических показателей [35].

Широко распространение получили способы брикетирования, применяемые в черной и цветной металлургии при подготовке рудного сырья и концентратов в дальнейшей переработке [36].

Известны также технологии брикетирования некондиционных порошкообразных пыли отходов ферросилиция. Для их переработки используют процессы окускования, брикетирования и гранулирования, основанные на смешении отходов со связующими материалами и последующем уплотнении прессами. Так, в работе Дубровина А.С., Сырых В.А. и соавт. (Брикетирование отсевов ферросилиция с использованием вибрационно-гидравлических прессов типа «Рифей» - Челябинск: ЮУрГУ, 1999. -. 95) предложено применять вибрационно-гидравлические прессы типа «Рифей».

Однако использование такого оборудования не позволило получить брикеты с высокой прочностью непосредственно после прессования. Это обусловлено тем, что вибрационные прессы работают при сравнительно невысоком давлении, вследствие чего не обеспечивается достаточная плотность. В связи с этим уплотненную шихту положить в специальных формах и производят длительную сушку для упрочнения брикетов.

Известен способ (Канаев Ю.П., Бондарев А.А. Окусковывание мелких отходов ферросилиция/Совершенствование производства ферросилиция. Материалы заводской науч.-техн. конференции, выпуск 3. – Новокузнецк, НКФЗ, 1997. – С. 394), по которому уплотнение смеси на цементном связующем материале производят при высоком давлении до 300 кгс/см^2, а затем готовую смесь сушить в атмосфере насыщенного пара. Недостаткам этого способа является длительный процесс формирования брикетов и необходимость использования парогенераторной установки для насыщенного пара.

Известен способ изготовления брикетов (Патент RU 2600775 Способ изготовления брикетов из мелкофракционных отсевов или порошкообразных отходов ферросиликомарганца (ферросилиция) из мелкофракционных отходов

ферросплавного производства) в виде ферросиликомарганца или ферросилиция, характеризующийся тем, что осуществляют дозирование упомянутых отходов, введение пластификатора, смешивание с жидким стеклом, прессование полученной смеси в брикеты, упрочнение брикетов путем нейтрализации щелочного элемента в жидком стекле и сушку брикетов, причем в качестве пластификатора используют жидко-пластичное вещество с кислотной средой, которое наносят на поверхность частиц упомянутых отходов в виде пленок при перемешивании смеси до смешивания с жидким стеклом, упрочнение брикетов проводят при нейтрализации щелочного элемента в жидком стекле за счет химической реакции между жидким стеклом при контакте с пластифицирующей пленкой пластификатора, состоящей из патоки-мелассы, предварительно обработанной кислотосодержащими добавками.

Брикетирование не предъявляет особых требований к качеству сырья, здесь допускается использования фракционных материалов менее 10 мм. Кроме того процесс брикетирования технологически достаточно прост. Основные проблемы процесса брикетирования заключаются только в дозировании связующих в определенных количествах и смешивании их с брикетируемым материалом.

В работах [35,36] исследовалось влияние физических свойств исходных материалов на поведение в процессе обработки. При производстве ферросилиция (FeSi) в качестве сырья используются: (I) кварц в качестве основного поставщика кремния (Si); (II) железная руда в качестве источника железа (Fe); и (III) углерод (C) в качестве основного восстановителя. Сырье подается в печь вокруг электродов, а затем подвергается термообработке при температурах от 800°C до 2000°C. Ферросилиций получают путем обработки кварцевой породы (SiO_2) углеродом в качестве восстановителя в соответствии с уравнением.

$$SiO_2(s) + 2C(s) = Si(l) + 2CO(g) \approx H°2000\ °C = 688\ кДж/моль$$

Отходы ферросплавов утилизируют обычно в двух направлениях: окускование и возвращение в плавку; использование для производства вяжущих и строительных материалов.

Таким образом, исследование физических и металлургических свойств исходных материалов имеет значение, поскольку оно показывает их поведение во время обработки в печах.

Фактически, чтобы сделать брикеты со связующими материалами надо знать количество сырья, необходимое для производства 1 тонны ферросилиция, необходимо знать химический состав сырья и получаемого сплава. С этой точки зрения, как описано в литературе [37,38], для получения сплавов FeSi контроль смесей должен осуществляться количественным (количество углерода, вводимого в соотношении углерод/кварц) и качественным способом (природа кварца, реакционная способность, гранулометрический состав сырья и пористость материала). Эти параметры существенно влияют на термодинамику

и кинетику восстановления кремнезёма, а также на энергетические показатели процесса.

Таким образом, пути переработки отходов при выплавке ферросплавов, на заводе остаются недостаточно изученными. Брикетирование - привлекательный способ их вторичной переработки. Брикеты, вводимые в печи, должны обладать определенными механическими и химическими свойствами.

Брикетирование материалов с использованием мелких фракций и связующих позволяет получать качественные брикеты даже при относительно низком давлении, в отличие от брикетирования без использования связующих.

Однако не существует стандарта для определения пригодности брикетов, используемых в процессе плавки, не выявлено оптимальное количество связующего материала и его количество, т.к. эти параметры зависят конкретно от состава брикетируемого материала.

1.4 Классификация связующих веществ

Вещества, которые могут связывать мелкозернистые фракции и сохранять свой первоначальный состав, называются связующими [39].

Связующее при формировании брикетов можно как рассматривать разность многоэтапного процесса при склеивания разных отдельных зерен с помощью клея [40].

Но при этом к конечному готовому продукту предъявляются особые требования [40]:

- высокие механические свойства;
- устойчивость к осадкам, температуре, солнечному свету, окислению атмосферным кислородом и др.;
- отсутствие примесей;
- отсутствие летучих соединений, оказывающих токсическое действие на организм человека.;
- низкая стоимость и доступность;
- простота использования;
- стабильность при хранении и транспортировке. Известно [41-43], что все виды вяжущих, применяемых при брикетировании руд и рудных концентратов, можно разделить на:

В зависимости от типа образованного соединения связующие классифицируются:

- по физическому состоянию вяжущего при смешивании с основным материалом;
- по химической природе связующего.

В зависимости от состава используемого сырья используются различные виды связующих, поэтому на физические или механические свойства брикетов, полученных методом холодного прессования, будет оказываться свое влияние.

Связующие делятся на две категории: органические и неорганические. К органической классификации относятся такие материалы, как тяжелые

нефтепродукты, смолы, крахмал, патока и лигносульфонаты. К неорганической классификации относятся бентонит, глины, цемент, жидкое стекло (силикат натрия), а также известь и магнезиальные соединения [25].

К числу используемых связующих относятся также вода и водные растворы различных веществ (например, силиката натрия), крахмал, декстрин, бентонит и другие глинистые материалы.

Химически активные связующие обеспечивают прочность брикетов за счёт образования новых фаз — продуктов реакции между компонентами связующего или между связующим и шихтой [25]. Это способствует формированию прочных связей между частицами материала. К таким системам относятся, например, гашёная известь и смеси едкого магнезита с магнетитом или хлормагнезитом.

Неорганические (минеральные) связующие представляют собой порошкообразные минеральные материалы или растворы солей. Их связующие свойства обусловлены процессами гидратообразования и последующей кристаллизацией, происходящими при взаимодействии с водой. В некоторых случаях (например, при применении гашёной извести) прочность брикетов обеспечивается её взаимодействием с углекислым газом из воздуха и рекристаллизацией гидрата оксида кальция [25].

Для твердения минеральных вяжущих важным фактором является время, поскольку прочностные характеристики формируются постепенно в течение нескольких часов или суток.

Жидкое стекло ($R_2O \cdot nSiO_2$, где R – Na, K или Li) находит применение в различных отраслях цветной и черной металлургии: при брикетировании хромовых [35], сурмянистых [26], флюоритовых [41], марганцевых [37] концентратов; железорудных материалов; кварцитов [37]. Для брикетирования применяют натриевое жидкое стекло Na2O·nSiO2, оно получается обжигом смеси кварцевого песка с содой или сульфатом натрия при температуре 1300-1400 °С.

Жидкое стекло традиционно используется в качестве связующего в технологии брикетирования.

Жидкое стекло – технологический вяжущий материал, вводящий в состав брикетируемого материала небольшое количество балласта. В отличие от цементов и рыхлой глины он обеспечивает брикетам высокую твердость, не вносит в брикетируемый материал нежелательных примесей (серы и фосфора) и в зависимости от модуля и плотности обеспечивает относительно высокую усвояемость. металлические плавящиеся элементы. хром, марганец, углерод [38].

Каустическая сода. Наряду со связками на известковой основе определенное распространение при окусковании тонкодисперсных материалов получили связки на основе окиси магния [44]. Например, каустический магнезит был использован для брикетирования железной хромоникелевой руды, закиси никеля, доломитовой мелочи, некоторых железных руд. Во всех исследованиях необходимым условием достижения нормативной прочности являлось

вылеживание в течение 24 часов. Так же отмечается, что брикеты не полностью соответствовали кондиционным требованиям по водоустойчивости – через 1,5-2 часа размокали в воде.

Связующие неорганического (минерального) происхождения, как правило, вступают с брикетируемыми материалами в химическую реакцию. Интенсивность структурообразования зависит от скорости и полноты химических реакций, а также давления прессования [25]. В качестве минеральных связующих наибольшее распространение нашли известь, жидкое стекло, цементы, каустический магнезит и доломит, чугунная стружка, глины, гипс и другие [45].

Среди наиболее широко используемых в промышленности вяжущих выделяются цемент, гипс и известь. Они относятся к минеральным неорганическим вяжущим и обладают разными физико-химическими свойствами, определяющими область их применения.

Цемент — это гидравлическое вяжущее вещество, наиболее часто используемое в строительстве и металлургии. В процессе брикетирования цемент играет роль прочного и долговечного связующего, способного обеспечить высокую механическую прочность брикетов. После гидратации цемент затвердевает, образуя кристаллическую структуру, которая удерживает частицы материала вместе.

Известь — это вяжущее, получаемое при обжиге известняка ($CaCO_3$) и последующем гашении оксида кальция водой [46]. Гашёная известь ($Ca(OH)_2$) применяется преимущественно как воздушное вяжущее, твердеющее на воздухе в результате карбонизации — взаимодействия с углекислым газом. Гашеная известь применяется в качестве связующего [25] и флюса. Обладает хорошей реакционной способностью и способна взаимодействовать с другими компонентами шихты. В брикетах она улучшает пластичность и равномерность массы, способствует формированию плотной структуры.

Известь получают путем термической обработки (обжига) известняка [45], в составе которого содержится не более 8 % примесей. Процесс осуществляется при температуре от 900 до 1200 °C и сопровождается высокими энергозатратами, поскольку требует значительного количества тепла для протекания реакции.

$$CaCO_3 <-> CaO + CO_2 \text{ [39]}$$

Процесс гашения негашеной извести происходит при добавлении воды в объёме не менее 30 %. В результате протекает экзотермическая реакция, сопровождающаяся интенсивным выделением тепла и образованием гидроксида кальция.

$$CaO + H_2O = Ca(OH)_2$$

В процессе гашения извести допускается наличие не более 10 % нерасслаивающихся комков. Такие неполностью расколовшиеся фрагменты могут образоваться как в результате недожога, так и пережога известняка — оба случая негативно сказываются на качестве продукта. Необожжённые частицы не вступают в реакцию с водой и, попадая в брикеты, могут стать причиной их разрушения. Пережжённые куски, напротив, гасатся очень медленно, и при хранении или плавке брикетов способны вызывать их растрескивание и распад. Кроме того, при открытом хранении известь подвергается воздействию атмосферной влаги, вследствие чего верхние слои частично гидратируются. Образовавшаяся гашеная известь со временем карбонизируется под влиянием углекислого газа из воздуха, что приводит к снижению её связующей активности. По этой причине известь необходимо хранить в герметичных складских помещениях.

Шлакощелочные вяжущие - эти связующие получают на основе доменных или сталеплавильных шлаков и щелочных активаторов (например, NaOH, жидкое стекло и др.). Они затвердевают в результате химической реакции между активатором и силикатами шлака.

Бентонит — это природный глинистый минерал, основным компонентом которого является монтмориллонит. Благодаря своей слоистой структуре и способности значительно увеличиваться в объёме при взаимодействии с водой, бентонит широко применяется в качестве связующего вещества в металлургической промышленности и смежных отраслях.

Он относится к силикатам с низкой температурой плавления. В процессе термического воздействия силикатные фазы начинают плавиться, способствуя спеканию и сближению частиц, особенно оксидов железа. В дальнейшем, при охлаждении, происходит формирование дополнительных прочных связей за счёт процессов рекристаллизации. Это обеспечивает высокую термическую устойчивость и прочность получаемых брикетов.

Однако у бентонита есть и недостатки. В первую очередь — это повышение содержания кремнезёма в конечной продукции, что может нежелательно сказаться на химическом составе брикетов. Также предполагается, что брикеты, сформированные с использованием как органических, так и неорганических связующих (включая бентонит), могут обладать более низкой восстановительной способностью по сравнению с окатышами из чистых оксидов железа. Это связано с их большей плотностью, меньшей пористостью и, соответственно, худшей проницаемостью для восстановительных газов.

Магнезитовые и доломитовые вяжущие - эти материалы получают из природных минералов, богатых MgO и CaO. Магнезит и доломит после обжига и измельчения могут применяться как связующие для огнеупорных или высокотемпературных брикетов.

Авторы работы [31] считают, что разные связующие могут обеспечивать высокие эксплуатационные свойства и вид связующего определяет уровень этих свойств. Были рассмотрены две разные системы связующего и два разных

состава. Рекомендуемым составом является композиция, состоящая из кварца, угля и сахара.

В работах [47-48] авторы показывают, что брикеты, изготовленные из мелкой руды, пыли и шлама с органическим связующим, показывают высокие прочность и улучшенную реакционную способность по сравнению с кусковой рудой.

В статье [49] авторами было установлено, что выбор типа и дозировки связующего оказывает существенное влияние на прочностные характеристики брикетов, полученных из пыли ферросилиция. Применение жидкого стекла в количестве около 6% обеспечивает удовлетворительные механические свойства. Однако наилучшие показатели прочности достигнуты при комбинированном использовании жидкого стекла (около 2%) и крахмала (около 3%). Такая композиция способствует формированию более прочных и устойчивых агломератов, пригодных для промышленного применения. Полученные брикеты сохраняют свою целостность и форму при введении в плавку, что подтверждает их перспективность для внедрения в металлургические процессы.

В ряде работ [50-56] в качестве связующего использовался пластификатор, смешанный с жидким стеклом. Недостатком этого способа является окисление кремния в ферросилиции при взаимодействии со связующими, что приводит к снижению количества активного кремния в брикетах.

В работе [57] в качестве связующих материалов предлагается использовать каменноугольные высоко- и среднетемпературные пеки, каменноугольную смолу и битум.

В работе [58, 34] авторы использовали в качестве связующих водный раствор порошка силикатной глыбы с небольшими добавками вермикулита, флюоритового концентрата и пассиватора (калиевого хромпика). Опыты показали, что при использовании происходит их преимущественное поглощение частичками вермикулита, что обеспечивает высокую сыпучесть формовочной смеси, снижает взаимодействие материала растворителя и связующего с ферросплавом. При прессовании происходит выдавливание растворителя или раствора из частичек вермикулита, приводящее к склеиванию формовочной смеси в прочные брикеты. Для уменьшения взаимодействия растворителя с отсевами ферросплавов в состав шихты вводят пассиватор в виде водного раствора бихромата калия в количестве до 0,2% от массы порошка ферросплава [33].

В работе [59] авторы рассматривают в качестве связующего жидкое стекло (ЖС) и ОС (низкосортная мука). Из анализа работ было доказано, что наиболее прочными получаются брикеты с использованием в шихте в качестве связующего 10 – 20% ЖС. В то же время достаточно прочными (прочность на сжатие не менее 25 кгс/см^2) являются брикеты с использованием 2 – 4 % ОС.

В работах [60] в качестве связующего используется жидкое стекло с добавлением электрофильтрованной пыли алюминиевого производства, которая содержит смолы (полиароматические углеводороды). Исследования

показывают, что заготовки, полученные этим способом, имеют пористую структуру (45,5%) для образования хорошо развитой активной поверхности и соответствующую кажущуюся плотность (1100 кг/см^3).

В ряде работ [61-70] исследовано использование в качестве связующих гашеной извести, портландцемента и силиката натрия. Исследовались следующие пропорции связующих веществ: 2.50%; 5.00%; 7.50% и 10,00%, соответственно. При этом дополнительно использовалась вода, для испытаний использовались четыре произвольных уровня влажности: 0,00%; 5,00%; 10,00% и 15,00%. Авторами данной работы доказано, что смеси обладают достаточной брикетируемостью, но различия в процентном содержании связующего и воды влияют на структурные характеристики и технологичность процесса. Наблюдалось увеличение кажущейся плотности по отношению к увеличению соотношения вода/связующее в смеси для всех полученных брикетов.

Таким образом, связующее — это важнейшие представители минеральных вяжущих материалов, каждый из которых имеет свою специфику применения, обусловленную химическим составом, способами твердения и физико-механическими характеристиками. Их выбор определяется требованиями конкретного технологического процесса и условий эксплуатации. Связующее играет важную роль в процессе брикетирования. Оно оказывает большое влияние на температуру распада брикета. К связующему предъявляется ряд требований, среди которых механические свойства, обеспечивающие защиту брикетов от деформации под нагрузкой, стойкость к разрушению/излому при ударе и сжатии, стойкость к истиранию, прочность на сжатие и др, химический состав, при котором в брикетах не увеличивается содержание кремнезема, фосфора, серы, мышьяка и т.д.; металлургические характеристики, при которых сохраняются металлургические свойства брикета, такие как высокая и небольшой перепад давления при восстановлении; технологичность, при которой добавление, смешивание, диспергирование связующего не вызывает затруднений и не изменяет традиционный цикл производства брикетов; хорошая термическая стабильность; фактор стоимости; простота и доступность на местах.

Готовые брикеты, производимые на базе ВДП, должны отвечать следующим требованиям [41-42]:

- соответствовать по химическому составу ГОСТу на данный ферросплав;
- выдерживать условия транспортировки, т.е. иметь достаточную механическую прочность;
- соответствовать размерному фактору согласно соответствующему ГОСТ.

Одним из ключевых моментов, возникающих при брикетировании ВДП, является правильный подбор связующего компонента. Связующий компонент должен обеспечить определенную пластичность для формирования брикета, механическую прочность после соответствующей обработки (например, сушки) и не вносить больших изменений в химический состав брикета, с тем, чтобы состав брикета соответствовал ГОСТ на данный ферросплав.

1.5 Основные проблемы утилизации отходов производства ферросилиция

Отходы производства ферросилиция, многие доли составляет высокодисперсная пыль (ВДП) из мелких отходв ферросилиция, которые предоставляет собой сложный вид для переработки техногенного сырья. Несмотря на значительный потенциал, содержание кремния 70% и более что их утилизация связано проблем экологического и технологического характера. Основные причина сложности утилизации является свойств пыли: высокая дисперсность, что основная частиц, которая имеет фракционный размер менее 0,2-1,0 мкм, также также пыли части кремния является аморфное которая есть прифорность [38, 52].

Прифорность – способность мелкодисперсного ферросилиция к самовоспламенению на воздухе, что создает повышенную пожарную опасность при хранении, а также при транспортировке.

При утилизации отходов также осложняющим фактором служит электризация высокодисперсных частиц, способствующая их агломерации и налипанию, что затрудняет равномерное смешивание со связующим, и также ухудшает условия уплотнения при формирования плотной структуры брикета.

Попытки вовлечения использование ВДП в плавильных агрегатах является малоэффективным вследствие значительного пылеуноса и в процессе дробильно-сортировочных операций и характеризующийся высокой степенью дисперсности частиц (менее 50 мкм).

Основным направлением утилизации ВДП является ее использование в виде брикетов, представляющих как кондиционный продукт. Такой подход обеспечивает вовлечение отходов в повторный производственный цикл, также снижает затраты на применение ферросилиция в качестве легирующего и раскисляющего материала при производстве сталей и это повышает экономическую эффективность.

При брикетировании – основном методе окускования ВДП ключевой проблемой становится подбор связующего, которое обеспечило бы достаточную механическую прочность брикетов без внесения нежелательных примесей. Как показано в работах [34, 53], применение традиционных неорганических связующих (цемент, известь) приводит к увеличению содержания кремния и железы в готовых брикетах, что может ограничивать их использование в качестве ферросилиции. Повышение давления прессования для увеличения плотности брикетов, в свою очередь, ведет к росту энергозатрата и ускоренному износу оборудования [25, 89].

Накопление не переработанной высокодисперсной пыли на открытых площадках создает экологическую опасность на окружающую среду. При этом отходы при складировании теряют содержащиеся в них ценные компоненты, что не соответствует принципам ресурсосбережения [16, 20].

Помимо брикетирования, для переработки пыли ферросилиция предлагались такие методы. как самораспространяющийся

высокотемпературный синтез (СВС) [38] или использование в составе шихт для агломерации [22]. Однако СВС технология требует сложного аппаратурного оформления и строгого соблюдения мер безопасности, а агломерация высококремнистых пылей из-за спекаемости материала затруднена.

Таким образом, каждый их известных методов имеет ограничения, что делает актуальность работы и задачу разработки специализированный технологии брикетирования, которые будет ближе к составу и свойствам ВДП.

Таким образом, анализ литературных данных показывает, что основные проблемы утилизации отходов производства ферросилиция связаны с особенностями химического состава ВДП, отсутствием универсальных составов связующих и технологических режимов брикетирования, а также недостаточной эффективностью существующих технологических решений. Решение указанных проблем требует комплексного подхода, включающего оптимизацию состава шихты, выбор эффективного связующего и обоснование параметров прессования, что и составляет цель настоящего исследования.

Выводы по разделу и постановка задач исследования

Проведенный информационный анализ показал, что на сегодняшний день не существует единой универсальной технологии, которая была бы применима для любой ВДП.

Подбор связующего, его состава, количества, дисперсности, а также параметры процесса брикетирования должны быть разработаны в зависимости от природы исходного материала. Наиболее доступными связующими при брикетировании ВДП являются жидкое стекло, каустическая сода и бентонит.

При этом основной проблемой остаётся необходимость обеспечения такого химического состава брикетов, который соответствовал бы требованиям ГОСТ к ферросплавам, а также достижение прочности, сопоставимой с кондиционным продуктом.

Таким образом, была сформулирована цель работы: разработка технологии окускования высокодисперсной пыли (ВДП), образующейся при производстве ферросилиция с получением кондиционного продукта.

В качестве объекта исследований были определены брикеты, получаемые из ВДП при производства ферросилиция, т.к. Карагандинская область является регионом, где именно производство ферросилиция является доминирущим (ТОО «Asia FerroAlloys», ТОО «Qaragandy Power Silicon», бывший ТОО «YDD Corporation» и пр.).

В качестве предмета исследований определены прочность, плотность, состав и электропроводность, как основные показатели качества кондиционного продукта.

Для решения указанной цели были поставлены следующие задачи:

1) провести анализ состава и свойств высокодисперсной пыли (ВДП), образующейся при производстве ферросилиция;

2) исследовать физико-химические свойства исходной пыли (химический и фазовый составы, фракционный состав) как факторов, определяющих технологию окускования;

3) провести экспериментальные исследования по выбору оптимального связующего для процесса брикетирования;

4) определить оптимальные технологические параметры процесса брикетирования;

5) оценить качество полученных брикетов по комплексу показателей: прочность на сжатие, выход подрешётного продукта, содержание кремния и углерода;

6) проведение опытно-промышленных испытаний на производственной площадке по выплавке стали с использованием опытных брикетов.

2 МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1 Характеристика исходных материалов и методы подготовки образцов

В качестве компонентов шихты использовались высокодисперсная пыль (ВДП), мелкодисперсный некондиционный ферросилиций (МНФ) и железорудный концентрат (ЖК) Саякского месторождения (Казахстан). Высокодисперсная пыль, полученная из газоочистных систем печей завода ТОО «YDD Corporation» (г. Караганда), представляет собой тонкодисперсный порошок темно-серого цвета с размером частиц менее 50 мкм. Данное предприятие ранее специализировалось на выпуске ферросилиция различных марок в соответствии с ГОСТ 1415-93 [2].

МНФ характеризуется повышенным содержанием кремния, что позволяет корректировать состав сплава, а железорудный концентрат отличается высоким содержанием железа и вводится в состав шихты и используется в составе брикетов для повышения их прочностных характеристик.

Химический состав разных марок ферросилиция и исходных компонентов шихты представлен в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Химический состав разных марок ферросилиции и компонентов шихты

Марка / компонент	Si	Fe	O	S	P	Al	Mn	Cr	Zn
ФС92	92.0–95.0	ост.	—	0.02	0.03	1.0	0.1	0.1	—
ФС90	87.0–92.0	ост.	—	0.02	0.03	1.5	0.2	0.2	—
ФС75	74.0–80.0	ост.	—	0.04	0.05	2.0	0.4	0.3	—
ФС70	68.0–75.0	ост.	—	0.04	0.05	2.0	0.4	0.3	—
ФС50	47.0–51.0	ост.	—	0.04	0.05	1.5	0.6	0.5	—
ФС45	41.0–47.0	ост.	—	0.04	0.05	2.0	1.0	0.5	—
ВДП	71,5	26,9	0,06	0,002	0,042	1,193	0,253	0,05	—
ЖК	12,25	49,38	32,44	0,038	0,064	3,30	2,285	0,021	0,222
МНФ	47.0–52.0	40.0–42.22	0.2	0.1	0.02	2.0	0.6	0.5	—

Как видно из данных таблицы 2.1 высокодисперсная пыль (ВДП) и мелкодисперсный некондиционный ферросилиций (МНФ) по составу

соответствуют ГОСТ на ФС70 и ФС50, соответственно, могут быть использованы как сырье для получения кондиционного продукта.

