

**БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ им. В.Г. ШУХОВА**

На правах рукописи



БОДЯКОВ АЛЕКСАНДР НИКОЛАЕВИЧ

**ТЕХНОЛОГИЯ СТАБИЛИЗАЦИИ ШЛАКА
ДЛЯ ЩЕБНЯ ОСНОВАНИЙ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ**

Специальность 2.1.5. Строительные материалы и изделия

**Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

**Научный руководитель:
кандидат технических наук, доцент
Маркова Ирина Юрьевна**

Белгород 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА.....	12
1.1 Анализ отечественного рынка каменных материалов для дорожного строительства.....	13
1.2 Исследование потенциальных источников сырья для замены традиционных каменных материалов	17
1.3 Современная методологическая база стабилизации шлаков.....	25
1.4 Особенности кристаллохимической стабилизации	32
1.5 Выводы	37
2 МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИМЕНЯЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ.....	40
2.1 Методы исследования.....	40
2.2 Характеристика применяемых материалов	46
2.3 Выводы	50
3 ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ ИСХОДНЫХ СЫРЬЕВЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ КРИСТАЛЛОХИМИЧЕСКОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ.....	51
3.1 Методологическая основа экспериментальных исследований	51
3.2 Физико-механические свойства исходного шлака	57
3.3 Физико-химические свойства исходного шлака.....	65
3.4 Структурные особенности проб металлургического шлака полученного по различным технологиям охлаждения	71
3.5 Состав и химические свойства стабилизаторов из отходов производства	75
3.6 Выводы	82
4 АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ ДЛЯ КРИСТАЛЛОХИМИЧЕСКОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ САМОРАСПАДАЮЩЕГОСЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ШЛАКА	84

4.1	Исследование влияния различных стабилизаторов на свойства шлака в лабораторных условиях.....	84
4.2	Особенности введения стабилизатора в шлаковый расплав	90
4.3	Стабилизация шлакового расплава с применением гранулированной пыли ДСП в лабораторных условиях	94
4.4	Анализ свойств шлака, полученного в результате масштабирования технологии стабилизации с применением гранулированной пыли ДСП в условиях реального производства.....	100
4.5	Анализ физико-механических свойств стабилизированного шлака.....	108
4.6	Выводы	113
5	ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ СТАБИЛИЗАЦИИ ШЛАКА ДЛЯ ЩЕБНЯ ОСНОВАНИЙ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ	116
5.1	Технологические особенности стабилизации шлака.....	115
5.2	Расчет конструкций дорожных одежд с использованием стабилизи- рованного шлака.....	119
5.3	Технико-экономическое обоснование устройства оснований авто- мобильных дорог с применением стабилизированного шлака	125
5.4	Внедрение результатов работы.....	128
5.5	Выводы	129
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ	131
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	133
	ПРИЛОЖЕНИЯ	153
	ПРИЛОЖЕНИЕ А. Акт о производственном эксперименте по изучению влияния гранулированной пыли на физические свойства шлака	154
	ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Протоколы расчёта конструкций дорожной одежды.....	155
	ПРИЛОЖЕНИЕ В. Локальные сметные расчёты	172
	ПРИЛОЖЕНИЕ Г. Титульный лист рекомендаций по использованию отходов электрометаллургического производства для получения высоко- прочных каменных материалов для дорожного строительства	173

ПРИЛОЖЕНИЕ Д. Титульный лист стандарта организации СТО 02066339–054–2023	174
ПРИЛОЖЕНИЕ Е. Титульный лист стандарта организации СТО 02066339–055–2023	175
ПРИЛОЖЕНИЕ Ж. Акт об испытаниях	176
ПРИЛОЖЕНИЕ И. Протокол о намерениях	178
ПРИЛОЖЕНИЕ К. Акт об апробации результатов работы.....	179
ПРИЛОЖЕНИЕ Л. Справка о внедрении результатов работы в учебный процесс.....	180

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность. В современном дорожном строительстве каменные материалы играют важную роль, обеспечивая прочность и долговечность дорожных конструкций. Объемы их потребления достигают более 300 млн м³ в год. Высокий спрос на сырье для получения дорожно-строительных материалов обусловлен реализацией стратегических программ, национальных проектов и, возникшей в последние годы, необходимостью восстановления инфраструктурных объектов в приграничных зонах СВО, включающих разветвленную сеть автомобильных дорог. При этом, отмечается дефицит качественных каменных материалов, который связан с рядом причин: истощение запасов каменных карьеров; экологические требования и законодательные ограничения (запрет на добычу из-за соображений экологической безопасности).

Одним из путей решения обозначенной проблемы является использование крупнотоннажных отходов металлургического производства – шлаков. Однако широкомасштабное использование металлургических шлаков затруднено из-за непостоянства свойств и низких физико-механических показателей. Перевод данного вида отходов в категорию высококачественного техногенного сырья возможен путем разработки технологии кристаллохимической стабилизации шлака с использованием в качестве стабилизаторов также отходов производства, что позволит снизить объемы отходов, накапливающихся в отвалах, и расширить номенклатуру качественных каменных материалов для дорожного строительства.

Работа выполнена при финансовой поддержке в форме: гранта Фонда содействия инновациям по программе «УМНИК» проект № 15227ГУ/2020; Стипендии президента № СП-1960.2022; программы «Приоритет-2030»; гранта РФФ 23-19-00796.

Степень разработанности темы. Вопросам переработки отходов металлургических производств с точки зрения использования в качестве минерального сырья как в дорожном строительстве, так и при производстве материалов для промышленного и гражданского строительства, посвящен

большой объем работ, выполненных отечественными и зарубежными научными школами.

Однако, несмотря на значимость полученных результатов, предлагаемые технологические решения по переработке самораспадающихся высокоосновных шлаков электрометаллургического производства не удовлетворяют части решаемых задач. Так, затраты на технологические операции по переводу отходов в высококачественный сырьевой материал не обеспечивают необходимый экономический эффект. Кроме того, остаются не раскрытыми вопросы кристаллохимической стабилизации шлакового расплава для получения высокопрочных каменных строительных материалов за счет использования отходов электрометаллургических предприятий без существенного преобразования технологической линии и удорожания готовой продукции.

Цель работы. Разработка научно обоснованного технологического решения по стабилизации электрометаллургических шлаков, обеспечивающего получение высокопрочных каменных материалов для дорожного строительства.

Для достижения указанной цели решались следующие **задачи**:

- изучение комплекса физико-механических, физико-химических свойств и структурных особенностей шлаков, как объектов стабилизации, и отходов различных производств, как инициаторов стабилизации, для установления возможности и целесообразности их использования;
- исследование влияния и установление механизма взаимодействия шлакового расплава со стабилизатором в виде пыли дуговых сталеплавильных печей;
- установление закономерностей структурообразования и зависимостей, связывающих свойства каменных материалов с составом и свойствами исходного сырья; технологическими параметрами и рецептурными факторами получения стабилизированного шлака;
- разработка нормативно-технической документации для реализации результатов исследований; промышленная апробация.

Научная новизна работы. Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено технологическое решение, обеспечивающее получение высокопроч-

ного каменного материала для дорожного строительства в виде стабилизированного шлака, заключающееся в кристаллохимической стабилизации шлакового расплава дисперсными отходами электрометаллургического производства. Введение 2–5 % стабилизатора в виде гранулированной пыли дуговых сталеплавильных печей (ДСП) в состав шлакового расплава обеспечивает получение каменных материалов пригодных как для дорожного строительства, так и для строительной отрасли в целом. Отсутствие в составе дорогостоящих боратовых компонентов и низкая стоимость применяемого стабилизатора позволяет получить шлаковый щебень устойчивой структуры с требуемыми физико-механическими характеристиками и низкой себестоимостью.

Предложен механизм фазо- и структурообразования шлака в процессе кристаллохимической стабилизации шлакового расплава. Стабилизирующий эффект достигается за счет присутствия в составе вводимых компонентов ионов кальция, калия, натрия, марганца, встраивающихся в кристаллическую структуру минералов, за счет чего образуются твердые растворы, понижающие температуру полиморфных превращений. Это позволяет предотвратить силикатный γ -распад за счет фиксации полиморфной структуры C_2S в высокотемпературных α - и β -модификациях. В результате формируется материал с прочными связями, устойчивыми с течением времени, обеспечивающими повышение физико-механических характеристик шлака.

Установлены закономерности влияния рецептурно-технологических параметров получения стабилизированного шлака, а именно состава, концентрации пыли дуговых сталеплавильных печей и способа ее введения на реологические свойства расплава, определяющие условия гидродинамического слияния вводимых компонентов при кристаллохимической стабилизации самораспадающихся металлургических шлаков.

Теоретическая и практическая значимость работы. Дополнены теоретические представления о процессах фазо- и структурообразования при формировании каменного материала в результате кристаллохимической стабилизации шлакового расплава пылью дуговых сталеплавильных печей. Установлены закономерно-

сти влияния состава и концентрации стабилизаторов на комплекс физико-механических свойств каменных материалов из стабилизированного шлака и их структурные особенности.

Установлены рецептурно-технологические параметры получения стабилизированного шлака путем кристаллохимической стабилизации шлакового расплава пылью дуговых сталеплавильных печей, обеспечивающие получение высокопрочного каменного материала с маркой по прочности М1200, по морозостойкости F50, по истираемости ИП, устойчивостью структуры УС1, что позволяет классифицировать его как шлаковый щебень, пригодный для строительства и реконструкции автомобильных дорог в качестве оснований и покрытий.

Разработана технология стабилизации, включающая гранулирование пыли ДСП и введение в шлаковый расплав на стадии его слива.

Предложены альтернативные конструкции и произведен расчет дорожных одежд с применением полученного шлакового щебня.

Методология и методы исследования. Методологической основой работы являлся комплексный анализ системы «состав (сырье) – структура (сырье, материал) – свойства (материал)» в части анализа исходного отвального шлака, отходов сталеплавильного производства в качестве потенциальных стабилизаторов, а также оценки эффективности процесса стабилизации шлакового расплава в зависимости от вида и концентрации стабилизатора. Идея базируется на известной роли кристаллохимической стабилизации компонентов шлакового расплава в улучшении свойств металлургических шлаков.

Оценку состава и структурных особенностей осуществляли с использованием: РФА, растровой электронной микроскопии, рентгенофлуоресцентного анализа, ИК-спектроскопии, лазерной гранулометрии, оптической микроскопии, метода адсорбции газов по БЭТ. Физико-механические свойства стабилизированного шлака оценивались в соответствии с ГОСТ 8269.0–97 «Щебень и гравий из плотных горных пород и отходов промышленного производства для строительных работ. Методы физико-механических испытаний» (с Изменениями № 1, 2) и ГОСТ 3344–83 «Щебень и песок шлаковые для дорожного строительства. Технические

условия» (с Изменениями № 1).

Положения, выносимые на защиту:

- теоретическое обоснование и экспериментальное подтверждение технологического решения, обеспечивающего получение высокопрочного каменного материала для дорожного строительства в виде шлака, стабилизированного пылью дуговых сталеплавильных печей;
- механизм фазо- и структурообразования шлака в процессе кристаллохимической стабилизации шлакового расплава пылью дуговых сталеплавильных печей;
- закономерности влияния рецептурно-технологических параметров получения стабилизированного шлака на реологические свойства расплава и физико-механические свойства каменных материалов;
- состав, технология получения стабилизированного шлака и свойства каменных материалов;
- расчет конструкций дорожных одежд с применением стабилизированного шлакового щебня в зависимости от категории автомобильной дороги и типа дорожной одежды. Результаты апробации.

Степень достоверности полученных результатов обеспечена: применением общепринятых и апробированных методик, в том числе с учетом требований нормативной документации; использованием метрологически поверенного лабораторного оборудования; воспроизводимостью результатов экспериментальных исследований; промышленной апробацией и ее положительными результатами, не противоречащими общепризнанным научным фактам и результатам других исследований.

Апробация результатов работы. Основные положения диссертационной работы были представлены на: Международном молодежном форуме «Образование. Наука. Производство» (Белгород, 2018, 2020, 2021, 2022, 2023); Региональной научно-практической конференции по программе «УМНИК» (Белгород, 2019); Международной научно-технической конференции молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова (Белгород, 2021, 2023); VII Конференции рынок щебня России

(Москва, 2021); Международной научно-практической конференции «Наукоемкие технологии и инновации (XXV научные чтения)» (Белгород, 2023); Международной научно-технической конференции «Современные тренды в строительстве: проблемы и пути их решения», посвященная 80-летию государственного и политического деятеля КР Насирдина Исанова (Бишкек, Кыргызская Республика, 2023).

Внедрение результатов исследований. Промышленная апробация технологии стабилизации шлака осуществлялась в электросталеплавильном цехе на базе дочернего предприятия АО «ОЭМК им А.А. Угарова» – ООО «Уралметком – Оскол» при выплавке стали на стадии слива шлакового расплава.

Для масштабного внедрения результатов работы разработаны нормативные документы: рекомендации по использованию отходов электрометаллургического производства для получения высокопрочных каменных материалов для дорожного строительства; стандарт организации СТО 02066339–054–2023 «Гранулированный стабилизирующий агент на основе пыли дуговых сталеплавильных печей. Технические условия»; СТО 02066339–055–2023 «Высокопрочные каменные материалы из стабилизированного металлургического шлака. Технические условия»; технологический регламент на получение стабилизированного шлака с использованием стабилизатора в виде пыли дуговых сталеплавильных печей.

Теоретические положения, результаты научно-исследовательской работы и промышленного внедрения используются в учебном процессе при подготовке бакалавров по направлению 08.03.01 – «Строительство» образовательных программ «Автомобильные дороги и аэродромы», «Экспертиза и технологии перспективных материалов»; магистров направлений 08.04.01 – «Строительство» образовательных программ «Автомобильные дороги» и «Дорожно-строительные материалы и технологии»; специалистов по направлению 08.05.02 – «Строительство, эксплуатация, восстановление и техническое прикрытие автомобильных дорог, мостов и тоннелей» профиль «Строительство (реконструкция), эксплуатация и техническое прикрытие автомобильных дорог».

Публикации. Основные положения работы изложены в 18 публикациях, в

том числе 3 – в журналах, входящих в перечни рецензируемых научных изданий и международных реферативных баз, рекомендованных ВАК РФ; 4 – в изданиях, индексируемых в базе данных Scopus; 1 патент РФ на изобретения. Кроме того, на состав гранул и способ стабилизации зарегистрировано 4 ноу-хау.

Личный вклад. Автором проведено теоретическое обоснование и экспериментальное подтверждение эффективности использования отходов электрометаллургического производства для кристаллохимической стабилизации металлургических шлаков с целью получения высокопрочных каменных материалов. Осуществлен комплекс лабораторных исследований с последующей обработкой и анализом полученных данных. Принято участие в апробации полученных результатов работы.

Структура и объем работы. Диссертационная работа включает введение, пять глав, заключение, список литературы и приложения. Диссертация изложена на 180 страницах машинописного текста, включающего 27 таблиц, 53 рисунка, список литературы из 175 источников, 10 приложений.

1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

В современном дорожном строительстве каменные материалы играют важную роль, так как они обеспечивают прочность и долговечность дорожных покрытий, а объемы их потребления достигают более 300 млн м³ в год. Высокий спрос на сырье для получения дорожно-строительных материалов обусловлен реализацией стратегических программ: Транспортной стратегии РФ до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года (от 27 ноября 2021 года № 3363-р) [1], Стратегии развития инновационной деятельности в области дорожного хозяйства на период 2021–2025 годов, национальных проектов («Безопасные качественные дороги» [2], «Региональная и местная дорожная сеть» [3]) и, возникшей в последние годы, необходимостью восстановления инфраструктурных объектов в приграничных зонах специальной военной операции (СВО), включающих разветвленную сеть автомобильных дорог общего пользования. Так в 2023 году в рамках реализации Федерального проекта «Региональная и местная дорожная сеть» в Белгородской области консолидированный бюджет на модернизацию и развитие транспортной сети, включающий средства Федерального бюджета, составил более 3 млрд рублей. Это позволило на данный момент обеспечить укладку 900 584,31 м² дорожных покрытий. При этом, отмечается дефицит качественных каменных материалов, который связан с рядом причин.

Во-первых – это истощение запасов каменных карьеров, что приводит к увеличению затрат на добычу и транспортировку сырья, и, как следствие стоимости дорожно-строительных композитов.

Во-вторых, экологические требования и законодательные ограничения (ограничения на добычу из-за соображений экологической безопасности), которые также влияют на доступность каменных материалов. В свою очередь, возможность замены потребителями традиционного минерального сырья, такого как песок и щебень другими продуктами затруднена, из-за отсутствия материалов, обладающих комплексом требуемых базовых свойств [4]. Совокупность перечисленных факторов способствует поиску возможных путей решения обозначенной проблемы.

1.1 Анализ отечественного рынка каменных материалов для дорожного строительства

Основной характеристикой щебня, которая влияет на его функциональное назначение и, в итоге, обуславливает выбор покупателей, является его прочность. Наряду с прочностью зерновой состав также является одним из ключевых показателей, обуславливающих область применения и функциональное назначение рассматриваемого щебня [5]. Если рассматривать природный щебень, то прочностные показатели являются постоянными для конкретной породы. В свою очередь фракция щебня является величиной переменной, поскольку технология производства щебня позволяет изготавливать щебень различных фракций на одном и том же оборудовании. При этом, в зависимости от набора базовых свойств, некоторые виды (фракции) песка, щебня и песчано-гравийных смесей (ПГС) применяются исключительно в дорожном строительстве, а некоторые виды указанных товаров только в капитальном и жилищном строительстве [6].

С учетом определенных фактических районов продаж на рынке каменных материалов установлено, что:

- при транспортировке щебня из осадочных плотных горных пород используется преимущественно железнодорожный и автомобильный транспорт;
- дальность перевозки щебня может составлять от 1000 до 2000 км. При этом цена товара с учетом транспортных расходов возрастает более чем на 100–200 %, что обуславливается в основном отсутствием производства товара или его нехваткой на территории соответствующего региона [7];
- в целом, потребности каждого федерального округа обеспечиваются местными карьерами, находящиеся внутри непосредственно субъектов Российской Федерации данного федерального округа.

Основными потребителями щебня из осадочных плотных горных пород являются дорожно-строительные предприятия каждого областного центра, которые потребляют щебень как из карьеров расположенных внутри своего федерального округа, так и из карьеров, расположенных в близлежащих федеральных округах.

При этом, в двух и более граничащих между собой субъектах Российской Федерации покупателю экономически выгодно приобретать товар как с территории субъекта, входящего в один с потребителем федеральный округ, так и с территории соседней области, входящей в состав другого федерального округа, так как транспортное плечо доставки товара из двух областей до точки сбыта приблизительно одинаково. В некоторых субъектах Российской Федерации объем производства щебня из плотных горных пород значительно превышает внутреннее потребление региона, в связи с чем поставки товара из данных регионов осуществляются, как на приграничные, так и на удаленные территории.

Существенное наращивание объемов как строительства в целом, так и дорожного строительства в частности, может привести к росту загрузки мощностей по производству щебня до критически высокого уровня в 82–95 %. В свою очередь, это может создать риски возникновения его дефицита и спровоцировать рост цен на рынке сырьевых материалов.

На сегодняшний день рынок нерудных строительных материалов по видам природного сырья для дорожного строительства согласно геологической карте отделен географическими границами (рисунок 1.1). Для каждого вида природного сырья свои границы [8]:

- строительный песок и песчано-гравийные смеси (ПГС) – более 10 % объема вывозится из следующих регионов: Карелия, Владимир, Иваново, Калуга, Смоленск, Тверь и Ярославль, Адыгея, Волгоград и Краснодар, Кабардино-Балкария, Карачаево-Черкесия и Северная Осетия-Алания, Киров, Оренбург, Ульяновск и Чувашия, Марий Эл, Курган, Свердловск и Челябинск, Алтай; Псковской области, Калуги и Ярославля, Ростова, Карачаево-Черкесии и Северной Осетии-Алании, Кирова и Удмуртии. Из других регионов строительный песок импортируется в: Вологодскую область, Ленинград, Санкт-Петербург, Белгород, Кострому, Москву, Астрахань, Крым и Севастополь, Ставрополье, Пензу, Саратов, Ульяновск;

- щебень из изверженных плотных горных пород – Северо-Западный федеральный округ (СЗФО), Центральный федеральный округ (ЦФО), Уральский

федеральный округ (УФО), Сибирский федеральный округ (СФО), Приволжский федеральный округ (ПФО) и Дальневосточный федеральный округ (ДФО) отдельно. Исключением является Республика Крым и г. Севастополь, а также субъекты Российской Федерации, в которых присутствуют производители щебня. Для рынков Южного федерального округа (ЮФО) и Северо-Кавказского федерального округа (СКФО) географическими границами являются Приволжский федеральный округ (ПФО), Южный федеральный округ (ЮФО) и Северо-Кавказский федеральный округ СКФО;

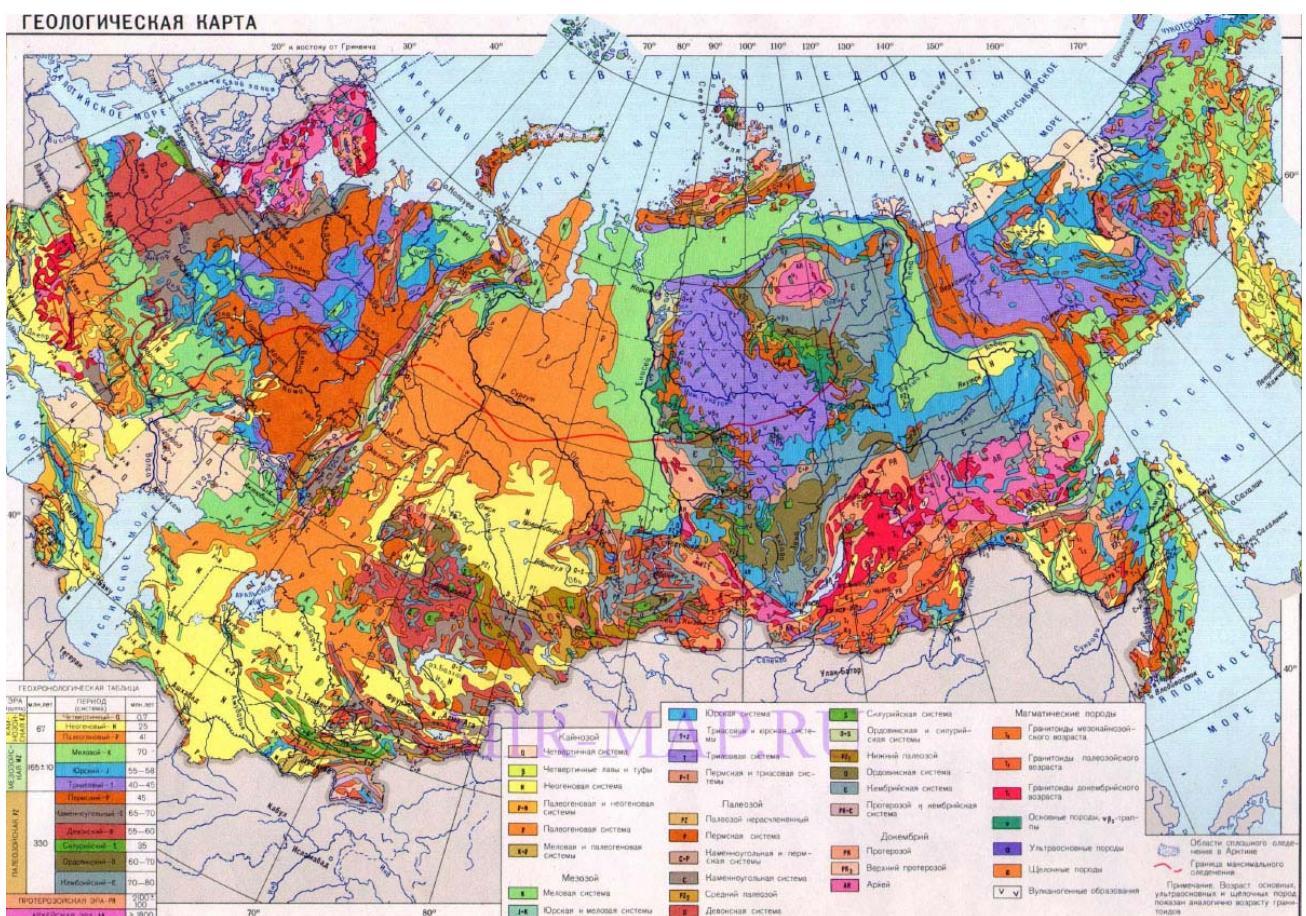


Рисунок 1.1 – Геологическая карта Российской Федерации

— щебень из осадочных плотных горных пород, включая щебень из гравия и валунов – территория нескольких субъектов Российской Федерации Вологодская область, Республика Карелия, Псковская область, Владимирская область, Ивановская область, Калужская область, Липецкая область, Смоленская область,

Тульская область, Ярославская область, Республика Адыгея, Краснодарский край, Ростовская область, Кабардино-Балкарская Республика, Республика Северная Осетия-Алания, Кировская область, Республика Марий Эл, Республика Мордовия, Оренбургская область, Пензенская область, Пермский край, Свердловская область, Челябинская область, Иркутская область, Кемеровская область, Еврейская автономная область.