Железорудный концентрат (ЖК) отличается высоким содержанием железа (49,4 %) и кислорода (32,44 %), которые могут оказывать влияние на структуру и свойства получаемых брикетов.



а б в

Рисунок 2.1 – Общий вид компонентов шихты:
а) высокодисперсная пыль; б) железорудный концентрат; в) мелкодисперсный некондиционный ферросилиций

На рисунке 2.1 показан общий вид компонентов шихты, используемых при изготовлении опытных брикетов.

В лабораторных условиях при брикетировании высокодисперсной пыли в качестве связующих по отдельности применялись натриевое жидкое стекло с модулем SiO_2/Na_2O, каустическая сода (NaOH) и бентонитовая глина. Связующее применялось с целью обеспечения прочности полученных образцов и сохранения их формоустойчивости. Такой подход позволил провести сравнительную оценку эффективности различных видов связующих и определить их влияние на механические свойства полученных брикетов. Вода применялась для регулирования влажности смеси и облегчения процесса формования. На рисунке 2.2 показан общий вид связующих материалов.



а б в

Рисунок 2.2 – Общий вид связующих материалов:
а) бентонитовая глина, б) каустическая сода, в) жидкое стекло

Состав связующих материалов приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2 – Состав связующих материалов используемых в экспериментах

Связующий материал	Основные компоненты	Химическая формула / состав	Содержание, мас. %
Жидкое стекло (натриевое)	Диоксид кремния	SiO_2	60–75
	Оксид натрия	Na_2O	15–25
	Вода	H_2O	15–25
Каустическая сода	Гидроксид натрия	NaOH	97–99
	Карбонат натрия (примесь)	Na_2CO_3	до 1–3
Бентонитовая глина	Диоксид кремния	SiO_2	55–65
	Оксид алюминия	Al_2O_3	15–20
	Оксид магния	MgO	2–5
	Оксид кальция	CaO	1–3
	Оксид железа	Fe_2O_3	2–5
	Связанная вода	H_2O	8–12

2.2 Методы исследований

Для подготовки и проведения экспериментальных исследований образцов использовались стандартизированные методики и современное аналитическое оборудование аккредитованных лабораторий, соответствующих требованиям ГОСТ ISO/IEC 17025-2009 «Общие требования к компетентности испытательных и калибровочных лабораторий».

Экспериментальные исследования выполнялись на базе Международного центра материаловедения, Испытательной лаборатории инженерного типа «КОРМС» Карагандинского технического университета имени Абылкаса Сагинова, а также в лабораториях Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина (г. Екатеринбург, Российская Федерация) и Навоийского государственного горно-технологического университета (г. Навои, Узбекистан).

Определялись такие параметры брикетов как прочность на сжатие, плотность, пористость, исследования структуры, химического и элементного состава, а также на электропроводность.

2.2.1 Подготовка образцов

Брикеты изготавливали методом прессования на лабораторном прессе РП-50 (Рисунок 2.3). Лабораторный пресс РП-50 для брикетирования применяется для изготовления образцов материалов в виде круглых или квадратных таблеток в специальных пресс-формах при подготовке пробы к

физико-химическим исследованиям. Ручной пресс Биолент серии РП сделан из стали, снабжен 4 направляющими. Ручной пресс РП-50 имеет защитный кожух из противоударного поликарбоната с дверцей. Технические характеристики пресса приведены в таблице 2.3.



Рисунок 2.3 – Лабораторный пресс РП-50

Все компоненты шихты тщательно смешивались в течение 5 минут до достижения гомогенной массы [4]. Затем с помощью пресса из подготовленной шихты готовились образцы диаметром 35мм и высотой 10мм, давление прессования варьировалось в пределах от 30 до 50 кН (рисунок 2.4) [4].

Подготовленную шихту подвергали прессованию при заданных параметрах нагрузки. После этого брикеты подвергались процессу сушки в сушильном шкафу Snol-67/350 при температуре 60^0С в течение 90 минут.

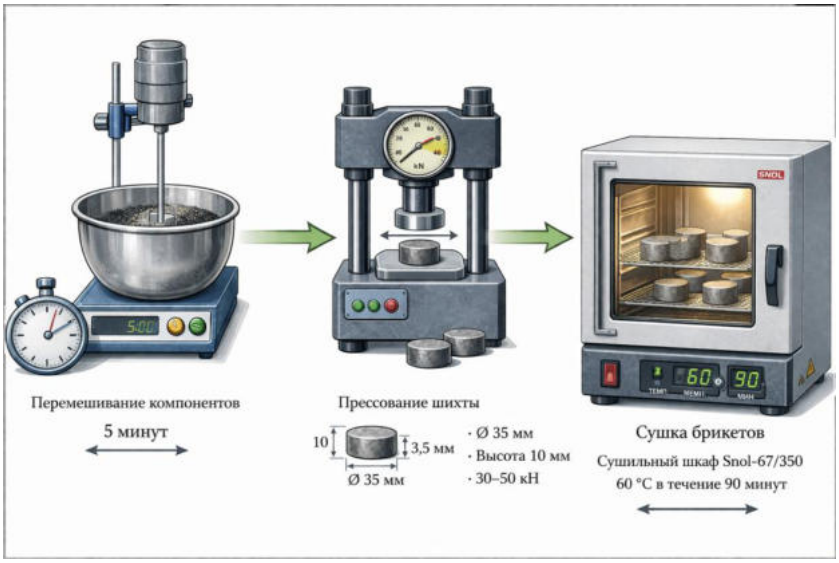


Рисунок 2.4 – Процесс подготовки образцов (брикеты)

Таблица 2.3 - Технические характеристики лабораторного пресса РП-50

Параметр	Значение
Максимальное усилие прессования	0–50 тонн
Диаметр поршня	130 мм
Ход поршня	0–50 мм
Нижняя плита	135 ± 5 мм
Верхняя плита	50 ± 5 мм
Рабочее пространство	115 × 115 × 180 мм
Стабилизация давления	1 МПа / 10 мин

2.2.2 Определение химического состава

Химический состав образцов определяли с использованием эмиссионного спектрометра ДФС-71 (Россия) (рисунок 2.5) и рентгенофлуоресцентного анализатора NITON XL2-100G (США).



Рисунок 2.5 - Эмиссионный спектрометр ДФС-71



Рисунок 2.6 - Рентгено-флуоресцентный спектрометр Olympus

Определение содержания кремния и углерода дополнительно проводили на приборах СПАС-05 и анализаторе фирмы Olympus (рисунок 2.6). Технические характеристики приборов приведены в таблицах 2.4 и 2.5.

Спектрометр предназначен для определения химического состава металлических и других твёрдых образцов методом оптико-эмиссионной спектрометрии (ОЭС). Он позволяет устанавливать общую массу химических элементов от магния до урана (включая лёгкие элементы, такие как алюминий, кремний, фосфор, сера и т.д.) в пластиках, металлах и их сплавах, грунтах, рудах и других полезных ископаемых, ювелирных изделиях и т.п.

Таблица 2.4 - Техническая характеристика прибора СПАС-05

Параметр	Значение
Метод	Атомно-абсорбционная спектрометрия
Диапазон длин волн	190–900 нм
Тип проб	Растворы после химической подготовки
Предел обнаружения	до 10^{-6} %
Погрешность	±1–2 %

Таблица 2.5 - Техническая характеристика Olympus (XRF)

Параметр	Значение
Метод	Рентгенофлуоресцентный анализ
Диапазон элементов	Mg–U
Время анализа	2–30 с
Детектор	SDD
Тип анализа	Неразрушающий

2.2.3 Определение фазового состава

Элементный состав образцов был изучен микроспектральным методом анализа (MPCA) на растровым микроскопе AURIGA с системой микроанализа и EBSD приставкой Carl Zeiss NTS GmbH (рисунок 2.7). Область анализа составляла 50–75 μм, что позволило детально изучить фазовые и элементные изменения. Для картирования, анализа текстур и определения фаз применялась система HKL.



Рисунок 2.7 - Двухколонный растровый микроскоп AURIGA с системой микроанализа и EBSD

Качественный и количественный фазовый состав исследуемых образцов определяли с помощью рентгенодифракционного анализа на рентгеновском дифрактометре Bruker D8 Advance в диапазоне углов дифракции 2θ = 15 - 95° в излучении Kα Co с шагом 0,025° с использованием позиционно-чувствительного детектора LynxEye. Расшифровка дифрактограмм осуществлялась с помощью базы данных ICDD PDF-2 (v. 2023).

2.2.4 Определение фракционного состава

Для оценки фракционного состава исследуемой ВДП был проведен седиментационный анализ продукта на приборе ФСХ-6К (рисунок 2.8).

Фракционный состав компонентов определялся с использованием анализаторной просеивающей машины серии AS 200 (фирма Retsch) (рисунок 2.9).



Рисунок 2.8 - Фотоседиментометр ФСХ-6К



Рисунок 2.9 - Просеивающая машина AS 200

2.2.5 Определение механических свойств

Предел прочности на сжатие определяли на испытательной машине INSTRON (рисунок 2.10).

Плотность образцов определяли пикнометрическим методом ГОСТ 32183 [71].



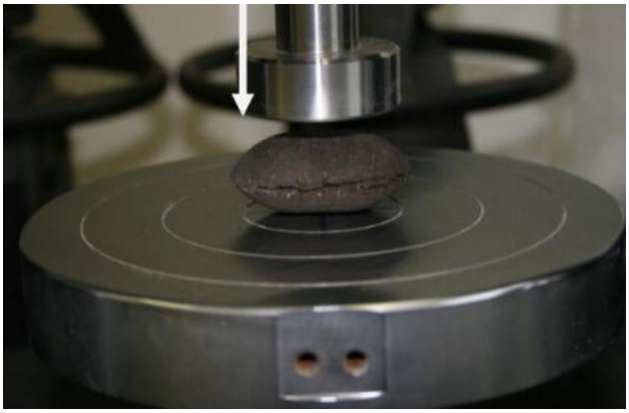


Рисунок 2.10 - Машина INSTRON

2.2.6 Определение прочности на сброс

Сброс образца проводили на стальную плиту толщиной 20мм с высоты 2 метра 3 раза. Затем испытуемые образцы просеивались через сита с ячейками 10 мм. Сита с более мелкими ячейками не использовались, т.к. согласно ГОСТ 1414-93 наименьший допустимый размер частиц составляет 10 мм (класс крупности 6), причем доля подрешетного продукта должна составлять не более 10%.

В качестве показателя прочности на сбрасывание использовалась массовая доля подрешетного продукта: чем больше доля подрешетного продукта, тем меньше прочность на сброс.

3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ВЫБОРУ СВЯЗУЮЩЕГО ПРИ БРИКЕТИРОВАНИИ ВДП

3.1 Определение гранулометрического состава ВДП

Гранулометрический состав шихты является важнейшей характеристикой, определяющей свойства шихты, формирование брикетов, их прочность и плотность [25, 72]. Оптимальные соотношение мелких и крупных фракций обеспечивает равномерность структуры, повышение механической прочности и улучшение восстановительных процессов [73-75]. Преобладание крупных фракций (более 1-3 мм) снижает однороднсть смеси и ухудшает прочность брикета, так как между зернами образуются пустоты [72, 76]. Наличие мелкодисперсной фракции (пыли) необходимо для заполнения межчастичного пространства, что обеспечивает повышение плотности и формирование брикетов. [26, 73]. Однако слишком большое количество высокодисперсной пыли может затруднить выход воздуха при прессования и привести к повышенному пылеобразованию. Для оценки дисперсности ВДП был проведен фракционный анализ. Результаты распределения частиц по размерам представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1 - Распределение частиц по размеру

Компонент	≤ 0,05 мкм	0,05–0,2 мкм	0,2–1,0 мкм	1,0–3,0 мкм	≥ 3,0 мкм
ВДП	14 %	16 %	55 %	13 %	2 %

Из таблицы 3.1 видно, что ВДП характеризуется преобладанием фракции 0,2 – 1,0 мкм (55%). Суммарная доля частиц менее 0,2 мкм составляет 30%, что свидетельствует о высокой дисперсности материала.

Для более детального изучения высокодисперсной пыли был выполнен фотоседиментационный метод (рисунок 3.1). Анализ показал, что основная масса частиц сосредоточена в диапазоне 2-10 мкм с четко выраженным максимумом при 3-4 мкм.

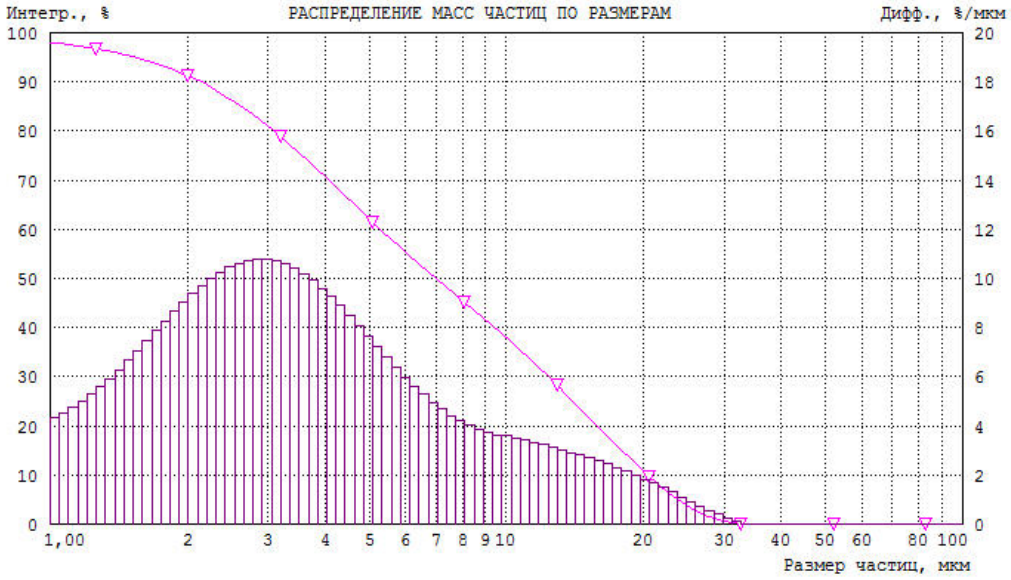


Рисунок 3.1 – Гранулометрический состав высокодисперсной пыли (результаты фотоседиментационного анализа)

Высокая дисперсность исследуемых ВДП способствует увеличению площади межчастичных размеров. Учитывая эти особенности, для достижения оптимальных прочностных характеристик было проведено сравнительное исследование трех типов связующих с различными механизмами структурообразования: жидкого стекла, каустической соды и бентонита.

Также было проведено исследование морфологии свойств ВДП. Форма частиц показана на рисунке 3.2.

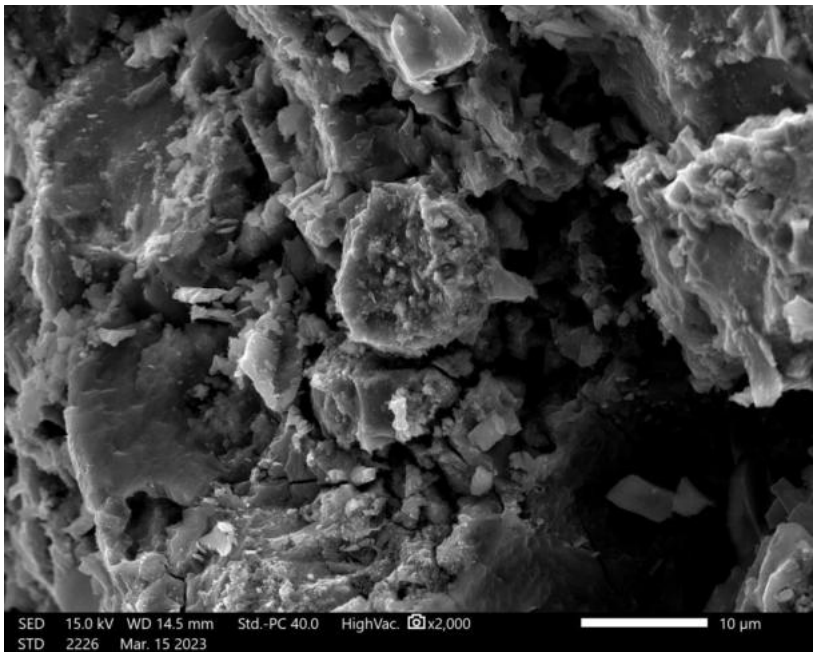


Рисунок 3.2 – Форма частиц ВДП (увеличение X 2000)

Эффективность процесса брикетирования во многом определяется физическими свойствами и морфологией исходного шихты.

Анализ формы частиц ВДП, проведенный с помощью электронной микроскопии показал, что форма частиц ближе к равноосной (рисунок 3.2) согласно классификации [72, 75], но не сферичной. Считается, что сферичные частицы порошка дают максимальный насыпной вес, т.е. наиболее плотную укладку при свободной насыпке, но плохо прессуются и для порлучения прессовок достаточной прочности требуют больших удельных давлений [73]. В данном случае учитывая не сферичную форму частиц можно начать брикетирование с относительно невысоких давлений прессования.

Одним из ключевых моментов, возникающих при брикетировании ВДП, является правильный подбор связующего компонента. Связующий компонент должен обеспечивать определенную пластичность для формирования брикета, механическую прочность после соответствующей обработки (сушки) и не вносить больших изменений в химический состав брикета, с тем, чтобы состав брикета соответствовал ГОСТ на данный ферросплав.

3.2 Использование жидкого стекла в качестве связующего при брикетировании ВДП

В качестве связующего при изготовлении брикетов было выбрано жидкое стекло – водный щелочной раствор силикатов натрия состава $Na_2O\ (SiO_2)_n$. Данный материал широко применяется в различных технологических процессах благодаря доступности, невысокой стоимости и хорошим связующим свойствам [25, 77].

Данный материал широко применяется в качестве связующего компонента при формировании брикетов, окотышей порошкообразных материалов [62, 78].

Целью данного этапа исследований является определение эффективности использования жидкого стекла в качестве связующего и определение химических и механических свойств полученных образцов.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

- Установление оптимального содержания жидкого стекла в составе брикетной смеси;
- Оценка влияния давления формования на прочность брикетов на сжатие;
- Определение прочности полученных образцов к механическим нагрузкам, возникающим при транспортировке и хранении.

При подготовке экспериментальных смесей связующее и влага добавлялись сверх 100%, где за базовую единицу принималась масса сухой ВДП и МНФ. Состав исследуемой шихты приведен в таблице 3.2.

Таблица 3.2 - Состав используемой шихты

Обозначение образцов	Состав шихты, %масс			
А	ВДП	МНФ	Количество $Na_2O(SiO_2)n$	Вода
	55	30	10	5

Для подтверждения элементного состава и изучения морфологии частиц был проведен микрорентгеноспектральный анализ (МРСА), результаты которого представлены на рисунке 3.4. На полученной спектральном анализе показаны пики кремния (Si) и кислорода (O). Присутствие натрия (Na) в спектре является прямым доказательством равномерного распределения связующего в объеме материала. Также обнаружены пики железа (Fe), кальция (Ca), алюминия (Al) и марганца (Mn), что полностью соотвествует с данными химического анализа исходных компонентов.

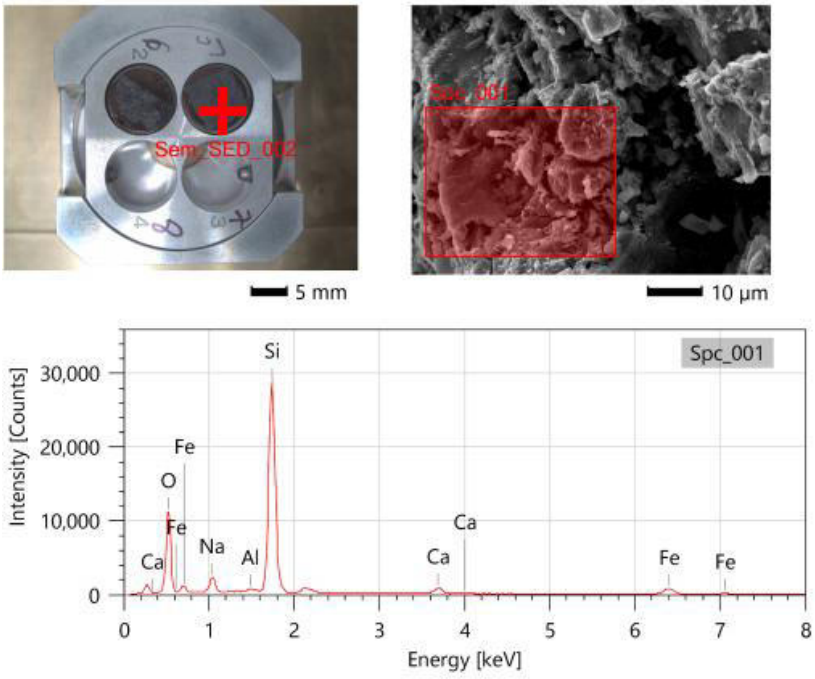


Рисунок 3.4 – Микрорентгеноспектральный анализ (МРСА)

Интенсивные пики кремния (Si) и кислорода (O) коррелируют с фазовым составом выскодисперсной пыли и силикатной связки.

Внешний вид полученных брикетов до и после механических испытаний (предел прочности на сжатие) представлен на рисунке 3.5.



а *б*

Рисунок 3.5 – Брикеты с жидким стеклом после сушки:
а) до испытаний; б) после испытаний

Результаты механических испытаний образцов на прочность при сжатии, а также данные химического анализа полученных образцов приведены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 - Результаты испытаний образцов

Номер образца	Шихта	Давление прессования, кН	Предел прочности на сжатие, МПа	Доля подрешетного продукта ≤ 10 мм, %	Содержание кремния, %	Содержание углерода, %
1	А	30	15, 2	44,2	66,1	0,083
2		40	16, 4	26, 1	66,2	0,082
3		50	23, 1	15,2	66,1	0,083
4		60	23, 1	15,1	66, 1	0,083

Анализ данных таблицы 3.3 показывает, что механическая прочность брикетов на сжатие возрастает с увеличением давления прессования. При минимальном давлении 30 кН прочность составляет 15,2 МПа, в то время как при повышении давления до 50 кН этот показатель достигает своего максимума в 23,1 МПа. Установлено, что использование давления ниже 40 кН (прочность 16,4 МПа) является нецелесообразным, так как это приводит к высокому выходу подрешетного продукта (от 26,1% до 44,2%), что делает невозможной качественную транспортировку и загрузку брикетов в печь. Оптимальным с точки зрения механической прочности на сжатие является образец №3, который при давлении 50 кН показывает прочность 23,1 МПа, что соответствует техническим требованиям для перегрузки материалов.

Химический анализ полученных образцов подтверждает стабильность элементного состава при использовании жидкого стекла. Содержание кремния

в брикетах варьируется в пределах 66,1 – 66,2%, что близко к значениям исходной ВДП. Содержание углерода остается стабильно (0,083%), но значительно чуть ниже предельно допустимых 0,1 % для марки ФС70.

Несмотря на достигнутые высокие показатели прочности при сжатии для образца №3, использование жидкого стекла выявило ряд существенных технологических недостатков. Высокая вязкость связующего препятствует достижению полной гомогенности смеси, а значительное введение щелочного компонента (Na_2O) может негативно повлиять на последующий процесс плавки. Кроме того, доля подрешетного продукта даже при максимальном давлении составляет 15%, что превышает норматив в 10%.

Таким образом, проведения сравнительных исследований с другими типами связующих, такими как каустическая сода и бентонит необходимо для получения качественных характеристик брикетов.

3.3 Использование каустической соды в качестве связующего при брикетировании ВДП

Выбор каустической соды (гидроксида натрия, NaOH) в качестве связующнго компонета основан на известных технических решениях, в частности на способах получения брикетов, описанных в патентах [79, 80]. Использование каустической соды (NaOH) в качестве связующего основано на её способности образовать силикатные соединения, обеспечивающие сцепление частиц.

Механизм взаимодействия NaOH с высокодисперсными материалами связан с растворением аморфного SiO_2 в щелочной среде и последующим образованием натриевых силикатов, выполняющих роль связующего [77, 78, 81].Подобные процессы подробно рассмотрены в работах по щелочной активации силикатных систем, где показано, что повышение концентрации гидкроксид натрия способствует структурообразования и увеличение прочных характеристик материала [83,84].

Применение 10-30% раствора NaOH в виде связующего мелкодисперсных фракций ВДП (в количестве 3-5% от массы шихты) обеспечивает формирование прочных межчастичных связей при последующнй сушке и уплотнении материала. [62-64]. Формирование брикетов с использованием каустической соды в виде связующего согласуется с современными представлениями о механизмах связывания при брикетировании мелкодисперсных материалов [24, 64].