При этом не исключается наличие локальных региональных рынков, а также рынков, охватывающих территории нескольких федеральных округов. Согласно статистическому анализу потребления объемов щебня в 2017–2023 гг. в России с учетом прогнозной оценки необходимых объемов на период до 2026 года (рисунок 1.2) ожидается увеличение потребления каменных материалов, связанное с наращиванием темпов строительства новых, ремонта и реконструкции существующих автомобильных дорог.

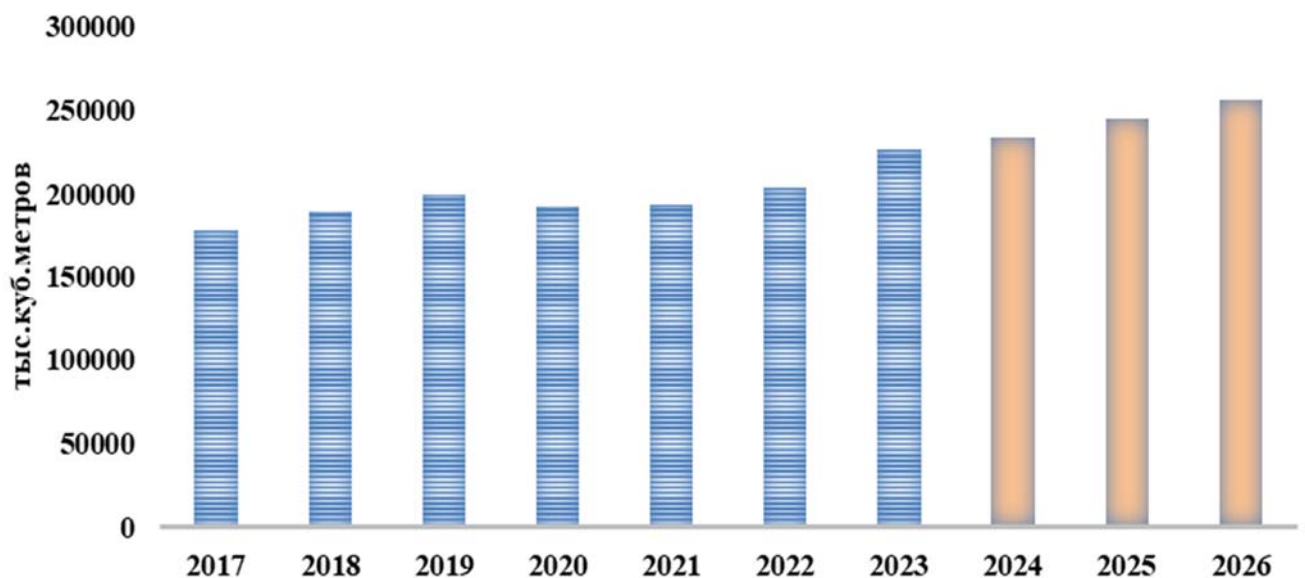


Рисунок 1.2 – Статистический анализ объемов потребления щебня в России

Таким образом, анализ отечественного рынка каменных материалов показал, что в ближайшей перспективе ожидается рост потребления щебня, который, в частности, обусловлен наращиванием объемов строительных работ в транспортном строительстве. Существующие на сегодняшний день карьеры каменных ма-

териалов по ряду причин испытывают сложности в обеспечении требуемыми объемами потребления. Кроме того, некоторые регионы вынуждены закупать привозные каменные материалы, высокая стоимость которых обусловлена, в том числе, транспортными расходами на доставку. В этой связи поиск альтернативных источников и технологий получения сырья в виде каменных материалов с комплексом заданных характеристик приобретает особую актуальность.

1.2 Исследование потенциальных источников сырья для замены традиционных каменных материалов

Непрерывная потребность удовлетворения спроса на щебень ведет к высокой нагрузке на источники сырьевой базы и производственные мощности регионов, в которых сосредоточены наиболее крупные запасы нерудного сырья. Дефицит каменных строительных материалов для транспортного строительства, демонстрирует необходимость наращивания темпов добычи традиционных или исследования возможности и эффективности применения альтернативных материалов.

Вопросы поиска альтернативных решений для расширения номенклатуры сырьевых ресурсов дорожно-строительного назначения в виду своей актуальности на протяжении многих лет прорабатывались различными научными школами [9–12]. Так, в работах [13–17] предлагается использовать вторичный щебень в качестве крупного заполнителя, который может стать надежной заменой природным каменным материалам, при производстве бетона. Вторичный щебень [18] представляет собой материал, полученный в результате переработки (измельчения) строительных отходов в виде асфальто- и цементобетона. В свете тенденции ресурсо- и энергосбережения повторное использование такого сырья в последние годы весьма актуально. При этом, большую популярность для переработки в дорожном строительстве из-за преимущественного использования в конструкциях дорожных одежд имеет асфальтобетон.

На сегодняшний день, асфальтовый гранулят (измельченный асфальтобе-

тон) [19–27] довольно часто применяют при ремонтах и реконструкции автомобильных дорог непосредственно на участках, где осуществляются строительные работы. Повторное использование сырья при переработке слоев из асфальтобетона называется технологией регенерации (рисунок 1.3). Это позволяет заменить традиционное сырье в различных слоях дорожных конструкций. Однако в зависимости от функционального назначения устраиваемого слоя при регенерации к асфальтовому грануляту добавляют дополнительные компоненты и используют различные виды вяжущих.

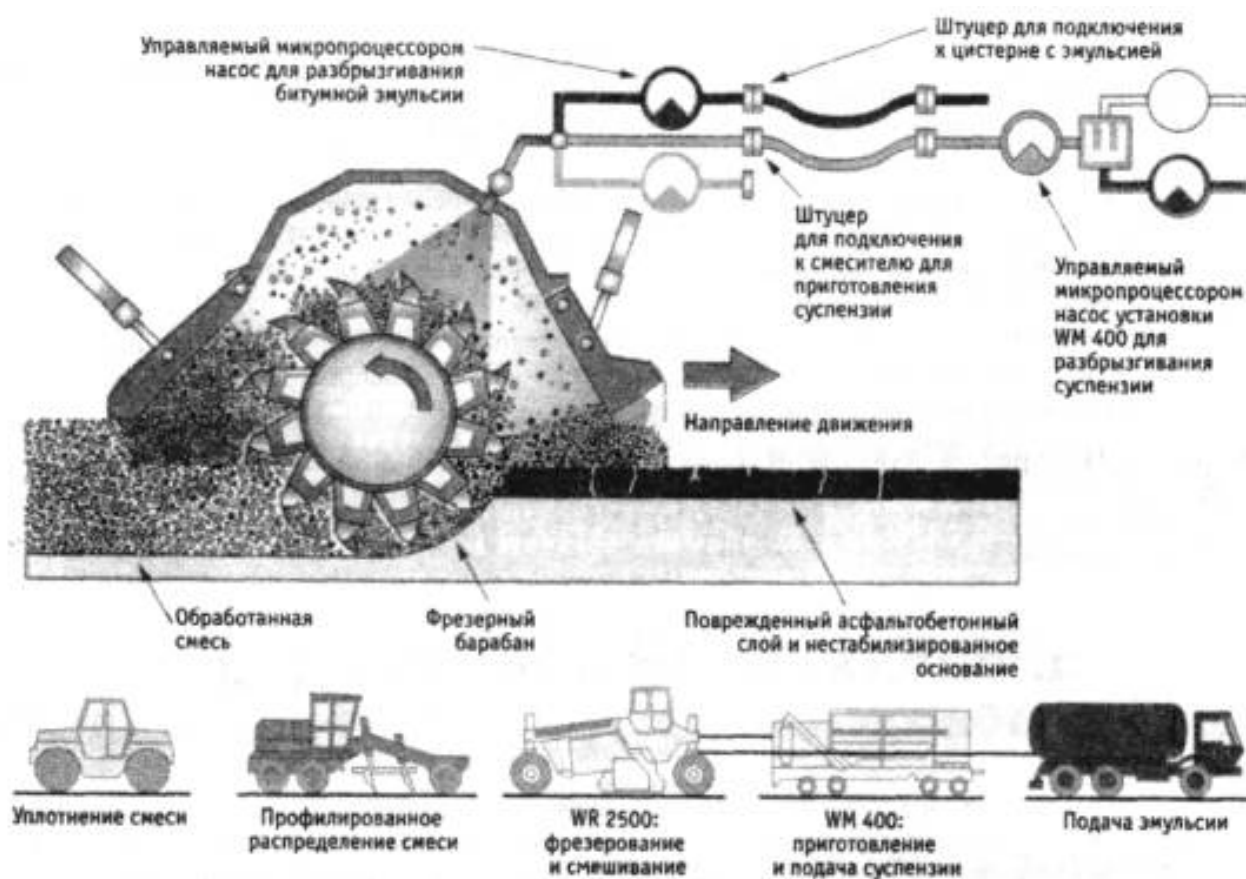


Рисунок 1.3 – Технология регенерации асфальтовых покрытий

Что же касается боя бетона на основе цемента (рисунок 1.4), то его вторичное использование позволяет решить две проблемы: утилизация отбракованных бетонных изделий на крупных предприятиях-изготовителях; повторное применение разрушенных зданий и сооружений в результате природных катаклизмов или боевых действий.



Рисунок 1.4 – Вторичное сырье в виде боя бетона

Наиболее широкое распространение применение данного вида вторичного сырья получило в составе композиционных материалов на основе цемента [28–38]. При этом, в дорожно-строительной отрасли применение боя бетона весьма ограничено, в связи с тем, что каменный материал из боя бетона имеет неоднородную структуру с дефектами, способствующими потере прочности и разрушению под воздействием динамических нагрузок от транспортных средств.

Так же одним из вариантов замены традиционного щебня является улучшение физико-механических свойств малопрочных каменных материалов с использованием методов химической пропитки. Так, авторами [39] разработан и освоен метод пропитки местного карбонатного щебня жидким расплавом серы в лабораторных условиях. Показано, что при этом достигается увеличение его марки по дробимости, что объясняется повышением плотности материала на 10–11 % за счет заполнения пор, при этом лещадность снижается от 6 до 10 раз. Данный материал рекомендован для дорожного строительства при устройстве оснований автомобильных дорог и производстве асфальтобетона.

В своих исследованиях Черных Д.И. [40–42] доказал, что конверсионный (техногенный) карбонат кальция может утилизироваться в качестве эффективного компонента при получении искусственного заполнителя в форме гравия, а практическое применение разновидностей разработанного искусственного гравия ориентировано на использование в качестве заполнителя для бетонов, в качестве сме-

сей заполнителей для устройства дорожного полотна.

Черепов В.Д. в своей работе [43] определил основные физико-механические и эксплуатационные характеристики рациональных составов прессованного каменного материала на основе отсеков дробления карбонатных пород, модифицированного добавкой Пенетрон Адмикс при расходе цемента 10–20 %. Прочность при сжатии материала составила 20–25 МПа, морозостойкость соответствует марке F50, коэффициент водостойкости превышает значение 0,8. Значения средней плотности, общей пористости и водопоглощения (по массе) полученного материала составили 2100 кг/м³, 20–23 %, 6,5–6,2 % соответственно.

Наряду с рассмотренными альтернативными вариантами щебня наиболее многотоннажным и перспективным является техногенное сырье в виде металлургических шлаков [44–53]. На территории Российской Федерации ежегодно образуется около 30 млн тонн отвальных металлургических шлаков в год.

Шлаки, являющиеся побочными продуктами металлургического производства, представляют собой ценное сырье для строительной отрасли благодаря своим физико-механическим и физико-химическим свойствам [54]. Они обладают низкой стоимостью, но характеризуются неоднородностью состава от партии к партии и, как следствие, изменяющимися во времени физико-механическими свойствами. Кроме того, иногда в составе шлаковых материалов отмечается наличие тяжелых металлов. Это существенно затрудняет использование шлаков в строительной индустрии. Для решения обозначенных проблем требуется проведение комплексных исследований по изучению базовых характеристик металлургических шлаков и совершенствованию технологий их обработки с целью обеспечения заданных характеристик.

Шлак является неметаллическим побочным продуктом, состоящим в основном из силикатов и оксидов, которые образуются в процессе рафинирования расплавленной стали [55]. Металлургические шлаки разделяют по видам выплавляемого металла (рисунок 1.5) на: конвертерные, мартеновские, доменные, электросталеплавильные, ферросплавные и ваграночные [56–57].

Их, в свою очередь, можно объединить в две группы: шлаки первичных ме-

таллургических процессов (доменные и ферросплавные), а также шлаки вторичных процессов (сталеплавильные и ваграночные). Последние исследования показали, что выход первичного шлака на тонну стали, составляет 12–15 %, а процент вторичного шлака составляет около 3 % [58–59]. В настоящий момент применяют два основных метода для производства стали: кислородно-конверторные установки и электродуговая печь (ДСП). В настоящее время развитие сталеплавильного производства образует два основных вида шлака – шлаки окислительного рафинирования металла в дуговой сталеплавильной печи или кислородном конверторе (печные шлаки) и шлаки восстановительного рафинирования в агрегате ковш-печь (шлаки АКП) [60].



Рисунок 1.5 – Классификация шлака по виду выплавляемого металла

Состав шлака зависит от состава огнеупорной футеровки печи [61]. Если футеровка сделана из кислых материалов, таких как шамот или песок, то и шлак будет кислым. Если же футеровка изготовлена из основных материалов, например, магнезита, то и шлак будет основным. Это связано с тем, что разные материалы имеют разные химические свойства и могут взаимодействовать с шлаком, что может привести к разрушению футеровки.

Компонентом, способствующим формированию шлаков в технологическом

процессе, выступает флюсовый материал [62–64]. Главной функцией флюса является облегчение отделения металла от пустой породы в процессе плавки, называемой рафинирование. Вступая в реакцию с примесями в руде, он образует слой шлака на поверхности расплавленного металла. Образованный слой шлака выполняет дополнительную функцию защитного барьера, отделяя расплавленный металл от воздуха, предотвращая тем самым окисление. Затем шлак сливают, он охлаждается и затвердевает, приобретая конечный вид.

Следует отметить, что флюсы или как их еще называют – пла́вни, используемые в металлургии, по составу могут быть основными, кислыми и глиноземистыми [65–67]. В качестве пла́вней наиболее распространены такие материалы, как: известняк, доломит, железные руды, марганцовые руды, кварц и алюмосиликаты. Так же могут быть использованы плавиковый шпат, сульфиды (например, пирит), гипс, барит и др. Таким образом, состав флюсового материала является одним факторов, определяющих состав образовавшегося шлака.

Удаление шлака требуется в течение нагрева и окисления в конце нагрева, перед выпуском [68–69]. Печь наклоняется назад к шлаковому окну, и шлак сливается или собирается в ковш или на площадку ниже печи, в результате чего образуются пыль и дым. Для специальных сталей, главным образом легированной стали, по металлургическим причинам шлак выпускается с жидкой сталью в ковш. Большая часть шлака отделяется от стали на площадке для скачивания шлака в шлаковый ковш. Дым, образующийся при этом, должен улавливаться с помощью системы вытяжки.

Общеизвестно [70–74], что в зависимости от соотношения основных и кислотных оксидов, металлургические шлаки подразделяются на три категории: основные, кислотные и промежуточные. Окислительная способность шлака возрастает с увеличением его основности. К основным относятся шлаки с высоким содержанием основных оксидов, таких как CaO , MgO и FeO ; к кислотным – шлаки, в которых доминируют SiO_2 и Al_2O_3 ; амфотерные – которые могут вести себя и как кислотные, и как основные. Отношение содержания CaO и MgO к содержанию SiO_2 и Al_2O_3 называют степенью или модулем основности шлака, а обратное

отношение $(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)/(\text{CaO} + \text{MgO})$ – степенью или модулем кислотности. Металлургические шлаки по своей способности к кристаллизации из расплавленного состояния находятся между силикатными стеклами и металлами. Как в случае с другими силикатами, различают кристаллизацию из расплава и из стекла.

Исследования шлаков в целом можно разделить на две категории (рисунок 1.6): повторное использование и воздействие на окружающую среду. Исследования повторного использования шлаков подразделяются на три основных направления: использование шлака в качестве строительного материала, извлечение металлов из шлака и использование шлака для восстановления окружающей среды.

Металлургические шлаки являются ценным сырьем для производства ряда строительных материалов и изделий, которые более дешевые, чем полученные из природного сырья. В настоящее время практически на всех металлургических предприятиях организованы цехи или отделения по переработке шлаков [75].

Основным потребителем шлаков является промышленность строительных материалов, а именно: производство бетона; изготовление шлакоблоков; производство асфальтобетона; отделочные материалы; дорожное строительство; цементные заводы; шлаковая пемза; сырье для производства минеральной ваты; в сельском хозяйстве в качестве удобрения [76–79].

Для производства щебня в основном применяют отвалы шлаки сталеплавильного производства (подходящие для переработки в щебень), а также другие шлаки, в том числе цветной металлургии [80–86]. При использовании шлаков в качестве каменных материалов для дорожного строительства необходимо уделять особое внимание таким характеристикам, как: прочность, дробимость, морозостойкость и устойчивость структуры.

На сегодняшний день среди действующей нормативной документации, регламентирующей использование шлаков в строительстве, выделяют:

– ГОСТ 5578–2019 «Щебень и песок из шлаков черной и цветной металлургии для бетонов. Технические условия»;

– ГОСТ 3344–83 «Щебень и песок шлаковые для дорожного строительства. Технические условия» (с Изменениями № 1);

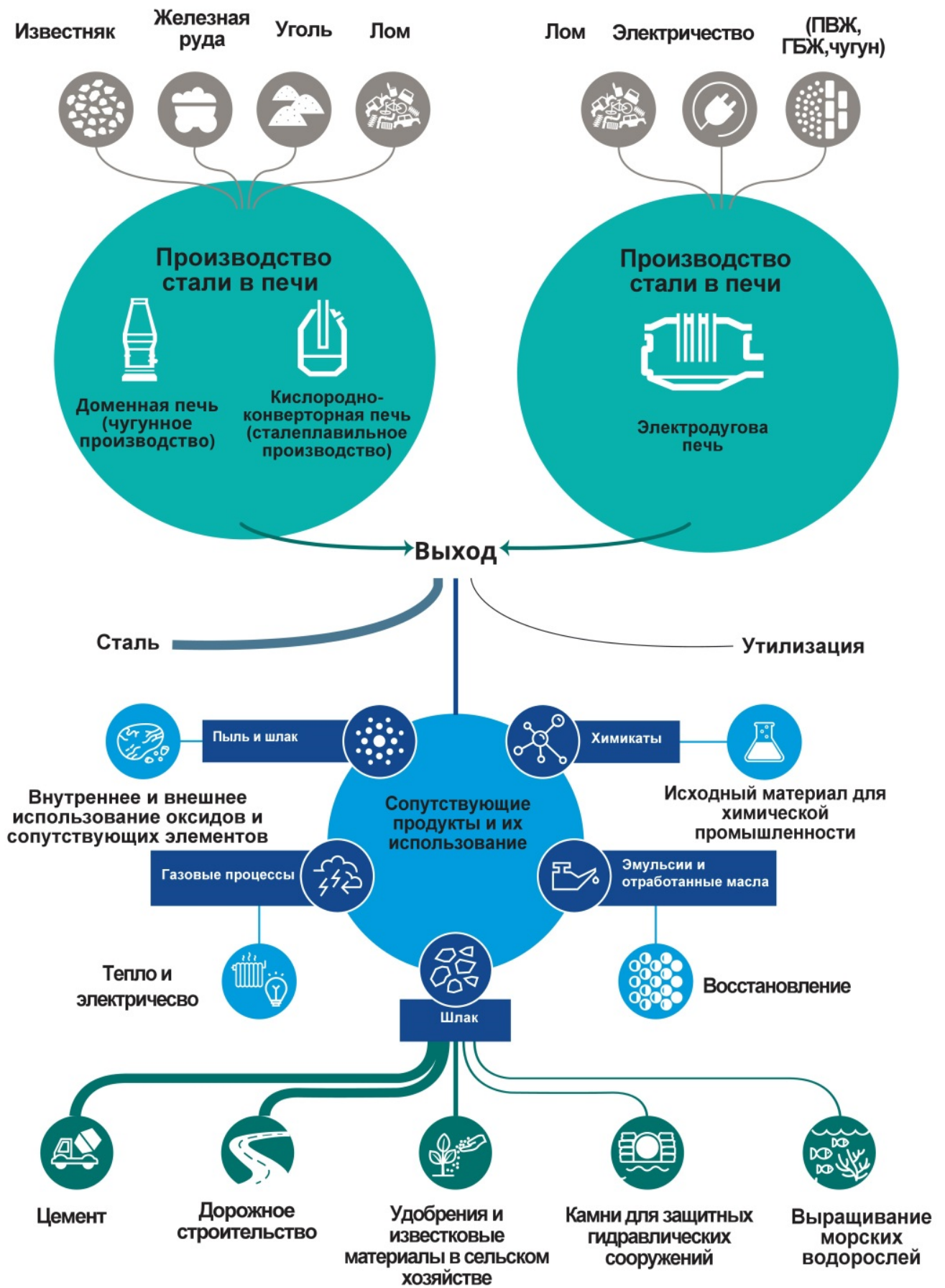


Рисунок 1.6 – Рациональные пути использования вторсырья

– ГОСТ 32826–2014 «Дороги автомобильные общего пользования. Щебень и песок шлаковые. Технические требования» (с Поправкой, с Изменением № 1) – разработан с соблюдением и применяется в зоне действия требований Технического регламента ТР ТС 014/2011 «Безопасность автомобильных дорог», утвержденного решением Коллегии Евразийской экономической комиссии от 13 июня 2012 г. № 81.

На основании проведенного анализа можно сделать вывод, что среди альтернативных видов сырья с позиции использования в качестве каменных материалов наиболее перспективными являются металлургические шлаки. При этом, не все шлаки черной металлургии могут быть использованы в качестве строительных материалов. В виду содержания тяжелых металлов и большого количества кислотных соединений, а также протекающих процессов самораспада затруднено их прямое использование, а их переработка не всегда экономически целесообразна. Улучшение свойств шлака возможно за счет применения такого приема, как стабилизация. Однако с учетом непостоянства состава шлаков, особенностей технологий их получения, а также разновидностей технологий стабилизации в каждом отдельном случае требуется аналитическая проработка с целью принятия наиболее рационального решения для получения конечного материала близкого по своим свойствам к традиционному природному щебню.

1.3 Современная методологическая база стабилизации шлаков

В настоящее время широко признана ионная теория строения расплавленных шлаков, получившая свое подтверждение благодаря работам М.И. Темкина [87], В.А. Кожеурова [88], О.А. Есина [89] и других авторов [90–95]. Расплавленные шлаки состоят из атомных катионов Ca^{2+} , Mg^{2+} , Fe^{2+} , Al^{3+} , связанных в основном с анионами кислорода или с более сложными, содержащими кислород, ионами: PO_4^{3-} , AlO_2^- , FeO_2^- , SiO_4^{4-} . Один из главных факторов, характеризующих шлаки металлургических комбинатов, – это устойчивость их структуры против всех видов распада. Существуют несколько видов распада, которые обуславливают

структуру шлака как склонную к распаду (рисунок 1.7).

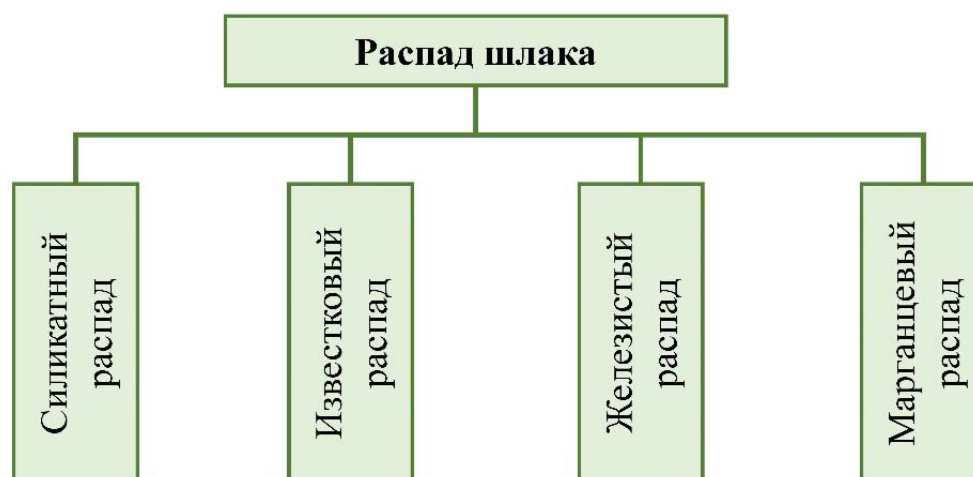


Рисунок 1.7 – Виды распада шлаков

Силикатный распад связан с переходом кальциевого силиката из бета- в гамма-форму и характеризуется значительным приростом объема вещества, вследствие перехода структура шлака покрывается большим количеством трещинами, после чего распадается в тонкодисперсный мучнистый порошок.

Известковый процесс является следствием гидратации извести. Этот тип распада наиболее характерен для мартеновских шлаков. Приводит к самопроизвольному растрескиванию каменного материала на куски.

Железистый распад характерен для металлургических шлаков с избыточным содержанием неокисленного железа относительно окислов этого металла. Предельно допустимая величина составляет до 1,5 % от FeO. При превышении этих значения и взаимодействии шлаков с водой происходит переход сульфида железа в его гидроксид, при этом выделяется сероводород. В результате протекания этих химических реакций происходит резкое увеличение объема шлака (до 38%), что и приводит к растрескиванию.