Целью исследований в данном разделе является экспериментальная проверка эффективности каустической соды в качестве связующего и определение физико-механических свойств полученных образцов.

Основная задача — установить, обеспечивает ли данный способ требуемую механическую прочность.

Для приготовления смеси использовался 30%-ный раствор NaOH в количестве 10% от массы.

В таблице 3.4 приведены составы используемой шихты.

Таблица 3.4 - Состав используемой шихты

Обозначение шихты	Состав шихты, %масс			
В	ВДП	МНФ	Количество NaOH	Вода
	55	30	10	5

Результаты механических и химических испытаний образцов серии В представлены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 - Результаты проведенных исследований

Номер образца	Шихта	Давление прессования, кН	Предел прочности на сжатие, МПа	Доля подрешетного продукта ≤ 10 мм, %	Содержание кремния, %	Содержание углерода, %
1	В	30	19,1	35,4	60,1	0,091
2		40	20,1	23,6	60,2	0,091
3		50	20,2	21,3	60,1	0,090
4		60	20,2	21,3	60,1	0,091

Анализ данных таблицы 3.5 показывает, что использование каустической соды в качестве самостоятельного связующего не позволяет достичь необходимых эксплуатационных характеристик брикетов. Несмотря на то, что с ростом давления прессования прочность на сжатие увеличивается до 20,2 МПа, этот показатель не достигает рекомендуемого минимума в 25 МПа, необходимого для безопасной транспортировки [53].

Особое внимание следует обратить на прочность на сброс. Даже при максимальном давлении прессования (50 кН) доля подрешетного продукта составляет 21,3%, что более чем в два раза превышает допустимую норму согласно ГОСТ 1415-93 (не более 10%).



а



б

Рисунок 3.6 - Брикеты с каустической содой.
Образцы: *а* – до испытаний; *б* – после испытаний

На рисунке 3.6 показан внешний вид образцов с каустической содой до и после испытаний на сброс. Здесь подтверждается, что после испытаний образцы подвергаются интенсивному разрушению.

Также химический анализ показывает снижение содержания кремния в образце №3 до 60,0%, что может быть связано с избыточной концентрацией щелочного компонента и перераспределением фаз при высоком давлении. Содержание углерода остается в пределах нормы (0,091%), однако общие механические свойства делают данную технологию неэффективной.

3.4 Использование глины в качестве связующего при брикетировании ВДП

Глинистые материалы, благодаря высокому содержанию монтмориллонита, каолинита и других глинистых минералов, обладают способностью набухать в присутствии воды, также формировать пластичную массу, способную удерживать частицы пыли в форме [84, 85]. Связующее действие глин обусловлено химическими процессами и формированием прочной структуры при последующей сушке и уплотнении [86, 87].

Применение глинистых связующих широко распространено в процессах окатывания и брикетирования минерального сырья, где бентонит обеспечивает достаточную механическую прочность т формоустойчивость [86, 88].

В отличие от химических связок (жидкое стекло, каустическая сода), которые при высыхании могут становиться чрезмерно хрупкими, глина дает сырому брикету определенную эластичность и формирует прочную связку после сушки. А также, минеральная природа глины способствует сохранению целом брикета при температурах в плавильной печи, сохраняя его целиком.

Целбю исследований в данном разделе является экспериментальная проверка эффективности бентонита в качестве связующего и определение химических и механических свойства полученных образцов.

3.4.1 Математическое планирование экспериментов при брикетировании ВДП с бентонитовой глиной

Бентонитовая глина до настоящего времени не использовалось в качестве связующего при брикетировании ВДП.

При производстве железорудных окатышей бентонитовая глина используется в количестве 3-7% по масс. С целью определения оптимального количестве глины в шихте для брикетирования было проведено математическое планирование.

Математическое планирование и обработка результатов эксперимента выполнены по методике Малышева В.П. [95].

На данном этапе проведен детерминированный поисковый эксперимент с целью установления характера влияния бентонитовой глины на химического состава и механического свойства брикетов из ВДП. В качестве управляемых факторов приняты содержание бентонитовой глины и режимы прессования. Для каждого фактора задано пять уровней варьирования. В таблице 3.6 приведены факторы эксперимента, определяющие формирования брикетов.

Таблица 3.6 - Факторы эксперимента, определяющие условия формирования брикетов

Фактор	Наименование	Уровни факторов				
		1	2	3	4	5
X_1	Содержание бентонита, %	0	1	3	5	7
X_2	Давление прессования, кН	40	45	50	55	60

По методике Малышева В.П. проведен вероятностно-детерминированный эксперимент, включающий 25 опытов с варьированием состава шихты и связующего.

В таблице 3.7 приведена матрица эксперимента, включающая все сочетания уровней факторов для 25 опытов процесса брикетирования с использованием бентонитовой глины, а также значения функций отклика — предела прочности, плотности и показателя сброса.

Таблица 3.7 – Матрица эксперимента при брикетировании ВДП с бентонитовой глиной

№ опыта	Бентонит, % ($X_{1)}$	Давление прессования, кН (X_2)	Прочность, МПа (Yэ)	Плотность (Yэ)	Доля подоешетного продукта, % (Yэ)
1	0	40	15,96	1,98	14,40
2	0	45	17,94	2,00	14,20
3	0	50	10,56	2,01	9,12
4	0	55	23,27	2,01	9,13
5	0	60	23,27	2,01	9,13
6	1	40	15,80	2,11	12,72
7	1	45	17,20	2,15	11,80
8	1	50	15,80	2,18	11,00
9	1	55	19,00	2,19	10,80
10	1	60	19,20	2,20	10,50
11	3	40	21,20	2,94	7,46
12	3	45	21,80	2,96	7,50
13	3	50	21,12	2,99	7,80
14	3	55	22,90	3,01	8,20
15	3	60	23,00	3,02	8,50
16	5	40	14,20	2,78	8,40
17	5	45	14,50	2,79	7,20
18	5	50	14,20	2,81	6,10
19	5	55	15,30	2,82	5,90
20	5	60	15,40	2,83	5,80
21	7	40	12,00	2,32	8,76
22	7	45	12,20	2,33	7,60
23	7	50	12,00	2,35	6,50
24	7	55	12,70	2,36	6,20
25	7	60	12,80	2,37	6,00

В таблице представлены все 25 опытов, выполненных в соответствии с планом полного факторного эксперимента. Полученные значения прочности, плотности и сброса являются исходными данными для последующей статистической обработки.

Для оценки влияния содержания бентонита на функции отклика рассчитаны частные функции – средние значения прочности, плотности и сброса по пяти уровням давления для каждого содержания связующего. Результаты представлены в таблице 3.8.

Таблица 3.8 - Экспериментальные значения частных функций отклика

Содержание бентонита X_1, %	Прочность брикетов Y_1, МПа	Плотность брикетов Y_2, г/см³	Показатель сброса Y_3, %
0	10,56	2,01	14,40
1	15,80	2,71	12,72
3	21,12	2,94	7,46
5	14,20	2,98	8,40
7	12,00	2,99	8,76

Из данных таблицы 3.8 видно, что изменение содержания бентонитовой глины носит нелинейный характер. При добавлении 3 % связующего достигаются максимальные показатели прочности (23,20 МПа) и плотности (1,99 г/см³). Дальнейшее форсирование концентрации бентонитовой глины до 7 % снижает прочность до 13,20 МПа.

Для количественной идентификации наблюдаемых явлений осуществлена аналитическая аппроксимация полученных массивов полиномами второго порядка. Выведенные одномерные уравнения регрессии и их статистические характеристики показаны в таблице 3.9.

Таблица 3.9 – Регрессионные модели частных функций отклика

Функция отклика	Уравнение регрессии	Коэффициент детерминации R^2
Предел прочности на сжатие, МПа (при 50 кН)	$Y_1 = -0{,}2651x^2 + 1{,}2268x + 21{,}399$	0,7335
Плотность, г/см³ (при 50 кН)	$Y_2 = -0{,}0665x^2 + 0{,}5393x + 1{,}7979$	0,9368
Доля подрешетного продукта, % (при 50 кН)	$Y_3 = 0{,}3082x^2 - 2{,}9626x + 14{,}650$	0,9306

Высокие значения коэффициентов детерминации (R^2 от 0,7335 до 0,9368) свидетельствуют об адекватности уравнений экспериментальным данным. Отрицательные коэффициенты при квадратичных членах для прочности (-0,2651) и плотности (-0,0665) математически подтверждают экстремальный характер кривых с точкой локального максимума в области 3 % бентонита.

Графическая интерпретация полученных зависимостей представлена на рисунках 3.7–3.9.

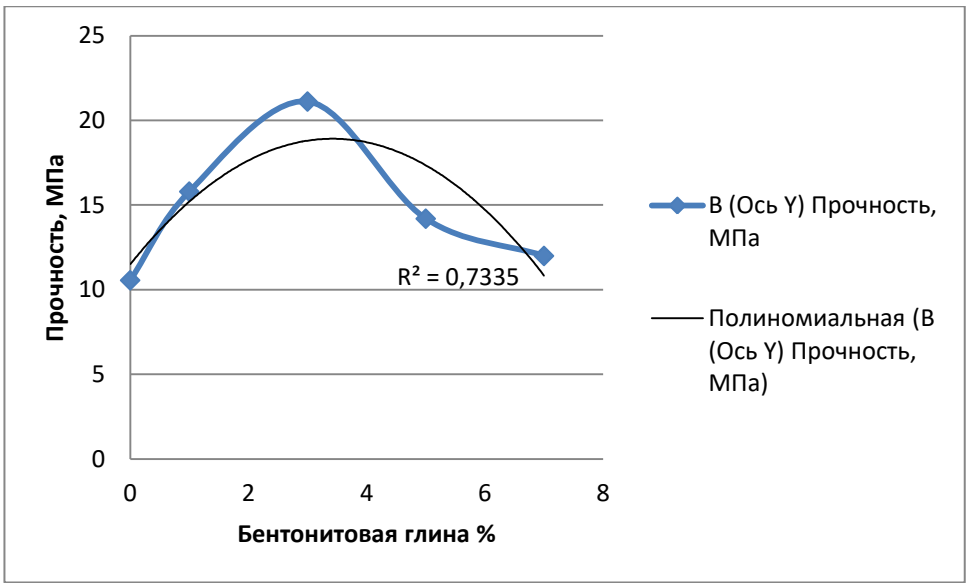


Рисунок 3.7 – Зависимость предела прочности на сжатие брикетов из ВДП от содержания бентонитовой глины (при фиксированном давлении прессования 50 кН)

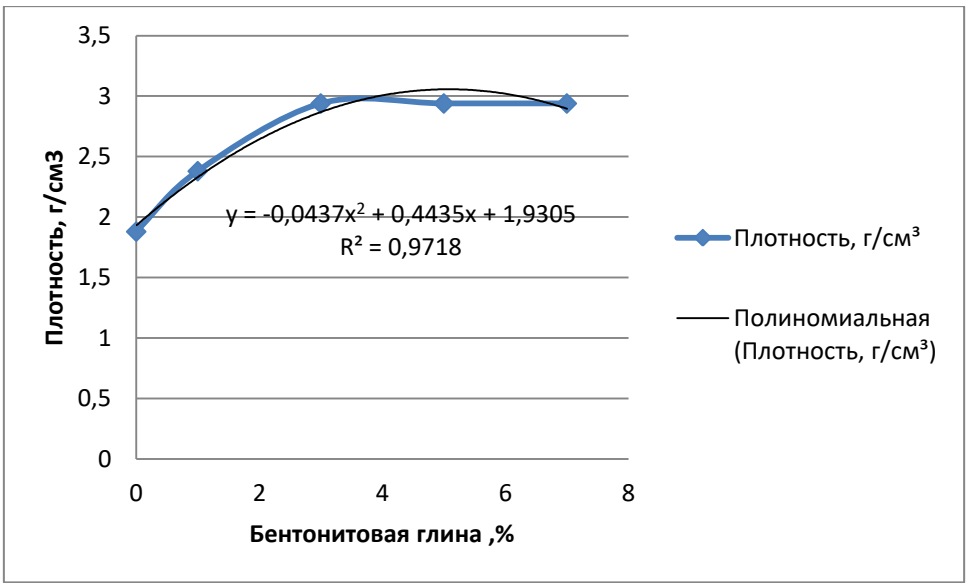


Рисунок 3.8 – Зависимость плотности брикетов из ВДП от содержания бентонитовой глины (при фиксированном давлении прессования 50 кН)

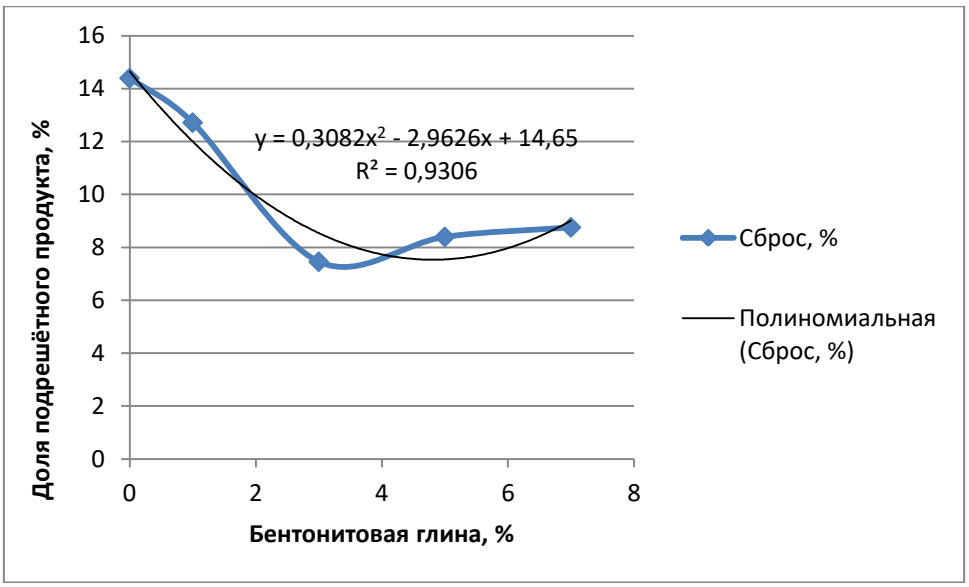


Рисунок 3.9 – Зависимость показателя сброса (доли подрешётного продукта) брикетов из ВДП от содержания бентонитовой глины (при фиксированном давлении прессования 50 кН)

Для оценки чистого влияния силового фактора на прессуемость металлургического отхода ВДП без использования связующего материала (х = 0 %) проанализировано изменение предела прочности брикетов в диапазоне давлений от 40 до 60 кН. Экспериментальные точки и аппроксимирующий полином представлены на рисунках 3.10 – 3.12

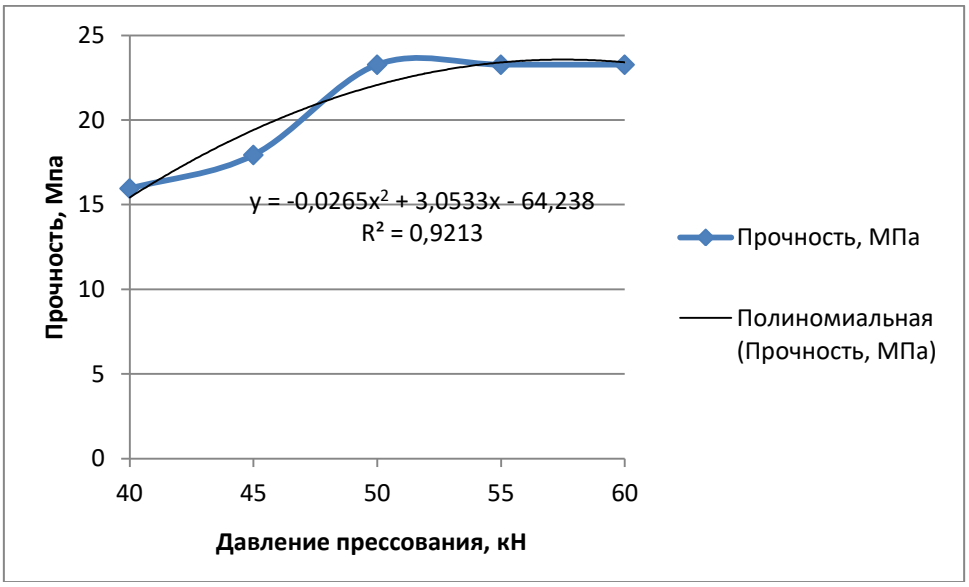


Рисунок 3.10 – Зависимость предела прочности на сжатие брикетов из ВДП от давления прессования (без добавления связующего, х = 0 %)

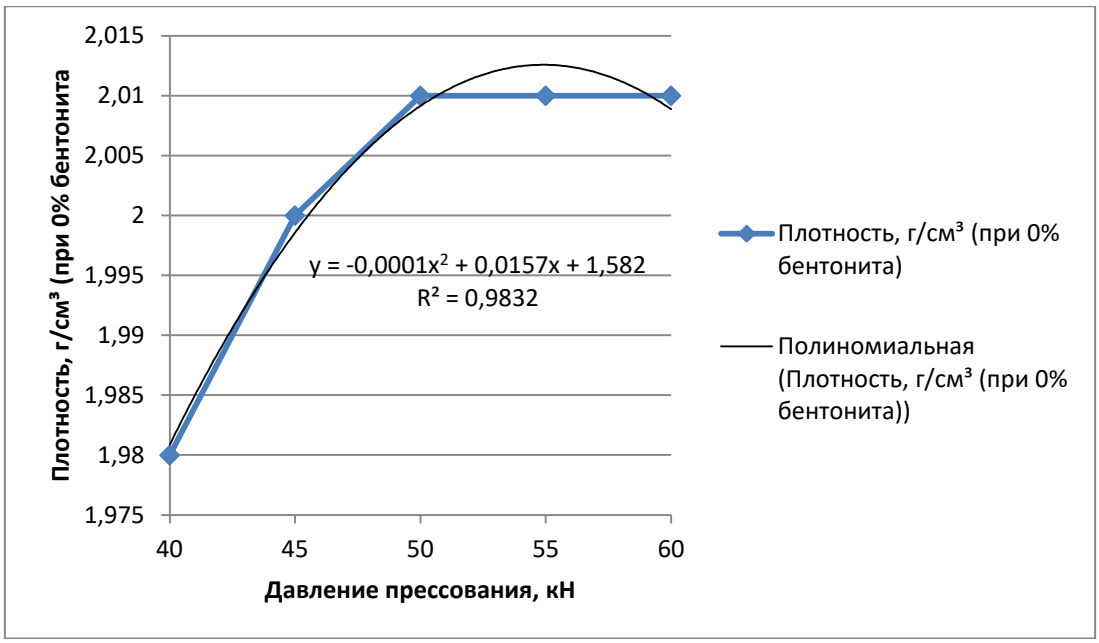


Рисунок 3.11 – Зависимость макроструктурной плотности брикетов из ВДП от давления прессования (без добавления связующего, x = 0 %)

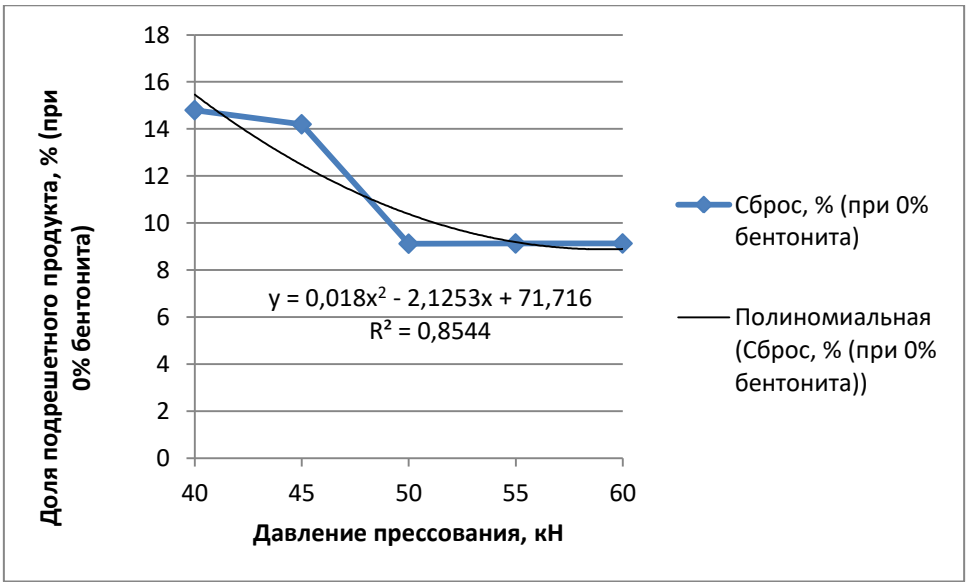


Рисунок 3.12 – Зависимость показателя сброса брикетов из ВДП от давления прессования (без добавления связующего, x = 0 %)

Методом наименьших квадратов по результатам полного факторного эксперимента построена эмпирическая формула для расчёта прочности брикетов при сжатии (МПа) в зависимости от содержания бентонита x (%) и давления прессования P (кН):

$$Y=-6,68+1,63x+1,01P-0,363x2-0,00982P2-0,0074xP$$

Коэффициент детерминации $R^2=0,8741$.

Проверка уравнения путём подстановки экспериментальных значений показала хорошее совпадение расчётных и экспериментальных данных.

Установлено, что увеличение содержания бентонитовой глины до 3–4 % способствует росту прочности брикетов, тогда как дальнейшее увеличение приводит к её снижению.

3.4.2. Экспериментальные исследования

На основании разработанной матрицы планирования были проведены экспериментальные исследования.

Составы исследуемой шихты приведены в таблице 3.10. Количество высокодисперсной пыли (ВДП) во всех замесах оставалось неизменным. Увлажнение производилось водой в количестве 5% сверх 100% массы сухой навески.

Таблица 3.10 - Состав используемой шихты

Обозначение образцов	Количество бентонитовой глины,%	Вода,%
1	7	5
2	5	5
3	3	5

Далее внешний вид сырых брикетов и после сушки показаны в рисунке 3.13.



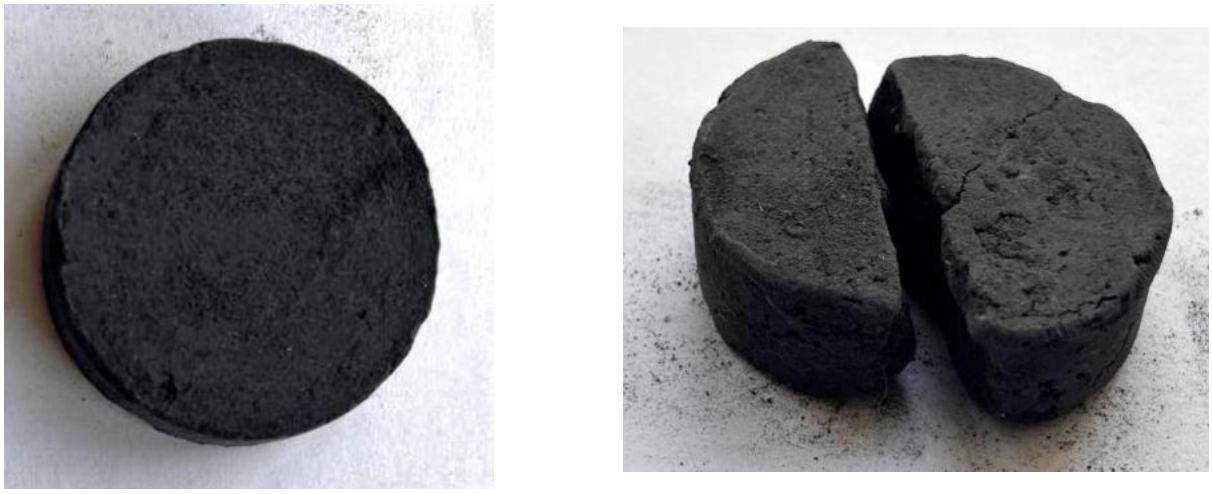
Рисунок 3.13 – Образцы брикетов после сушки

Результаты механических и химических испытаний образцов представлены в таблице 3.11.

Таблица 3.11 - Результаты проведенных исследований

Номер образца	Давление прессования, кН	Предел прочности на сжатие, МПа	Доля подрешетного продукта ≤ 10 мм, %	Содержание кремния, %	Содержание углерода, %
1	30	20,2	12,1	72,4	0,055
2	40	20,3	12,3	73,8	0,055
3	50	25,1	9,8	73,9	0,055

Анализ данных таблицы 3.11 показывает, что применение бентонитовой глины обеспечивает кратное повышение прочности брикетов. Предел прочности на сжатие достигает 20,3–25,1 МПа, что значительно выше показателей для жидкого стекла и соды. При давлении 50 кН (образец №3) доля подрешетного продукта составил 9,8 %, что соответствует нормам ГОСТ 1415-93 [2]. На рисунке 3.14 показано состояние образцов до и после испытаний на сброс.