Марганцевый распад происходит только при нахождении шлака во влажной среде [59].

Однако, необходимо учитывать, что в некоторых случаях металлургические шлаки подвержены процессу самораспада, который связан с наличием в их соста-

ве значительного количества низкотемпературной модификации белита $\gamma\text{-C}_2\text{S}$ [70, 96–106]. Превращение двухкальцевого силиката из его гексагональной кристаллической структуры в моноклинную кристаллическую структуру представляет собой полиморфное превращение, которое происходит при определенной температуре – 550 °С и характеризуется изменениями в кристаллической решетке. Это превращение может привести к изменению физических и химических свойств двухкальцевого силиката, включая его коэффициент теплового расширения, механическую прочность и реакционную способность.

Из кристаллохимии и минералогии известно [70, 96–106], что существует пять полиморфных модификаций C_2S (рисунок 1.8), которые характеризуются различными кристаллическими структурами и свойствами.

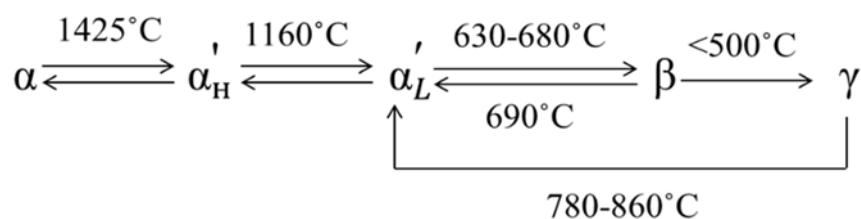


Рисунок 1.8 – Схема полиморфизма белита

Тремя распространенными полиморфными формами двухкальцевого силиката являются $\alpha\text{-C}_2\text{S}$, $\beta\text{-C}_2\text{S}$ и $\gamma\text{-C}_2\text{S}$. Альфа-форма ($\alpha\text{-C}_2\text{S}$) двухкальцевого силиката представляет собой гексагональную кристаллическую структуру, характеризующуюся хорошей термической стабильностью и высокой реакционной способностью с водой. При этом $\alpha\text{-C}_2\text{S}$ устойчив при температуре выше 1425 °С. При температуре 1425 °С происходит переход в высокотемпературную модификацию $\alpha'\text{-C}_2\text{S}$, а при снижении температуры менее 1160 °С происходит переход из высокотемпературной формы $\alpha'\text{-C}_2\text{S}$ в низкотемпературную $\alpha'_L\text{-C}_2\text{S}$. Дальнейшее охлаждение $\alpha\text{-C}_2\text{S}$ до температуры 670 °С приводит сначала к преобразованию в $\beta\text{-C}_2\text{S}$, которая затем при температуре ниже 525 °С медленно переходит в $\gamma\text{-C}_2\text{S}$ [99–102, 105–106].

Бета-форма двухкальциевого силиката представляет собой моноклинную кристаллическую структуру, которая образуется при высоких температурах, является метастабильной модификацией белита и характеризуется низкой термической стабильностью и низкой реакционной способностью с водой.

Гамма-форма двухкальциевого силиката характеризуется случайным расположением атомов в твердом состоянии и обычно считается менее стабильной, чем альфа- или бета-формы. Переход β -C₂S в γ -C₂S сопровождается увеличением объема примерно на 12 % вследствие большой разницы в плотности, что приводит к рассыпанию шлака.

Фазовые переходы «расплав $\leftrightarrow \alpha$, $\alpha \leftrightarrow \alpha'$ » и « $\alpha' \leftrightarrow \beta$ » являются обратимыми, а превращения « $\beta \rightarrow \gamma$ » и « $\gamma \rightarrow \alpha'$ » идут только в одном направлении. Структуры всех модификаций построены из ионов Ca²⁺ и SiO₄⁴⁻, а расположение этих ионов схоже, имея некоторые отличия в γ -C₂S. При этом структуры β -форм получают из структуры α -C₂S путем постепенного понижения симметрии, которое вызвано изменением ориентации тетраэдров и незначительным смещением ионов Ca²⁺. Переход сопровождается изменением координации катиона кальция от 9 в α -фазе, до 8 в β -фазе, и 6 в γ -фазе, при этом происходит поворот кремнекислородного тетраэдра на 30 % вокруг оси, проходящей через центр тяжести тетраэдров.

С позиции дорожного строительства разработка научно-обоснованных технологических решений, позволяющих предотвратить процессы распада шлаковых материалов, связанных с полиморфными превращениями C₂S, особенно γ -модификации, является весьма актуальной [107–115]. Медленное охлаждение основных металлургических шлаков, сопровождающееся полной выкристаллизацией двухкальциевого силиката (C₂S), приводит к их распаду в тонкий порошок вследствие перехода β -C₂S в γ -C₂S. Этот процесс называется силикатным распадом. Вследствие гетерофазных флуктуаций возникают небольшие участки, имеющие такое же расположение атомов (ионов), как и в кристалле. Возникновение кристаллика в переохлажденной жидкости сопряжено с затратой энергии на образование поверхности раздела. При этом, если размер кристаллика меньше критического, энергетически более выгодно его разрушение (так как поверхностная

энергия превышает выигрыш в энергии перехода в более устойчивое состояние). Если же кристалл по своим размерам больше критического, то энергетически более выгоден его рост. Диспергирование шлаков также может происходить в результате гидратации избыточных оксидов кальция, свободного оксида магния, сульфидов железа и марганца. Продукты гидратации этих соединений имеют больший объем по сравнению с их негидратированными фазами, что и приводит к разрушению агрегатов шлака.

В свою очередь, высокотемпературные формы белита невозможно сохранить при охлаждении до комнатной температуры, если не использовать известные способы стабилизации (химический, физический или термический, кристаллохимический).

У каждого из способов стабилизации имеются свои преимущества и недостатки. Так, химический способ стабилизации связан с изменением химического состава шлака в печи. Термический заключается в резком охлаждении шлака, что способствует сохранению стабильных высокотемпературных форм, а наиболее широкое применение получил при охлаждении доменных шлаков. Кристаллохимический способ стабилизации подразумевает введение примесных ионов и представляет наибольший интерес, так как позволяет стабилизировать наиболее распространенные шлаки ДСП за счет простоты технологии, но не всегда экономически целесообразен. Этот способ условно можно разделить на стабилизацию боратами (как наиболее распространённую) и не боратную, которая связана с введением других стабилизирующих агентов.

Химический способ стабилизации шлака [97, 116] основан на добавлении определенных химических веществ в шлак в момент выплавки стали для изменения его свойств. Этот метод может быть использован для уменьшения вязкости шлака, улучшения его текучести и снижения температуры плавления. Химическими стабилизаторами могут быть известь, доломит, плавиковый шпат или другие минералы, которые могут взаимодействовать с основными компонентами шлака и изменять его химический состав. Данный способ имеет ряд общих недостатков, связанных с тем, что на различных технологических этапах может про-

изойти реакция взаимодействия химических элементов добавок и стали, что ухудшает как качество стали, так и уменьшает степень стабилизации шлака; также возникает сложность введения химических веществ в обрабатываемый шлак. Известен «Способ стабилизации распадающегося шлака» авторов Демина Б.Л. и др. [118–119]. К недостаткам такого способа относятся то, что введение в металлургический шлак природного материала колеманита в виде фракции разного размера 3–90 мм не позволяет равномерно распределиться по всему объему металлургического шлака, что приводит к неравномерной степени стабилизации, и не позволяет точно дозировать материал. Природный материал содержит естественную влажность, что приводит к парообразованию в момент введения в шлаковый расплав, при этом возможен паровой взрыв и выплеск шлака.

Что касается физической (термической) стабилизации, она заключается в быстром охлаждении шлака из жидкого до твердого состояния, что позволяет предотвратить его распад или разделение на различные фазы [120, 121]. Охлаждение происходит в различных агрегатах при различных режимах путем добавления воды или других охлаждающих агентов в шлак, который затем быстро охлаждается и затвердевает. Данный способ применяется при грануляции высокоосновных доменных шлаков.

Быстрое охлаждение с целью предотвращения полиморфного превращения является стандартной практикой в цементной промышленности. Многочисленные исследования доказали взаимосвязь между скоростью охлаждения, окончательным минералогическим составом и гидравлическими свойствами клинкера. Применительно к металлургической технологии эффективность метода подтверждена в анализируемых работах. По данным источников для осуществления стабилизации высокотемпературных модификаций белита, скорость охлаждения шлака должна быть не менее 5 град./сек.

В нашей стране этот метод стабилизации получил развитие при реализации способа, предложенного Школьником Я.Ш. и др. [122–125], который реализован на многих предприятиях России и Китая, но проблема широкого распространения данного способа связана со значительными капитальными затратами и необходи-

мостью встраивания оборудования, реализующего данный способ в действующее производство и менять существующие технологические процессы.

Главным недостатком такого способа является повышенный расход воды, а также то, что сложность грануляции шлака с технологической точки зрения в связи с узким интервалом температур нарастания вязкости, присутствием значительного количества металлических включений. Все это ограничивает его применение на практике.

Одним из наиболее доступных и простых методов является кристаллохимическая стабилизация (КХС), подразумевающая на стадии слива шлака введение в небольших количествах дополнительного компонента, содержащего инородные ионы, такие как: MgO , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , K_2O , P_2O_5 , Cr_2O_3 , B_2O_3 и др. [109, 126–133]. Растворяясь в высокотемпературных формах C_2S , они образуют твердые растворы, повышающие или понижающие температуру полиморфных превращений.

Таким образом, полиморфные превращения двухкальциевого силиката представляют собой довольно сложный физико-химический процесс, который зависит от целого ряда факторов и напрямую влияет на конечные свойства образующегося материала – шлака. Причиной распада рафинировочного шлака является полиморфное превращение двухкальциевого силиката (белита), входящего в его состав переход $\beta\text{-C}_2\text{S}$ в $\gamma\text{-C}_2\text{S}$ сопровождается увеличением объема примерно на 12 %, что приводит к рассыпанию шлака. Приведенный анализ современной методологической базы стабилизации шлаков показал, что на сегодняшний день существует три способа стабилизации данного материала: химический, физический (термический), кристаллохимический. Наибольшим преимуществом среди них обладает метод кристаллохимической стабилизации, так как является наиболее доступным и простым с технологической точки зрения. Однако использование данного способа стабилизации подразумевает введение компонентов, содержащих инородные ионы, за счет которых происходит процесс стабилизации. Введение таких компонентов не всегда бывает экономически выгодным из-за высокой стоимости, поэтому поиск альтернативных компонентов, которые могут применяться для кристаллохимической стабилизации является весьма актуальным. Это позво-

лит добиться высоких прочностных характеристик и обеспечит экономическую эффективность конечного материала.

1.4 Особенности кристаллохимической стабилизации

Качество и экономическая эффективность кристаллохимической стабилизации напрямую зависит от компонентов, которые вводятся в состав шлака. На сегодняшний день существует множество работ, связанных с исследованием возможности применения различных материалов для кристаллохимической стабилизации. При этом на практике применялись как специальные добавки, так и отходы различных производств.

Наиболее полно изучены и описаны результаты стабилизации рафинировочного шлака боратами. Поскольку бор может перейти из шлака в сталь и повлиять на металлургические свойства стали, бораты вводили в шлак после того, как он отделялся от металла (при скачивании шлака из ковша перед вакуумированием ковша с металлом и при сливе шлака из ковша после разливки металла) [99, 108–109, 135–137]. Бораты в виде природных минералов содержащих бор, таких как колеманит, или отходы, которые содержат оксиды бора вводятся в струю шлака или в шлаковую чашу с расходом от 8 до 10 кг/т стали.

Не боратная стабилизация предполагает введение в состав шлака фосфатов, или же оксидов Cr_2O_3 , V_2O_5 ; P_2O_5 ; MnO ; As_2O_5 [109, 126–133]. Введение этих оксидов предотвращает полиморфную деформацию кристаллов $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$, и предотвращает образование $\gamma\text{-}2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$. Введение в состав шлака оксида фосфора, может негативно сказаться на составе выплавляемой стали, за счет перехода фосфора в ее состав. Содержание фосфора в стали строго регламентируется, так как повышенное содержание фосфора приводит к реологическим изменениям свойств стали. Введение оксида As недопустимо, так как этот химический элемент являет сильнодействующим ядом.

Структуры всех модификаций построены из ионов Ca^{2+} и SiO_4 . Расположение этих ионов очень схоже в $\gamma\text{-C}_2\text{S}$ несколько отличается. Высокотемпературные

формы белита невозможно сохранить при охлаждении до комнатной температуры, если их не стабилизировать инородными ионами. Структуры высокотемпературных полиморфных модификаций принадлежат к семейству глазерита $K_3Na(SO_4)_2$. Кристаллографические характеристики полиморфных модификаций белита приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Кристаллографические данные для полиморфных модификаций двухкальциевого силиката

Поли- морфная группа	Параметры ячейки, нм			Угол	Соотношение осей	Тип структуры
	a	b	c			
α	0,5579		0,7150	$\gamma=120^\circ$	–ac	Гексагональный
α_H	0,9490	0,5590	0,6850	–	abc	Ромбический
α_L	2,0871	0,9496	0,5600	–	bca	Ромбический
β	0,5502	0,6745	0,9297	$\beta=94,59^\circ$	cab	Моноклинный

Элементарные ячейки всех четырех модификаций тесно связаны одна с другой. Общий вид кристаллических структур полиморфных модификаций белита представлен на рисунке 1.9.

Из диаграмм состояния (рисунок 1.10), имеющих наиболее важное для оптимизации основного сталеплавильного процесса следует, что в основных шлаках CaO повышает, а FeO, SiO₂ и Al₂O₃ понижают температуру плавления. На диаграммах состояния также показано, что имеются большие области жидкого состояния шлака с температурой плавления до 1600 °С.

Реальные шлаки многокомпонентные и температура их плавления еще ниже, чем это следует из диаграмм тройных систем.

Согласно тройной диаграмме состояния шлаковых систем распад шлака связан с полиморфным превращением двухкальциевого силиката (белита) рисунок 1.11, входящего в его состав. Поэтому основной задачей являются мероприя-

тия по стабилизация высокотемпературных модификаций белита.

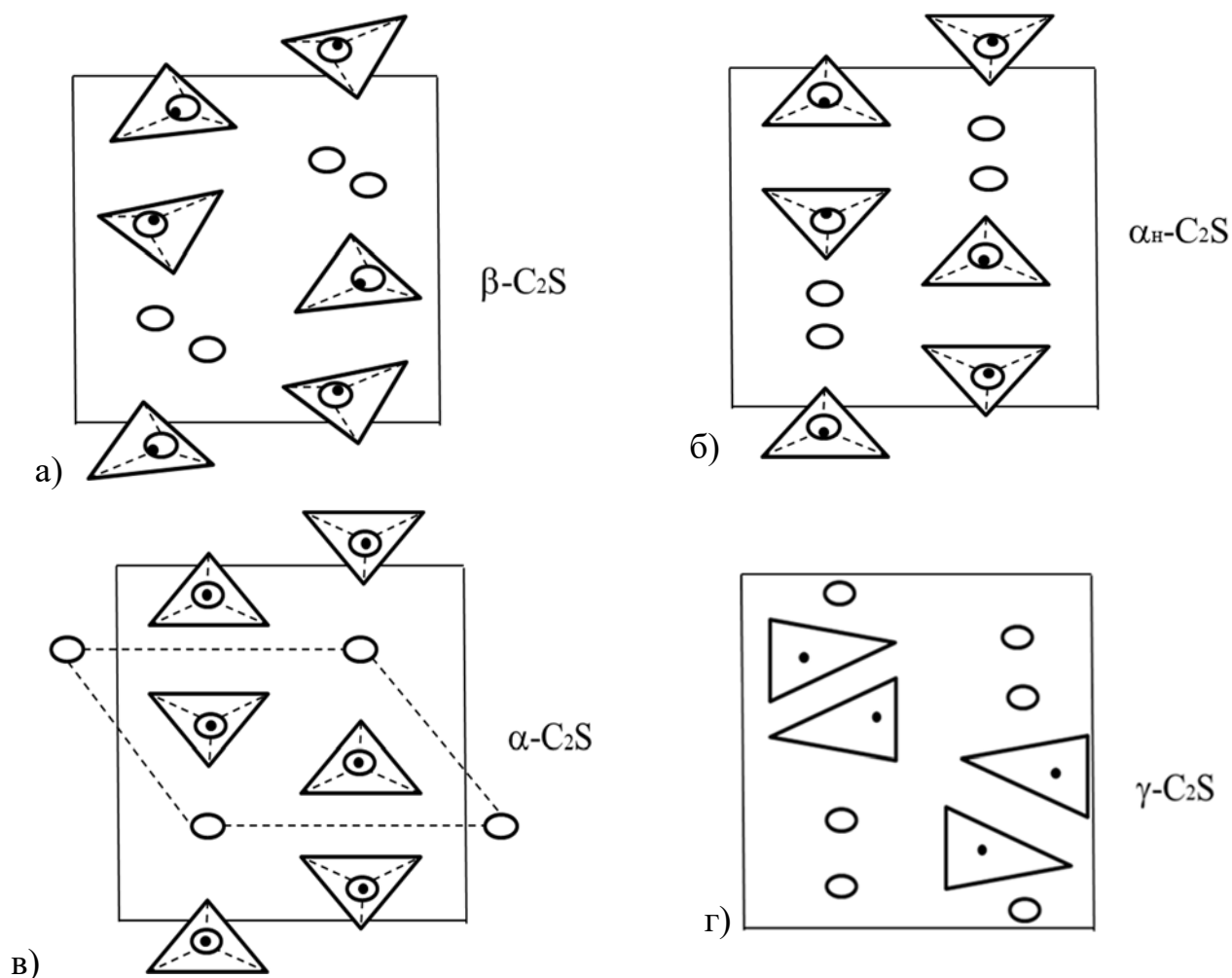


Рисунок 1.9 – Общий вид кристаллических структур полиморфных модификаций белита [139–140]: а) α -C₂S; б) α' -C₂S; в) β -C₂S; г) γ -C₂S

При этом согласно тройным диаграммам состояния отмечается, что химический состав стабилизаторов для стабилизации высокотемпературных форм C₂S, должен обеспечить в диапазоне температур 1300–1600 °С условия возникновения твердых растворов.

Итальянские исследователи Д. Момбеллиа, К. Мапеллиа, С. Бареллаа, А. Груттадаурия, У. Ди Ландроб [141] провели испытания по стабилизации шлака электродуговой печи (ЭДП) путем добавления кварца в лабораторной печи. Температуру, время обработки и скорость охлаждения варьировали, чтобы определить наилучшие условия для регулирования образования стабильной микроструктуры, способной препятствовать распаду. В итоге наилучшая химическая ста-

бильность была достигнута при смешивании пылевидных порошков шлака с 20% кремнезема и охлаждении водой [141].

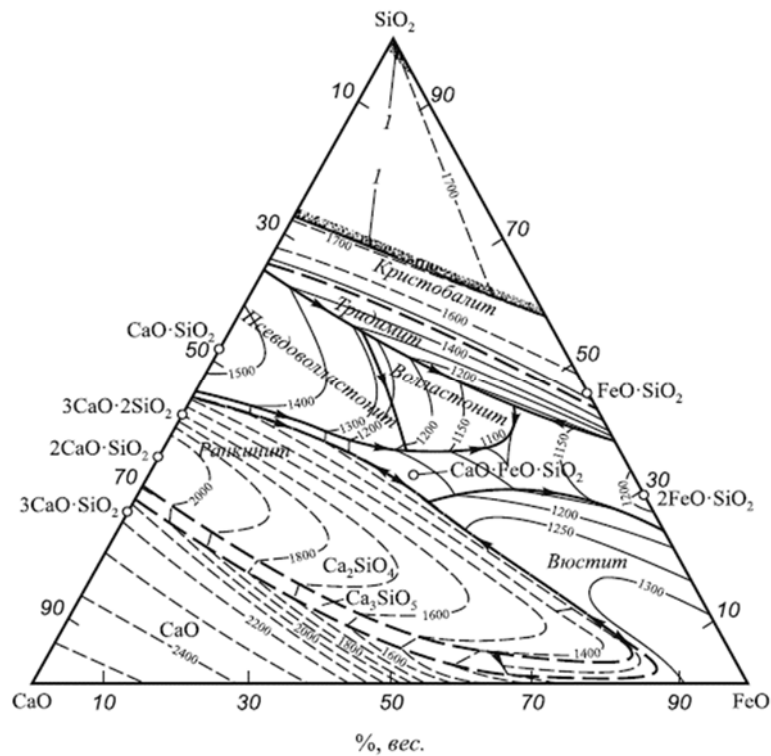


Рисунок 1.10 – Область диаграммы $\text{CaO}-\text{SiO}_2-\text{FeO}$ [139–140]

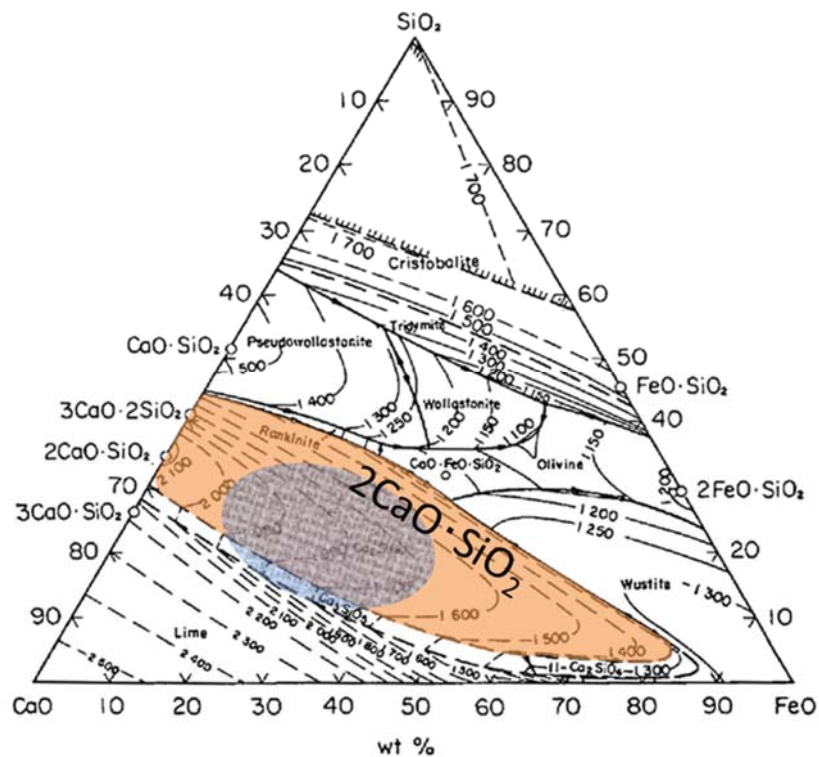


Рисунок 1.11 – Зона полиморфизма $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ [139–140]

Зарубежные исследователи Сабрина Сорлини, Алекс Санзени и Лука Ронди [142] провели исследование по оценке механических свойств и экологической пригодности сталеплавильного шлака электродуговой печи (ДСП) в асфальтобетонных смесях для дорожной одежды. Была проведена серия испытаний на образцах шлака ДСП для определения физических, геометрических, механических и химических свойств. Были разработаны пять асфальтобетонных смесей для нежестких дорожных покрытий, содержащих до 40 % шлака электродуговой печи. Испытанный шлак показал удовлетворительные физико-механические свойства. Результаты испытаний асфальтобетонных смесей со шлаком ЭДП были сопоставимы с характеристиками смесей, содержащих природные заполнители, а испытания на выщелачивание дали удовлетворительные результаты [142].

Также в Иллинойском университете в Урбана-Шампей в процессе исследований был разработан процесс быстрого отбора заполнителей сталеплавильного шлака на содержание свободных оксидов и потенциал расширения с использованием комплексонометрического титрования, термогравиметрического анализа и теста на расширение в автоклаве. Исследователи Александр С. Бранд и Джеффри Р. Рослер [143] выбрали сталеплавильный шлак для испытаний в качестве крупного заполнителя в бетоне. Было подтверждено, что заполнители из сталеплавильного шлака в бетоне могут обеспечивать приемлемые прочностные характеристики, высокую степень морозостойкости и высокие прочностные показатели. Однако эти заполнители давали большую усадку при свободном высыхании, чем бетон с доломитовыми заполнителями [3].

В Харьковском национальном автомобильно-дорожном университете Хоботов Э.Б., Игнатенко М.И., Сторчак О.Г., Калюжная Ю.С., Грайворонская И.В. [144] проводили исследование, цель которого заключалась в том, что на основе выбранных экспериментальных методов обосновать ресурсную ценность отвалного доменного шлака ПАО «Запорожсталь». Они доказали наличие в составе шлака минералов, необходимых для производства минеральных вяжущих, а также высокая концентрация гидравлически активных минералов и аморфной фазы, высокоразвитая поверхность шлаковых частиц, наличие сорбционной поверхност-

ной активности позволили рекомендовать этот шлак для производства портланд-цемента и шлакопортландцемента по совокупности показателей [144].