а *б*

Рисунок 3.14 – Брикеты с бентонитовой глиной
Образцы: *а* – до испытаний; *б* – после испытаний

визуальный анализ (рисунок 3.14, б) подтверждает, что брикеты с каустической содой и жидким стеклом не прочные и при падении разлетаются в пыль, а бентонитовая глина делает их более прочными и вязками. При ударе такой брикет не превращается в пыль, а просто распадается на несколько крупных частей. Благодаря этому сырье не теряется при транспортировке и соответствует по требованиям норматива.

Таким образом, использование бентонитовой глины в качестве связующего является решением, обеспечивающим повышение прочности брикетов и снижение потерь при транспортировке. Полученные результаты свидетельствуют о том, что химические и механические свойства бентонитовой глины превосходят показатели других связующих материалов.

3.5 Сравнительный анализ влияния типа связующего

В завершение базовых исследований был проведен сравнительный анализ эффективности трех изученных связующих систем. Основными критериями оценки послужили механическая прочность на сжатие, устойчивость к ударным нагрузкам (прочность на сброс) и сохранение целевого химического состава (содержание кремния и углерода).

Анализ полученных результатов позволяет выявить ряд важных закономерностей влияния типа связующего на качество готовой продукции. Установлено, что применение бентонитовой глины обеспечивает существенный прирост механической прочности: показатели на сжатие увеличились на 42% по сравнению с образцами на жидком стекле и на 74% по сравнению с каустической содой.

Выбор бентонита в качестве связующего подтверждается и результатами испытаний на сброс, где доля подрешетного продукта составил 10%, что полностью соответствует по требованиям ГОСТ 1415-93. Внешний вид брикетов на основе бентонита до и после механического воздействия (рисунок 3.14) наглядно иллюстрирует их в сохранении формы и минимальном потери.

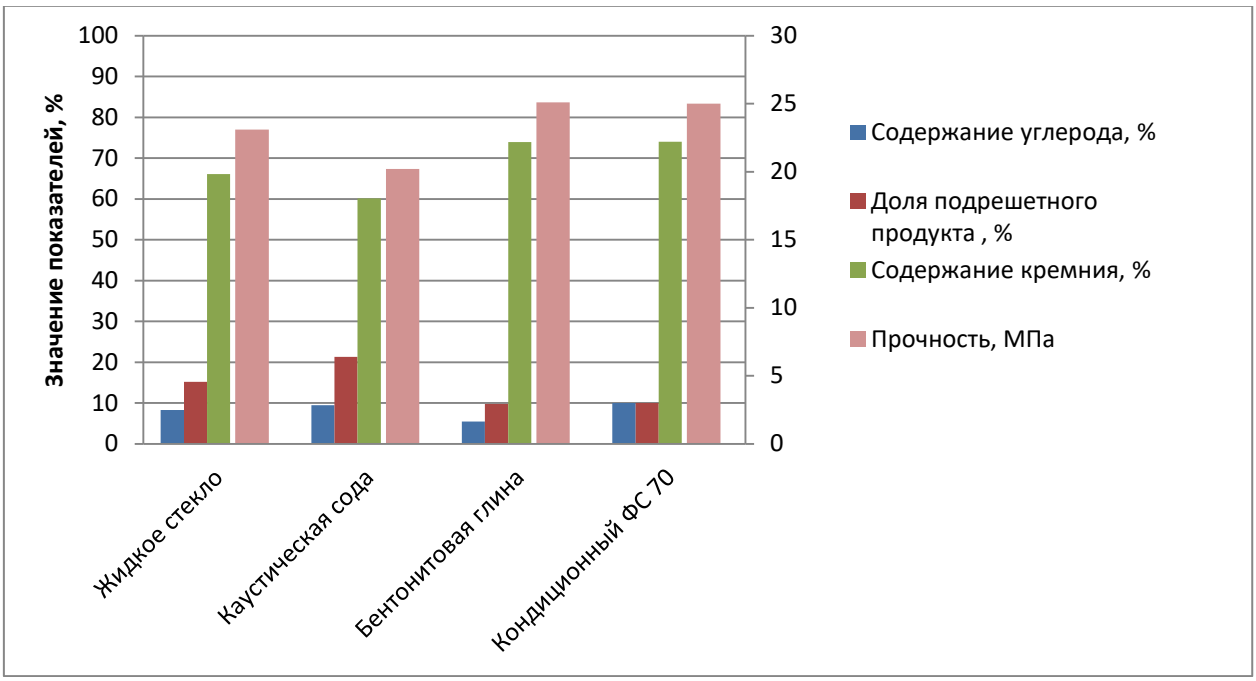


Рисунок 3.15 – Сравнительный анализ влияния типа связующего на свойства брикетов

На основании результатов исследований была построена диаграмма (рисунок 3.15), иллюстрирующая влияние различных связующих материалов на прочность брикетов, выход подрешётного продукта, а также содержание кремния и углерода в полученном продукте. Для удобства графического представления все показатели были приведены к единому масштабу. В частности, значения содержания углерода представлены в виде величины, умноженной x*100. Показатели предел прочности всех образцов были нормированы относительно прочности кондиционного ферросилиция марки ФС-70, принятой за 100%. Такое представление данных не меняет соотношения между соответствующими параметрами и позволяет представить все данные на одной диаграмме в одном масштабе.

Как видно из рисунка 3.15, применение бентонитовой глины обеспечивает повышение прочности брикетов, снижение доли подрешётного продукта и сохранение содержания кремния на уровне, соответствующем требованиям ГОСТ, по сравнению с жидким стеклом и каустической содой.

Выводы по разделу

На основании проведенных экспериментальных исследований были сделаны следующие выводы:

1) Определено, что использование бентонитовой глины в качестве связующего позволяет получить брикеты повышенной прочности. По данному показателю брикеты с бентонитовой глиной значительно превосходят показатели прочности брикетов с использованием жидкого стекла и каустической соды.

2) Установлено, что прочность брикетов с бентонитовой глиной составляет около 25 МПа, что является достаточным для транспортировки и складирования брикетов согласно литературным данным.

3) Оптимальным давлением прессования является 50 кН, при котором обеспечивается минимальный выход доли подрешетного продукта (не более 10%), что соответствует требованиям по ГОСТ 1415-93, дальнейшее увеличение прессования не приводит к повышению прочности

4) Установлено, что содержание бентонитовой глины в составе шихты не должно превышать 3–4 % по массе, поскольку дальнейшее увеличение количества связующего не приводит к заметному повышению прочности брикетов, но способствует увеличению содержания примесей в конечном продукте.

5) Подтверждено, что брикеты на основе бентонитовой глиной по химическому составу (содержание кремния ~70,3%) полностью соответствуют требованиям к кондиционному ферросилицию марки ФС70, что есть возможность утилизировать пыли и использовать как кондиционный продукт.

4 ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЖЕЛЕЗОРУДНОГО КОНЦЕНТРАТА В КАЧЕСТВЕ КОМПОНЕНТА ШИХТЫ ПРИ БРИКЕТИРОВАНИИ ВДП

4.1 Теоретическое обоснование использования железорудного концентрата в качестве компонента шихты при брикетировании

Одной из ключевых проблем при брикетировании высокодисперсной пыли ферросплавного производства является получение брикетов, обладающих достаточной механической прочностью и плотностью [25, 89]. Недостаточная прочность ограничивает возможности транспортировки и загрузки брикетов в плавильные печи, тогда как пониженная плотность приводит к их всплыванию на поверхность расплава, неполному погружению и расплавлению, возникновению ликвации и, как следствие, снижению качества готового металла [29, 93].

Основными проблемами при брикетировании ВДП являются низкая механическая прочность и недостаточная плотность готовых изделий [25, 63]. Первую проблему решают использованием различных связующих в составе шихты для прессования [61-63], а вторую проблему в большинстве случаев путем повышения давления прессования [73, 92].

Повышение давления прессования традиционно рассматривается как способ увеличения плотности и прочности брикетов, поскольку при возрастании давления происходит более тесное сближение частиц, уменьшается объем пор и увеличивается площадь межчастичных контактов [73]. В определенном диапазоне давлений наблюдается зависимость плотности прессовки от давления прессования [92]. Однако увеличение давления сопровождается ростом энергозатрат, ускоренным износом прессового оборудования и снижением производительности [26].

Кроме того, существует структурное ограничение уплотнения дисперсной системы: согласно теории плотнейшей упаковки частиц даже при идеальной укладке сохраняется остаточная пористость порядка 25-30% [72, 75, 90], что делает дальнейшее повышение плотности исключительно за счет давления мало результативным.

В этой связи целесообразным представляется изменение гранулометрического состава шихты. Использование частиц различного размера способствует формированию плотной структуры за счет заполнения пор, а более крупные частицы образуют несущий каркас, а мелкие заполняют межзерновые промежутки, уменьшая суммарную пористость системы [72, 91, 94]. Подобный подход широко применяется в порошковой металлургии и при технологии окатышей железорудного сырья [22, 29, 92].

Было высказано предположение, что частичное введение железорудного концентрата (ЖК) в состав шихты при брикетировании ВДП будет способствовать формированию более плотной структуры и увеличению средней плотности готового изделия. Железорудный концентрат характеризуется высокой истинной плотностью и отличным фракционным

составом по сравнению с высокодисперсной пылью, что создает предпосылки для более рациональной упаковки частиц при совместном прессовании [91].

Частичное введение железорудного концентрата может способствовать снижению общей пористости брикета, увеличению его средней плотности и формированию более жесткой структурной основы, воспринимающей внешние нагрузки [89, 90]. Повышение плотности, в свою очередь, должно обеспечить лучшую устойчивость брикета в расплаве и уменьшить вероятность его всплывания [93]. Дополнительным фактором является возможное участие оксидов железа в металлургических процессах при плавке, что может оказывать влияние на восстановительные реакции [29, 30].

Таким образом, теоретический анализ позволяет предположить, что введение железорудного концентрата в состав шихты при брикетировании высокодисперсной пыли является обоснованным способом повышения плотности и эксплуатационных характеристик брикетов без существенного увеличения давления прессования.

Для проверки этого предположения были проведены следующие эксперименты.

4.2 Экспериментальные исследования по использованию железорудного концентрата в качестве компонента шихты при брикетировании ВДП

Целью данного этапа является оптимизация состава шихты путём введения железорудного концентрата для повышения плотности и корректировки химического состава брикетов до уровня кондиционного продукта. Подробные характеристики используемых материалов (ВДП, МНФ, ЖК и бентонита) приведены в главе 2.

Для проведения исследований были подготовлены опытные образцы с варьируемым содержанием ЖК от 10 до 20% при постоянном давлении прессования 50 кН. Составы экспериментальных смесей представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 - Состав шихты для изготовления опытных брикетов

Маркировка образца	Количество ВДП, %	Количество ЖК,%	Количество МНФ, %	Бентонитовая глина,%	Вода,%
ЖК 10	50	10	35	3	2
ЖК15	50	15	30	3	2
ЖК20	50	20	25	3	2

Использование ЖК положительно сказывается на плотности брикета за счет заполнения межчастичного пространства мелкодисперсной фазой концентрата. Однако при содержании ЖК выше 15% прочность стабилизируется, а выход

подрешетного продукта начинает расти, что указывает на предел насыщения структуры мелкой фракцией.

На опытных образцах проводились исследования структуры, химического и элементного состава, измерялась прочность на сжатие и плотность.

Далее в таблице 4.2 приведен химический состав опытных брикетов и состав ФС70 согласно ГОСТ 1415-93, который использовался в качестве образца сравнения.

Таблица 4.2 - Химический состав опытных брикетов

Марка	Si	Fe	C	S	P	Al	Mn	Cr
ФС70	68,0-74,0	26-28	0,1	0,02	0,04	2	0,4	0,4
ЖК 10	69,60	27,00	0,12	0,033	0,045	1,92	0,40	0,38
ЖК15	72,1	27,0	0,10	0,021	0,040	2,00	0,40	0,40
ЖК20	68,70	28,10	0,15	0,040	0,040	2,02	0,42	0,42

Как видно из данных таблицы 4.2, полученные опытные образцы по содержанию основных элементов (Si, C, Fe) максимально приближены к составу кондиционного ферросилиция марки ФС70. Образцы №1 и №2 полностью соответствует диапазону ГОСТ по кремнию (68,0- 74,0%) тогда как в образце №3 при максимальном содержании ЖК (25%) наблюдается незначительное превышение по железу (Fe – 28,10%) относительно верхней границы норматива. Содержание углерода в образцах №1 и №2 (0,10-0,12%) также близко к требуемому значению, однако в образце №3 оно возрастает до 0,15%, что обусловлено элементным составом используемого концентрата. Таким образом, наиболее сбалансированным является образец №2, который по большинству показателей соответствует марке ФС70, в то время как повышенный примесей в образце №3 может ограничить его использование при легировании и раскислении стали.

В целом такие брикеты могут быть использованы при раскислении стали, поскольку они обычно лишь частично замещают кондиционные ферросплавы в шихте. Однако повышенное содержание серы (и в отдельных случаях фосфора) необходимо учитывать при расчете массы вводимого раскислителя или лигатуры и при оценке влияния на качество металла [58,59].

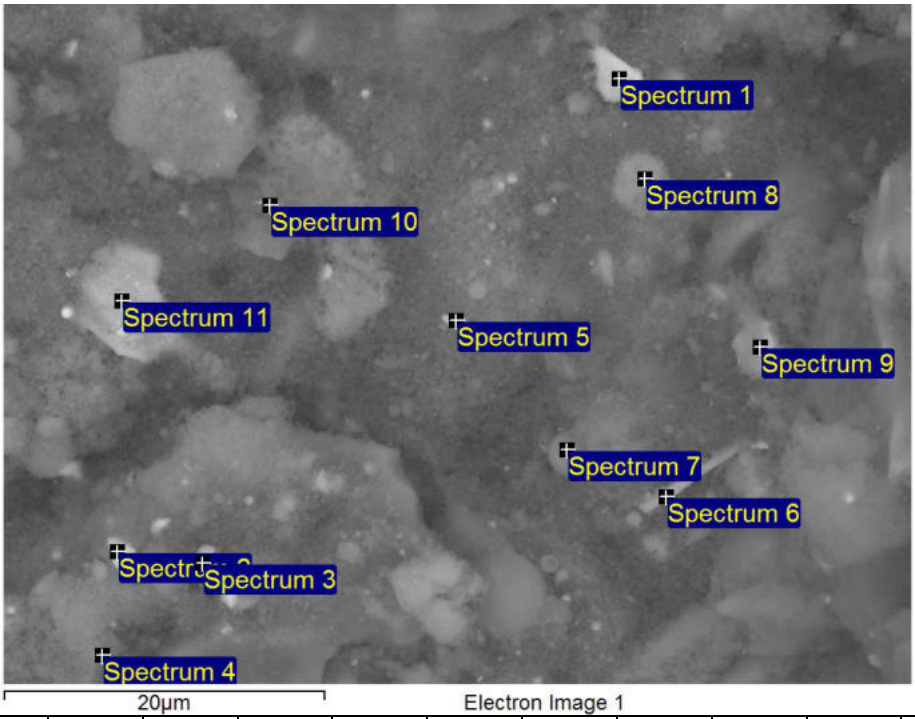
Таблица 4.3 - Результаты экспериментов

Образец	Предел прочности на сжатие, МПа	Плотность, г/см^3	Доля подрешетного продукта ≤ 10 мм, %
ФС 70	25	5,00	10
ЖК 10	25,4	3,90	15,1

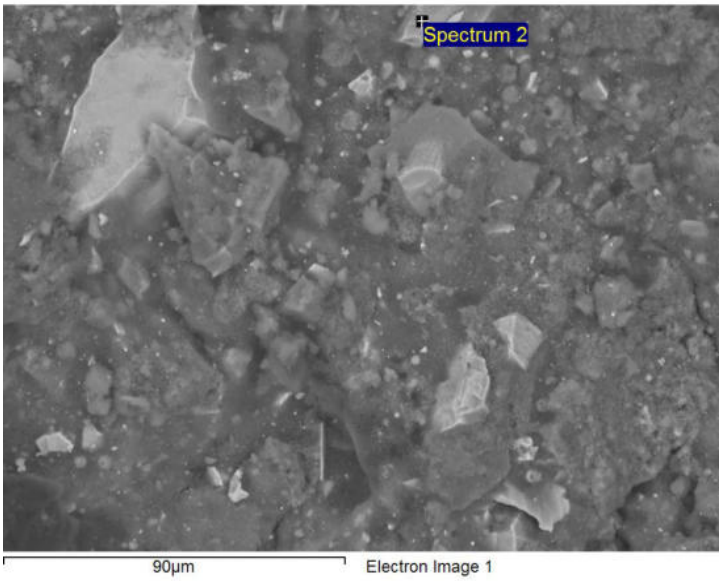
ЖК15	25,7	4,80	11,2
ЖК20	25,0	4,92	14,3

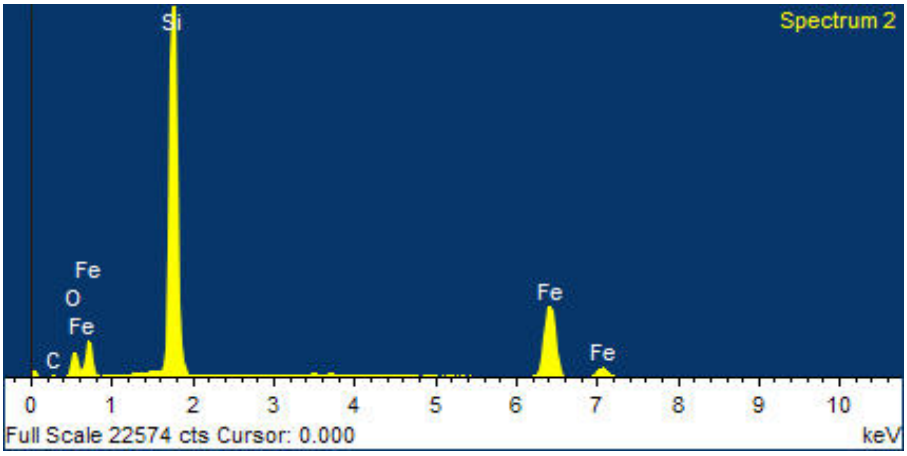
На опытных брикетах также были определены плотность и прочность на сжатие, результаты анализа приведены в таблице 4.3. Результаты сравнивались как с брикетом, полученным без добавления ЖК, так и с кондиционным ферросплавом.

На этапе исследования был выполнен микрорентгено-спектральный анализ (МРСА) в различных фазовых областях опытных образца ЖК15. Выбор данного образца обясняется тем, что по своим химическим свойствам и по механическим свойствам соответствует кондиционному ФС70. На рисунке 4.11 приведены структуры и соответствующий спектр образца ЖК15.



Spectrum	In stats.	O	Na	Mg	Al	Si	S	Ca	Ti	Mn	Fe		Total
Spectrum 1	Yes	1.22				32.90					65.88		100.0
Spectrum 2	Yes	13.95				48.39					37.66		100.0
Spectrum 3	Yes	5.11				35.82		0.35			58.72		100.0
Spectrum 4	Yes	19.44			0.82	42.09				0.54	37.11		100.0
Spectrum 5	Yes	3.04	0.27	0.18	0.24	7.79		0.43			88.05		100.0
Spectrum 6	Yes	2.94				39.87					57.19		100.0
Spectrum 7	Yes	34.30	0.88	0.80	0.74	58.77		2.01		0.26	2.23		100.0
Spectrum 8	Yes	12.86				86.23			0.19		0.72		100.0
Spectrum 9	Yes	21.82	0.34	0.53	1.30	45.85	12.36	15.77			2.03		100.0
Spectrum 10	Yes	37.78	0.28			61.31					0.63		100.0
Spectrum 11	Yes	35.07	0.78	0.76	0.55	59.31		1.24		0.22	2.08		100.0
Max.		59.31	0.88	0.80	1.30	86.23	12.36	15.77	0.19	0.54	88.05		
Min.		5.11	0.27	0.18	0.24	1.22	12.36	0.35	0.19	0.22	0.63		





Образец ЖК15

Рисунок 4.1 – Структуры и спектры образцов

Как и ожидалось, во всех образцах присутствуют кремний, железо, кислород и углерод. В качестве примесей в небольших количествах присутствуют кальций, алюминий, марганец. Характер элементов наглядно отражен на картах распределения элементов (рисунок 4.2). Во всех образцах обнаружены основные элементы: кремний, железо и углерод.

Также в небольших количествах присутствуют кальций, алюминий, марганец и натрий, что связано с составом бентонитовой глины. Высокое содержание кислорода позволяет предположить, что железо и кремний в образцах находится в виде оксидов.

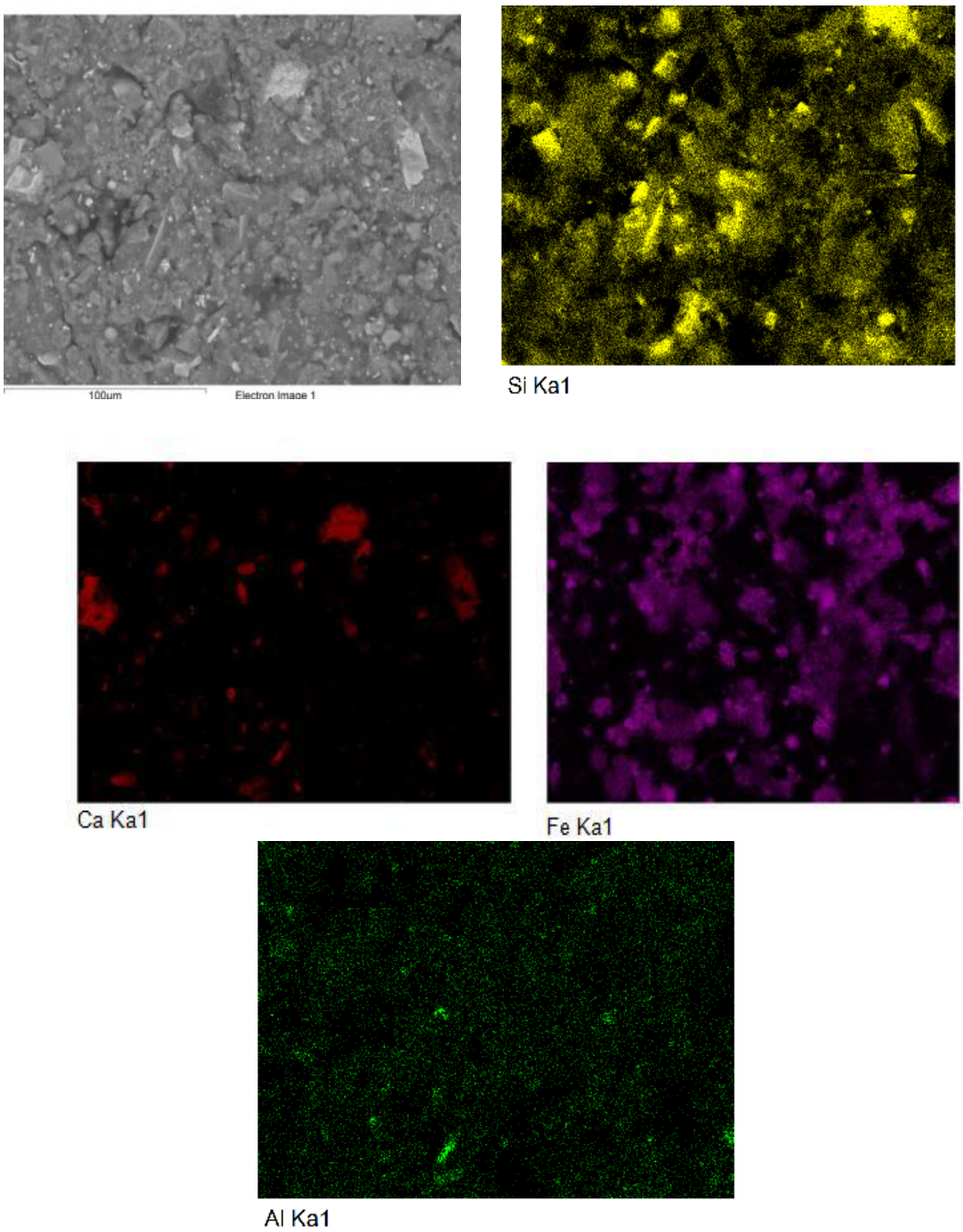
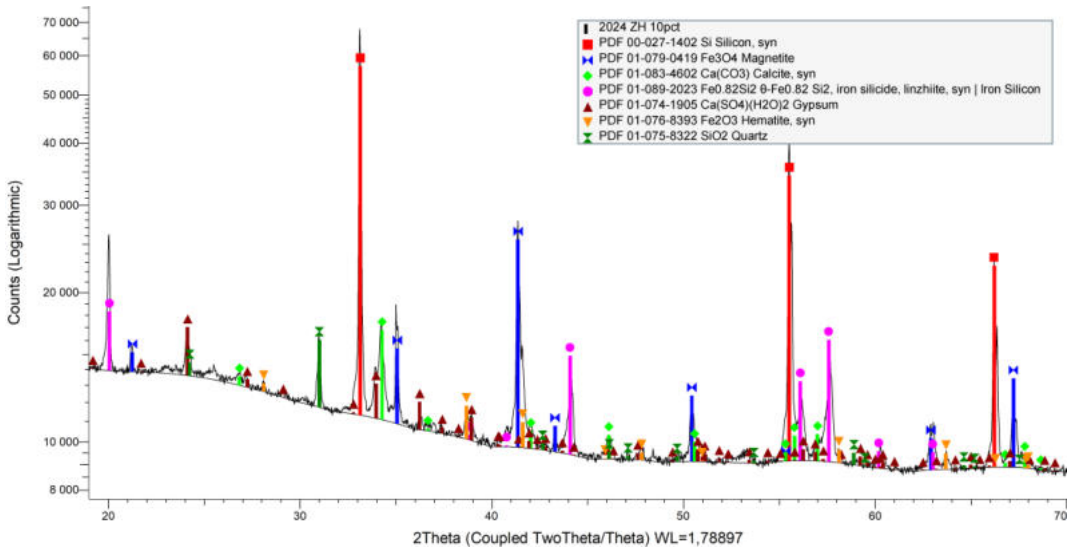


Рисунок 4.2 – Карта распределения элементов

С целью выявления фаз, в которых присутствуют указанные элементы, был проведен рентгенофазовый анализ (РФА), результаты которого приведены на рисунке 4.3.



ЖК 15

Рисунок 4.3 - Качественный фазовый анализ образца ЖК 15 (DiffracSuite EVA v6.0; ICDD PDF-2 2023, фрагмент дифрактограммы; логарифмический масштаб по оси y для показа линий с малой интенсивностью)

Результаты рентгенофазового анализа показали, что основными фазами являются магнетит, кварц, гематит, силициды железа и кальцийсодержащие фазы.

На основании данных таблиц 4.2 и 4.3 построена диаграмма (рисунок 4.4), иллюстрирующая соотношение между содержанием ЖК в шихте, прочностью, плотностью и содержанием кремния и углерода.

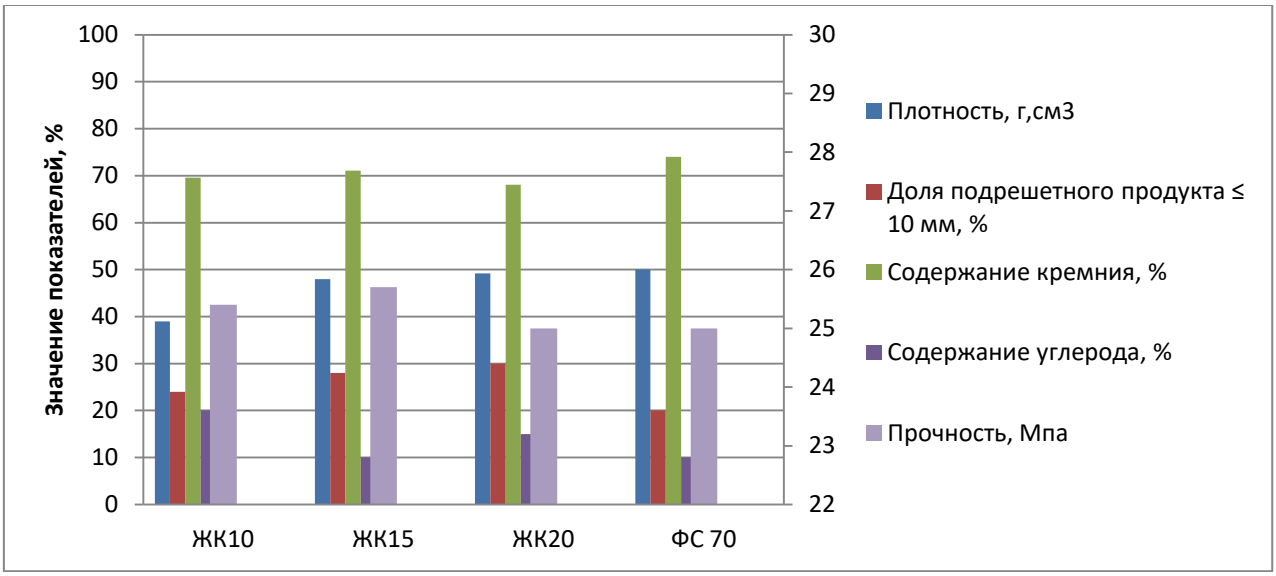


Рисунок 4.4 –Сравнение между прочностью, плотностью, содержанием углерода и кремния опытных брикетов и содержанием ЖК в шихте

Для удобства все данные приведены к одному масштабу, т.е. величина плотности и содержание углерода представлена, как x^* 100. Такое предоставление данных не меняет соотношения между соответствующими параметрами и позволяет представить все данные на одной диаграмме в одном масштабе.

Как видно из рисунка 4.4, использование ЖК в составе шихты положительно сказывается на физико-механических характеристиках продукции. Повышение плотности брикета при добавлении ЖК объясняется заполнением межчастичных пустот ВДП более дисперсными частицами концентрата. В ином случае, при использовании ЖК с более низкой дисперсностью (например, агломерационного концентрата), частицы железа могут выполнять роль жесткого «каркаса», также способствуя упрочнению структуры.

Однако использование ЖК свыше 15% приводит к постепенному снижению содержания кремния и нежелательному росту содержания углерода в готовом брикете. Ввод железорудного концентрата в качестве компонента шихты позволяет одновременно достичь двух целей: повысить плотность брикета и сохранить кондиционный химический состав, так как концентрат содержит железо и кремний в необходимых пропорциях.

Проведенные исследования показали, что оптимальным является введение 10–15% железорудного концентрата по массе. Это обеспечивает увеличение прочности и плотности брикета в среднем на 20% при сохранении состава, близкого к марке ФС70. Улучшение таких характеристик брикета, как прочность и плотность обеспечивает лучшую сохранность продукта при транспортировке, т.е. повышению годного, а также обеспечивает лучшие условия при раскислении и легировании, что, в конечном итоге, приводит к повышению качества стали.

Следует отметить, что применение ЖК при брикетировании пыли производства других ферросплавов (например, ферромарганца) требует дополнительных исследований, так как это может привести к значительному отклонению состава брикета от требований соответствующих ГОСТ.

На основе результатов, полученных в ходе экспериментальных исследований (раздел 4.3), был разработан и защищен патентом на полезную модель РК способ получения кондиционных брикетов из высокодисперсной пыли ферросплавного производства (патент РК №10925).

Главным техническим преимуществом разработанного метода по сравнению с наиболее близким аналогом (патентом РФ 2 272 082) является решение проблемы низкой плотности брикетов. Как показал анализ, брикеты с низкой плотностью склонны к всплыванию на поверхность расплава, что ухудшает их растворимость и электропроводность ванны печи. Введение в состав шихты 10–15% железорудного концентрата и 3% бентонитовой глины позволяет достичь плотности, сопоставимой с кусковым ферросилицием марки ФС70.

4.3 Электропроводность брикетов в зависимости от содержания железорудного концентрата

Определение электропроводности брикетов необходимо для оценки их технологической пригодности в металлургических процессах. Электрические свойства брикетированного материала косвенно характеризуют плотность структуры, степень контакта между частицами проводящих фаз и однородность распределения компонентов в объеме брикета. Повышенная электропроводность свидетельствует о формировании более устойчивой контактной сети между железосодержащими частицами и это может оказывать влияние на теплопередачу в печных агрегатах. Кроме того, это способствует более равномерному нагреву материала и влиять на процессы восстановления в печи.

В печных агрегатах электропроводность определяет, как черех брикетов проходит электрический ток и как распределяется нагрев. Поэтому определение этого показателя является важным этапом оценки качества брикетов и позволяет подтвердить правильность выбранного состава шихты.

Целью исследований на данном этапе является оценка влияния состава опытного брикета на электрические свойства. Исследования выполнены для серий образцов (глава 4.2) с содержанием ЖК 10% (ЖК10), 15% (ЖК15) и 20% (образец 4) (по массе) при постоянных условиях формирования и одинаковой геометрии образцов.

Для оценки электрических свойств брикетов проведены измерения полного электрического сопротивления образцов с использованием LCR-моста Rohde & Schwarz HM8118 (рисунок 4.5).

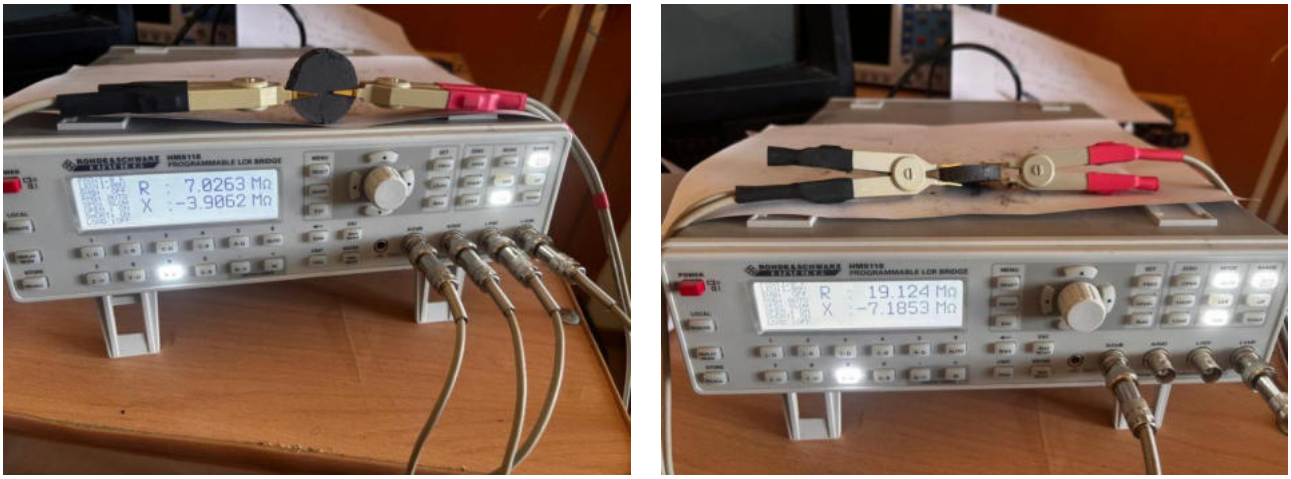


Рисунок 4.5 - Измерение электрического сопротивления брикетов на LCR-мосте Rohde & Schwarz HM8118

Измерения выполняли при прижатии контактов к торцевым поверхностям образца. В качестве измеряемой величины принимали активную составляющую сопротивления R (в МΩ), отображаемую на экране прибора.

Испытуемые образцы имели цилиндрическую форму диаметром 35 мм и толщиной 10 мм.

Площадь поперечного сечения рассчитывалась по формуле:

$$S = \pi r^2 = \pi \left(\frac{d}{2}\right)^2 \quad (4.1)$$

где, d – диаметр образца;

r - радиус.

При d=0,035м радиус составляет r= 0,0175 м, тогда:

$$S = \pi(0{,}0175)^2$$

$$S=3{,}1416 \cdot 0{,}00030625$$

$$S = 9{,}62 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$$

Толщина образца:

$$L=0{,}01 \text{ м}.$$

Удельное электрическое сопротивление определялось по выражению:

$$\rho = R \cdot \frac{S}{L} \quad (4.2)$$

где R — электрическое сопротивление, Ом;

ρ— удельное сопротивление, Ω·м.

Электропроводность рассчитывали как величину, обратную удельному сопротивлению:

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \quad (4.3)$$

где σ— электропроводность, См/м.

Поскольку сопротивление измерялось в МΩ, удобно использовать пересчётный коэффициент для геометрии Ø35×10 мм:

$$\frac{S}{L} = 0{,}096211$$

$$\rho(\Omega \cdot \text{м}) = \text{R}(\text{M}\Omega) \cdot 96\,211, \sigma = \frac{1}{\rho}$$

По экспериментальным значениям сопротивления рассчитаны удельное сопротивление ρ и электропроводность σ. Результаты расчётов удельного сопротивления и электропроводности брикетов при различном содержании железорудного концентрата приведены в таблице 4.4. Все измерения проводились для каждого образца 10 раз.

Таблица 4.4 - Электрические характеристики брикетов при различном содержании железорудного концентрата

Содержание ЖК, %	Удельное сопротивление $\bar{\rho}$, Ом*м	Электропроводность $\bar{\sigma}$, $Ом^{-1}/м$
ЖК10	2.50×10^{6}	3.10×10^{-7}
ЖК15	7.50×10^{6}	1.33×10^{-7}
ЖК20	3.19×10^{6}	2.03×10^{-7}

Примечание: средние значения ρ и σ рассчитаны по формулам (4.2)–(4.3) для геометрии Ø35×10 мм.

σ15%>σ10%>σ25%

То есть лучшие электрические свойства (максимальная σ / минимальная ρ) у состава 15% ЖК.

Полученные данные свидетельствуют о существенном влиянии содержания железорудного концентрата на электрические свойства брикетов. Установлено, что зависимость электропроводности от содержания ЖК носит экстремальный характер.

На рисунке 4.6 представлена зависимость электропроводности брикетов от содержания железорудного концентрата. Минимальное значение σ наблюдается при 15% ЖК, что подтверждает экстремальный характер зависимости.

Такое поведение системы (минимум в середине графика) можно объяснить сменой механизма проводимости и перестройкой структуры смеси. При содержании 10% ЖК проводимость осуществляется за счет проводимости самой ВДП, т.к. она, по сути , является матрицей. Проводящие частицы ЖК (магнетит) практически не влияют на процесс — они представляют собой «вкрапления» в проводящую матрицу.

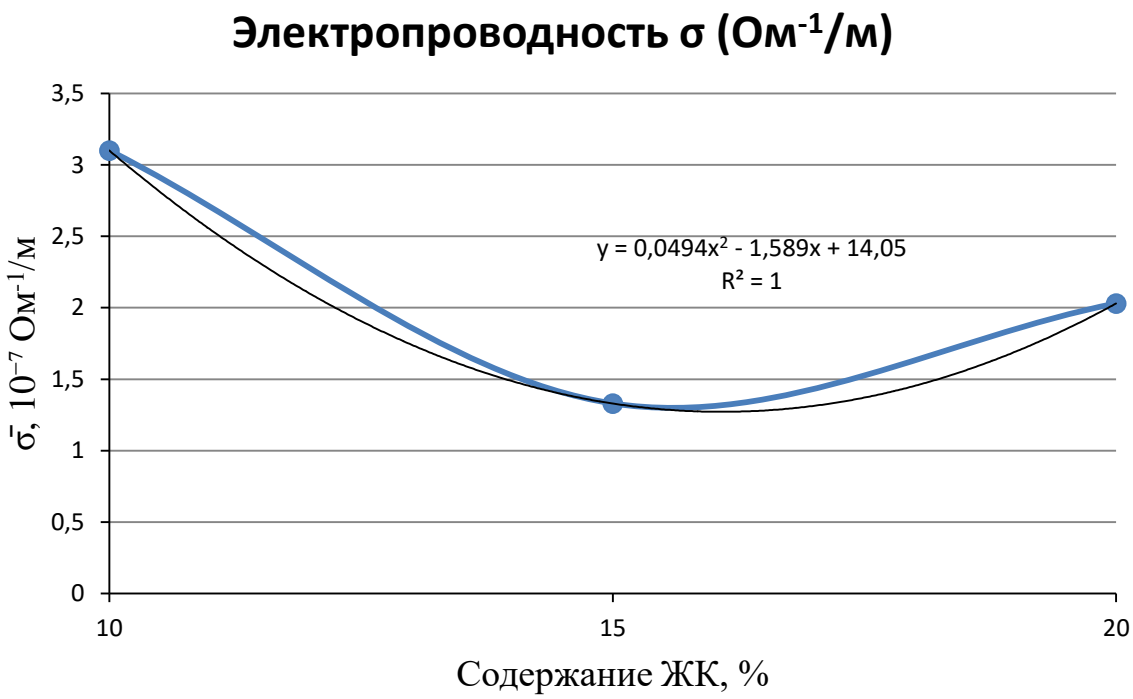


Рисунок 4.6 – Зависимость электропроводности брикетов от содержания железорудного концентрата

При содержании 15% ЖК происходит структурная дезорганизация матрицы. Частицы магнетита начинают замещать собой проводящие каналы матрицы, но при этом их недостаточно для образования непрерывной «цепи», т.к. сами они еще не соприкасаются друг с другом. Образно говоря, старая цепь (матрица) уже разрушена, а новая (с частицами ЖК) еще не сформировалась. В результате электропроводимость такой смешанной структуры падает, а сопротивление в этой точке максимально.

Когда концентрация ЖК достигает 20–25%, токопроводящих частиц концентрата становится так много, что они начинают массово соприкасаться. Формируется сквозной каркас (цепочки контактов «зерно к зерну»), проводимость которого выше, чем смешанной структуры.

Как видно из графика, наименьшее значение удельной электропроводности наблюдается для образца с содержание ЖК 15%, т.е. этот образец обладает наибольшим удельным электросопротивлением. Для ферросплавов высокое значение удельного электросопротивления желательно, т.к. чем выше электросопротивление, тем больше тепла Джоуля-Ленца выделяется, тем, следовательно, легче и быстрее происходит расплавление шихты.

Выводы по разделу

1) Проведенные исследования показали возможность использования железорудного концентрата в качестве составляющей шихты при брикетировании высокодисперсной пыли, образующейся при производстве

ферросилиция. Использование 15% по массе железорудного концентрата с содержанием железа и кремния около 65% и 24% соответственно, приводит к увеличению прочности и плотности брикета в среднем на 20%.

2) На основании комплекса проведенных исследований разработан и защищен патентом на полезную модель РК способ брикетирования, включающий использование комбинированной шихты (ВДП+ЖК+МНФ+Бентонитовой глины), что гарантирует получение кондиционного продукта с высокими эксплуатационными свойствами.

3) Экспериментально доказано, что оптимальным количеством в шихте является 15 % железорудного концентрата по массе. Это обеспечивает: увеличение прочности и плотности брикета в среднем на 20 %; достижение плотности 4,8–4,9 г/см³, что сопоставимо с кусковым ферросплавом; сохранение химического состава, соответствующего требованиям ГОСТ 1415-93 и высокое удельное сопротивление.

5 РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ БРИКЕТОВ ИЗ ВЫСОКОДИСПЕРСНОЙ ПЫЛИ ФЕРРОСПЛАВНОГО ПРОИЗВОДСТВА

5.1 Технологическая схема существующего и разработанного процессов

В рамках исследования проведён сравнительный анализ разработанной технологии с применяемыми зарубежными схемами брикетирования пыли ферросплавного производства. Анализ показал, что, несмотря на общую направленность процессов (утилизация пылевидных отходов методом окускования), принципиальные подходы к организации технологического процесса, составу шихты и назначению (табл. 5.1) получаемого продукта существенно различаются.

Анализ показывает, что применяемая в зарубежной практике технология ориентирована преимущественно на утилизацию отходов и реализуется по упрощённой схеме: пыль ферросилиция смешивается со связующим (жидкое стекло в количестве 10–20 % либо органическое связующее 2–4 %), после чего смесь подвергается прессованию и последующей сушке.

Таблица 5.1 - Сравнительный анализ технологий брикетирования пыли ферросилиция

Критерий	Существующая технология	Разработанная технология
Цель	Утилизация отходов:	Утилизация отходов
Экономическая эффективность	Снижение затрат на утилизацию	Снижение затрат + получение кондиционного продукта
Статус продукта	Побочный материал	Кондиционный продукт
Состав шихты	Пыль + минимальные добавки	ВДП+ некондиционный мелкий ферросилиций + железорудный концентрат + связующее
Плотность брикетов	Низкая / средняя	Повышенная
Погружаемость в расплав	Затруднена (возможное всплытие)	Улучшенная
Скорость растворения	Замедленная	Ускоренная
Безопасность хранения	Риск взаимодействия с влагой	Повышенная безопасность
Условия хранения	Требуется строгий контроль влажности	Более устойчивое хранение
Технологическая направленность	Экологическая задача	Экологическая, экономическая

На основании проведенных лабораторных экспериментов была разработана технология получения брикетов из высокодисперсной пыли ферросплавного производства, направленная на утилизацию техногенных отходов с сохранением их химического состава и получением кондиционного продукта.

Высокодисперсная пыль, образующаяся в системах газоочистки, используется в качестве основного техногенного сырья. В состав шихты дополнительно вводятся железорудный концентрат, мелкофракционный ферросилиций и связующее вещество.

Разработанная технология характеризуется комплексным подходом к формированию шихтового состава и направлена не только на утилизацию отходов, но и на получение кондиционного продукта с улучшенными эксплуатационными свойствами. В её состав входят:

- высокодисперсная пыль (ВДП) – 50–55 %;
- железорудный концентрат – 10–15 %;
- некондиционный ферросилиций – 25–30 %;
- бентонитовая глина – 3 %;
- вода – 2 %.

На рисунке 5.1 приведены схемы существующего технологического процесса брикетирования (рис.5.1а) и схема разработанной технологии (рис. 5.1.б).



а б

Рисунок 5.1 – Блок-схема процессов брикетирования ВДП : а-существующая технология; б- разработанная технология

Разработанная технология предлагает использовать в составе шихты железорудный концентрат и в качестве связующего – бентонитовую глину. Использование новых компонентов обуславливает новые параметры технологического процесса (давление, прессования, время и температуру сушки), позволяет повысить плотность и электросопротивление брикетов при хорошей прочности и пластичности, что позволяет получить продукт с улучшенными свойствами и составом кондиционного ферросилиция.

На основании проведённых лабораторных исследований и полученных результатов разработана технологическая карта процесса получения брикетов из отходов производства ферросилиция (рисунок 5.2, Приложение Д), согласованная и одобренная техническим советом ТОО «КМЗ им. Пархоменко».

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ КАРТА

Получение брикетов из отходов производства ферросилиция						«Утверждаю» Директор ТОО «КМЗ им. Пархоменко» В.И. Сурина «__» 2025 г.
ТОО «КМЗ им. Пархоменко»	Технологическая карта № 025 от 29.09.2025 г.		Область применения – в качестве частичной замены ферросилиция для раскисления и легирования стали			
Исходные материалы	*Основные:* отходы производства ферросилиция, высокодисперсная пыль (ВДП)		Вспомогательные: железорудный концентрат для производства окатышей/агломерата; бентонит, вода		гидрофобизатор – углекислота и др.	
Оборудование	Пресс, минимальное давление 40-50 кН		Камера сушильная, минимальная температура, 60°С		Смеситель	Формообразующая оснастка
Состав на 100 кг	отходы производства ферросилиция ВДП	железорудный концентрат	некондиционный мелкий ферросилиций	бентонит	вода	гидрофобизатор (сверх 100%)
количество, %	50-55	10-15	25-30	3	2	10
Основные технологические операции						
1. Загрузка в смеситель в соответствии с расчетным составом шихты	2. Смешивание в течение 35-40 мин.		3. Выпуск смеси из смесителя			
4. Обработки гидрофобизатором	5. Загрузка смеси в формообразующую оснастку		6. Прессование при давлении 40-50 кН		7. Сушка в камере при температуре 60°С в течение 1,5 -2 ч.	
Контроль качества						
Химический анализ: выборочно 5 образцов из каждой партии в 100 брикетов	Контроль прочности: выборочно 5 образцов из каждой партии в 100 брикетов		Контроль плотности: выборочно 5 образцов из каждой партии в 100 брикетов			
Хранение	До отгрузки потребителю брикеты должны храниться в закрытом, проветриваемом, защищённом от прямого солнечного света помещении при относительной влажности воздуха не выше 50 %. Исключено совместное хранение с другими материалами.					
Разработчики:	Исагулова Д.А.	Подпись	Ержан А.		Подпись	

Рисунок 5.2 – Технологическая карта процесса получения брикетов из ВДП

Разработанная технологическая карта процесса брикетирования ВДП с использованием ЖК и бентонитовой глины была рассмотрена и одобрена на Техническом совете ТОО «КМЗ им.Пархоменко».

На основании разработанной карты были изготовлены брикеты из отходов ВДП общей массой 20кг, которые были использованы в качестве частичной замены ферросилиция при выплавке стали 30ХГС на производственной площадке ТОО «КМЗ им.Пархоменко».

5.2 Проведение опытно- промышленный испытаний по выплавке стали с использованием опытных брикетов

Исследования в области переработки металлургических отходов и использования брикетированных материалов при выплавке стали подтверждают их технологическую и экономическую эффективность. В работе [103] исследованы химические и термические особенности поведения агломератов из побочных продуктов дуговых сталеплавильных печей, что демонстрирует возможность их повторного вовлечения в металлургический процесс. Применение оксидно-углеродистых брикетов в сталеплавильных цехах рассмотрено в [104], где показано их влияние на восстановительные реакции и тепловой режим плавки. Технологические аспекты жесткой экструзии пыли дуговых печей и рудной мелочи для последующего использования в ферросплавном производстве приведены в [105].

Полученные брикеты используются для раскисления и легирования стали.