Проведенный комплексный анализ, касающийся вопросов переработки самораспадающихся высокоосновных шлаков электрометаллургического производства с применением кристаллохимической стабилизации, показал значительное количество работ, свидетельствующих об актуальности рассматриваемого способа. Однако, не смотря на большое количество работ и имеющиеся схемы стабилизации шлаковых расплавов, остается и ряд неизученных вопросов. Кроме того, зачастую предлагаемые технологические решения не удовлетворяют части поставленных задач, в том числе затраты на технологические операции по переводу отходов в высококачественный сырьевой материал не обеспечивают желаемый экономический эффект.

1.5 Выводы

1. Анализ отечественного рынка каменных материалов показал, что в ближайшей перспективе ожидается рост потребления щебня, который, в частности, обусловлен наращиванием объемов строительных работ в транспортном строительстве. Существующие на сегодняшний день карьеры каменных материалов по ряду причин испытывают сложности в обеспечении требуемыми объемами потребления. Кроме того, некоторые регионы вынуждены закупать привозные каменные материалы, высокая стоимость которых обусловлена, в том числе, транспортными расходами на доставку. В этой связи поиск альтернативных источников и технологий получения сырья в виде каменных материалов с комплексом заданных характеристик приобретает особую актуальность.

2. Среди альтернативных видов сырья с позиции использования в качестве каменных материалов наиболее перспективными являются металлургические шлаки. При этом, не все шлаки черной металлургии могут быть использованы в качестве строительных материалов. В виду содержания тяжелых металлов и большого количества кислотных соединений, а также протекающих процессов

самораспада затруднено их прямое использование, а их переработка не всегда экономически целесообразна. Улучшение свойств шлака возможно за счет применения такого приема, как стабилизация. Однако с учетом непостоянства состава шлаков, особенностей технологий их получения, а также разновидностей технологий стабилизации в каждом отдельном случае требуется аналитическая проработка с целью принятия наиболее рационального решения для получения конечного материала близкого по своим свойствам к традиционному природному щебню.

3. Полиморфные превращения двухкальциевого силиката представляют собой довольно сложный физико-химический процесс, который зависит от целого ряда факторов и напрямую влияет на конечные свойства образующегося материала – шлака. Причиной распада рафинировочного шлака является полиморфное превращение двухкальциевого силиката (белита), входящего в его состав переход β -C₂S в γ -C₂S сопровождается увеличением объема примерно на 12 %, что приводит к рассыпанию шлака. Приведенный анализ современной методологической базы стабилизации шлаков показал, что на сегодняшний день существует три способа стабилизации данного материала: химический, физический (термический), кристаллохимический. Наибольшим преимуществом среди них обладает метод кристаллохимической стабилизации, так как является наиболее доступным и простым с технологической точки зрения. Однако использование данного способа стабилизации подразумевает введение компонентов, содержащих инородные ионы, за счет которых происходит процесс стабилизации. Введение таких компонентов на всегда бывает экономически выгодным из-за высокой стоимости, поэтому поиск альтернативных компонентов, которые могут применяться для кристаллохимической стабилизации является весьма актуальным. Это позволит добиться высоких прочностных характеристик и обеспечит экономическую эффективность конечного материала.

4. Проведенный комплексный анализ, касающийся вопросов переработки самораспадающихся высокоосновных шлаков электрометаллургического производства с применением кристаллохимической стабилизации, показал значитель-

ное количество работ, свидетельствующих об актуальности рассматриваемого способа. Однако, не смотря на большое количество работ и имеющиеся схемы стабилизации шлаковых расплавов, остается и ряд неизученных вопросов. Кроме того, зачастую предлагаемые технологические решения не удовлетворяют части поставленных задач, в том числе затраты на технологические операции по переводу отходов в высококачественный сырьевой материал не обеспечивают желаемый экономический эффект. В этой связи наибольший интерес для кристаллохимической стабилизации представляет дешевое техногенное сырье.

2 МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРИМЕНЯЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ

2.1 Методы исследования

Исследования применяемых и разрабатываемых материалов в рамках научной работы носит комплексный характер. Сырьевые и синтезированные материалы были изучены с использованием методик и оборудования, описанных в нормативных документах и научной литературе. Физико-механические и физико-химические характеристики материала были исследованы с использованием различных методов и оборудования. Применение широкого спектра методов и приборов позволило установить взаимодействие компонентов и механизмы структурообразования шлаков с использованием различных стабилизаторов. Результаты экспериментальных исследований сырьевых материалов, стабилизаторов и стабилизированного шлака получены с использованием материально-технической базы Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова в структурных подразделениях:

- кафедры «Автомобильные и железные дороги им А.М. Гридчина»;
- кафедры «Материаловедение и технологии материалов»;
- Центра высоких технологий БГТУ им. В. Г. Шухова.

Исследования, представленные в работе, включали комплекс определения базовых физико-механических свойств шлака. Пробы шлака отбирались в соответствии с ГОСТ 8267–93 «Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия» (с Изменениями № 1–4) и ГОСТ 8269.0–97 «Щебень и гравий из плотных горных пород и отходов промышленного производства для строительных работ. Методы физико-механических испытаний» (с Изменениями № 1, 2). Оценка физико-механических свойств производилась с использованием методик и оборудования согласно ГОСТ 8269.0–97, ГОСТ 3344–83 «Щебень и песок шлаковые для дорожного строительства. Технические условия» (с Изменениями № 1). Марку по прочности шлакового щебня (дробимость) опре-

деляли по степени разрушения зерен в водонасыщенном состоянии при сжатии (раздавливании) в цилиндре. Марку по истираемости определяли по потере массы пробы щебня, возникающей при воздействии ударных нагрузок от шаров и истирающих усилий в полочном барабане. Устойчивость структуры зерен шлакового щебня против распадов, определяли по потере массы пробы после выдерживания в дистиллированной воде в течение 30 суток и последующего трехкратного пропаривания. Марку по морозостойкости оценивали по потере массы пробы после воздействия на пробы шлака циклов попеременного замораживания в насыщенном водой состоянии и оттаивания в воде. Активность шлака определялась по значению предела прочности образцов-цилиндров, изготовленных из шлакового теста максимальной плотности, достигаемой при подобранном количестве воды. Максимальную плотность шлакового теста устанавливали путем подбора. Аналитическую пробу шлакового щебня массой 5 кг высушивали до постоянной массы и размалывали в шаровой мельнице так, чтобы остаток на сите с размером отверстий 0,071 мм был не более 6–10 % или удельная поверхность была равна (3000 ± 100) $\text{см}^2/\text{г}$. Измельченный отвалый шлак был заформован в образцы-цилиндры под нагрузкой 300 $\text{кг}/\text{см}^2$ до максимальной плотности, при оптимальной влажности.

Определение удельной эффективной активности естественных радионуклидов техногенного сырья осуществляли в соответствии с ГОСТ 30108–94 «Материалы и изделия строительные».

Определение удельной эффективной активности естественных радионуклидов» производилось с помощью гамма-бета-спектрометрического комплекса «Прогресс БГ»4. В состав комплекса входят: детектирующая система GEM–40190–S на базе полупроводника из высокочистого германия; спектрометрический усилитель и многоканальный анализатор импульсов 92X «Spectrum Master»; система визуализации и обработки спектра.

Моделирование процесса получения стабилизированного шлака осуществлялось на базе кузнечного цеха опытно-промышленных мастерских БГТУ им. В.Г. Шухова (рисунок 2.1). Апробация результатов исследования производи-

лась в условиях реального производства на базе электросталеплавильного цеха ОЭМК им. А.А. Угарова.



Рисунок 2.1 – Моделирование процесса стабилизации шлака
в лабораторных условиях

Пробу распавшегося сталеплавильного шлака помещали в высокотемпературные тигли различной емкостью (100/450 мл. рисунок 2.2, б ,в) и расплавляли в плавильной печи с эжекционной горелкой ППЭГ-5/15 (рисунок 2.2, а) при температуре 1460–1480 °С.

Шлак доводился до полного расплава, признаком которого являлось появление характерных пузырьков, при этом температура печи контролировалась с помощью высокотемпературного инфракрасного термометра.

Для имитации слива, производимого в шлаковую траншею, полученный расплав сливали на подготовленную поверхность, представляющую собой слой

мелкодисперсного шлака, отобранного из шлаковой траншеи фракции 0–5 мм.



а)



в)



б)

Рисунок 2.2 – Оборудование и приспособления для моделирования процесса стабилизации в лабораторных условиях:

а) печь с эжекционной горелкой ППЭГ-5/15;

б) высокотемпературный тигель объемом 100 мл;

в) высокотемпературный тигель объемом 450 мл.

В процессе охлаждения на воздухе модельный шлак полностью распадался в порошок. Эту пробу принимали в качестве контрольного образца. Затем в такую же навеску шлака добавляли стабилизатор, предварительно перемешав в сухом состоянии непосредственно перед плавкой. Навеску также вводили в расплав шлака в виде бумажного конверта (для имитации бумажного мешка), закрепленного на конце 1,5 метрового стержня. Для стабилизации шлака массу навески стабилизатора принимали равной от 1 до 7 % от массы шлака с шагом 1 %. Для оценки процентного выхода стабилизированной фракции шлакового щебня производилось отсеивание нестабилизированной части через сито с размером ячейки 0,63 мм. Расчет распавшейся фракции оценивали по массе просеянного вещества.

В результате *масштабирования эксперимента в условиях цеха* при осуществлении стабилизации в два этапа, массу стабилизатора разбивали на две порции: 1-я порция – $2/3$ от выбранного процентного содержания сразу же после первого слива шлака в шлаковую чашу, 2-я порция – $1/3$ от выбранного процентного содержания сразу же после второго слива шлака в шлаковую чашу равномерно непосредственно в струю и на поверхность расплава при сливе шлака.

Составы, строение и структурные особенности всех материалов изучались с помощью:

- прибора Фурье-ИК-спектрометра VERTEX 70 – для качественного анализа материалов и идентификации фазового состава. Полученные результаты были обработаны с помощью метода Фурье-деконволюции [145–148]. Целью этого метода является оптимизация параметров сложных спектров, таких как положение, интенсивность, ширина и вид контура, чтобы минимизировать различия между рассчитанной и экспериментальной спектральными кривыми. Программа PeakFit использовалась для преобразования спектральных кривых;

- спектрометра ARL 9900 WorkStation со встроенной системой дифракции, предназначенный для количественного исследования фазового состава методом рентгеновской дифрактометрии и для определения элементного состава проб методом рентгеновской флуоресценции [149–150]; Компьютерные программы DifWin и Crystallographica Search-Match (CSM) использовались для обработки рентгенограмм. международного центра дифракционных данных ICDD с использованием базы данных PDF-2 (Powder Diffraction File 2), которая входит в программу поискового сочетания, а также справочники, содержащие дифракционные характеристики соединений;

- сканирующего растрового электронного микроскопа высокого разрешения в условиях вакуума TESCAN MIRA 3 LMU с встроенным энергодисперсионным спектрометром (ЭДС). Он оснащен двумя типами детекторов: вторичных электронов (SE), работающих в высоком вакууме, и отраженных электронов (BSE), работающих в переменном вакууме [150–154]. Для визуализации элементов строения и структуры материалов и исследования элементного состава воз-

можно увеличение данного РЭМ в диапазоне от четырех до миллиона раз. Рентгеноспектральный микроанализ доступен как количественно, так и качественно. Качественный микроанализ позволяет выявить элементы образца. В ЭДС весь спектр накапливается, поэтому каждое измерение автоматически подвергается качественному анализу. Чтобы определить концентрацию элементов в образце, необходим количественный микроанализ. Это относительный метод, основанный на сравнении интенсивности рентгеновских линий, созданных в образце, с интенсивностями соответствующих линий в эталоне известного состава при известных токах зонда и других идентичных аналитических условиях, таких как одинаковое ускоряющее напряжение, геометрия установки образца и стандарта, одинаковое состояние поверхности и другие факторы. Вводятся поправки на матричные эффекты для учета различий между составами стандарта и образца. Встроенная база данных позволяет проводить количественный микроанализ, записывая готовые данные о эталонах для каждого элемента;

- оптического микроскопа ZEISS Axio Scope.A1 для оценки особенностей строения материалов [155];

- лазерного анализатора Analysette 22 NanoTec Plus для определения гранулометрического состава рассматриваемых материалов в диапазоне измерений от 0,01 до 2000 мкм в дополнение к использованию ситового метода. Строит дифференциальные и интегральные кривые распределения частиц по размерам в соответствии с результатами проведенного анализа ЭВМ, входящего в компоновку прибора [156];

- 4-х точечного метода адсорбции газов БЭТ [157–158] (Брунауэра – Эммета – Теллера, газ-адсорбат – азот) с использованием прибора Sorbi M для определения площади удельной поверхности. Метод БЭТ заключается в том, что образец термостатируется, чтобы освободить поверхность материалов от адсорбированных на них газов или воды. Затем при температуре жидкого азота (77 К), газ адсорбируется на этих материалах таким образом, что его молекулы образуют монослой на их доступной поверхности.

Для расчета конструкций дорожных одежд с использованием разработан-

ных материалов, а также сметной стоимости предложенных конструкционных решений использовалось программное обеспечение CREDO-RADON и Гранд-СМЕТА, соответственно.

Таким образом, для изучения исходных и синтезированных материалов, полученных с использованием лабораторного оборудования использован комплекс нормированных методов и оборудования, а также научно признанных методик. Представленный перечень методик, а также применение поверенного высокоточного оборудования позволит получать широкий спектр данных, обеспечить высокую воспроизводимость и достоверность результатов исследования.

2.2 Характеристика применяемых материалов

В качестве исходного сырья для проведения экспериментальных исследований в работе применялся металлургический шлак, который является побочным продуктом предприятия АО «Оскольский электрометаллургический комбинат (ОЭМК) им. А.А. Угарова» (Белгородская обл., г. Старый Оскол).

Для исследований физико-химических и технологических свойств были отобраны пробы шлака, полученного как по сухой технологии переработки (воздушное охлаждение), так и шлака, охлаждаемого гидравлическим способом по существующей технологии. Отбор проб производился в различное время и от разных плавов согласно ГОСТ 8269.0–97.

Отвальный шлак отбирался непосредственно из отвала по истечении нескольких недель после слива расплава (рисунок 2.3, а).

Для получения шлаков путем воздушного охлаждения (по сухой технологии, рисунок 2.3, б), на шлаковом участке ОЭМК на ровную подготовленную площадку сливали шлаковый расплав из ковша. Начальная температура шлака составляла около 1500 °С. Шлак растекался на площадке, образуя слой высотой от 20 до 25 сантиметров. Температура поверхности шлака снижалась, и через три часа она составляла около 300 °С, на поверхности шлака происходил силикатный распад, в результате которого образовывался слой тонкодисперсных частиц, за-

медляющих процесс охлаждения. Еще одна проба шлака отбиралась из шлакового лежащего в отвале.

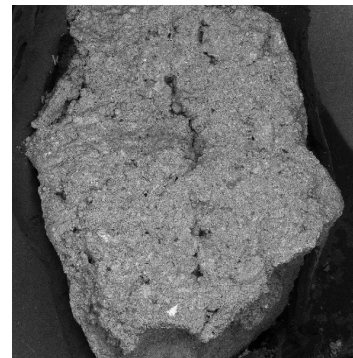
Отбор проб шлака, полученного гидравлическим охлаждением (рисунок 2.3, в) по существующей технологии, производился из шлаковой траншеи после охлаждения до температуры 20–40 °С и перемешивания слоя шлака экскаватором. Влажность шлака – 10–15 %. На шлаковом участке ОЭМК на подготовленной площадке шлаковой траншеи сливали ковш шлакового расплава для получения шлаков по сухой технологии охлаждения. Слой шлака имел высоту от двадцати до двадцати пяти сантиметров на ровной поверхности. Стартовая температура составляла примерно 1500°С. В результате силикатного распада шлак превратился в слой тонкодисперсных (пылевидных) частиц.



а)



б)



в)

Рисунок 2.3 – Пробы шлака, используемого в работе: а) отвальный шлак; б) шлак воздушного охлаждения; в) шлак гидравлического охлаждения

Состав металлургических шлаков сложен и определяется несколькими факторами, включая тип получаемого металла, состав руды и состав флюсового материала, используемого в процессе плавки, а также температурой процесса плавки. Как правило, основными компонентами металлургических шлаков являются оксиды кальция, кремния и металлов (Al, Fe, Mg и др.). Наличие этих микроэлементов и их количество в шлаке свидетельствует об эффективности процесса плавки и, как следствие, о качестве шлака. Химический состав пробы отвального шлака представлен в таблице 2.1. Данные о химическом составе предоставлены лабораторией предприятия.

Таблица 2.1 – Химический состав пробы отвального шлака
по данным лаборатории ОЭМК им. А.А. Угарова

Наименование	Содержание оксидов, %				
	CaO	SiO ₂	Fe общ	MgO	Al ₂ O ₃
Отвальный шлак ДСП	43,20	22,40	18,20	7,40	2,60

На основании имеющихся данных о составе и свойствах известных стабилизаторов для исследований выбраны потенциально способные выступать в качестве стабилизирующих агентов материалы различного происхождения (рисунок 2.4): пыль газоочистных установок дуговых сталеплавильных печей (ДСП) АО «Оскольский электрометаллургический комбинат (ОЭМК) им. А.А. Угарова» (Белгородская обл., г. Старый Оскол); плав соды кальцинированной щелочной ОХК «Щекиноазот» (Тульская обл., Щекинский р-н, р.п. Первомайский); хромитовый песок ООО «ДИАЛ-ГУПП» (г. Екатеринбург).



Рисунок 2.4 – Внешний вид стабилизаторов, исследуемых в работе:

а) феррохромовая руда; б) содощелочной плав; в) пыль ДСП

Используемые в работе стабилизаторы существенно отличаются друг от друга по внешнему виду: феррохромовая руда, которая является сырьем для получения различных марок стали, представляет собой порошок серого цвета с включениями металла (таблица 2.2, рисунок 2.4, а); отход производства капролактама или содощелочной плав, который представляет собой пластинки различной формы, имеет цвет от светло-желтого до темно-коричневого (таблица 2.3, рисунок 2.4, б); отход металлургического производства, представляющего собой тонкодисперсный порошок пыль газоочистных установок, дуговых сталеплавильных печей (ДСП), называемый пыль ДСП, имеет темно-коричневый цвет (таблица 2.4,

рисунок 2.4, в).

Таблица 2.2 – Свойства хромитового песка ТУ 07.29.19–005–52967881–2023

Наименование показателя	Значения показателя
Содержание влаги, %	0,2–0,5
Насыпная плотность, кг/м ³	2300–2800
Растворимость в воде	Не растворим
Кислотность (РН)	7–10

Таблица 2.3 – Свойства плава соды кальцинированной щелочной ТУ 213–636–00209023–97

Наименование показателя	Значения показателя
Внешний вид	Куски неправильной формы различных размеров от светло-серого до светло-коричневого цвета. Допускается зеленый оттенок.
Массовая доля общей щелочности в пересчете на углекислый натрий в прокаленном веществе, > %	85,0
Массовая доля потерь при прокаливании, < %	15,0

Таблица 2.4 – Свойства пыли газоочистных установок ДСП

Наименование показателя	Значения показателя
Внешний вид	Порошок темно-коричневого цвета
Насыпная плотность, кг/м ³	600–800

Таким образом, для проведения экспериментальных исследований и установления целесообразности и эффективности кристаллохимической стабилизации металлургических шлаков с целью улучшения их физико-механических свойств в работе рассмотрены отходы.

2.3 Выводы

1. Для изучения исходных и синтезированных материалов, полученных с использованием лабораторного оборудования использован комплекс нормированных методов и оборудования, а также научно признанных методик. Представленный перечень методик, а также применение поверенного высокоточного оборудования позволит получать широкий спектр данных, обеспечить высокую воспроизводимость и достоверность результатов исследования.

2. Для проведения экспериментальных исследований и установления целесообразности и эффективности кристаллохимической стабилизации металлургических шлаков с целью улучшения их физико-механических свойств в работе рассмотрен металлургический шлак, который является побочным продуктом предприятия АО «Оскольский электрометаллургический комбинат (ОЭМК) им. А.А. Угарова» (Белгородская обл., г. Старый Оскол).

3. В качестве стабилизаторов были исследованы потенциально способные выступать в качестве стабилизирующих агентов материалы различного происхождения, удовлетворяющие требованиям по составу: пыль газоочистных установок дуговых сталеплавильных печей (ДСП) АО «Оскольский электрометаллургический комбинат (ОЭМК) им. А.А. Угарова» (Белгородская обл., г. Старый Оскол); плав соды кальцинированной щелочной ОХК «Щекиноазот» (Тульская обл., Щекинский р-н, р.п. Первомайский); хромитовый песок ООО «ДИАЛ-ГУПП» (г. Екатеринбург).

3 ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ИСХОДНЫХ СЫРЬЕВЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ КРИСТАЛЛОХИМИЧЕСКОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ

Проведенный анализ открытых отечественных и зарубежных источников относительно свойств металлургических шлаков и методов их улучшения с целью получения качественных материалов, как для дорожно-строительной отрасли, так и для строительства в целом показал, что процессу самораспада подвержены основные активные шлаки. Их состав, как правило, представлен преимущественно оксидами кальция, железа, магния и марганца. Одним из наиболее эффективных способов стабилизации таких шлаков является кристаллохимическая стабилизация, которая подразумевает изменение строения кристаллической решетки материала без изменения его состава. Применение подобных технологических приемов в промышленных масштабах требует серьезной проработки в лабораторных условиях. Моделирование процесса стабилизации с учетом всех возможных факторов дает возможность спрогнозировать возможность переноса разработанного технологического решения на производство с минимальной погрешностью ожидаемых результатов.

3.1 Методологическая основа экспериментальных исследований

С целью систематизации экспериментальных исследований и определения порядка проведения работ на основе осуществленного анализа разработан пошаговый план и декомпозиционная модель диссертационного исследования. Методологической основой работы являлся комплексный анализ системы «состав (сырье) – структура (сырье, материал) – свойства (материал)» в части анализа исходного отвального шлака, отходов сталеплавильного производства в качестве потенциальных стабилизаторов, а также оценки эффективности процесса стабилизации шлакового расплава в зависимости от вида и концентрации стабилизатора. Идея базируется на известной роли кристаллохимической стабилизации компонентов шлакового расплава в улучшении свойств металлургических шлаков.

Использование методов планирования эксперимента позволяет осуществлять процесс исследований более эффективно и продуктивно, способствуя повышению качества и надежности полученных данных. Так, планирование эксперимента предполагает определение: используемой нормативной документации (методы исследований, технические условия), общепризнанных методик и оборудования, обеспечивающих высокую точность и воспроизводимость, полученных данных; оптимального количества опытов и условий их проведения, необходимых для решения конкретной научной задачи с заданной точностью.

В рамках диссертационного исследования, посвященного разработке технологии получения каменных материалов из отходов промышленного производства для использования в транспортном строительстве, была разработана структурная схема исследования (рисунок 3.1), которая включает в себя все этапы и аспекты данной работы.

На начальном этапе при изучении рынка традиционной сырьевой базы для дорожного строительства и доступности применяемых материалов определены существующие глобальные проблемы, предполагаемые пути их решения и ожидаемые результаты (рисунок 3.2). Как уже отмечалось ранее, расширение номенклатуры минеральных сырьевых материалов для дорожного строительства вызвано рядом серьезных причин, а именно: ограничениями на добычу традиционных минерально-сырьевых ресурсов из соображений экологической безопасности; высокой стоимостью, связанной с транспортными расходами; стратегическими задачами по утилизации и вторичному применению крупнотоннажных отходов производства, связанными с улучшением экологической обстановки территорий прилегающих к крупным предприятиям.

В связи с вышеизложенным, *рабочей гипотезой* исследования явилось предположение о возможности получения высокопрочных каменных материалов из металлургического шлакового расплава за счет кристаллохимической стабилизации высокотемпературных модификаций белита с использованием отходов электрометаллургического производства путем введения стабилизирующего агента на стадии слива расплава, обеспечивающей образование твердых растворов с

высокотемпературными формами двухкальциевого силиката и трансформацией в низкотемпературные полиморфные модификации.



Рисунок 3.1 – Структурная схема диссертационного исследования

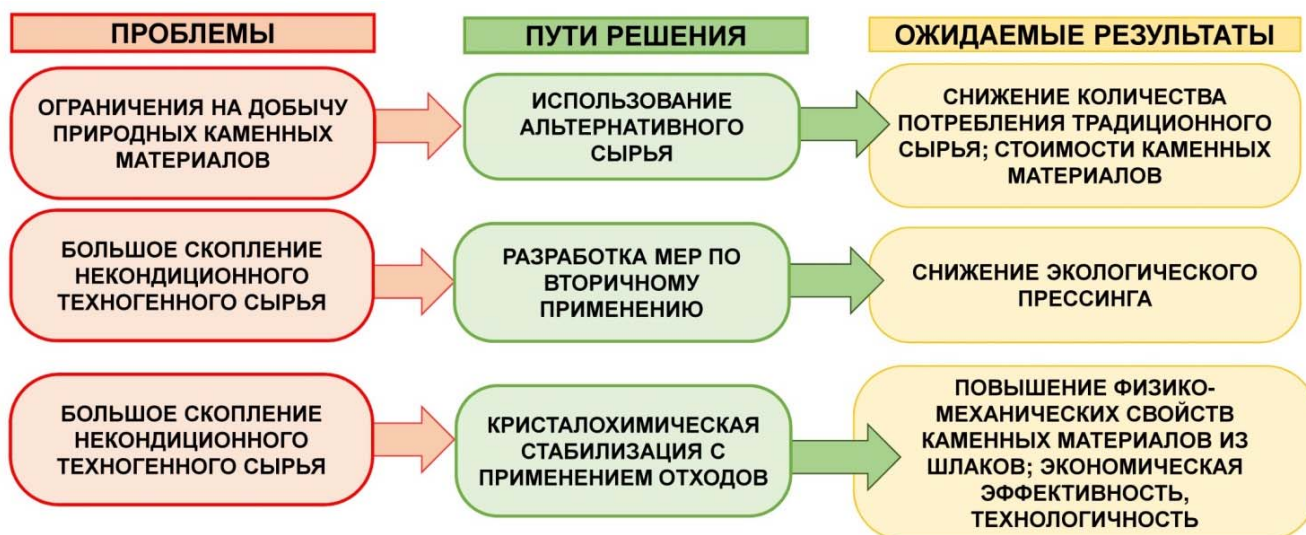


Рисунок 3.2 – Проблематика научно-исследовательской работы

Таким образом, разработанная структурная схема позволяет выделить основные этапы для декомпозиции исследования (рисунок 3.3, 3.4), представляющей собой блоки с указанием определяемого показателя и ссылки на нормативный документ или источник, содержащий подробное описание применяемой методики. В результате исследования были разделены на четыре основных блока и включали определение и анализ комплекса базовых свойств исходного сырья, применяемого в работе, их взаимное влияние на свойства получаемого конечного материала как в лабораторных, так и в производственных условиях, а также разработку методических рекомендаций по стабилизации шлака и применения его в дорожных конструкциях.

К первому блоку следует отнести изучение комплекса физико-механических, физико-химических свойств и структурных особенностей самораспадающегося отвального шлака и стабилизаторов (рисунок 3.3). Применение стандартизированных методик позволило определить базовые свойства отвального шлака как каменного материала и установить необходимость их улучшения. Произведен качественный и количественный анализ состава шлака в зависимости от способа охлаждения и нахождения в отвале, а также состав других отходов, применяемых в работе в качестве стабилизирующих агентов. Кроме того, проанализированы структурные особенности материалов.

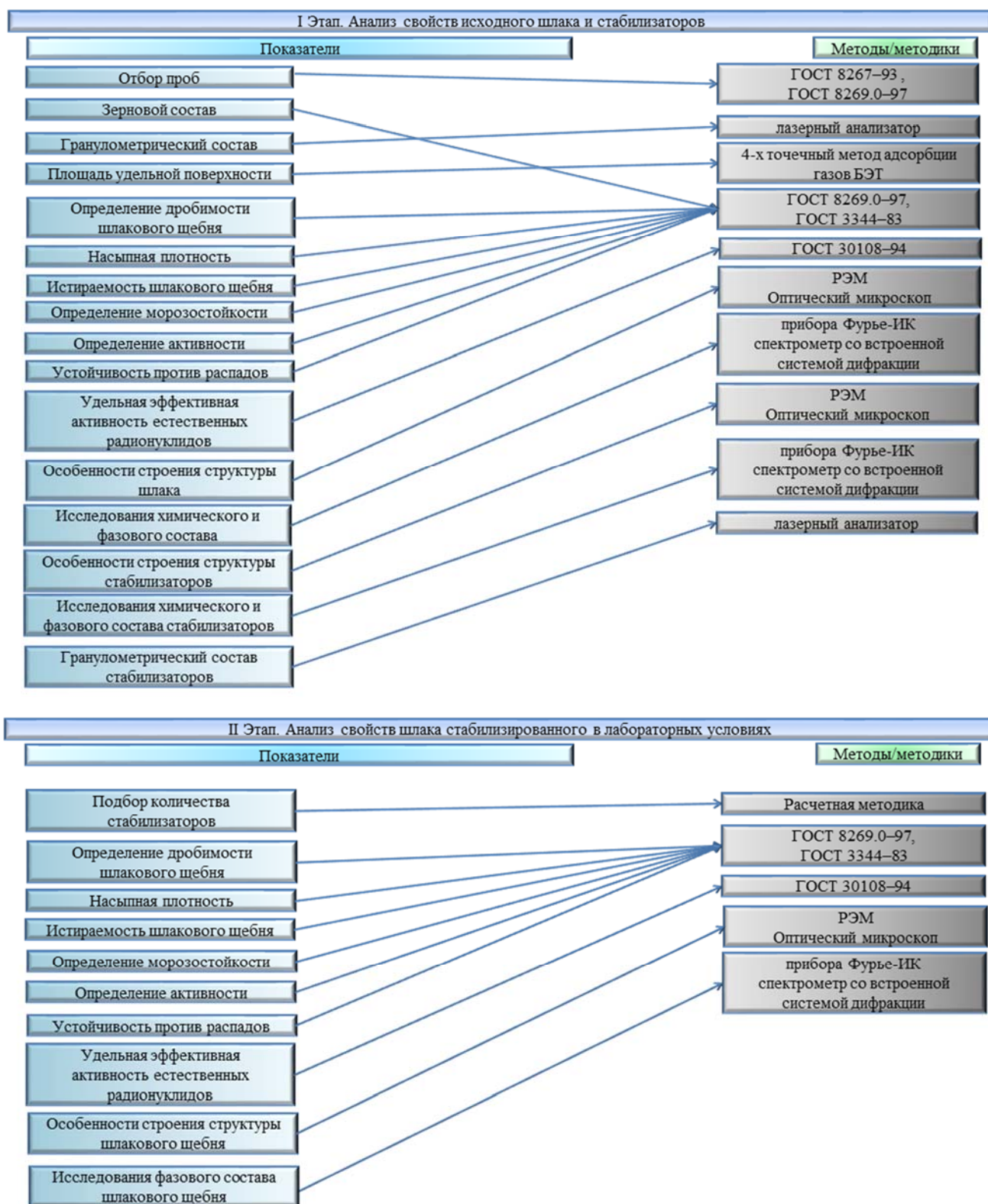


Рисунок 3.3 – Декомпозиция I и II этапов исследования

В рамках второго блока проводились экспериментальные исследования по изучению влияния стабилизаторов на свойства шлака, в частности устойчивость шлака к самораспаду, полученного в результате кристаллохимической стабилиза-

ции в лабораторных условиях. Моделирование процесса стабилизации производилось на базе кузнечного цеха опытно-промышленных мастерских БГТУ им. В.Г. Шухова.

В рамках третьего блока (рисунок 3.4) производилось масштабирование эксперимента в условиях электросталеплавильного цеха ОЭМК им. А.А. Угарова. Шлак, полученный в результате стабилизации, проанализирован на предмет повышения физико-механических свойств.

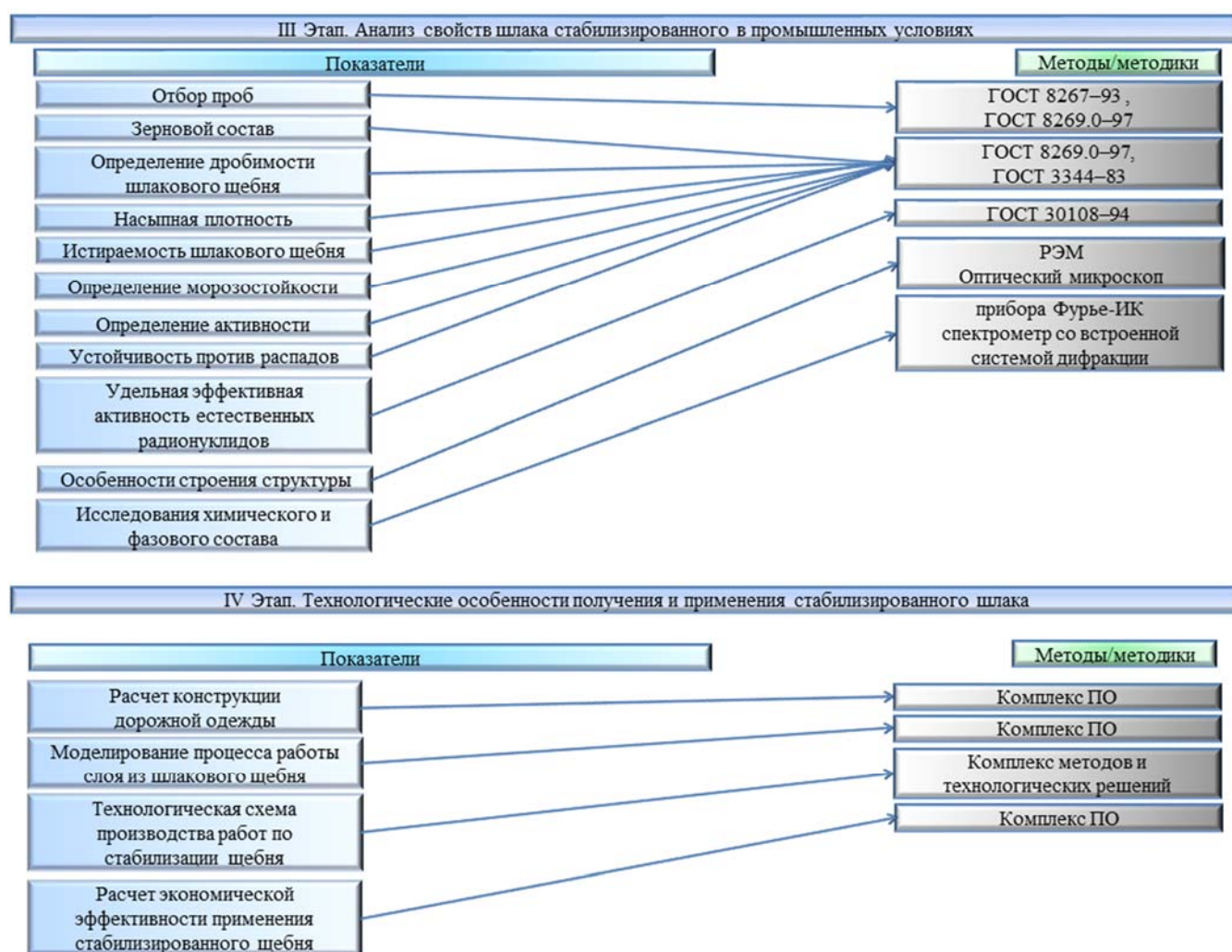


Рисунок 3.4 – Декомпозиция III и IV этапов исследования

С целью установления механизма взаимодействия расплава с наиболее эффективным стабилизатором, а также влияния технологии охлаждения расплава на свойства шлака были проанализированы структурные особенности и распределение элементов в его структуре.

В рамках четвертого блока с целью распространения эффективной и экономической технологии стабилизации высокоосновных металлургических шлаков на предприятиях страны разработаны технологические особенности получения каменного материала из стабилизированного шлака; предложены конструкции дорожных одежд различных типов с применением каменного материала из стабилизированного шлака в слоях основания. Кроме того, на заключительном этапе исследований был подготовлен ряд нормативных документов.

Таким образом, комплексное изучение вопросов применения шлаковых материалов и способов повышения их физико-механических свойств для замены традиционных каменных материалов позволило установить рецептурно-технологические особенности кристаллохимической стабилизации основных металлургических шлаков с использованием других видов техногенного сырья в качестве стабилизирующих агентов. Разработанная методология исследования, в основе которой лежит комплексный анализ каменных материалов из металлургического шлака до и после стабилизации по схеме «состав (сырье) – структура (сырье, материал) – свойства (материал)», включает четыре этапа: анализ свойств исходного шлака и стабилизаторов; анализ свойств шлака, стабилизированного в лабораторных условиях; анализ свойств шлака, стабилизированного в промышленных условиях; технологические особенности получения и применения стабилизированного шлака. Предложенная декомпозиция в виде пошагового плана диссертационного исследования позволяет регулировать процесс исследования, устанавливать закономерности и выявлять механизмы процесса структурообразования шлака в результате стабилизации шлакового расплава в зависимости от условий стабилизации.

3.2 Физико-механические свойства исходного шлака

Шлаки, являющиеся побочными продуктами металлургического производства, представляют собой ценное сырье для строительной отрасли благодаря своим физико-механическим и физико-химическим свойствам [44–60, 65, 67–68, 70–

75, 79–86]. Они обладают низкой стоимостью и хорошей адгезией к различным видам вяжущих, но характеризуются неоднородностью состава от партии к партии и, как следствие, изменяющимися во времени физико-механическими свойствами. Для решения обозначенных проблем требуется проведение комплексных исследований по изучению базовых характеристик металлургических шлаков и совершенствованию технологий их обработки с целью обеспечения заданных характеристик.

Отвальные шлаки в результате их предварительного охлаждения водой с последующим складированием на воздухе представляют собой аморфно-кристаллический материал, относящийся к твердым гетерогенным системам. Исследование физико-механических свойств и состава отвальных шлаков ОЭМК им. А.А. Угарова позволяют прогнозировать возможность их эффективного использования в дорожном строительстве.

Шлаки по своим физико-химическим свойствам очень близки к изверженным горным породам, которые применяются для получения строительных материалов. Традиционно шлаковый щебень получают дроблением устойчивых отвальных металлургических шлаков или специальной обработкой огненно-жидких шлаковых расплавов (литой шлаковый щебень). Для производства щебня в основном применяют отвальные шлаки сталеплавильного производства (подходящие для переработки в щебень), а также другие шлаки, в том числе цветной металлургии. При использовании шлаков в качестве каменных материалов для дорожного строительства необходимо уделять особое внимание таким характеристикам, как: прочность, дробимость, морозостойкость и устойчивость структуры.

Для проведения экспериментальных исследований в работе применялся отвальный шлак в исходном виде (контроль), который является побочным продуктом Оскольского электрометаллургического комбината им. А.А. Угарова. Отобранные пробы отвального шлакового щебня соответствовали трем различным фракциям, согласно номенклатуре выпускаемой продукции предприятия: 0–600 мм, 0–20 мм и 20–60 мм.

На первоначальном этапе, для установления возможности безопасного ис-

пользования в качестве строительных материалов, таких как песок и щебень необходимо провести испытание на содержание естественных радионуклидов.

Естественные радионуклиды образуются в результате распада радиоактивных элементов, присутствующих в земной коре, и могут включать изотопы калий-40, торий-232 и радий-226. Эти элементы могут привести к радиационной опасности, если их содержание в строительных материалах превышает требования стандартов и норм по радиационной безопасности, установленным регулирующими органами.

Анализ полученных значений удельной эффективной активности естественных радионуклидов (таблица 3.1) для фракций 0–20, 20–60 и 0–600 мм, соответствует нормативным требованиям для строительства дорог и аэродромов и может применяться без ограничений. Фракция 0–600 мм образуется после вылеживания шлака в отвалах и является исходным сырьем для получения фракций 20–60 и 0–20 мм. Фракция 0–20 мм образуется после прохода через дробильно-сортировочный комплекс. Так как зерновой состав отобранных проб не соответствует стандартным фракциям по ГОСТ 3344–83, после отбора проб шлаковый щебень путем рассева разделяли на следующие фракции: 5–10, 10–20, 20–40, 40–60 мм с целью дальнейшего определения физико-механических характеристик.

Таблица 3.1 – Удельная эффективная активность естественных радионуклидов

№ п/п	Определяемые показатели	Результаты испытаний $\pm\Delta$		Норма по ГОСТ 30108–94
		ОШ 0–20; 20–60	ОШ 0–600	
1	Удельная активность Ra–226, Бк/кг	51 ± 9	53 ± 9	Не норм.
2	Удельная активность калия–40, Бк/кг	< 45	< 33	
3	Удельная активность тория–232, Бк/кг	21 ± 4	17 ± 4	
4	Эффективная удельная активность ($A_{эфф}$) природных радионуклидов, Бк/кг	79 ± 11	75 ± 11	< 740

Для определения зернового состава проб шлакового каменного материала производили оценку гранулометрического состава смесей ситовым методом на пробах 0–20, 20–60 мм, рассев фракции 0–600 мм не производился, так как это не позволяет осуществить стандартный набор сит.

На основании анализа гранулометрического состава смесей из различных фракций (таблица 3.2, 3.3) установлено, что в составе смеси 0–20 мм наибольшим остатком (20,13 %) характеризуется сито № 5, а также сита № 2,5 и 10 – 15,32 и 13,04 % соответственно.

Таблица 3.2 – Зерновой состав смеси 0–20 мм

Показатель	Размер отверстий сит, мм									
	20	12,5	10	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	< 0,16
Частный остаток, %	1,18	4,47	13,04	20,13	15,32	9,05	9,29	8,20	12,18	7,14
Полный остаток, %	1,18	5,65	18,69	38,82	54,40	63,19	72,48	80,68	91,86	100

Таблица 3.3 – Зерновой состав смеси 20–60 мм

Показатель	Размер отверстий сит, мм							
	70	40	20	10	5	2,5	1,25	< 1,25
Частный остаток, %	18,29	26,20	41,76	12,75	0,73	–	–	0,27
Полный остаток, %	18,29	44,49	86,25	99,00	99,73	99,73	99,73	100

Гранулометрический состав смеси 20–60 характеризуется наибольшим остатком на сите (41,76 %) на сите № 20. Значительным остатком (26,20 %) характеризуется сито № 40. При этом, указанная смесь характеризуется отсутствием зерен более от 5 до 1,25 мм.

Насыпная плотность представляет собой величину, характеризующую вес 1 м³ щебня конкретной фракции со всеми примесями и пустотами. Анализ данных таблицы 3.4 показывает, что насыпная плотность смеси 0–20 составляет 1380 кг/м³, смеси 20–60 составила 1310 кг/м³.

Дальнейшие исследования проводились с использованием фракций, рассеянных в соответствии с ГОСТ. Определение марки щебня по прочности позволяет установить возможность его применения в дорожном строительстве и конкретное функциональное назначение (слои основания, заполнитель асфальто- или цементобетона). Марка по прочности отвального шлака различных фракций составляет от 300 до 800 в зависимости от размерности зерен рассматриваемых фракций. Марка по прочности отвального шлака средневзвешенной пробы (0–20 и 20–60) составляет 800. Марка щебня по прочности средневзвешенной пробы 0–600 составляет 600. Наименьшую марку имеет щебень фракции 20–40 полученный из смеси 0–600, это объясняется тем, что в кусковом материале процесс карбонизации протекает значительно менее интенсивно, из-за меньшей площади поверхности контакта с воздухом. Добиться повышения марки по прочности дробленого шлака возможно после выдерживания в течение от одного до нескольких месяцев на открытом воздухе после дробления, для завершения процессов карбонизации.

Определение марки по истираемости отвального шлакового щебня всех фракций (таблица 3.4) не превысила IIV. Это объясняется его рыхлой структурой, не способной сопротивляться истирающим и ударным воздействиям.

В результате определения марки по морозостойкости (таблица 3.4) установлено, что пробы шлакового щебня не подверженного стабилизации не соответствуют даже минимальным требованиям для марки F15.

При определении физико-механических характеристик всех проб отвального шлака установлено, что чем крупнее фракция, соответствующая ГОСТ, тем больше потери массы при испытании. Так, наибольшими потерями массы при испытаниях характеризуются фракции шлака 20–40 мм (проба 0–600), 10–20 мм (проба 0–20), 40–60 мм (20–60). В целом пробы отвального шлака характеризуются низкими физико-механическими характеристиками.

Таблица 3.4 – Физико-механические характеристики проб отвального шлака в соответствии с ГОСТ 3344–83

Проба	ρ _н , кг/м ³	Фракция, мм	Потеря массы при испытании на, %:						Марка по:				
			прочность		истираемость		морозостойкость		Прочно- сти	Истирае- мости	Морозо- стойкости		
			Факт. значения	Норма по ГОСТ	Факт. значения	Норма по ГОСТ	Факт. значения	Норма по ГОСТ					
0–600	–	5–10	36,25	35–45	52,26	45–60	40,12	< 10	600	IIIV	–		
		10–20	38,32		58,22				300				
		20–40	47,99	45–55	58,72				800				
0–20	1380	5–10	26,30	25–35	47,22		34,21		800				
		10–20	27,52		52,13								
20–60	1310	20–40	33,80		54,27		35,50						
		40–60	34,56		–								

В случае с морозостойкостью отмечается, что полученные значения не укладываются в предел, ограниченный нормативной документацией. Таким образом, полученные данные позволяют сделать вывод, что независимо от пробы для замены каменного материала шлак требует повышения физико-механических характеристик.

В дополнение к нормируемым характеристикам шлака, определялась площадь удельной поверхности частиц распавшейся части шлака (менее 0,63) с учетом внешней и внутренней пористости методом Брунауэра-Эммета-Теллера (БЭТ, характеризует степень дисперсности шлака) (таблица 3.5, рисунок 3.5) и его гранулометрический состав с использованием лазерной дифракции.

Таблица 3.5 – Удельная поверхность шлака

Проба	Коэффициент корреляции	Методом БЭТ, м ² /г
0–600	0,9993	4,8 ± 0,1

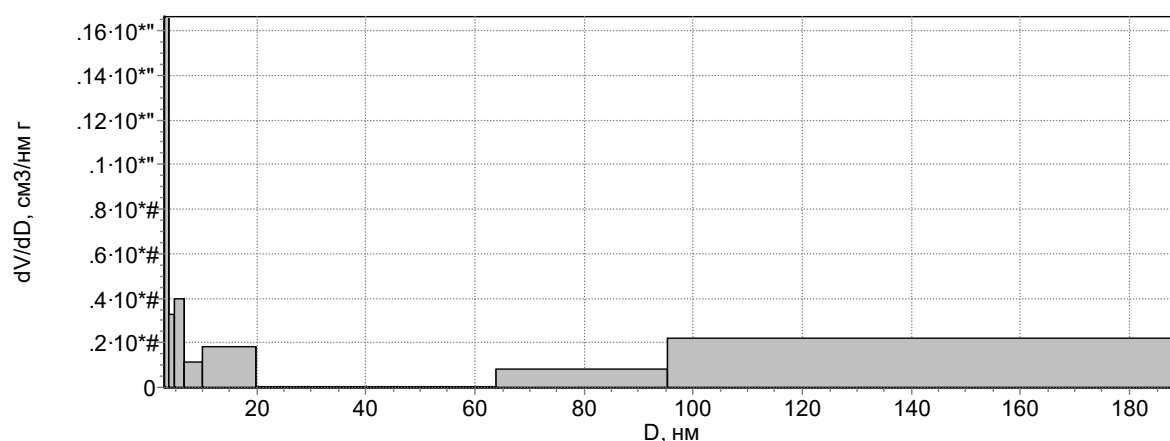


Рисунок 3.5 – График распределения пор шлака ОЭМК

Согласно полученным данным удельная поверхность отвального шлака составляет 4,8 м²/г.

Обращает на себя внимание тот факт, что поры в структуре шлака распределены неравномерно (рисунок 3.5). Наибольший объем составляют поры размером более 100 нм. Отмечается наличие небольшого объема пор размером менее 20 нм (занимают менее 10 %). Полученные данные свидетельствуют о высокой по-

ристости структуры шлака.

Согласно данным лазерной гранулометрии (рисунок 3.6) отвальный шлак, подверженный процессу распада, является полидисперсной системой с размером частиц от 0,1–100 мкм. На графике выражены три основные фракции 0,1–7 мкм, 9–15 мкм и 70–100 мкм.

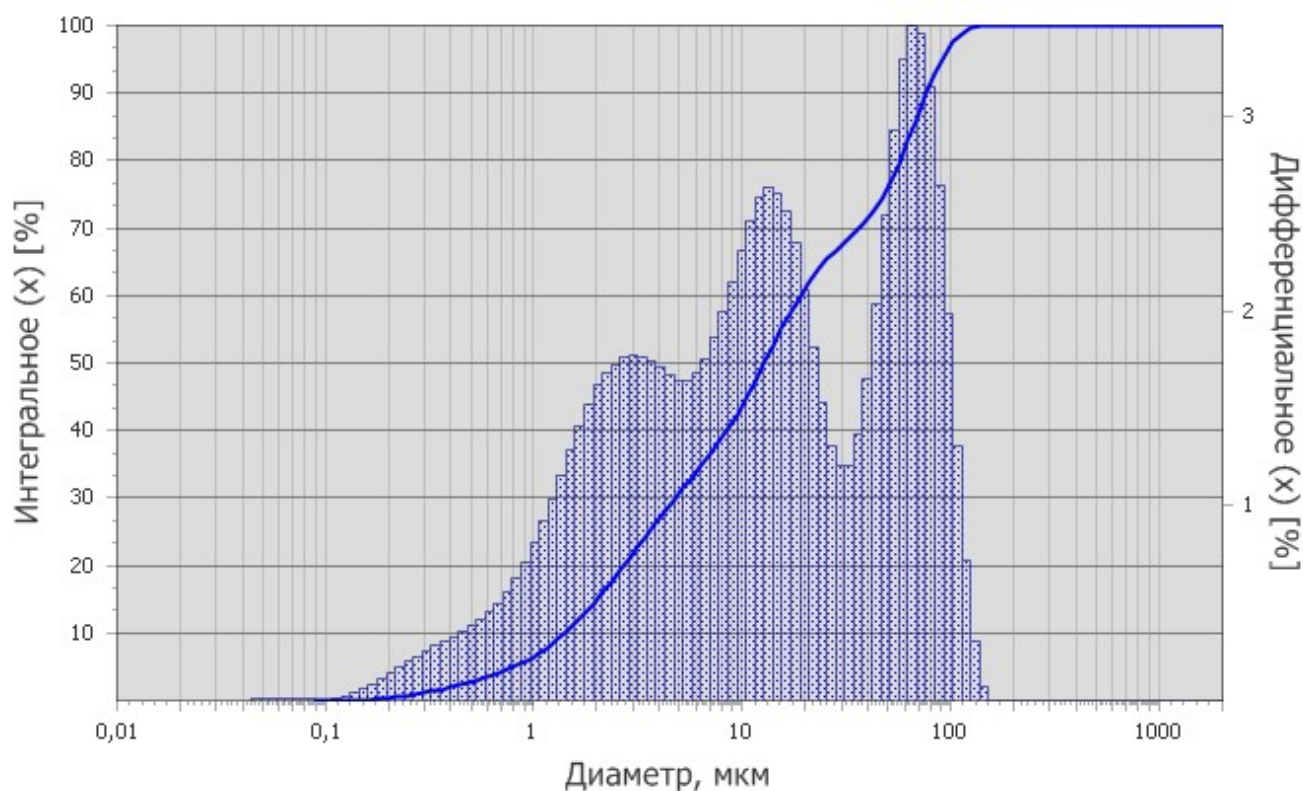


Рисунок 3.6 – Гранулометрический состав проб шлака ОЭМК
по лазерной дифракции

Таким образом, анализ комплекса физико-механических характеристик как регламентируемых нормативной документацией, так и полученных с использованием научно-признанных методик показал, что все пробы отвального шлака характеризуются невысокими марками по прочности 300–800, истираемости ИIV и не соответствуют даже минимальным требованиям по морозостойкости. При этом, отвальный шлак, подверженный распаду, характеризуется достаточно высокой удельной поверхностью и пористостью. Гранулометрический состав шлака по данным лазерной дифракции характеризуется присутствием частиц в диапазоне 0,1–100 мкм. На основании полученных данных установлено, что для использова-

ния в качестве каменного материала необходимо повышение его физико-механических характеристик.