Процесс раскисления и легирования стали играет важную роль в улучшении ее механических свойств и структуры. Анализ ряда исследований [106-109] показывает, что использование различных типов раскислителей оказывает значительное влияние на качество готового металла. Кремнийсодержащие стали представляют собой группу конструкционных и специальных сталей, в которых кремний является одним из основных легирующих элементов. В зависимости от назначения содержание кремния может изменяться от 0,3–0,5 % в конструкционных сталях до 3,0–4,5 % и более в электротехнических сталях. Кремний оказывает комплексное влияние на структуру и свойства стали: повышает предел текучести и упругость, улучшает прокаливаемость, способствует формированию более мелкозернистой структуры, повышает жаростойкость и сопротивление окислению. Одновременно кремний является эффективным раскислителем, широко применяемым при выплавке стали. В процессе раскисления он активно взаимодействует с растворённым кислородом с образованием устойчивых оксидов кремния, которые переходят в шлак, что позволяет снизить газонасыщенность металла, уменьшить количество неметаллических включений и повысить однородность структуры. В конструкционных легированных сталях, таких как сталь 30ХГС, кремний выполняет двойную функцию — раскисляющую и легирующую, способствуя повышению прочности, износостойкости и усталостной выносливости в сочетании с хромом и марганцем. При этом содержание кремния строго регламентируется нормативной документацией, поскольку его избыточное количество может привести к повышению хрупкости и снижению свариваемости стали. Таким образом, применение кремнийсодержащих материалов и брикетов при раскислении и легировании позволяет эффективно регулировать химический состав стали и обеспечивать требуемый комплекс эксплуатационных свойств.

Таким образом, введение кремнийсодержащих брикетов в сталеплавильный процесс позволяет не только эффективно проводить раскисление и

легирование, но и целенаправленно регулировать химический состав и структуру стали, обеспечивая требуемый комплекс механических свойств.

В качестве объекта исследований использовалась сталь 30ХГС (ГОСТ 4543-2016). Сталь 30ХГС является улучшаемой сталью, широко применяемой для изготовления изделий, работающих в сложно-напряженных условиях. Химический состав марки стали 30ХГС (ГОСТ 4543-2016) приведен в таблице 5.2.

Таблица 5.2 - Химический состав марки стали 30ХГС (ГОСТ 4543-2016)

Элемент	C	Si	Mn	Cr	S	P
Содержание	0.28 - 0.35	0.9 - 1.2	0.8 - 1.1	0.8 - 1.1	до 0.035	до 0.035

Для дальнейшего исследования были изготовлены опытные брикеты согласно разработанной технологической карте. Состав опытных брикетов приведен в таблице 5.3.

Таблица 5.3 - Состав опытных брикетов

Маркировка образца	Количество ВДП, %	Количество ЖК,%	Количество МНФ, %	Бентонитовая глина,%	Вода,%
Брикеты	50	15	30	3	2

Полученные брикеты (рисунок 5.3) вводились в ковш по окончании плавки в количестве 2% масс от массы плавки. Емкость ковша – 40 кг, масса плавки – 25 кг. Было проведено 3 варианта раскисления и легирования:

1вариант- сталь раскислена и легирована ФС50 (1.5% по масс)

2 вариант-сталь раскислена брикетами и ФС50 (в соотношении 3:2)

3 вариант - сталь раскислена брикетами (2.3 по масс)



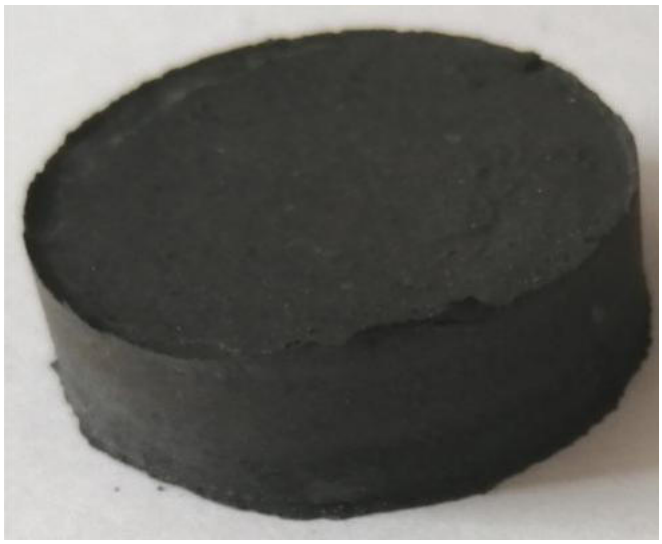


Рисунок 5.3 – Опытные брикеты

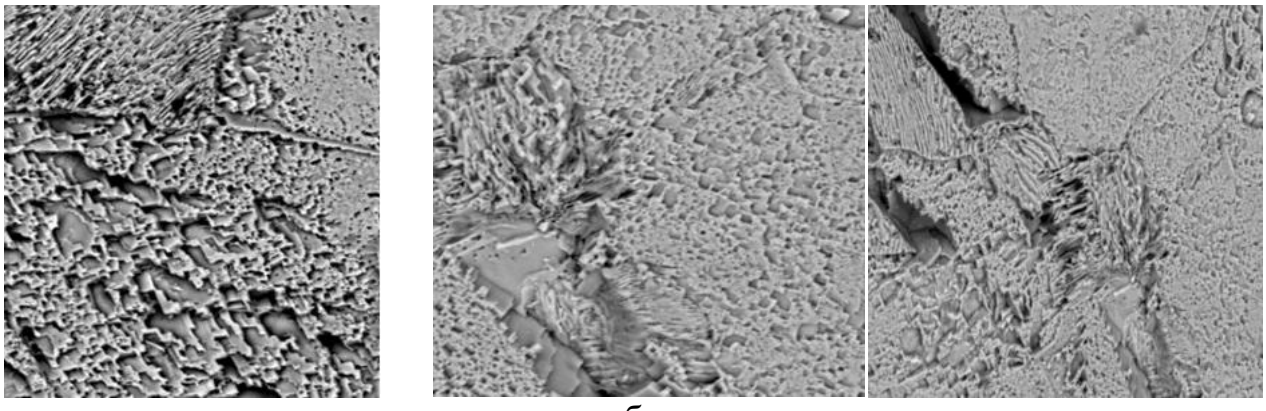
Плавку стали 30ХГС (ГОСТ 4543-2016) проводили в литейном цехе ТОО «КМЗ им. Пархоменко» (г. Караганда). В качестве шихты использовался стальной лом, феррохром, ферромарганец и либо ФС50-7 (образец сравнения), либо опытные брикеты. Расплавленный металл разливался в ковш, в который предварительно вводились опытные брикеты. Из ковша плавку разливали в песчано-глинистые формы. После полного охлаждения отливки подвергались нормализации при температуре 900^0С с охлаждением на воздухе, как более дешевая альтернатива улучшению. Из отливок вырезались образцы для дальнейших исследований: химический состав, структура, твердость прочность на сжатие и ударная вязкость. Все исследования проводились в лаборатории ТОО «КМЗ им. Пархоменко». Все измерения проводились с тремя дублями, приведены усредненные результаты.

Химический состав опытных образцов приведен в таблице 5.4.

Таблица 5.4 - Химический состав опытных образцов

Номер образца	Марка	C	Si	Mn	Cr	S	P
0	30ХГС (ГОСТ 4543-2016)	0,28 – 0,35	0,9 – 1,2	0,8 – 1,1	0,8 – 1,1	до 0,035	до 0,035
1	Сталь, раскисленная и легированная ФС50	0,30	1,2	0,8	1,1	0,035	0,035
2	Сталь, частично раскисленная и легированная опытными брикетами	0,32	1,2	0,8	1,1	0,033	0,033
3	Сталь, раскисленная и легированная опытными брикетами	0,32	1,2	0,8	1,1	0,033	0,033

Данные таблицы 5.4 показывают, что после раскисления и легирования опытными брикетами состав стали соответствует требованиям ГОСТ и практически совпадает с химическим составом стали, раскисленной кондиционным ФС50.



а б в

Рисунок 5.4 - Микроструктура стали 30ХГСА (увеличение х 300):
а) образец №1; б) образец №2; в) образец №3

На рисунке 5.4 представлены структуры опытных образцов. Структура образцов после нормализации представлена перлито-ферритной смесью и карбидной фазой. Визуальное сравнение структур показывает, что все образцы характеризуется более однородной структурой, фаза внедрения (карбиды)

выражены менее четко. Более детальное исследование структуры не проводилось, однако проведенное сравнение позволяет сделать предположение, что нормализация делает структуру более однородной, карбиды становятся менее заметными, а перлит с ферритом распределяются равномернее. Это, скорее всего, улучшает свойства образцов.

Для проверки этого предположения исследовались механические свойства образцов. В таблице 5.5 представлены полученные результаты.

Таблица 5.5 - Механические свойства опытных образцов

Параметр	Предел прочности на сжатие (МПа)	Твердость (HV)	Ударная вязкость (Дж/см²)
Образец №1	435	220	36
Образец №2	436	225	35
Образец №3	435	225	35

Данные таблицы 5.5 показывают, что сталь, частично раскисленная и легированная опытными брикетами (образец №2), а также сталь, раскисленная и легированная полностью (образец №3), демонстрирует даже чуть более высокие механические свойства, чем образец, раскисленный кондиционным ФС50. Этот факт можно объяснить лучшей усвояемостью брикетов за счет более мелкого фракционного состава и, как следствие, созданием более дисперсной структуры стали.

Проведенное исследование показало, что опытные брикеты являются перспективной альтернативой ферросилиция для раскисления и легирования стали 30ХГС и, вероятно, других кремнийсодержащих сталей. Сталь, раскисленная и легированная опытными брикетами из высокодисперсной пыли (ВДП) ферросплавного производства с использованием железорудного концентрата, демонстрирует химический состав и механические свойства в соответствии с ГОСТ на данную сталь. Использование брикетов позволит заменить кондиционный ферросилиций ФС 50 на более дешевый продукт и улучшить экологическую обстановку региона, т.к. производство брикетов осуществляется за счет утилизации техногенных отходов.

Результаты научных исследований и разработки были внедрены в производственный процесс ТОО «КМЗ имени Пархоменко». Имеется акт внедрения (Приложение Б).

5.3 Технико-экономическое обоснование внедрения технологии переработки высокодисперсной пыли ферросплавного производства

Экономическая часть работы направлена на оценку данную внедрения разработанной технологии получения брикетов из ВДП и их использования в качестве раскислителя и легирующей добавки при получении стали.

А экономическая эффективность внедрения технологии переработки ВДП ферросилиция определяется за счет снижения себестоимости.

В таблице 5.6 представлена примерная себестоимость производства 1 тонны брикетов из ВДП. Годовой объем производства принят равным 2000 тонн, исходя из количества накапливаемых отходов из ВДП на предприятиях. А цены взяты из официальных открытых источников РК (satu.kz, отчетов предприятий в открытом доступе).

Расход сырья:

- Средний состав разработанной шихты для брикетирования:
- ВДП — 55 %
- бентонитовая глина — 3 %
- железорудный концентрат — 15 %
- МНФ (мелкодисперсный некондиционный ферросилиций) — 25 %
- вода техническая — 2 %
-

Расход компонентов на 1 тонну продукции:

Компонент	Содержание, %	Расход, кг/т
ВДП	55	550
Бентонитовая глина	3	30
Железорудный концентрат	15	150
МНФ	25	250
Вода техническая	2	20

ВДП и МНФ являются техногенными отходами ферросплавного производства. Стоимость ВДП на рынке Казахстана составляет 15 000 тг/т, стоимость МНФ — 22 000 тг/т, железорудный концентрат – 50 000 тг/т[109].

Стоимость связующих материалов: бентонитовая глина – 800 тг/т, вода техническая – 2 000 тг/т

Стоимость сырья определяется по формуле:

$$C_{сыр}=\Sigma(G_i P_i) \quad (5.1)$$

$C_{сыр}$= 21314 тг/т.

Затраты на сырье составляют 21314 тг/т продукции.

Затраты на электроэнергию определяются исходя из удельного расхода энергии на технологические линии брикетирования и для смешивание, сушки.

Согласно исходным данным, расход на технологический цикл составляет 20 кВт ·ч на единицу продукции. Пересчёт на 1 тонну:

$$C_{эл}= E \cdot T \quad (5.2)$$

$$C_{эл}=E \times T = 20 \times 40 = 800 \text{ тг/т}.$$

К прочим затратам относятся:

- амортизация оборудования;
- заработная плата;
- транспортные расходы;
- ремонт оборудования.

На основе технологических расчётов и анализа аналогичных производств [110] данные расходы составляют:

заработная плата — 5 500 тг/т;

амортизация — 5 000 тг/т;

прочие (ТО, ремонт, охрана труда) — 10 540 тг/т.

Итого прочие расходы — 21 040 тг/т.

Себестоимость продукции определяется по следующей формуле:

$$C = C_{сыр} + C_{эл} + C_{пр} \quad (5.3)$$

Подставляя значения:

$$C=21314+800+21040=43154 \text{ тг/т.}$$

Следовательно, полная себестоимость производства разработанных брикетов составляет 43 154 тг/т.

Сравнение с традиционной технологией.

В качестве базового варианта для сравнения взята стоимость традиционного раскислителя — ферросилиций.

Стоимость базового варианта в среднем составляет 71 729 тг/т (по данным предприятий).

Снижение себестоимости при использовании разработанной технологии определяется по формуле:

$$C_{себ} == C_{баз} - C_{брик} = 71729-43154=28\,575 \text{ тг/т}$$

Таким образом, применение разработанных брикетов позволяет снизить затраты на 28 575 тг на каждую тонну продукции.

Годовой экономический эффект определяется по формуле:

$$E_г = \Delta C \times Q \quad (5.4)$$

где Q - годовой объём производства.

При годовом объёме производства 2000 т:, получаем

$$E_г = 28575 \times 2000 = 57\,150\,000 \text{ тг.}$$

Срок окупаемости определяется выражением:

$$Т = \frac{К}{E_т} \quad (5.5)$$

где К - капитальные вложения.

Предположим, что капитальные вложения на приобретение смесителя, брикетировочного пресса, сушильного оборудования, а также модернизацию производственной линии составляют 85 725 000 тг.

$$Т = \frac{85725000}{57150000} = 1{,}53 \text{ года}$$

Т = 1,5 года.

На диаграмме (рис. 5.1) показано сравнение показателей для кондиционного ферросилиция ФС70 и брикетов. Для удобства все показатели приведены к единой шкале: за 100% приняты показатели ФС при объеме производства 2000т/г, для брикетов показан процент от соответствующего показателя ФС.

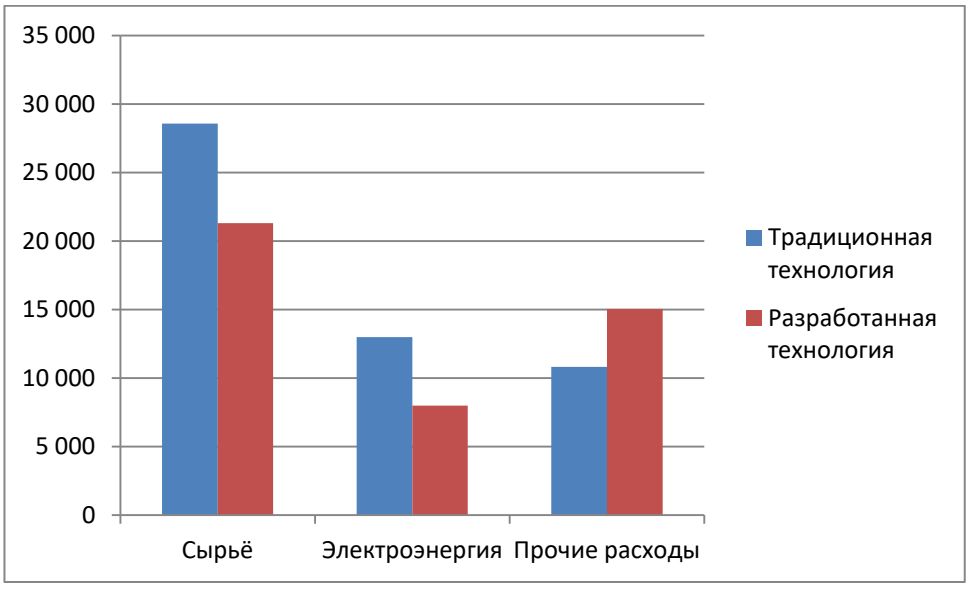


Рисунок 5.1 - Сравнение технико-экономических показателей производства брикетов и ферросилиций

Разработанная технология получения брикетов из ВДП обеспечивает:

- снижение себестоимости продукции на 28 575 тг/т;
- годовой экономический эффект 57,15 млн тг;
- срок окупаемости капитальных вложений 1,5 года;
- сокращение объёмов складируемых отходов и повышение ресурсной эффективности производства.

Полученные результаты подтверждают техническую и экономическую целесообразность внедрения разработанной технологии в условиях ферросплавных предприятий Республики Казахстан.

Выводы по разделу

1) Промышленные испытания выплавки стали 30ХГС, проведенные с использованием опытных брикетов, показали возможность их использования в качестве замены ферросилиция для раскисления и легирования. Полученные образцы стали показали соответствие химического состава и механических свойств требованиям ГОСТ 4543-2016, предъявляемым к данной марке стали.

2) Выполненный технико-экономический расчёт показал, что себестоимость производства разработанных брикетов составляет 43 154 тг/т. По сравнению с традиционным раскислителем — ферросилиций— достигается снижение затрат на 28 575 тг/т. При годовом объёме производства 2000 т экономический эффект составляет 57,15 млн тг в год, а срок окупаемости капитальных вложений в размере 85,7 млн тг составляет около 1,5 года.

3). Использование брикетов позволит заменить кондиционный ФС 50 на более дешевый продукт и улучшить экологическую обстановку региона, т.к. производство брикетов осуществляется за счет утилизации техногенных отходов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Определен состав шихты для брикетирования ВДП производства ферросилиция:

- высокодисперсная пыль (ВДП) – 50-55 %;
- железорудный концентрат – 15 %;
- мелкодисперсный некондиционный ферросилиций – 25-30 %;
- бентонитовая глина – 3 %;
- вода – 2 %.

2. Определены технологические параметры процесса брикетирования ВДП: давление прессования 50 кН, время сушки 90 мин, температура 60 С.

3. Разработана технология брикетирования отходов производства ферросплавов на основе ной шихты с использованием железорудного концентрата.

4. Брикеты, полученные по разработанной технологии, являются альтернативой ФС для раскисления и легирования стали 30ХГС и других кремнийсодержащих сталей. Сталь, раскисленная и легированная опытными брикетами из высокодисперсной пыли (ВДП) ферросплавного производства с использованием железорудного концентрата, демонстрирует химический состав и механические свойства в соответствии с ГОСТ на данную сталь.

5. Установлено, что брикеты, полученные по разработанной технологии, обладают достаточной прочностью, удовлетворительным выходом подрешётного продукта, а также соответствующим содержанием кремния и углерода, что подтверждает их пригодность для дальнейшего использования.

6. Экономическая эффективность разработанной технологии заключается в снижении себестоимости продукта – аналога ферросилиция, за счёт использования отходов. При годовом объёме производства 2000 т ожидаемый экономический эффект составляет 57,15 млн тг в год.

7. По результатам работы было опубликовано: 6 статей, 2 патента.

Список опубликованных работ по теме диссертации

1. Омарова А.Е. (Ержан), Исагулова Д.А., Квон СВ.С., Ковалева Т.В. Выбор связующего для производства брикетов из высокодисперсной пыли ферросплавного производства. // Труды университета, Караганда: Изд-во КарТУ имени Абылкаса Сагинова. –2023. - №3 (92). С. 79-84. (База КОКСНВО).

2. D.A. Issagulova, Sv.S. Kvon, A.E. Omarova (Erzhan), T.V. Kovalyova, V.Yu. Kulikov, A.A. Alina / Studying the binder effect on the properties of briquettes of ferroalloy production. // Metalurgija, Хорватия: Croatian Metallurgical Society. – 2024. -№ 1 (63). – С. 143-145. (База Scopus процентиль 35).

3. Патент на полезную модель. №8617 от 10.11.2023. Способ ввода дисперсных инокуляторов при изготовлении мелющих шаров. Авторы: Исагулова Д.А., Исагулов А.З., Квон Св.С., Куликов В.Ю., Омарова А.Е. (Ержан), Ковалева Т.В., Алина А.А.

4. Yerzhan A., Kvon Sv.S., Okishev K.Yu., Issagulova D.A., Kovalyova T.V. The Use of Clay as A Binder in Briquetting Finely Dispersed Dust of Ferrosilicon Production. // Труды университета, Караганда: Изд-во КарТУ имени Абылкаса Сагинова. –2024. - №4 (97). С. 53-57. (База КОКСНВО).

5. Yerzhan A., Kvon Sv.S., Issagulova D.A., Kulikov V.Yu., Kovalyova T.V. «The possibility of using iron ore concentrate as a binder when briquetting waste of ferroalloy production» // // Metalurgija, Хорватия: Croatian Metallurgical Society. – 2024. -№ 3-4 (63). – С. 454-456. (База Scopus процентиль 35).

6. Патент на полезную модель. № 9155 от 24.05.2024. Способ брикетирования пылевидных отходов, образующихся при производстве ферросилиция. Авторы: Исагулова Д.А., Ержан А., Квон Св.С., Куликов В.Ю., Ковалева Т.В., Адамова Г.Х.

7. Yerzhan A., Issagulova D.A., Kvon Sv.S., Okishev K.Yu., Kovalyova T.V. Application of ferroalloy production waste as deoxidising agent in steel production. // Научный журнал «Наука и техника Казахстана», г. Павлодар: Изд-во Университет Торайгырова. – 2025. – №3. С. 247-256. (База КОКСНВО).

8. Yerzhan A. , Issagulova D.A., Kvon Sv.S. /The influence of iron ore concentrate on the properties of briquettes from ferroalloy production waste. // Acta metallurgica slovaca, Slovaca – 2025. - № 3 (Vol.31), 138-140 pages. (База Scopus, проценитиль 52). DOI: https://doi.org/10.36547/ams.31.3.2216 .

9. Патент № 10925 25.07.2025. Способ брикетирования высокодисперсной пыли производства ферросплавов. Авторы: Исагулова Д.А., Ержан А., Квон Св.С., Куликов В.Ю., Ковалева Т.В., Адамова Г.Х.

10. Yerzhan A. , Issagulova D.A., Kvon Sv.S. Kovalyova T.V. Comparative analysis of the use of iron ore concentrate with different binders in the briquetting of ferroalloy production waste. // Mechanical Engineering: An International Journal (MEIJ), - 2025, - № 1/2 (Vol. 12), 9-17 pages.. DOI:10.5121/meij.2024.12201. (Конференция)

11. Ержан А., Квон Св.С., Окишев К.Ю. XXIII Международной научно-технической Уральской школы-семинара металловедов — молодых ученых (Екатеринбург, 03–07 февраля 2025 г.). -2025. С. 118-122. (Конференция).

12. Ержан А., Исагулова Д.А. Исследование процесса получения кондиционного продукта из отходов производства ферросилиция. Монография. - Караганда: Calibri, 2025. -70 с. ISBN 978-601-12-3322-4.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Ержан А., Квон Св.С., Окишев К.Ю. Изучение воздействия связующего на характеристики брикетов, изготовленных из отходов производства ферросплавов // XXIII Международная научно-техническая уральская школа-семинар металловедов — молодых ученых = ural school for young metal scientists Екатеринбург, 03–07 февраля 2025 года.
2. Янина М. Е. Основные факторы воздействия ферросплавного производства на атмосферу / М. Е. Янина ; науч. рук. В. Ф. Торосян // Экология и безопасность в техносфере: современные проблемы и пути решения : сборник трудов Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов, г. Юрга, 23-25 ноября 2017 г. — Томск : Изд-во ТПУ, 2017. — С. 295-299.
3. ГОСТ 1415–93 (ИСО 5445–80). Ферросилиций. Технические условия. — Введ. 1995-01-01. — М. : Издательство стандартов, 1994. — 12 с.
4. Омарова А.Е. (Ержан), Исагулова Д.А., Квон СВ.С., Ковалева Т.В. Выбор связующего для производства брикетов из высокодисперсной пыли ферросплавного производства // Труды университета. — 2023. — № 3 (92). — С. 79-84. — DOI: 10.52209/1609-1825_2023_3_79.
5. Гасик М. И., Лякишев Н. П. Теория и технология электрометаллургии ферросплавов. — М.: Интермет Инжиниринг.
6. Olsen S. E., Tangstad M., Lindstad T. Production of Manganese Ferroalloys. — Trondheim : SINTEF, 2007. — 247 p.
7. Соколовский А.А., Еремин В.П. Способ обработки мелкодисперсной кремнийсодержащей пыли газоочистки электротермического производства кремния и кремнеземистых ферросплавов : пат. РФ № 2085488. — 1997.
8. Surup G. R., Slizovskiy D., Tangstad M., Tkacik J. Airborne Emissions from Mn Ferroalloy Production // JOM. — 2019. — Vol. 71. — P. 349–365. — DOI: 10.1007/s11837-018-3165-9.
9. Wastes of the ferroalloy industry of Russia. Basic research and applied development of processing and recycling of man-made mineral formations // Proceedings of the «Tekhnogen-2019» Congress with international participation. — Yekaterinburg, 2019. — P. 99–102.
10. Абрамович С.М., Темлянцев М.В. Рециклинг твердых отходов в металлургии. Монография. // Москва. 210 стр., 2004. ISBN: 5-89349-684-1
11. Бюро национальной статистики Агентства по стратегическому планированию и реформам РК. Охрана окружающей среды в Республике Казахстан : статистический сборник. — Астана, 2023. — 180 с.
12. Министерство экологии и природных ресурсов РК. Национальный доклад о состоянии окружающей среды. — Астана, 2022. — 245 с.
13. Gasik M. I., Gasik M. M. Electrothermics of Silicon. — Kyiv : Nats. Metallurg. Akadem. Ukrainy, 2011. — 312 p.
14. Miyamoto Y., Kanehira S., Radwan M. Recycling of Industrial Wastes // Refractories Applications and News. — 2004. — Vol. 9. — No. 1. — P. 13-18.