3.3 Физико-химические свойства исходного шлака

Наряду с физико-механическими характеристиками определение физико-химических свойств играет важнейшую роль при установлении возможности и способа повышения качества металлургических шлаков с целью использования в дорожном строительстве.

Для изучения физико-химических свойств и технологических характеристик были отобраны пробные образцы шлака, полученные по различным технологиям, включая сухую и существующую гидравлическую. Отбор образцов производился в различные временные интервалы и из различных плавок, чтобы оценить изменения свойств во времени и в зависимости от технологии охлаждения. Образец шлака, полученный по существующей гидравлической технологии, был взят из шлаковой ямы после охлаждения до температур в диапазоне 20–40 °С и перемешан экскаватором, чтобы получить однородную пробу.

На начальном этапе определялась активность шлака, которая представляет собой усредненное значение предела прочности при сжатии затвердевших образцов из тонкоизмельченного шлака с водой в возрасте 28 суток (таблица 3.6). В работе активность шлака определялась в соответствии с ГОСТ 3344–83 по значению предела прочности образцов-цилиндров, изготовленных из шлакового теста максимальной плотности достигаемой при подобранном количестве воды. Максимальную плотность шлакового теста устанавливали путем подбора (рисунок 3.7).

В результате подбора было установлено, что образцы-цилиндры заформованные под нагрузкой 300 кг/см² достигают максимальной плотности, значение которой составило около 2330 кг/м³ при оптимальной влажности 13 %.

Данные таблицы 3.6 указывают на то, что шлак из отобранных проб смесей 0–20, 20–60, 0–600 относится к категории активных. Это свидетельствует о том, что различные физико-химические процессы, в том числе карбонизации, будут происходить и после применения данного материала в строительстве.

Таблица 3.6 – Активность исследуемых проб шлака

Фракция, мм	Активность	Среднее значение предела прочности при сжатии, МПа	Предел прочности образца при сжатии, МПа	
			Фактическое значение	по ГОСТ 3344–83
0–20	Активный	2,7	4,0	2,5–5
			2,0	
			2,5	
			2,8	
			3,0	
			2,7	
			2,2	
			2,6	
			2,2	
			3,0	
20–60	Активный	2,8	2,6	
			3,0	
			2,8	
			2,8	
			3,6	
			2,7	
			2,3	
			2,5	
			3,0	
			2,9	
0–600	Активный	3,1	3,2	
			3,3	
			3,9	
			2,5	
			2,7	
			2,8	
			3,9	
			3,3	
			2,5	
			2,7	

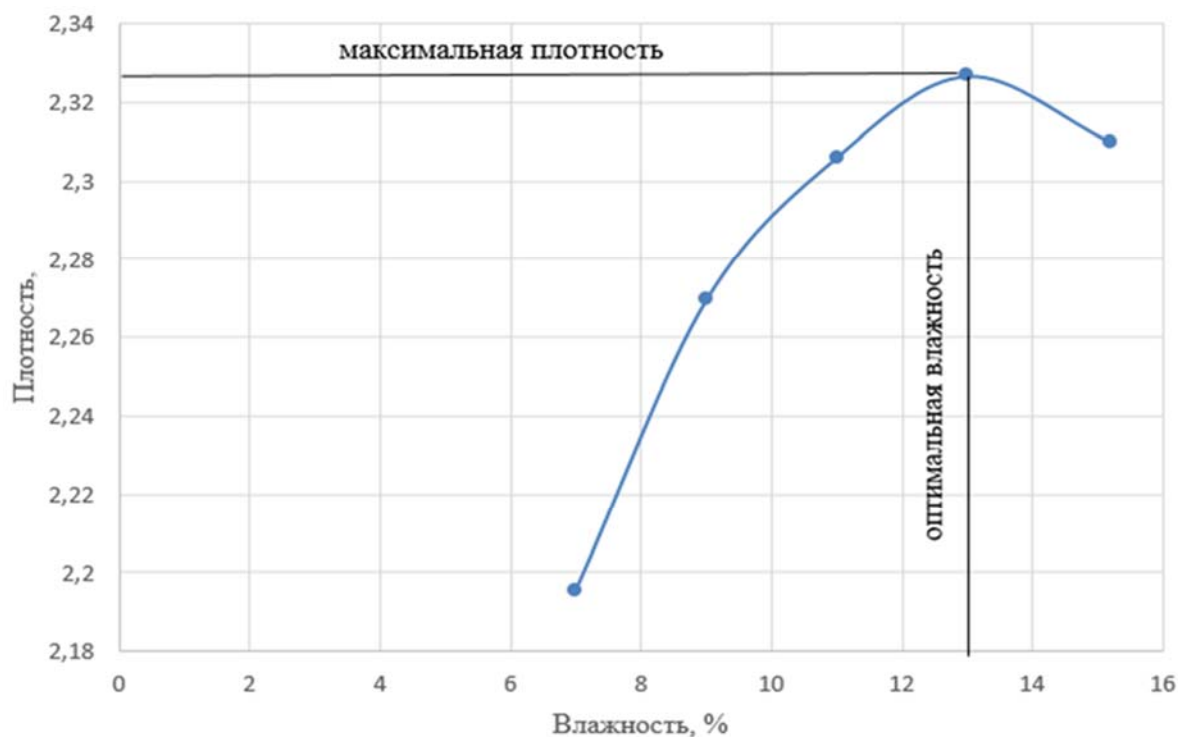


Рисунок 3.7 – Зависимость максимальной плотности
от оптимальной влажности

В свою очередь, устойчивость шлака против распада (таблица 3.7) смесей 0–20, 20–60 для сульфидного и железистого распада составила 1,44 %, для силикатного и известкового распада составила 2,53 %, что соответствует его среднеустойчивой структуры (УС2). Устойчивость против распада смесей 0–600 для сульфидного и железистого распада составила 1,56 %, для силикатного и известкового распада составила 3,22 %, что соответствует его среднеустойчивой структуры (УС2).

Согласно нормативной документации, устойчивость структуры шлаков против всех видов распада должна быть не менее УС2, следовательно, исследуемые пробы шлака обладают минимально необходимой устойчивостью и его можно применять для строительства дорог и аэродромов.

На основании данных о химическом составе (таблица 3.8), полученных с использованием рентгенофлуоресцентного анализа установлено, что исследуемые пробы шлаков являются основными активными материалами в виду преобладания

основных оксидов (Ca, Fe₂O₃, MgO, MnO) и значений модуля активности (Al₂O₃/SiO₂) Ma=0,10–0,13.

Таблица 3.7 – Устойчивость структуры щебня против распада

Проба	Устойчивость щебня против распада, %		Норма для всех видов по ГОСТ 3384–83	Устойчивость структуры
	для сульфидного и железистого распада	для силикатного и известкового распадов		
0–20	1,44	2,53	3–5	УС 2
20–60	1,01	2,79		
0–600	1,56	3,22		

Таблица 3.8 – Химический состав проб шлака

Наименование	Содержание оксидов, %											
	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	Al ₂ O ₃	MnO	Cr ₂ O ₃	P ₂ O ₅	TiO ₂	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O
Отвальный шлак	40,49	28,66	17,15	7,71	3,73	1,10	0,32	0,20	0,12	0,12	0,07	0,06
Шлак воздушного охлаждения	39,73	30,04	17,39	8,67	2,39	0,82	0,25	0,17	0,16	0,05	0,04	0,14
Шлак гидравлического охлаждения	34,30	29,21	22,12	9,71	3,17	0,67	0,13	0,18	0,22	0,15	0,08	0,15

Существенных колебаний в составе между пробами шлака, полученными в результате различных способов охлаждения и с учетом вылеживания в отвале не наблюдается. Так, рассматриваемые материалы характеризуются наибольшим содержанием следующих оксидов: кальция (34–41 %), кремния (28–30 %), железа (17–22 %), магния (7–10%), алюминия (2–4 %). Содержание остальных оксидов составляет менее 2 % от общей массы.

По данным рентгенофазового анализа (рисунок 3.8), в составе шлаков ОЭМК

основной фазой до стабилизации является γ -2CaO·SiO₂ ($d(A) = 1,637; 1,800; 1,91; 2,745; 3,01; 3,834; 4,311$), присутствуют: MgO ($d(A) = 2,43; 2,108; 1,49$), Ca(OH)₂ ($d(A) = 2,68; 1,933; 1,704; 1,482; 1,450$), 3CaO·Al₂O₃ ($d(A) = 4,004; 2,78; 1,910; 1,566$), MgO·Al₂O₃ ($d(A) = 2,02, 2,46$), геленита 2CaO·Al₂O₃·SiO₂ ($d(A) = 3,71; 3,06; 2,85; 2,436$). Одной из важнейших отличительных особенностей шлаков ОЭМК, является значительное содержание железосодержащих фаз – CaO·Fe₂O₃ ($d(A) = 2,69; 2,67; 2,238; 1,838; 1,832$), CaO·2FeO ($d(A) = 2,585; 2,233; 1,59$), вюстит FeO ($d(A) = 2,468; 2,141; 1,492$), Fe₂O₃ ($d(A) = 2,536; 1,626; 1,484$). В ряде проб шлаков присутствуют кальциймагниево-силикатные фазы типа мервинита ($d(A) = 2,84; 2,68; 2,41; 2,30; 2,20; 2,16; 1,88; 1,53$).

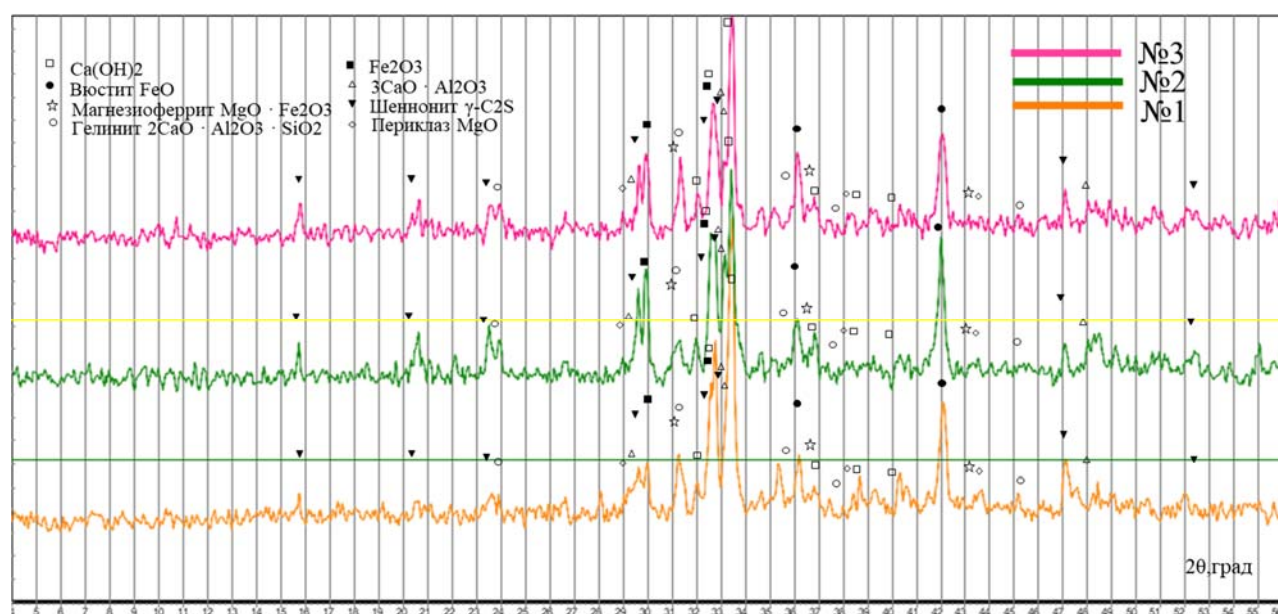


Рисунок 3.8 – Рентгенофазовый анализ электрошлака: проба № 1 – отвальный шлак гидравлического охлаждения; проба № 2 – шлак воздушного охлаждения; проба № 3 – шлак гидравлического охлаждения

В результате анализа проб шлака с использованием инфракрасной спектроскопии (рисунок 3.9) установлено, что три полосы поглощения средней интенсивности в области 650–450 см⁻¹ относящихся к группе SiO₄.

В области 450–280 см⁻¹ обнаруживаются полосы октаэдра XO₆ (где X – Mg, Na, Ca и др.). Полосы валентных OH⁻ колебаний, относящихся к структурным гидроксильным группам, обнаруживаются в области 3750–3200 см⁻¹. Участие

группы OH^- в водородной связи приводит к понижению частоты валентных OH^- колебаний. Полосы поглощения 410, 520 и 920 характерны для ларнита. Интенсивные полосы поглощения в области $1300\text{--}1600\text{ см}^{-1}$ может принадлежать RO- фазе [145].

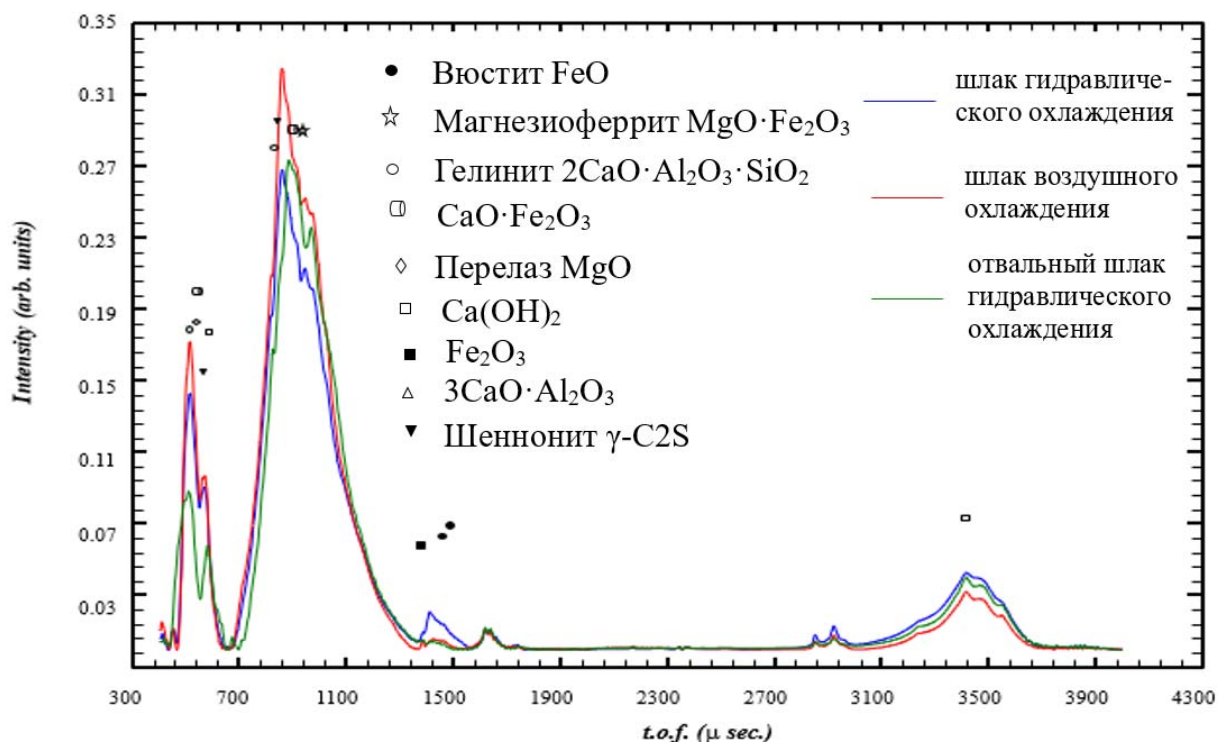


Рисунок 3.9 – Данные ИК-спектроскопического анализа
электросталеплавильного шлака

В результате проведенного анализа физико-химических свойств различных проб электросталеплавильного шлака, отличающихся способом охлаждения, было установлено, что все пробы характеризуются примерно одинаковой активностью и устойчивостью структуры против различных видов распада UC_2 . Кроме того, применение различных способов охлаждения и время вылеживания в отвале не оказывает существенного влияния на качественный и количественный минерально-фазовый состав шлака. В этой связи можно сделать вывод о том, что применение различных технологических приемов, по повышению свойств шлака, будет оказывать на него примерно одинаковое влияние независимо от способа охлаждения шлака.

3.4 Структурные особенности проб металлургического шлака, полученного по различным технологиям охлаждения

Анализ структурных особенностей материалов позволяет дополнить представления о влиянии различных факторов на их конечные свойства. В связи с этим пробы отвального шлака подверглись микроскопическим исследованиям. При небольшом увеличении $\times 100$ (общий вид проб, рисунок 3.10) видно, что основное различие проб шлаков заключается в степени дефектности частиц в зависимости от технологии охлаждения шлакового расплава.

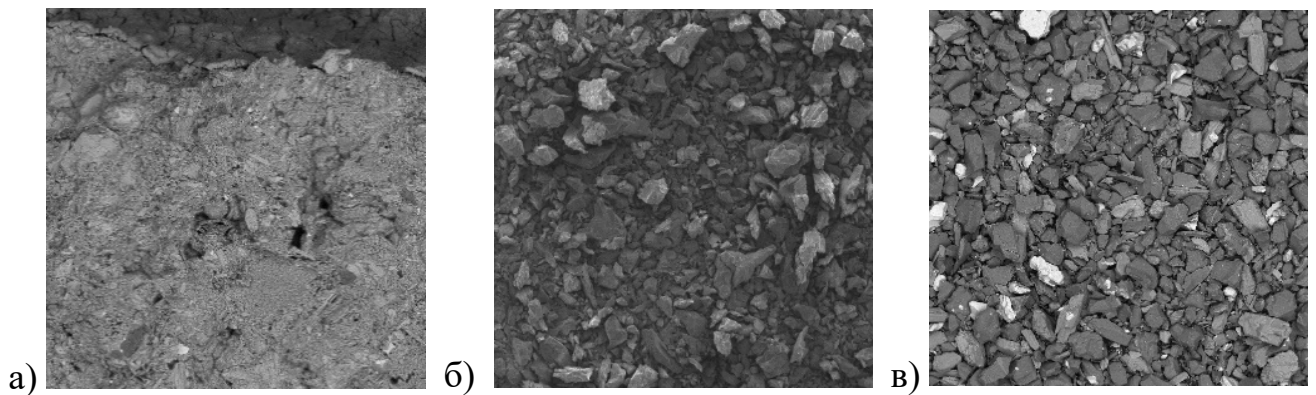


Рисунок 3.10 – Структурные особенности проб шлаков в зависимости от технологии охлаждения: а) отвальный шлак гидравлического охлаждения; б) шлак воздушного охлаждения; в) шлак гидравлического охлаждения

Кроме того, отвальный шлак характеризуется неоднородной зональной структурой образцов, обусловленной наличием примесных включений и различных дефектов (рисунок 3.11).

Так, например, при охлаждении шлака происходит выделение газов и образование газовых пузырьков, которые могут служить центрами кристаллизации и приводить к образованию структурных зон с различной степенью дефектности (рисунок 3.11). Также на структуру шлака могут влиять различные примеси, такие как оксиды и гидроксиды железа, алюминия, кальция и магния, которые могут образовывать различные фазы и влиять на распределение примесей в кристаллической структуре. Кроме того, дефекты кристаллической решетки могут возни-

катель в результате воздействия высоких температур и механических нагрузок при обработке и транспортировке шлака.

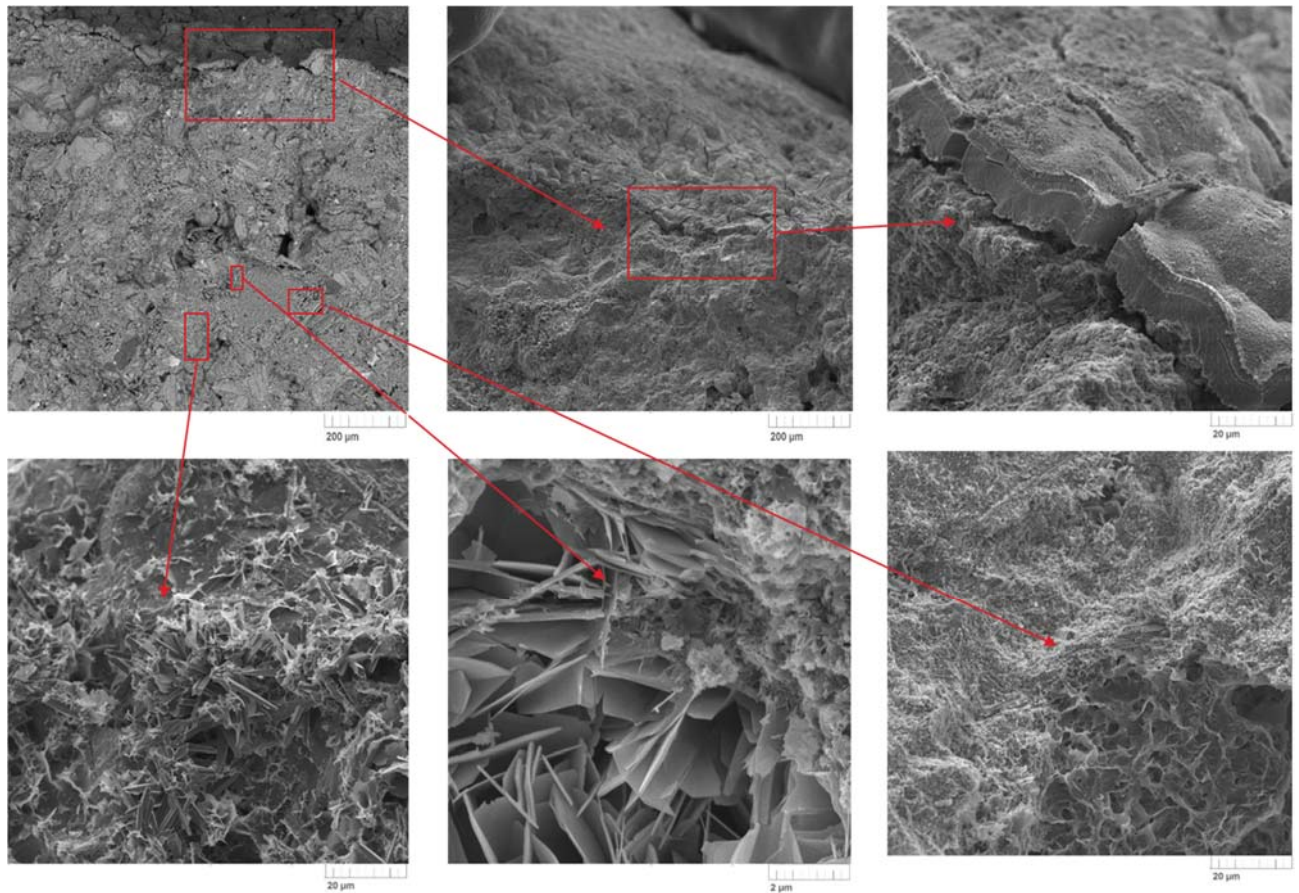


Рисунок 3.11 – Микроструктурный анализ отвального шлака ОЭМК

Все указанные выше факторы могут приводить к формированию неоднородной зональной структуры шлака, которая может оказывать влияние на его физико-химические и технологические свойства.

Отдельные поликристаллические зерна (рисунок 3.11, 3.12) монтчеллита имеют свободную форму роста, не превышающую 400 нанометров. Впоследствии формируется гребенчатая поверхность, которая состоит из множества мелких кристаллов магнезиоферрита. Эти кристаллы имеют округлую форму и образуют плотные агрегаты.

На представленных микрофотографиях шлака (рисунок 3.12) можно увидеть кристаллы мервинита округлой формы. Кристаллы ларнита имеют схожую форму и могут сохраняться в составе шлака.

Также на микрофотоснимках (рисунок 3.12) видны призматические и пла-

стинчатые кристаллы вторичного кальцита и монтичеллита соответственно. Их размеры составляют около 1,5х3,7 и 4х4,7 микрометров соответственно. Неправильная и разная кривизна граней свидетельствует о собирательном характере рекристаллизации данных частиц. Также видны округлые кристаллы мервинита с вытянутой формой вдоль одного направления, которые изменяются при переходе β – γ модификации в псевдоморфную волокнистую структуру. Кристаллы периклаза существуют в свободном состоянии и подтверждают данные рентгенофазового анализа о расположении рядов кристаллов периклаза с четырехгранными пирамидами в основании.

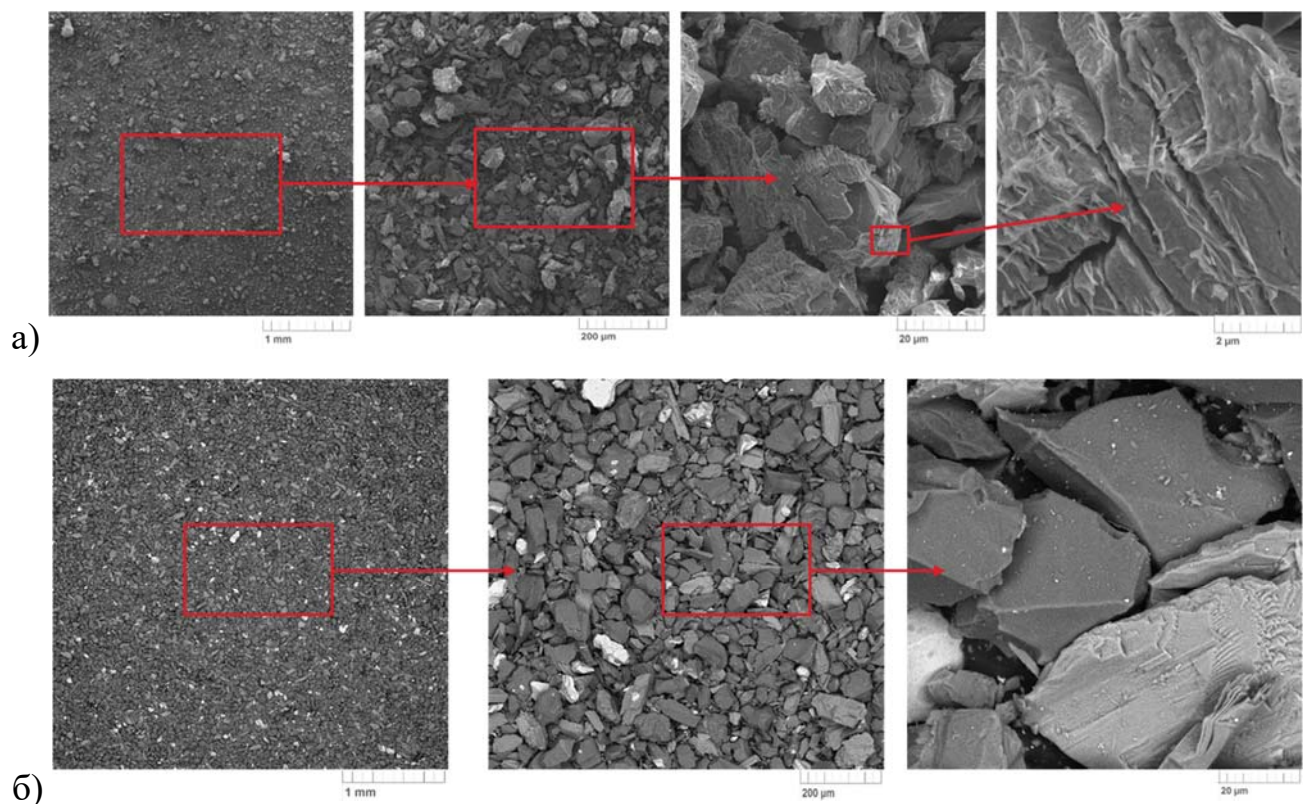


Рисунок 3.12 – Микроструктурный анализ шлака ОЭМК:

а) воздушного охлаждения; б) гидравлического охлаждения

Изучение многослойных карт энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (рисунок 3.13) позволил оценить распределение элементов в структуре образцов стабилизированного шлака, напрямую влияющих на количественный выход материала и его структурные особенности.

Основную массу карты заполняют оксиды кремния и кальция (рисунок

3.13), а также оксиды железа и магния. В результате превращений формируется сложная структура. Рассматриваемый материал представляет собой полидисперсную смесь зерен, содержащих различные оксиды, которые не всегда однородно распределены в объеме шлака. Последнее зависит от того, насколько интенсивно протекала реакция. При этом, в большинстве своем зерна шлака имеют равноосную форму, с четко различимыми гранями. Однако отмечается, что частицы, содержащие магний, имеют более вытянутую форму, что характерно для роста кристаллов в определенном направлении.

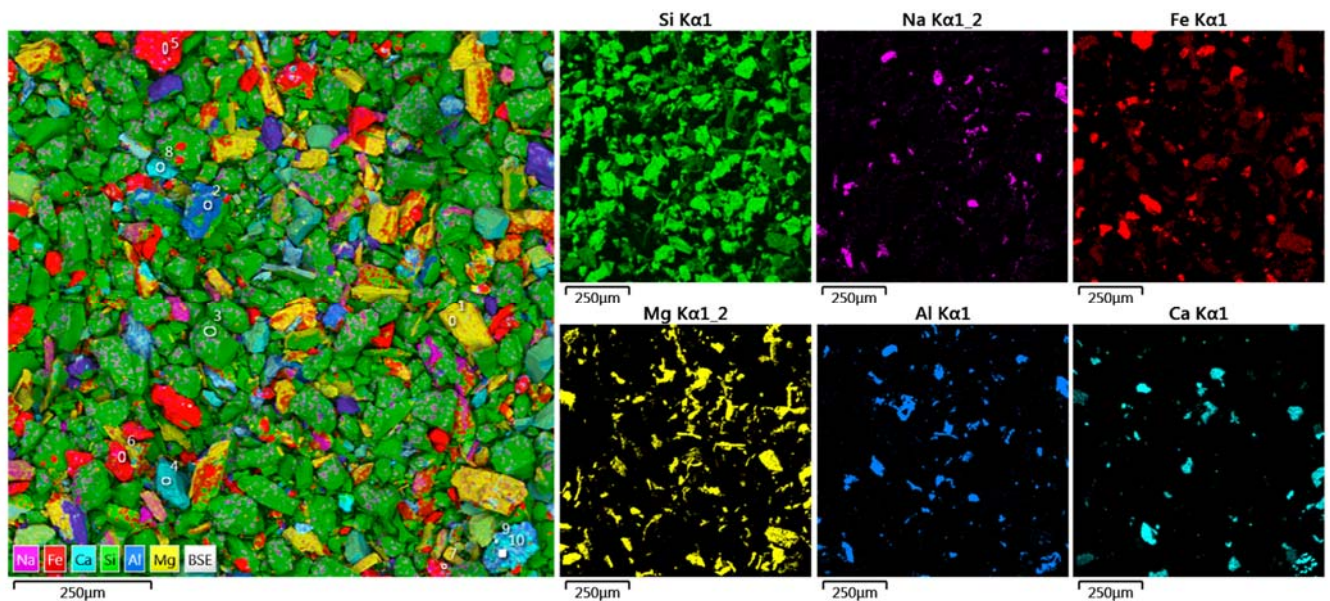


Рисунок 3.13 – Многослойная карта энергодисперсионного анализа проб шлака стабилизации

Анализ структурных особенностей с применением растровой электронной микроскопии в сочетании с энергодисперсионной рентгеновской спектроскопией позволил изучить особенности формирования структуры проб шлаков в зависимости от применяемого способа охлаждения. В результате установлено, что как при воздушном, так и при гидравлическом охлаждении формируется зернистая структура шлака. Однако, обращает на себя внимание степень дефектности кристаллической структуры шлака. Отмечается, что наибольшей степенью дефектности характеризуется проба отвального шлака, подверженная процессу самораспада в результате вылеживания. Наименьшая степень дефектности зерен шлака ха-

рактерна для пробы, полученной в результате гидравлического охлаждения. При этом, состав металлургического шлака представлен преимущественно оксидами кремния, кальция, железа и магния.

3.5 Состав и химические свойства стабилизаторов из отходов производства

Стабилизация высокотемпературных модификаций белита и предотвращения его полиморфной трансформации в низкотемпературную наиболее целесообразна с применением закалки или в результате введения примесных ионов. Общее требование к примесным ионам заключается в схожести размеров их ионных радиусов и зарядов с ионами двухкальциевого силиката. Внедряясь в структуру двухкальциевого силиката, они деформируют кристаллическую решетку белита, предотвращая поворот кремнекислородных тетраэдров и последовательную их трансформацию в низкотемпературные полиморфные модификации [70, 96–106].

В рамках диссертационной работы с целью повышения физико-механических свойств шлака для использования в качестве щебня для дорожного строительства проанализированы свойства трех техногенных отходов различных производств и произведена оценка целесообразности их использования в качестве стабилизатора.

С целью установления целесообразности использования выбранных отходов различных производств для кристаллохимической стабилизации был произведен их химический анализ в таблице 3.9. Анализ данных по химическому составу применяемых в работе стабилизаторов показал, что несмотря на существенные различия (таблица 3.9) каждый из стабилизаторов содержит в своем составе ионы (Na^+ , Si_4^{+} , Mg_2^+ , Al_3^+ , Ca_2^+ , K^+) оказывающие непосредственное влияние на фазовые превращения в процессе стабилизации.

Феррохромовая руда и пыль ДСП содержит в своем составе достаточно высокое количество стабилизирующих ионов (переходные или d-элементы, такие как: Fe_3^+ , Zn_2^+ , Mn_7^+ , Cr_3^+). Все перечисленные ионы представлены в форме оксидов. Например, присутствие в составе исследуемых стабилизаторов оксидов MgO ,

Al_2O_3 , Fe_2O_3 , K_2O , MnO и Cr_2O_3 способствует сохранению в составе шлака гидравлически активного двухкальциевого силиката в виде высокотемпературных α - и β -модификаций. Наличие оксида Na_2O в составе содощелочного плава способствует снижению температуры межфазных переходов.

Таблица 3.9 – Химический состав стабилизаторов

№ п/п	Na_2O	SiO_2	MgO	Al_2O_3	Cl	CaO	SO_3	Fe_2O_3	K_2O	ZnO	MnO	Cr_2O_3
1	97,88	0,69	0,39	0,36	0,24	0,09	0,08	0,05	0,04	–	–	–
2	8,05	6,51	4,35	0,48	0,55	10,87	1,16	54,62	6,19	3,85	2,33	0,35
3	–	1,6	9,36	15,1	–	0,41	0,03	27,3	0,04	–	0,28	41,2

Примечание: 1) феррохромовая руда;

2) содощелочной плав;

3) пыль дуговых сталеплавильных печей (ДСП).

По данным рентгенофазового анализа (рисунок 3.14, а), в составе хромитового песка 1 стабилизатор основными фазами являются Fe_3O_4 ($d(\text{A}) = 1,486; 1,617; 1,877; 1,926; 2,101; 2,423; 2,531; 2,971; 4,197; 4,852$), магнезиоферрит MgFe_2O_4 ($d(\text{A}) = 1,480; 1,600; 2,080; 2,510; 2,950$), хромит $\text{Fe}(\text{Cr}, \text{Al})_2\text{O}_4$ ($d(\text{A}) = 0,850; 1,100; 1,260; 1,460; 1,600; 2,070; 2,520; 2,950; 4,820$); в составе плава соды кальцинированной 2 стабилизатор (рисунок 3.2 б) основной фазой является натрит Na_2CO_3 ($d(\text{A}) = 1,720; 1,884; 1,952; 2,175; 2,194; 2,254; 2,366; 2,545; 2,602; 2,621; 2,970; 3,240; 3,420$); в составе пыли газоочистных установок ОЭМК 3 стабилизатор (рисунок 3.2 в) основными фазами являются магнетит $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ($d(\text{A}) = 1,486; 1,617; 2,101; 2,534; 2,971; 4,852$), и гематит Fe_2O_3 ($d(\text{A}) = 1,452; 1,485; 1,694; 1,840; 2,205; 2,516; 2,698$), так же присутствует Na_2O ($d(\text{A}) = 2,43; 2,108; 1,49$).

Участие гидроксильной группы в водородной связи приводит к понижению частоты валентных OH^- колебаний. Замещение октаэдрического алюминия железом проявляется в смещении полос OH^- групп к более низким частотам $2800\text{--}3000\text{ см}^{-1}$. В области $3675\text{--}3025\text{ см}^{-1}$ – соответствует гидроксильным группам координированным с 2MgFe^{2+} (3660 см^{-1}), Mg и 2Fe^{2+} (3648 см^{-1}) и 3Fe^{2+}

(3625 cm^{-1}). В области 450–280 cm^{-1} обнаруживаются полосы октаэдра XO_6 (где X – Mg, Na, Ca и др.) [145].

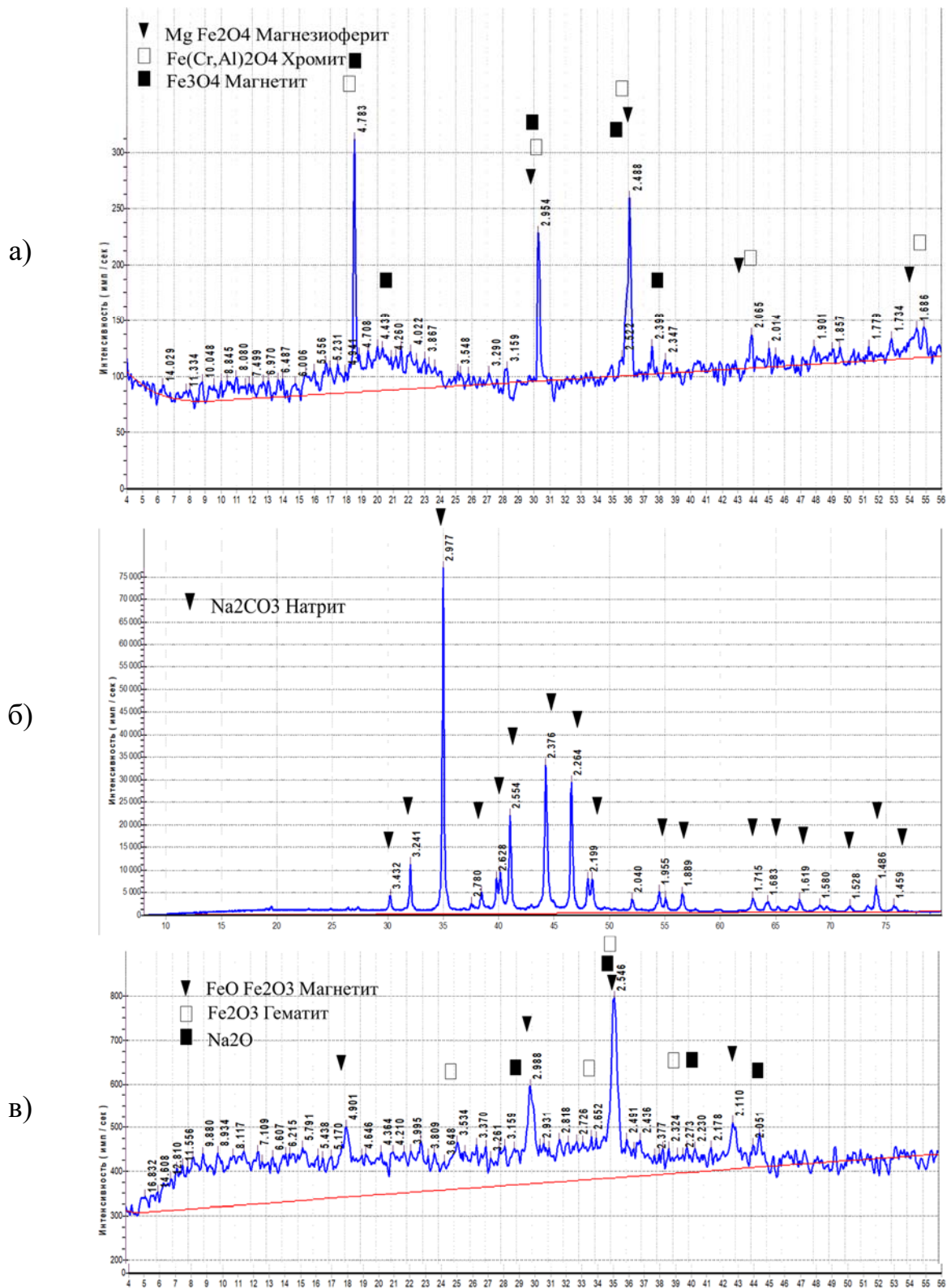
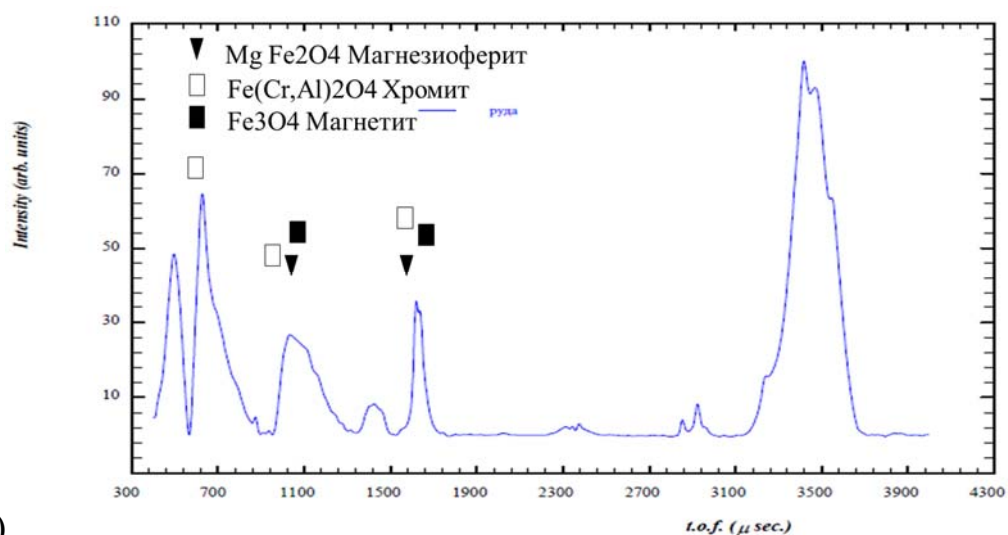
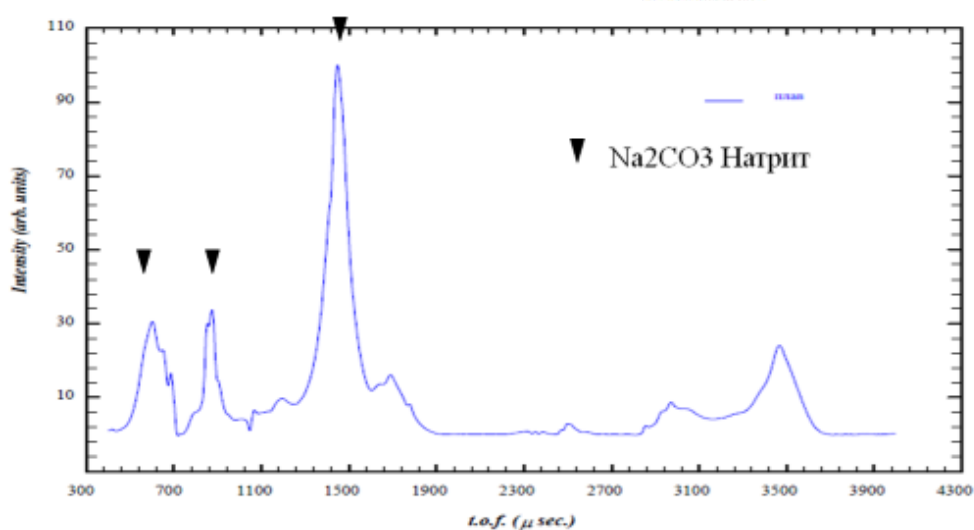


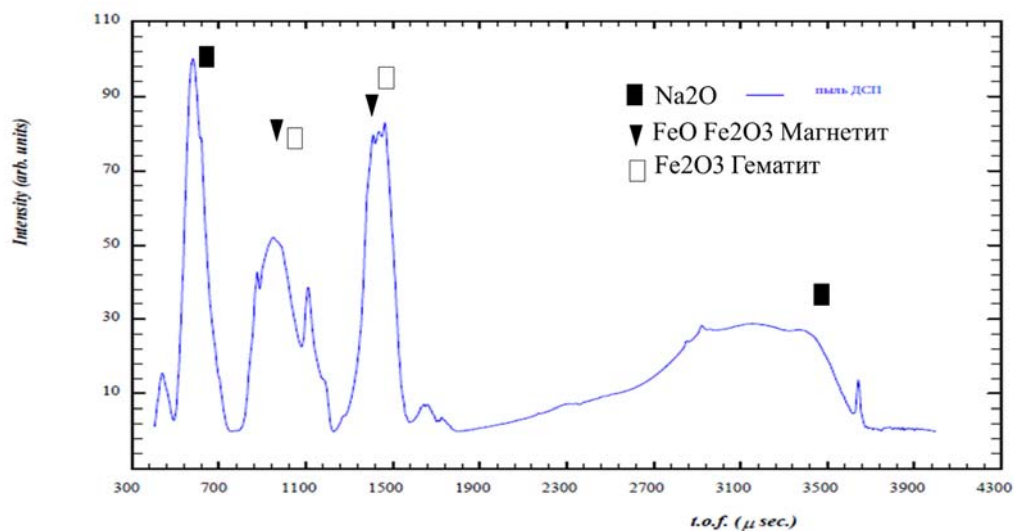
Рисунок 3.14 – Минерально-фазовый состав стабилизаторов из отходов различных производств: а) феррохромовая руда; б) содощелочной плав; в) пыль ДСП



а)



б)



в)

Рисунок 3.15 – ИК-спектроскопический анализ стабилизаторов из различных производств: а) феррохромовая руда; б) содощелочной плав; в) пыль ДСП

Более подробно был изучен стабилизатор в виде пыли дуговых сталеплавильных печей, являющийся отходом того же производства что и шлак [159].

Микроструктура сталеплавильной пыли представлена на рисунке 3.16. Форма пылинок определяется их происхождением.

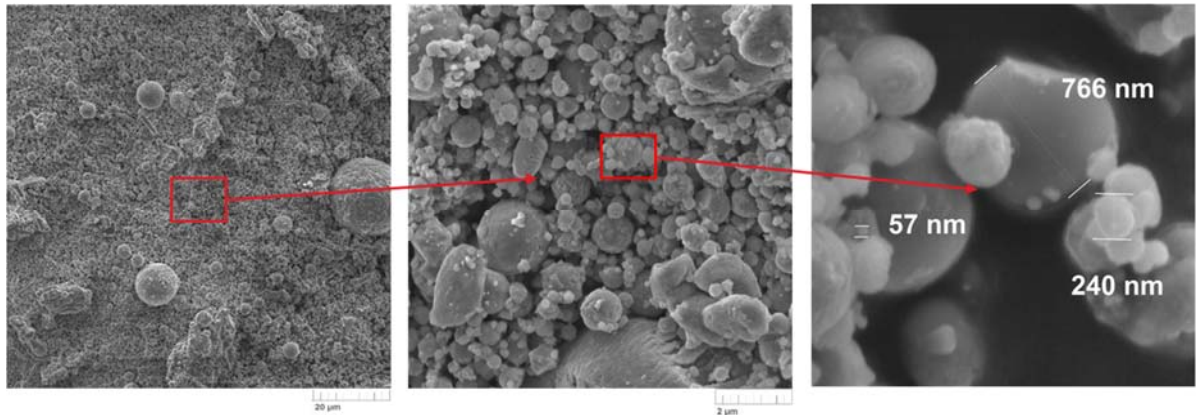


Рисунок 3.16 – Структурные особенности пыли ДСП

Частицы, образовавшиеся при испарении и продувке ванны кислородом, имеют форму, приближенную к сферической, что связано с наличием избыточной поверхностной энергии капель и относительно малой силой тяжести, действующей на каплю [160–164]. Это характерно при диспергировании жидкости или при конденсации паров капли. Электросталеплавильная пыль формируется на стадии тумана, когда мельчайшие капли при коалесценции, сливаясь, образуют вновь шарообразную капельку. Средний размер капелек составляет 1,5–2,5 мкм и соответствует наибольшему пику на гистограмме распределения частиц по размерам (рисунок 3.17).

На приведенных микрофотографиях видны также рыхлые частицы разных форм, следовательно, при конденсации паров металлов одновременно с частицами нормальной плотности образуются частицы, плотность которых значительно меньше плотности металла. Для пыли, образовавшейся в процессе загрузки шихтовых материалов, т.е. конденсата, частицы пыли будут иметь более острую и неправильную форму [160, 164].