15. Meghana A Patankar, Sandeep Td. Experimental Investigations on Effect of Alccofines and Microsilica on Durability Properties of High Performance Concrete // International Journal of Advanced in Management, Technology and Engineering Sciences. — 2018. — Vol. 8. — P. 1-8.

16. Gasik M. I., Lyakishev N. P., Emlin B. I. Theory and Technology of Ferroalloy Production. — Moscow : Metallurgiya, 1988. — 512 p.

17. Ndlovu S., Simate G. S., Matinde E. Waste Production and Utilization in the Metal Extraction Industry. — Boca Raton : CRC Press, 2017. — 478 p. — DOI: 10.1201/9781315156896.

18. Панов В.П., Козлов В.И. Экология металлургического производства. — Екатеринбург : УГТУ-УПИ, 2004. — 365 с.

19. Ермолович Е.А., Кузнецов А.В. Переработка техногенных отходов металлургического производства. — М. : Металлургия, 2008. — 320 с.

20. Вайсберг Л.А. Переработка и утилизация промышленных отходов. — СПб. : Химиздат, 2006. — 304 с.

21. Zhuchkov V. I., Zayakin O. V., Leont'ev L. I., et al. Waste Generation and Recycling in the Ferroalloy Industry // 8th International Symposium on High-Temperature Metallurgical Processing. — Springer, 2017. — P. 117-124.

22. Das B., Prakash S., Reddy P.S.R., Misra V.N. Characterisation and utilisation of solid wastes from ferroalloy industries // Resources, Conservation and Recycling. — 2007. — Vol. 48. — P. 1–18. — DOI: 10.1016/j.resconrec.2005.12.005.

23. Tangstad M., Ringdalen E. Recycling of ferroalloy off-gas dusts // INFACON XII: Proceedings of the Twelfth International Ferroalloys Congress. — Helsinki, 2010. — P. 621–630.

24. Safarian J., Kolbeinsen L. Sustainable production of ferroalloys // Journal of Sustainable Metallurgy. — 2016. — Vol. 2. — P. 1–15. — DOI: 10.1007/s40831-015-0035-8.

25. Маймур Б.Н., Худяков А.Ю., Петренко В.И., Ващенко С.В., Баюл К.В. Брикетирование металлургического сырья. Актуальность и пути развития метода // Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации. — 2016. — № 1. — С. 74-82.

26. Базилевич С.В., Вегман Е.Ф. Агломерация железных руд. — М. : Металлургия, 1967. — 368 с.

27. Кудрин В.А. Теория и технология производства чугуна. — М. : Интермет Инжиниринг, 2003. — 528 с.

28. Biswas A. K. Principles of Blast Furnace Ironmaking. — Brisbane : Cootha Publishing House, 1981. — 528 p.

29. Comparative review on the technologies of briquetting, sintering, pelletizing and direct use of fines in processing of ore and technogenic materials // CIS Iron and Steel Review. — 2023. — No. 26. — P. 4-10.

30. Babanin V.I., Eremin A.Ya. Briquetting fine-grained materials in ferroalloys production: practical experience and future prospects // Metallurgist. — 2006. — Vol. 50. — No. 5-6. — P. 45-50. — DOI: 10.1007/s11015-006-0070-1.

31. Серафимова Л.И., Кузнецов В.А. Обзор технологии брикетирования вторичных железосодержащих материалов // Проблемы горного дела : сборник научных трудов II Международного Форума студентов, аспирантов и молодых ученых-горняков, г. Донецк, 8-9 апреля 2021 г. — Донецк : ДонНТУ, 2021. — С. 304-308.

32. Forsmo S.P.E., Samskog P.O., Björkman B.M.T. Mechanisms in oxidation and sintering of magnetite iron ore green pellets // Powder Technology. — 2008. — Vol. 183. — P. 247–259. — DOI: 10.1016/j.powtec.2007.07.032.

33. Qiu G., Jiang T., Li H., Wang X. Iron ore pelletization technology and its application in modern steel production // Ironmaking & Steelmaking. — 2013. — Vol. 40. — P. 1–12. — DOI: 10.1179/1743281212Y.0000000041.

34. Umadevi T., Deodhar A.V., Prabhu M., et al. Influence of pellet properties on blast furnace performance // Ironmaking & Steelmaking. — 2011. — Vol. 38. — P. 321–328. — DOI: 10.1179/1743281210Y.0000000003.

35. Вегман Е.Ф. Окускование руд и концентратов.– М.: Металлургия, 1976. – 224 с.

36. Лурье Л.А. Брикетирование в металлургии. - М.: Металлургиздат, 1963. - 325 с.

37. Fei Li, Zhibo Sun, Fengyun Yan. The Agglomeration of Solid Wastes for Ferroalloy Production // INFACON XVI: International Ferro-Alloys Congress. — Trondheim : SINTEF/NTNU/FFF, 2021. — P. 1-7.

38. Diaz L., Julia N., Amalric A., Nussbaum G., Bjelland K.B. Recycling of Mn-rich Ore Fines, Dust and Sludge Briquettes in Mn Alloys Production // INFACON XVI: International Ferro-Alloys Congress. — Trondheim : SINTEF/NTNU/FFF, 2021. — P. 1–10.

39. Nemchinova N. V., Mineev G. G., Tyutrin A. A., Yakovleva A. A. Utilization of Dust from Silicon Production // Steel in Translation. — 2017. — Vol. 47. — No. 12. — P. 763–767. — DOI: 10.3103/S0967091217120087.

40. Проценко Е. Л., Жуковский Т. Ф. Экспериментальные исследования процесса брикетирования мелкофракционной пыли производства ферросилиция // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. — 2014. — № 6. — С. 187-191.

41. Еремин А.Я., Бабанин В.И. Изменение физико-механических свойств смесей мелкозернистых материалов со связующими на стадиях подготовки и прессования в процессе брикетирования // Кокс и химия. — 2003. — № 4. — С. 17-26.

42. Kadkhodabeigi M., Tveit H., Johansen S.T. Modelling the Tapping Process in Submerged Arc Furnaces Used in High Silicon Alloys Production // ISIJ International. — 2011. — Vol. 51. — P. 193–202. — DOI: 10.2355/isijinternational.51.193.

43. Hustad H.M. Tapping of FeSi Furnaces : PhD Thesis. — Trondheim : Norwegian University of Science and Technology, 2018. — 80 p.

44. Манашев И. Р., Манашева Э. М. Переработка циклонной пыли ферросилиция методом самораспространяющегося высокотемпературного

синтеза // Техноген-2021. — 2021. — С. 137-141. — DOI: 10.34923/technogen-ural.2021.32.49.041.

45. Pavlov S. V., Snitko Yu. P., Plyukhin S. B. Wastes and emissions in production of ferrosilicon // Elektrometallurgiya. — 2001. — № 4. — P. 22–28.

46. Baisanov S., Tolokonnikova V., Narikbayeva G., Korsukova I., Mukhambetgaliyev Ye. Mathematical method of phase equilibrium of binary system Cr-Si based on Bjerrum-Guggenheim concept // Metalurgija. — 2020. — Vol. 59. — Issue 1. — P. 97-100.

47. Folstad M.B., Ringdalen E., Tveit H., Tangstad M. Effect of Different SiO2 Polymorphs on the Reaction Between SiO2 and SiC in Si production // Metallurgical and Materials Transactions A. — 2021. — Vol. 52. — P. 792–803. — DOI: 10.1007/s11661-020-06113-w.

48. Kaliyan N., Morey R.V. Factors affecting strength and durability of densified biomass products // Biomass and Bioenergy. — 2009. — Vol. 33. — P. 337–359. — DOI: 10.1016/j.biombioe.2008.08.005.

49. Singh M. Studies on the Cement-Bonded Briquettes of Iron and Steel Plant Byproducts as Burden Material for Blast Furnaces : PhD Thesis. — Luleå : Luleå University of Technology, 2003. — 158 p.

50. Замбрано А.П., Такано С., Мурао М.Б., Тагусагава С.Ю. Поведение связующего в гранулах кромит-углеродного композита // Материаловедение и ресурсы. — 2016. — Т. 19. — С. 1344-1350.

51. Sivrikaya O., Arol A.I. The effect of binders on the mechanical properties of iron ore–coal composite briquettes // Minerals Engineering. — 2013. — Vol. 42. — P. 54–60. — DOI: 10.1016/j.mineng.2012.11.006.

52. Hewlett P.C., ed. Lea's Chemistry of Cement and Concrete. — 4th ed. — Oxford : Butterworth-Heinemann, 2004. — 1092 p. — DOI: 10.1016/B978-0-7506-6256-7.X5000-7.

53. Diaz L., Julia N., Amalric A., Nussbaum G., Bjelland K.B. Recycling of Mn-rich ore fines, dust and sludge briquettes in Mn alloys production // INFACON XVI: International Ferro-Alloys Congress. — Trondheim : SINTEF/NTNU/FFF, 2021. — P. 1-10.

54. Mishra S.C., Mishra B. Processing Ferroalloys from Lean Ore and Fines using Thermal Plasma // Advances in Thermal Plasma Processing. — 2021.

55. Jan J. Hycnar, Gabriel Borowski, Tomasz Józefiak. Conditions for The Preparation of Stable Ferrosilicon Dust Briquettes // Inżynieria Mineralna — Journal of the Polish Mineral Engineering Society. — 2020. — Vol. 2. — P. 113-120.

56. Георгадзе А.Г., Георгадзе Н.А., Гернер В.И., Никифоров А.П., Обрезков В.В., Плетнёв А.Н. Способ изготовления брикетов из мелкофракционных отсевов или порошковообразных отходов ферросиликомарганца (ферросилиция) : пат. RU 2600775 C2. — 2016.

57. Роот Е.П., Гернер В.И., Никифоров А.П. Способ изготовления брикетов из дисперсных фракций ферросплавов : пат. RU 2268313 C1. — 2006.

58. Gasik M. I. Problems of dispersion of high-percentage ferrosilicon with formation of toxic poisons // Steel. — 1996. — Vol. 38. — № 8. — P. 26–30.

59. Батан Б.К., Жунусов А.К. Связующие вещества для брикетирования металлургических отходов // Технические науки. — 2024. — С. 201-205. — DOI: 10.24412/2709-1201-2024-201-205.

60. Боровски Г., Степневски В., Войчик-Оливейра К. Влияние крахмального связующего на свойства угольных брикетов // Инт. Агрофизика. — 2017. — Т. 31. — С. 571-574.

61. Сингх М. Исследования по использованию цементно-стружечных брикетов из побочных продуктов металлургических заводов в качестве шихтового материала для доменных печей : дис. … д-ра философии. — Лулео : Технологический университет Лулео, 2003. — 158 с.

62. Sikora M., Izak P. Starch and its derivatives in ceramic process // Ceramika, Polski Biuletyn Ceramiczny. — 2006. — Vol. 93.

63. Borovik S.I., Alshakova A.S. Possibility of using coal binders for briquetting of ferrosilicon dust // Сборник научных трудов. — 2021. — С. 4-8.

64. Derungs P., Brouhon J.M., Harp G. Briquetting of Self-Reducing Blendings of Waste Iron Oxide Mixtures : Final Report. — Luxembourg : Publications Office of the European Union, 2002.

65. Jia F. A Kind of Briquette Binder : China Patent CN 101747970A. — 2010.

66. Buzin P.J.W.K. Desenvolvimento de Briquetes Autorredutores a Partir de Carepas de Processamento Siderúrgico para Utilização em Forno Elétrico a Arco : Master's Thesis. — Porto Alegre : Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2009. — 138 p.

67. Bizhanov A.M., Kurunovb I.F., Dashevskii V.Y.A. Mechanical Strength of Extrusion Briquettes (Brex) for Blast-Furnace and Ferroalloy Production: I. Dependence of the Strength Properties of Extrusion Briquettes on the Binder // Russian Metallurgy (Metally). — 2015. — No. 3. — P. 185–190. — DOI: 10.1134/S0036029515030039.

68. Eremin A.Y., Babanin V.I., Kozlova S.Y. Establishing the Requirements for Indices Characterizing the Mechanical Strength of Briquets with Binders // Metallurgist. — 2003. — Vol. 47. — P. 437–446. — DOI: 10.1023/B:MELL.0000021171.83939.66.

69. Zhang G., Sun Y., Xu Y. Review of briquette binders and briquetting mechanism // Renewable and Sustainable Energy Reviews. — 2018. — Vol. 82. — P. 477–487. — DOI: 10.1016/j.rser.2017.09.072.

70. Gasik M., ed. Handbook of Ferroalloys: Theory and Technology. — Oxford : Butterworth-Heinemann, 2013. — 536 p. — DOI: 10.1016/C2011-0-04204-7.

71. Vorobev V.P. Carborundum-Bearing Reducing Agents in High-Silicon Alloy Production // Steel in Translation. — 2017. — Vol. 47. — P. 688–690. — DOI: 10.3103/S0967091217100127.

72. Zych J., Smyksy K., Postuła J., Rudziński J. Recykling pyłów w odlewni żeliwa średniej wielkości // Przegląd Odlewnictwa. — 2008. — № 12.

73. Niesler M. Laboratoryjne próby brykietowania pyłów odlewniczych // Prace Instytutu Metalurgii Żelaza. — 2007. — № 59(2). — S. 9-14.

74. Hycnar J.J., Józefiak T. Brykietowanie odpadów drobnoziarnistych // VII Śląskie Seminarium Ochrony Środowiska nt. „Odzysk, recykling i unieszkodliwianie odpadów, a ochrona środowiska”. — Bytom, 2007.

75. Giemza H., Gruszka G., Hycnar J.J., Józefiak T., Kiermaszek K. Technologie odzysku drobnoziarnistych materiałów i odpadów węglowych na potrzeby produkcji paliw i energetyki // XXIII Krajowa Konferencja nt. „Zagadnienia surowców energetycznych i energii w gospodarce krajowej”. — Zakopane, 2009.

76. Dec R.T. Optimizing and controlling roll press operating parameters // Powder Handling and Processing. — 2002. — Vol. 14. — P. 222-225.

77. ГОСТ 32183–2013. Материалы порошковые. Метод определения плотности пикнометрическим методом. — Введ. 2014-01-01. — М. : Стандартинформ, 2014. — 12 с.

78. Rhodes M. Introduction to Particle Technology. — 2nd ed. — Chichester : Wiley, 2008. — 434 p. — DOI: 10.1002/9780470727102.

79. German R.M. Powder Metallurgy and Particulate Materials Processing. — Princeton : Metal Powder Industries Federation, 2005. — 542 p.

80. Upadhyaya A., Upadhyaya G.S. Powder Metallurgy: Science, Technology and Applications. — Boca Raton : CRC Press, 2011. — 566 p.

81. Yu A.B., Standish N. Estimation of the porosity of particle mixtures by a linear-mixture packing model // Industrial & Engineering Chemistry Research. — 1991. — Vol. 30. — P. 1372–1385. — DOI: 10.1021/ie00054a044.

82. Fang H., Wang H., Li C. Effect of particle size distribution on packing density and compressive strength of powder compacts // Powder Technology. — 2014. — Vol. 253. — P. 127–133. — DOI: 10.1016/j.powtec.2013.10.050.

83. Shi C., Krivenko P.V., Roy D. Alkali-Activated Cements and Concretes. — London : Taylor & Francis, 2006. — 376 p. — DOI: 10.1201/9781482264999.

84. Патент RU 2398029. Способ получения брикетов из промышленных дисперсных ферросплавов.

85. Патент RU 2156814 C1. Способ получения брикетов из дисперсных и порошкообразных отходов ферросплавного производства.

86. Provis J.L., van Deventer J.S.J. Alkali Activated Materials: State-of-the-Art Report. — Springer, 2014. — 388 p. — DOI: 10.1007/978-94-007-7672-1.

87. Davidovits J. Geopolymer Chemistry and Applications. — 4th ed. — Saint-Quentin : Institut Géopolymère, 2015. — 611 p. — ISBN 9782955453119.

88. Heah C.Y., Kamarudin H., Mustafa Al Bakri A.M., et al. Study on solids-to-liquid and alkaline activator ratios on kaolin-based geopolymers // Construction and Building Materials. — 2012. — Vol. 35. — P. 912–922. — DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.04.049.

89. Murray H.H. Traditional and new applications for kaolin, smectite, and palygorskite: A general overview // Applied Clay Science. — 2000. — Vol. 17. — P. 207–221. — DOI: 10.1016/S0169-1317(00)00016-8.

90. Luckham P.F., Rossi S. The colloidal and rheological properties of bentonite suspensions // Advances in Colloid and Interface Science. — 1999. — Vol. 82. — P. 43–92. — DOI: 10.1016/S0001-8686(98)00085-6.

91. Forsmo S.P.E., Samskog P.O., Björkman B.M.T. Mechanisms in oxidation and sintering of magnetite iron ore green pellets // Powder Technology. — 2008. — Vol. 183. — P. 247–259. — DOI: 10.1016/j.powtec.2007.07.032. (дубль 28 – оставлен для сохранения нумерации)

92. Sivrikaya O., Arol A.I. The effect of binders on the mechanical properties of iron ore–coal composite briquettes // Minerals Engineering. — 2013. — Vol. 42. — P. 54–60. — DOI: 10.1016/j.mineng.2012.11.006. (дубль 45)

93. Kaliyan N., Morey R.V. Factors affecting strength and durability of densified biomass products // Biomass and Bioenergy. — 2009. — Vol. 33. — P. 337–359. — DOI: 10.1016/j.biombioe.2008.08.005. (дубль 42)

94. Zhang Y., Peng Z., Ding Y. Cold-bonded briquetting of iron ore fines and metallurgical wastes: A review // Powder Technology. — 2019. — Vol. 353. — P. 47–63. — DOI: 10.1016/j.powtec.2019.05.014.

95. Liu X., Zhang J., Wang H. Effect of multi-sized particle systems on packing density and mechanical strength // Powder Technology. — 2018. — Vol. 338. — P. 586–595. — DOI: 10.1016/j.powtec.2018.07.054.

96. Sahoo H., Tripathy A., Das S.K. Influence of particle size distribution on compaction characteristics of iron ore fines // Minerals Engineering. — 2016. — Vol. 98. — P. 168–175. — DOI: 10.1016/j.mineng.2016.08.011.

97. Kong L., Yang C., Zhang L. Densification behavior of iron-based composite briquettes under different compaction pressures // Metallurgical and Materials Transactions B. — 2020. — Vol. 51. — P. 1234–1245. — DOI: 10.1007/s11663-020-01822-w.

98. Guo Z., Wang H., Zhang Y. Influence of briquette density on melting behavior in submerged arc furnace // Journal of Sustainable Metallurgy. — 2021. — Vol. 7. — P. 1120–1132. — DOI: 10.1007/s40831-021-00396-6.

99. Yang X., Li Y., Zhao B. Optimization of particle size distribution for enhanced packing density in composite systems // Advanced Powder Technology. — 2017. — Vol. 28. — P. 2504–2513. — DOI: 10.1016/j.apt.2017.06.023.

100. Малышев В.П. Математическое планирование металлургического эксперимента. — М. : Металлургия, 1977. — 168 с.

101. Borowski G. Pilot tests for utilization of fine coal to fuel briquettes production // Archives of Waste Management and Environmental Protection. — 2013. — Vol. 15. — No. 2. — P. 9-18.

102. Erzhan A., Kvon Sv.S., Issagulova D.A., Kulikov V.Yu., Kovalyova T.V. The possibility of using iron ore concentrate as a binder when briquetting waste of ferroalloy production // Metalurgija. — 2024. — Vol. 63. — No. 3-4. — P. 454-456.

103. Issagulova D.A., Kvon Sv.S., Omarova A.E. (Erzhan), Kovalyova T.V., Kulikov V.Yu., Alina A.A. Studying the binder effect on the properties of briquettes of ferroalloy production waste // Metalurgija. — 2024. — Vol. 63. — No. 1. — P. 143-145.

104. Патент № 9155 от 24.05.2024. Способ брикетирования пылевидных отходов, образующихся при производстве ферросилиция / Исагулова Д.А., Ержан А., Куликов В.Ю., Квон Св.С., Ковалева Т.В., Адамова Г.Х.

105. Erzhan (Yerzhan) A., Kvon Sv.S., Okishev K.Yu., Issagulova D.A., Kovalyova T.V. The Use of Clay as A Binder in Briquetting Finely Dispersed Dust of Ferrosilicon Production // Труды университета. — 2024. — № 4 (97). — С. 53-57. — DOI: 10.52209/1609-1825_2024_4_53.

106. Ержан А., Исагулова Д.А., Квон Св.С., Окишев К.Ю., Ковалева Т.В. Возможность использования брикетов из отходов ферросплавного производства для раскисления и легирования кремнийсодержащих сталей // Литейное производство. — 2025. — № 3. — С. 23-27.

107. Thomas Willms, Thomas Echterhof, Stefan Steinlechner, Matti Aula, et al. Investigation on the Chemical and Thermal Behavior of Recycling Agglomerates from EAF by-Products // Applied Sciences. — 2020. — Vol. 10. — No. 22. — 8309. — DOI: 10.3390/app10228309.

108. Elanskii G.N., Babich V.K., Smirnov G.A., Perevalov N.N. Oxide-carbon briquettes are a reserve for steelmaking shops // Steel in Translation. — 2001. — Vol. 31. — P. 40–42.

109. Steele R.B., Bizhanov A.P. Stiff Extrusion Agglomeration of Arc Furnace Dust and Ore Fines For Recovery at a Ferro Alloy Smelter // JC Steel and Sons Inc. — 2011. — Vol. 32. — P. 41–53.

110. Харлашин П.С., Носенко О.А., Яценко А.Н. Разработка рациональной технологии раскисления спокойных марок стали // Вестник Приазовского государственного технического университета. — 2011. — № 2(23). — С. 52-55.

111. Григорович К.В., Гарбер А.К. Анализ процессов комплексного раскисления расплавов углеродистых сталей // Металлы. — 2011. — № 5. — С. 171.

112. Бондарь В.И. Особенности использования карбида кремния при выплавке конвертерной стали // Литье и металлургия. — 2023. — № 2. — С. 55-60. — DOI: 10.21122/1683-6065-2023-2-55-60.

113. Рябчиков И.В., Мизин В.Г., Бакин И.В., Усманов Р.Г. О производстве и применении ферросплавов с РЗМ и ЩЗМ для модифицирования и микролегирования стали // Сталь. — 2020. — № 6. — С. 21-25.

114. Бюро национальной статистики Республики Казахстан. Статистический сборник: цены на энергетические ресурсы для промышленных предприятий. – Астана, 2024.

115. Стош Е.В., Басалай И.А. Экономическая эффективность производства топливных брикетов из льнокостры. БНТУ, 2015.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Акт проведения промышленных испытаний

«Утверждаю»
Директор
ТОО «НПО «Марганец»
Мусин А.М.
«27» 05 2024 г.

АКТ ИСПЫТАНИЯ

Настоящий акт составлен в том, что на производственной базе ТОО «НПО «Марганец» было обеспечено технологическое сопровождение плавки с использованием брикетов из высокодисперсной пыли производства ферросилиция, на электродуговой плавильной печи с печным трансформатором мощностью 630 кВ.

Целью испытания была оценка качества новой технологии получения ферросилициевых брикетов из высокодисперсной пыли ферросплавного производства с использованием нового комплексного связующего материала. Оценка проводилась с точки зрения усваиваемости кремния в сплаве на базе стали 35Л, выплавленной с применением полученных брикетов.

Были представлены брикеты следующего состава: высокодисперсная пыль производства ферросилиция – 85 %, вода – 5 %, жидкое стекло – 7 %, глина бентонитовая – 3 %. Режимы изготовления брикетов: температура сушки - 80 ^{0}С в течение 90 мин, давление прессования – 50 кН.

Технологический процесс выплавки сплава проводился на электродуговой плавильной печи с печным трансформатором мощностью 630 кВ. Плавка велась традиционным способом, добавка ферросплавов осуществлялась введением в ковш (на дно ковша) перед выпусков из печи полученного расплава.

Исследования показали хорошее усвоение в расплаве кремния из представленных брикетов из высокодисперсной пыли производства ферросилиция марки ФС70 – 0,47 %, при использовании кондиционного ферросилиция марки ФС70 – 0,35 %.

Акт был испытан в рамках реализации проекта грантового финансирования по теме «Разработка технологии получения кондиционного продукта из высокодисперсной пыли ферросплавного производства» по договору №114-КМУ4 от «17» мая 2023г.

От ТОО «НПО «Марганец»
Директор А.М Мусин

От КарТУ им. Абылкаса Сагинова
Научный руководитель Д.А. Исагулова
Ответственный исполнитель А.Е. Омарова

10

«Утверждаю»
Директор «Химико-металлургического института им. Ж. Абишева»
_____ Є.О. Байсанов
«__» _____ 2025 г.

АКТ ИСПЫТАНИЯ

Настоящий акт подтверждает, что на базе Химико-металлургического института им. Ж. Абишева были изготовлены образцы, предназначенные для технологического сопровождения плавки, и выполнены их исследования с применением методов РФА и МРСА.

Цель испытаний заключалась в оценке эффективности новой технологии получения ферросилициевых брикетов из высокодисперсной пыли ферросплавного производства с применением комплексного связующего материала. Анализ проводился с точки зрения усвояемости кремния в сплаве при выплавке стали марки 35ХГС с использованием полученных брикетов.

Для изготовления брикетов использовались следующие компоненты: высокодисперсная пыль (ВДП) производства ферросилиция – 50 %, мелкий ферросилиций (МФ) с размером частиц менее 3 мм – 30 %, железорудный концентрат (ЖК) – 15 %, бентонитовая глина – 3 % (в качестве связующего) и вода – 2 %. Режимы изготовления брикетов: температура сушки – 400 °С в течение 2 часа, давление прессования – 40 кН.

Плавка проводилась в графитовом тигле. Добавка ферросплавов и опытных брикетов осуществлялась совместно с основной шихтой при загрузке по заранее рассчитанной шихтовке. По завершении плавки полученный металл был разлит в песчаные формы, из которых были изготовлены образцы.

Из подготовленных образцов проведены исследования методами РФА и МРСА. В результате рентгенофазового анализа (РФА) был установлен фазовый состав исследованных образцов, подтверждающий образование целевых соединений ферросилиция. Микро-рентгеноспектральный анализ (МРСА) позволил определить элементный состав и равномерность распределения кремния и легирующих компонентов в металлической матрице. При исследовании неметаллические включения и иные структурные дефекты не выявлены, что свидетельствует о высоком качестве полученных образцов и эффективности применения опытных брикетов в плавке.

Исследования показали, что опытные брикеты являются перспективной альтернативой кондиционному ферросилицию марки ФС50 для раскисления и легирования стали 30ХГС и, вероятно, других кремнийсодержащих

сталей. Использование брикетов позволяет заменить кондиционный ФС50 на более экономичный продукт и способствует улучшению экологической обстановки региона, так как их производство осуществляется за счёт утилизации техногенных отходов.

Акт составлен в рамках реализации проекта грантового финансирования по теме «Разработка технологии получения кондиционного продукта из высокодисперсной пыли ферросплавного производства» по договору №114-КМУ4 от «17» мая 2023 г.

От «Химико-металлургического института им. Ж. Абишева»
Зав. лаборатории, к.т.н. В.В. Толоконникова

От КарТУ им. Абылкаса Сагинова
Научный руководитель Д.А. Исагулова
Ответственный исполнитель А. Ержан

«Утверждаю»
Директор ТОО
«КМЗ им. Пархоменко»
В.В. Сурина
«06» 10 2025 г.

АКТ

промышленных испытаний выплавки стали 35ХГС с использованием опытных брикетов из высокодисперсной пыли ферросилиция

На производственной площадке ТОО «КМЗ им. Пархоменко» проведены промышленные испытания выплавки стали 35ХГС с применением брикетов из высокодисперсной пыли ферросилиция.

Цель испытания - оценка эффективности брикетов, полученных по разработанной технологии, в качестве замены кондиционного ферросилиция ФС50.

Для изготовления брикетов использовались следующие компоненты: ВДП (высокодисперсная пыль ферросплавного производства) производства ферросилиция, мелкий ферросилиций (МФ) (частицы размером менее 3мм), железорудный концентрат (ЖК) и бентонитовая глина, как связующее.

Были изготовлены брикеты следующего состава:

Таблица 1. Химический состав опытных брикетов

Маркировка образца	Количество ВДП, %	Количество ЖК,%	Количество МФ, %	Бентонитовая глина,%	Вода, %	гидрофобизатор (сверх 100%)
Брикеты	50-55	5-15	15-25	3	2	10

Режимы производства брикетов:

- Температура сушки: 40–60 °C
- Время сушки: 1,5–2 часа
- Давление прессования: 40–50 кН

Технологический процесс выплавки стали проводился на электродуговой плавильной печи с печным трансформатором мощностью 630 кВ.

Плавка стали проводилась традиционным способом. Добавление брикетов осуществлялось в ковш перед выпуском расплава из печи. В качестве базы применялась сталь марки 35ХГС.

Таблица 2.Химический состав полученной стали:

Номер образца	Марка	C	Si	Mn	Cr	S	P
0	30ХГС (ГОСТ 4543-2016)	0,28 – 0,35	0,9 – 1,2	0,8 – 1,1	0,8 – 1,1	до 0,035	до 0,035
1	Сталь, раскисленная и легированная ФС50	0,30	1,3	0,8	1,1	до 0,037	до 0,035
2	Сталь, раскисленная и легированная опытными брикетами	0,32	1,2	0,8	1,1	до 0,033	до 0,033

Данные таблицы показывают, что после раскисления и легирования опытными брикетами состав стали соответствует требованиям ГОСТ и практически совпадает с химическим составом стали, раскисленной кондиционным ФС50.

Результаты промышленных испытаний на производственной площадке показали возможность применения брикетов из высокодисперсной пыли в качестве раскислителя и легирующей добавки при выплавке стали.

Испытания были проведены в рамках реализации проекта грантового финансирования по теме «Разработка технологии получения кондиционного продукта из высокодисперсной по договору №1 14-КМУ4 от «17» мая 2023 г.

Представители НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова»

Научный руководитель гранта, Ph.D.
Исагулова Д.А. _____

Ответственный исполнитель
Ержан А. _____

Представители
ТОО «КМЗ им. Пархоменко»

Технический директор
Булгаков Ю.И. _____

Главный конструктор
Курипко С.А. _____

ПРИЛОЖЕНИЕ Б.

Акт о внедрении технологии

«Утверждаю»
Директор ТОО
«КМЗ им. Пархоменко»
Сурина В.В.
«29» 12 2025 г.

АКТ ВНЕДРЕНИЯ

Настоящий акт составлен о том, что в производственных условиях ТОО «КМЗ им. Пархоменко» была адаптирована и опробована технология получения кондиционного продукта из высокодисперсной пыли ферросплавного производства и его применения в качестве раскислителя и легирующей добавки при выплавке стали.

В рамках испытаний были изготовлены опытные брикеты, включающие высокодисперсную пыль ферросплавного производства, мелкий ферросилиций, железорудный концентрат и бентонитовую глину в качестве связующего.

Опытные брикеты вводились в ковш перед выпуском расплава из печи и использовались в качестве раскислителя и легирующей добавки взамен кондиционного ферросилиция ФС50. В качестве базовой применялась сталь марки 30ХГС. Технологический процесс выплавки стали строго соответствовал разработанной технологической карте.

По результатам проведённых испытаний установлено, что химический состав стали, раскисленной и легированной опытными брикетами, соответствует требованиям ГОСТ 4543–2016, при этом опытные брикеты могут быть использованы в качестве замены кондиционного ферросилиция ФС50.

Испытания разработанной технологии выполнены в рамках диссертационной работы Ержан Айданы на тему «Исследование и разработка технологии окускования высокодисперсной пыли ферросплавного производства с целью её утилизации», результаты которой внедрены в производственный процесс ТОО «КМЗ им. Пархоменко».

Представители
ТОО «КМЗ им. Пархоменко»

Технический директор
Булгаков Ю.И.

Главный конструктор
Курипко С.А.

Представители НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова»

Профессор кафедры МНМ
Квон Св.С.

Профессор кафедры МНМ
Куликов В.Ю.

Докторант кафедры МНМ
Ержан А.

ПРИЛОЖЕНИЕ В.

Акт внедрения результатов научно-исследовательской работы в учебный процесс

«Утверждаю»
НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова»
Член Правления – проректор по академическим вопросам
Нусупбеков Б.Р.

«16» 03 2026 г.

АКТ
о внедрении результатов научно-исследовательских работ в учебный процесс НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова»

Настоящим актом подтверждается использование результатов диссертационного исследования Ержан Айданы на тему «Исследование и разработка технологии окускования высокодисперсной пыли ферросплавного производства с целью её утилизации», представленного на соискание степени доктора философии (PhD) по образовательной программе 8D07203 – «Металлургия», в учебном процессе НАО «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова» на кафедре «Металлургия и новые материалы».

В рамках организации учебного процесса для студентов 4 курса образовательной программы 6B07204 «Металлургия» по дисциплине «Переработка отходов в металлургическом производстве» и магистрантов 2 курса образовательной программы 7M07204 «Металлургия» по дисциплине «Инновационные технологии переработки сырьевых ресурсов чёрной и цветной металлургии» внедрены результаты диссертационного исследования посредством использования учебно-методических материалов, разработанных на основе выполненных научных исследований.

Основными учебно-методическими материалами являются результаты диссертационного исследования и авторская монография «Исследование процесса получения кондиционного продукта из отходов производства ферросилиция» (Ержан А., Исагулова Д.А. ISBN 978-601-12-3322-4), подготовленная по результатам диссертационного исследования и используемая при проведении лекционных и практических занятий, а также при организации самостоятельной работы обучающихся.

Монография содержит материалы по изучению химического, фазового и гранулометрического состава высокодисперсной пыли ферросплавного производства, её структуры и технологических свойств, особенностей процессов окускования, подбору связующих компонентов, оценке физико-механических характеристик полученных брикетов, а также вопросам получения кондиционного продукта из отходов производства ферросилиция и его повторного использования в металлургическом производстве.

В учебный процесс внедрены авторские разработки, направленные на обоснованный выбор технологических решений и режимов окускования, анализ результатов экспериментальных исследований, оценку эффективности переработки техногенных отходов и определение перспектив их дальнейшего применения в металлургической отрасли.

Актуальность внедрённых материалов обусловлена необходимостью решения экологических и производственных задач, связанных с образованием и накоплением высокодисперсных отходов ферросплавного производства. Представленные результаты демонстрируют научно обоснованные подходы к их переработке с получением кондиционного продукта, пригодного для повторного использования в металлургическом производстве, что соответствует современным принципам ресурсосбережения и рационального использования вторичных материальных ресурсов.

Использование монографии и разработанных на её основе учебно-методических материалов расширяет содержание дисциплин за счёт включения современных технологий переработки техногенных отходов ферросплавного производства, способствует формированию у обучающихся профессиональных компетенций в области ресурсосбережения и экологически ориентированной металлургии, развитию научно-исследовательских и практических навыков, а также повышает практическую направленность образовательного процесса и качество подготовки специалистов металлургического профиля.

Председатель учебно- методического совета, декан факультета металлургии и машиностроения, д.т.н., профессор — **Макашева А.М.**

Зав. кафедрой «Металлургия и новые материалы», PhD — **Аубакиров Д.Р.**

Председатель комитета по обеспечению качества факультета металлургии и машиностроения, PhD — **Нокина Ж.Н.**

Профессор кафедры «Металлургия и новые материалы» — **Квон Св.С.**

ПРИЛОЖЕНИЕ Г.

Отзыв о разработонной технологии от потребителей

ОТЗЫВ

на разработанную технологию по проекту:
ИРН AP19576811 «Разработка технологии получения кондиционного продукта из высокодисперсной пыли ферросплавного производства»

При проведении производственного совещания в Испытательной лаборатории ТОО «YDD Corporation» была рассмотрена технология брикетирования высокодисперсной пыли ферросплавного производства, разработанная в рамках грантового проекта «Разработка технологии получения кондиционного продукта из высокодисперсной пыли ферросплавного производства» (договор №114-КМУ4 от 17 мая 2023 г.).

Представленная разработка обладает высокой практической значимостью для предприятий ферросплавной и металлургической отрасли. Реализация данной технологии позволяет решить актуальную проблему переработки техногенных отходов ферросилиция и обеспечить их возврат в металлургический цикл в виде кондиционного продукта – прессованных брикетов.

К основным преимуществам технологии относятся:

- снижение экологической нагрузки за счет уменьшения объёмов отходов;
- экономическая эффективность, связанная с использованием вторичного сырья;
- получение брикетов с требуемыми прочностными характеристиками, стойких к воздействию влаги и механическим нагрузкам при транспортировке и хранении.

Технология показала хорошие перспективы к внедрению и может рассматриваться как замена части кондиционного ферросилиция при раскислении и легировании сталей. Мы отмечаем высокий потенциал данной разработки и возможность рассмотрения дальнейшего взаимодействия по вопросу её промышленного применения.

Начальник ИЛ
ТОО «YDD Corporation» **Лещенко М.С.**
13.10.2025 г.

ОТЗЫВ

на разработанную технологию по проекту:
ИРН AP19576811 «Разработка технологии получения кондиционного продукта из высокодисперсной пыли ферросплавного производства»

На техническом совете ТОО «КМЗ им. Пархоменко» была представлена технология получения брикетов из высокодисперсной пыли ферросплавного производства, разработанная в рамках реализации гранта «Разработка технологии получения кондиционного продукта из высокодисперсной по договору №1 14-КМУ4 от «17» мая 2023 г.

Разработанная технология представляет практический интерес для промышленных предприятий, работающих в сфере ферросплавного производства и металлургии. Предложенное решение позволяет эффективно утилизировать высокодисперсную пыль и другие отходы производства ферросилиция, превращая их в кондиционный продукт — прессованные брикеты, пригодные для повторного использования в металлургическом производстве.

Среди преимуществ технологии можно отметить:

– экологическую направленность (снижение объемов отходов);

– экономическую эффективность за счёт вторичного использования отходов;

– соответствие физико-механических свойств получаемых брикетов требованиям (высокая прочность, устойчивость к влаге и транспортировке).

Мы выражаем заинтересованность в дальнейшем сотрудничестве и рассматриваем возможность использования брикетов, полученных по разработанной технологии, в качестве замены кондиционного ферросилиция для раскисления и легирования при выплавке сталей.

Директор
ТОО «КМЗ им. Пархоменко» _____ **В.В. Сурина**

Приложение Д.

Патент на полезную модель

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН

REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

ПАТЕНТ
PATENT

№ 9155

ПАЙДАЛЫ МОДЕЛЬГЕ / НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ / FOR UTILITY MODEL

(21) 2024/0186.2

(22) 12.02.2024

(45) 24.05.2024

(54) Ферросилиций өндірісінде пайда болатын шаң тәрізді қалдықтарды брикеттеу тәсілі
Способ брикетирования пылевидных отходов, образующихся при производстве ферросилиция
Method of briquetting dust-like waste resulting from ferrosilicon production

(73) Омарова Айдана Ержанқызы (KZ)
Omarova Aidana Erzhankyzy (KZ)

(72) Исагулова Диана Аристотелевна (KZ)
Issagulova Diana Aristotelevna (KZ)
Ержан Айдана (KZ)
Yerzhan Aidana (KZ)
Куликов Виталий Юрьевич (KZ)
Kulikov Vitaliy Yuryevich (KZ)
Квон Светлана Сергеевна (KZ)
Kvon Svetlana Sergeyevna (KZ)
Ковалева Татьяна Викторовна (KZ)
Kovaleva Tatiana Viktorovna (KZ)
Адамова Гульден Хасеновна (KZ)
Adamova Gulden Khasenovna (KZ)

ЭЦҚ қол қойылды — А. Артыкова
Подписано ЭЦП — А. Артыкова
Signed with EDS — A. Artykova

«Ұлттық зияткерлік меншік институты» РМК директорының м.а.
И.о. директора РГП «Национальный институт интеллектуальной собственности»
Executive director of RSE «National institute of intellectual property»

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ

РЕСПУБЛИКА КАЗАХСТАН

REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

ПАТЕНТ
PATENT

№ 10925

ПАЙДАЛЫ МОДЕЛЬГЕ / НА ПОЛЕЗНУЮ МОДЕЛЬ / FOR UTILITY MODEL

(21) 2025/0975.2

(22) 13.02.2025

(45) 25.07.2025

(54) Темір кені концентратының көмегімен феррокорытпалар өндірісінің жоғары дисперсті шаңын брикеттеу тәсілі
Способ брикетирования высокодисперсной пыли производства ферросплавов с использованием железорудного концентрата
Method of briquetting of highly dispersed dust from ferroalloy production using iron ore concentrate

(73) «Әбілқас Сағынов атындағы Қарағанды техникалық университеті» коммерциялық емес акционерлік қоғамы (KZ)
Некоммерческое акционерное общество «Карагандинский технический университет имени Абылкаса Сагинова» (KZ)
«Karaganda Technical University named after Abylkas Saginov» Non-profit Joint Stock Company (KZ)

(72)

Исагулова Диана Аристотелевна (KZ)	Issagulova Diana Aristotelevna (KZ)
Ержан Айдана (KZ)	Yerzhan Aidana (KZ)
Квон Светлана Сергеевна (KZ)	Kvon Svetlana Sergeyevna (KZ)
Куликов Виталий Юрьевич (KZ)	Kulikov Vitaliy Yuryevich (KZ)
Ковалева Татьяна Викторовна (KZ)	Kovaleva Tatiana Viktorovna (KZ)
Алина Арайлым Алтынбековна (KZ)	Alina Arailym Altynbekovna (KZ)

ЭЦҚ қол қойылды — С. Ахметов
Подписано ЭЦП — С. Ахметов
Signed with EDS — S. Akhmetov

«Ұлттық зияткерлік меншік институты» РМК директоры
Директор РГП «Национальный институт интеллектуальной собственности»
Director of the «National Institute of Intellectual Property» RSE

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж.

Технологические карты



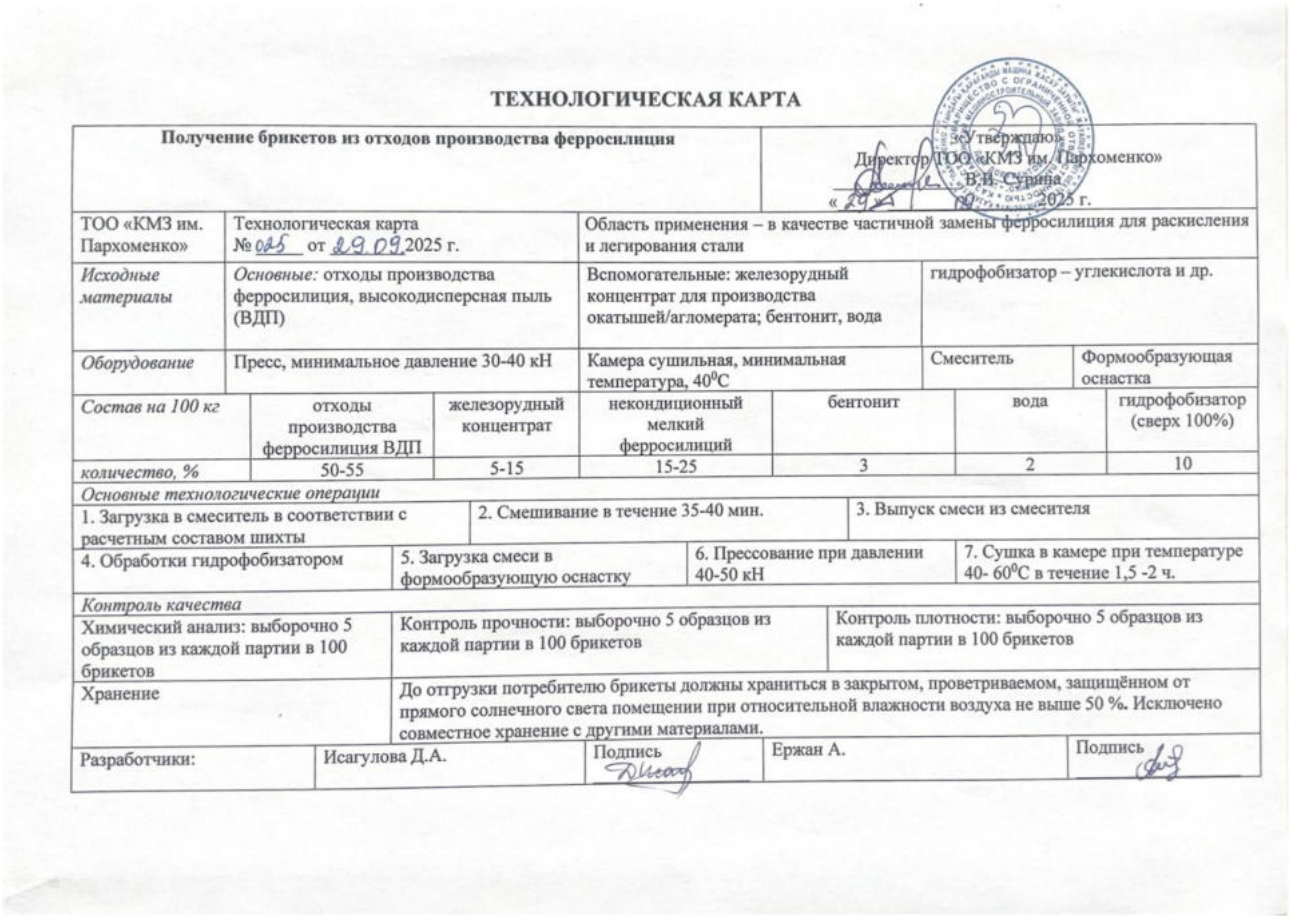
Технологическая карта

Получение брикетов из отходов производства ферросилиция			«Утверждаю» Директор ТОО «КМЗ им. Пархоменко» В.В.Сурина «26» 02 2024 г.		
ТОО «КМЗ им. Пархоменко»	Технологическая карта № 023 от «26» 02 2024 г.	Область применения – в качестве частичной замены ферросилиция для раскисления и легирования стали			
Исходные материалы	основные: отходы производства ферросилиция - высокодисперсная пыль (ВДП)	вспомогательные: железорудный концентрат для производства окатышей/агломерата; жидкое стекло; вода		гидрофобизатор – углекислота и др.	
Оборудование	Пресс, минимальное давление 30кН	Камера сушильная, минимальная температура 35^{0}С		Смеситель	Формообразующая оснастка

Состав на 100 кг	отходы производства ферросилиция ВДП	железорудный концентрат	жидкое стекло (сверх 100)	вода (сверх 100)	гидрофобизатор (сверх 100)
количество, кг	95-97	3-5	7-10	7-10	10

Основные технологические операции			
1.Загрузка в смеситель в соответствии с расчетным составом шихты	2.Смешивание в течение 40мин	3.Выпуск смеси из смесителя	
4.Обработка гидрофобизатором	5.Загрузка смеси в формообразующую оснастку	6.Прессование при давлении 50 -70 кН	7.Сушка* в камере при температуре 35^{0}С в течение 60мин
Контроль качества			
Химический анализ: выборочно 1 образец из каждой партии в 100 брикетов	Контроль прочности: выборочно 1 образец из каждой партии в 100 брикетов	Контроль плотности: выборочно 1 образец из каждой партии в 100 брикетов	
Хранение	До отгрузки потребителю брикеты должны храниться в темном помещении при влажности не более 45%. Исключено совместное хранение с другими материалами		
*Примечание: данная операция может быть исключена, если влажность окружающей среды не превышает 45%.			
Разработчики:	Омарова А.Е., Исагулова Д.А.	Подписи	

А) Предварительная



ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ КАРТА

Получение брикетов из отходов производства ферросилиция							«Утверждаю» Директор ТОО «КМЗ им. Пархоменко» В.И. Сурина «29» 09 2025 г.
ТОО «КМЗ им. Пархоменко»	Технологическая карта № 005 от 29.09.2025 г.		Область применения – в качестве частичной замены ферросилиция для раскисления и легирования стали				
Исходные материалы	*Основные:* отходы производства ферросилиция, высокодисперсная пыль (ВДП)		Вспомогательные: железорудный концентрат для производства окатышей/агломерата; бентонит, вода			гидрофобизатор – углекислота и др.	
Оборудование	Пресс, минимальное давление 30-40 кН		Камера сушильная, минимальная температура, 40^{0}С			Смеситель	Формообразующая оснастка
Состав на 100 кг	отходы производства ферросилиция ВДП	железорудный концентрат	некондиционный мелкий ферросилиций	бентонит	вода	гидрофобизатор (сверх 100%)	
количество, %	50-55	5-15	15-25	3	2	10	
Основные технологические операции							
1. Загрузка в смеситель в соответствии с расчетным составом шихты	2. Смешивание в течение 35-40 мин.		3. Выпуск смеси из смесителя				
4. Обработки гидрофобизатором	5. Загрузка смеси в формообразующую оснастку		6. Прессование при давлении 40-50 кН		7. Сушка в камере при температуре 40- 60^{0}С в течение 1,5 -2 ч.		
Контроль качества							
Химический анализ: выборочно 5 образцов из каждой партии в 100 брикетов	Контроль прочности: выборочно 5 образцов из каждой партии в 100 брикетов		Контроль плотности: выборочно 5 образцов из каждой партии в 100 брикетов				
Хранение	До отгрузки потребителю брикеты должны храниться в закрытом, проветриваемом, защищённом от прямого солнечного света помещении при относительной влажности воздуха не выше 50 %. Исключено совместное хранение с другими материалами.						
Разработчики:	Исагулова Д.А.		Подпись	Ержан А.		Подпись	

Б) Окончательная