Кроме того, обнаружены частицы кристаллической формы. Обычно правильную кристаллическую форму в дымах имеют первичные частицы, образующиеся путем непосредственного перехода пар-кристалл. Если образование дыма идет путем конденсации пара в виде жидких капель и их последующего затверде-

вания, частицы дыма могут иметь как кристаллическую форму, так и сферическую форму. Первичные дымовые частицы ряда металлов и их оксидов малы, их средний размер составляет менее 100 нм, что соответствует первому пику на гистограмме распределения частиц по размеру (рисунок 3.18). Малый размер частиц затрудняет определение их формы и среднего размера.

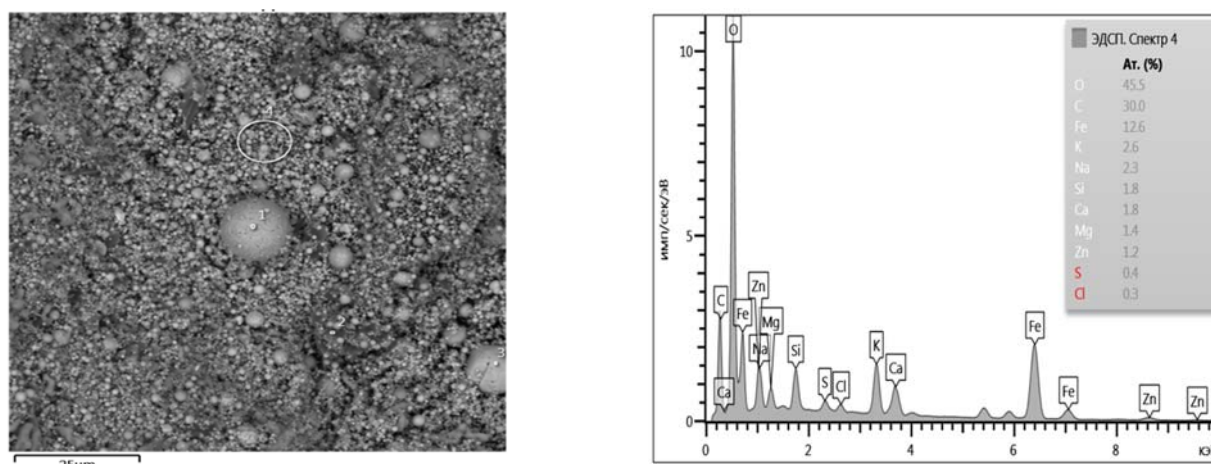


Рисунок 3.17 – Анализ микроструктуры отдельной сферической частицы пыли ДСП

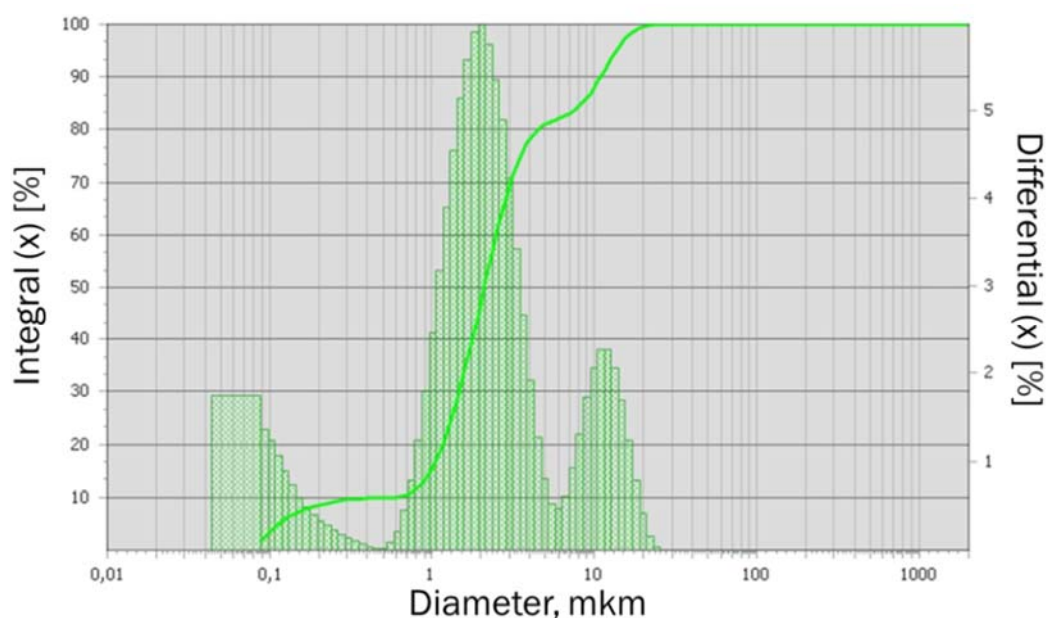


Рисунок 3.18 – Анализ гранулометрического состава пыли ДСП

Однако в пыли наблюдается большое количество частиц неправильной формы, слипшиеся колонии из сферических частиц. Это бывает в том случае, когда сталкивающиеся капли состоят из очень вязких жидкостей и процесс слияния

в одну шарообразную каплю тормозится, происходит только их слипание.

Эти «неправильные» частицы также имеют нормальную плотность, равную плотности вещества, из которого они были получены. Такие конгломераты имеют размер 10–12 мкм и соответствуют третьему пику на гистограмме распределения частиц по размеру.

Анализ техногенного сырья из отходов различных производств, рассматриваемых в качестве стабилизирующих агентов для кристаллохимической стабилизации шлакового расплава, показал, что все материалы характеризуются наличием в своем составе ионов способных встраиваться в кристаллическую решетку шлака. Следовательно, каждый из рассмотренных материалов может быть использован для стабилизации. При этом, остается не раскрытым вопрос эффективности каждого стабилизатора в виду существенного их различия. В этой связи возникает необходимость экспериментальных исследований, позволяющих практически установить целесообразность и эффективность кристаллохимической стабилизации в зависимости от вида стабилизатора.

3.6 Выводы

1. Комплексное изучение вопросов применения шлаковых материалов и способов повышения их физико-механических свойств для замены традиционных каменных материалов позволило установить рецептурно-технологические особенности кристаллохимической стабилизации основных металлургических шлаков с использованием других видов техногенного сырья в качестве стабилизирующих агентов. Разработанная методология исследования, в основе которой лежит комплексный анализ каменных материалов из металлургического шлака до и после стабилизации по схеме «состав (сырье) – структура (сырье, материал) – свойства (материал)», включает четыре этапа: анализ свойств исходного шлака и стабилизаторов; анализ свойств шлака, стабилизированного в лабораторных условиях; анализ свойств шлака, стабилизированного в промышленных условиях; технологически особенности получения и применения стабилизированного шлака.

Предложенная декомпозиция в виде пошагового плана диссертационного исследования позволяет регулировать процесс исследования, устанавливать закономерности и выявлять механизмы процесса структурообразования шлака в результате стабилизации шлакового расплава в зависимости от условий стабилизации.

2. Анализ комплекса физико-механических характеристик как регламентируемых нормативной документацией, так и полученных с использованием научно-признанных методик показал, что все пробы отвального шлака характеризуются невысокими марками по прочности 300–800, истираемости ИIV и не соответствуют даже минимальным требованиям по морозостойкости. При этом, отвальный шлак, подверженный распаду, характеризуется достаточно высокой удельной поверхностью и пористостью. Гранулометрический состав шлака по данным лазерной дифракции характеризуется присутствием частиц в диапазоне 0,1–100 мкм. На основании полученных данных установлено, что для использования в качестве каменного материала необходимо повышение его физико-механических характеристик.

3. В результате проведенного анализа физико-химических свойств различных проб электросталеплавильного шлака, отличающихся способом охлаждения, было установлено, что все пробы характеризуются примерно одинаковой активностью и устойчивостью структуры против различных видов распада $УС2$. Кроме того, применение различных способов охлаждения и время вылеживания в отвале не оказывает существенного влияния на качественный и количественный минерально-фазовый состав шлака. В этой связи можно сделать вывод о том, что применение различных технологических приемов, по повышению свойств шлака, будет оказывать на него примерно одинаковое влияние независимо от способа охлаждения шлака.

4. Анализ структурных особенностей с применением растровой электронной микроскопии в сочетании с энергодисперсионной рентгеновской спектроскопией позволил изучить особенности формирования структуры проб шлаков в зависимости от применяемого способа охлаждения. В результате установлено, что как при воздушном, так и при гидравлическом охлаждении формируется зернистая структура шлака. Однако, обращает на себя внимание степень дефектности кристаллической структуры шлака. Отмечается, что наибольшей степенью дефектности характеризуется проба отвального шлака, подверженная процессу са-

мораспада в результате вылеживания. Наименьшая степень дефектности зерен шлака характерна для пробы, полученной в результате гидравлического охлаждения. При этом, состав металлургического шлака представлен преимущественно оксидами кремния, кальция, железа и магния.

5. На основании анализа техногенного сырья из отходов различных производств, рассматриваемых в качестве стабилизирующих агентов для кристаллохимической стабилизации шлакового расплава, установлено, что все материалы характеризуются наличием в своем составе ионов способных встраиваться в кристаллическую решетку шлака. Следовательно, каждый из рассмотренных материалов может быть использован для стабилизации. При этом, остается не раскрытым вопрос эффективности каждого стабилизатора в виду существенного их различия. В этой связи возникает необходимость экспериментальных исследований, позволяющих практически установить целесообразность и эффективность кристаллохимической стабилизации в зависимости от вида стабилизатора.

4 АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ОТХОДОВ ДЛЯ КРИСТАЛЛОХИМИЧЕСКОЙ СТАБИЛИЗАЦИИ САМОРАСПАДАЮЩЕГОСЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ШЛАКА

В результате теоретических изысканий и исследования базовых свойств исходных сырьевых материалов обоснована целесообразность использования отходов различных производств с целью кристаллохимической стабилизации крупнотоннажного отхода электросталеплавильного производства в виде самораспадающегося основного металлургического шлака. Применение кристаллохимической стабилизации с минимальными ресурсозатратами может обеспечить получение качественного строительного материала, способного конкурировать с традиционными каменными материалами как в дорожно-строительной отрасли, так и в строительстве в целом. Однако, для качественной и количественной оценки влияния отходов различных производств на эффективность стабилизации шлака дуговых сталеплавильных печей необходимо экспериментальное подтверждение.

4.1 Исследование влияния различных стабилизаторов на свойства шлака в лабораторных условиях

Проведение лабораторных исследований является важнейшей частью любого эксперимента. При этом, моделирование условий, в которых осуществляется эксперимент оказывает существенное влияние на дальнейшее масштабирование разработанного технологического решения. Следовательно, чем больше факторов производственного процесса соблюдено в лабораторных условиях, тем выше вероятность достижения полученных результатов с учетом масштабных факторов.

В виду того, что повторить в лабораторных условиях операцию гидравлического охлаждения шлакового расплава из-за высоких температур, а также с учетом несущественных отличий в составе и структурных особенностях шлака, полученного по разным технологиям охлаждения (см. гл. 3), в лабораторных условиях

применялся шлак воздушного охлаждения. Подробное описание процесса кристаллохимической стабилизации в лабораторных условиях приведено в главе 2.

В результате осуществления кристаллохимической стабилизации с применением стабилизаторов из отходов различных производств установлено [114,138], что используемые материалы по-разному влияют на количественный выход полученного стабилизированного шлака (рисунок 4.1). Это объясняется существенными различия в составе стабилизирующих агентов.

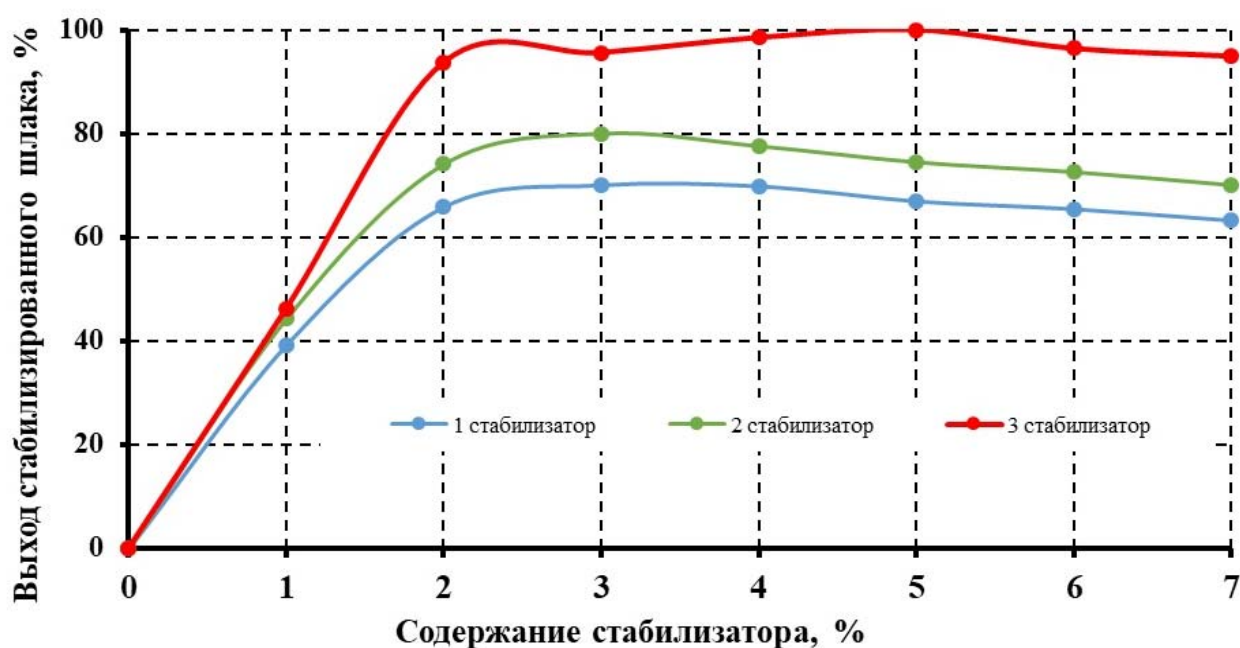


Рисунок 4.1 – Зависимость выхода стабилизированного шлака от содержания и вида стабилизатора: 1) феррохромовая руда; 2) содощелочной плав; 3) пыль ДСП

Так, введение 1 % феррохромовой руды в шлаковый расплав обеспечивает стабилизацию 39,2 % шлака (рисунок 4.1), а повышение концентрации стабилизатора до 2 % обеспечивает стабилизацию 65,8 % от массы шлака. Максимальная доля стабильной фракции (70 %) наблюдается при введении 3 % феррохромовой руды. Увеличение массы стабилизатора свыше 3 % показывает снижение эффективности введения рассматриваемого стабилизатора, при этом количество стабилизированного шлака снижается с 69,8 до 63,2 %. Увеличение частичного распада остывшего шлака при использовании феррохромовой руды более 3 % обусловле-

но снижением растворимости введенного стабилизатора в тигле. Следует отметить, что в данном случае стабилизация шлака происходит за счет высокого содержания оксидов металлов.

Использование содощелочного плава в качестве стабилизатора металлургического шлака, показало более высокую эффективность по сравнению с феррохромовой рудой. Введение 1 % содощелочного плава в шлаковый расплав обеспечивает стабилизацию 44,3 % шлака. Увеличение количества рассматриваемого стабилизатора до 2 % от массы обрабатываемого шлака приводит к стабилизации 74,1 % шлака. Использование 3 % содощелочного плава позволяет добиться максимальной стабилизации фракции металлургического шлака (80 %). Увеличение массы указанного стабилизатора свыше 3 % сопровождается резким вспениванием шлакового расплава, что приводит к выплеску расплава из тигля и снижению количества полученного стабилизированного шлака (на 22,4–29,9 %).

Введение 1 % пыли ДСП в шлаковый расплав обеспечивает стабилизацию 46,2 % шлака, что характеризует рассматриваемый стабилизатор как наиболее эффективный по сравнению с двумя другими. При использовании стабилизатора в количестве от 2 до 4 % от массы обрабатываемого шлака приводит к стабилизации более 90 % шлака. При этом полная стабилизация (100 %) фракции шлака обеспечивается лишь при введении 5 % пыли ДСП. Увеличение массы стабилизатора свыше 5 % сопровождается частичным распадом остывшего шлака (3,6–5,1 %) из-за снижения растворимости введенного стабилизатора.

Согласно анализу, полученных данных (рисунок 4.1), количественно характеризующих эффективность стабилизации металлургического шлака, рассматриваемые стабилизаторы можно выстроить в следующей последовательности по увеличению выхода стабилизированного шлака при их использовании: феррохромовая руда < содощелочной плав < пыль ДСП.

Однако с позиции использования стабилизированного металлургического шлака в качестве крупного заполнителя для дорожного строительства необходимо уделять особое внимание качеству получаемого материала. С этой целью производилась визуальная оценка влияния исследуемых стабилизаторов на макро- и

микроструктурные особенности конечного материала (рисунок 4.2).

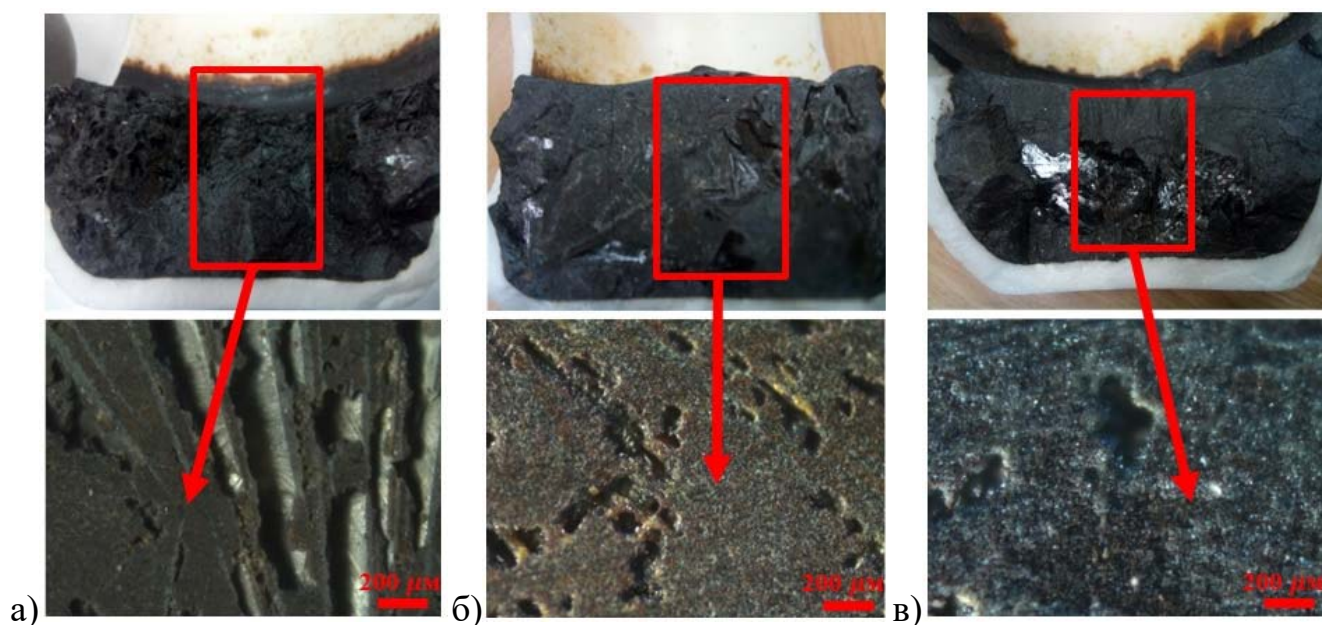


Рисунок 4.2 – Структурные особенности стабилизированного шлака при использовании: а) феррохромовой руды; б) содощелочного плава; в) пыли ДСП

Исследуемые стабилизаторы оказывают различное влияние не только на количественный выход фракции стабилизированного шлака, но и на его структурные особенности. Рассматривая макроструктуру образцов стабилизированного шлака достаточно сложно оценить особенности полученного материала, однако использование оборудования с более высоким увеличением (200 мкм) позволило выявить, что в зависимости от вида стабилизатора существенно изменяется пористость материала. С позиции дорожно-строительного материаловедения пористость определяет устойчивость материалов к погоднo-климатическим факторам (водонасыщение) и их долговечность под воздействием воды в период знакопеременных температур (марка по морозостойкости).

В результате установлено, что поры отличаются как по форме и объему, так и по распределению в структуре материала. Так введение феррохромовой руды в шлаковый расплав приводит к формированию крупных вытянутых пор, достигающих 1500 мкм в длину и 200 мкм в ширину (рисунок 4.2, а), что скорее всего

связано с высоким содержанием в составе феррохромовой руды оксида алюминия, который в результате реакции с минеральными компонентами шлака проявляет себя как пенообразователь.

Содощелочной плав позволяет получить материал с меньшим объемом пор, которые реже распределены в объеме стабилизированного шлака, а их размеры не превышают 500 мкм во всех направлениях (рисунок 4.2, б).

Наиболее плотная структура стабилизированного шлака с относительно низким количеством и размером пор отмечается у материала, стабилизированного с использованием пыли ДСП (рисунок 4.2, в). Размер пор составляет от 10 до 500 мкм в разных направлениях, при этом по сравнению с двумя другими образцами поры в структуре встречаются единично. Относительно невысокая пористость образцов шлака, стабилизированного с использованием содощелочного плава и пыли ДСП связана с воздухововлечением в результате их плавки и слива.

Рентгенофазовый анализ стабилизированных образцов шлака в лабораторных условиях (рисунок 4.3) показал, что во всех трех рентгенограммах присутствуют вюстит FeO ($d(A) = 2,468; 2,141; 1,492$), магнезиоферрит $\text{MgO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ($d(A) = 1,235; 1,291; 1,513; 2,140; 2,471$), геленит $2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ ($d(A) = 3,71; 3,06; 2,85; 2,436$) и гематит Fe_2O_3 ($d(A) = 2,536; 1,626; 1,484$). MgO ($d(A) = 2,43; 2,108; 1,49$), $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ($d(A) = 2,02, 2,46$), $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ($d(A) = 4,004; 2,78; 1,910; 1,566$). Для 1 стабилизатора (рисунок 4.3 а) характерно наличие магнезиохромита ($d(A) = 1,201; 1,270; 1,473; 1,605; 2,08; 2,514$) и магнезиоферрита ($1,21; 1,281; 1,483; 1,619; 2,094; 2,532$) во 2 стабилизаторе (рисунок 4.3 б) характерно наличие девитрита $\text{NaO} \cdot 3\text{CaO} \cdot 6\text{SiO}_2$ ($d(A) = 2,99; 3,25; 3,31; 4,17$). В 3 стабилизаторе (рисунок 4.3 в) присутствуют фазы $2\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ ($d(A) = 1,611; 1,673; 1,956; 2,462; 2,697; 3,015; 4,264$) и окерманита $\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2$ ($d(A) = 1,758; 2,036; 2,463; 2,861; 3,077; 3,709; 5,507$). При этом на всех рентгенограммах наблюдается структура двухкальциевого силиката характерная для $\beta\text{-}2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ ($d(A) = 2,878; 2,813; 2,794; 2,732, 2,718$).

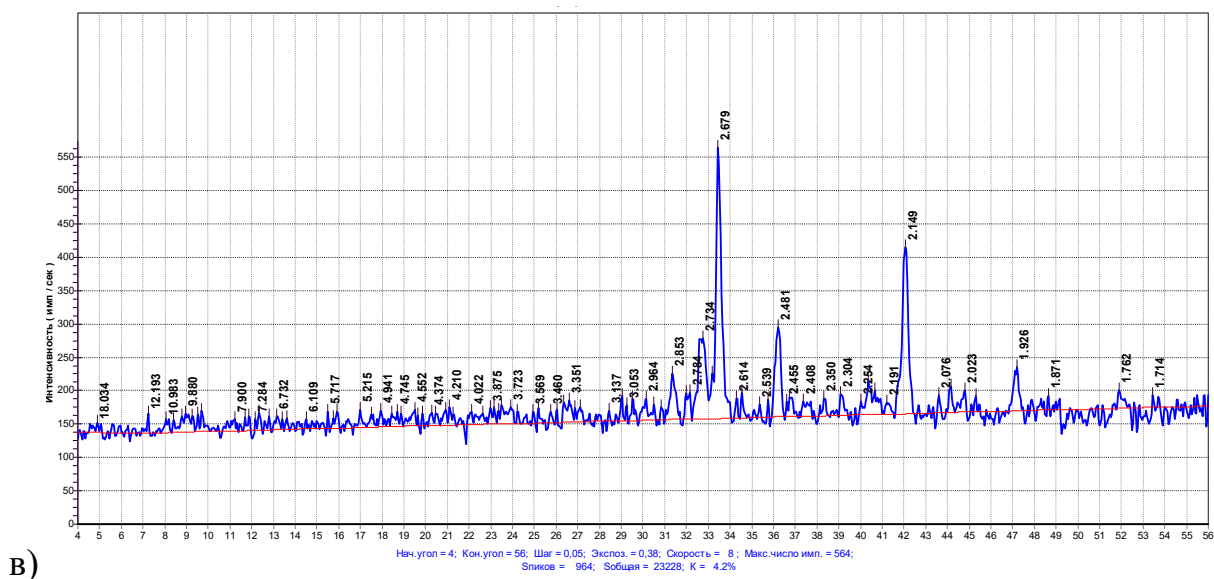
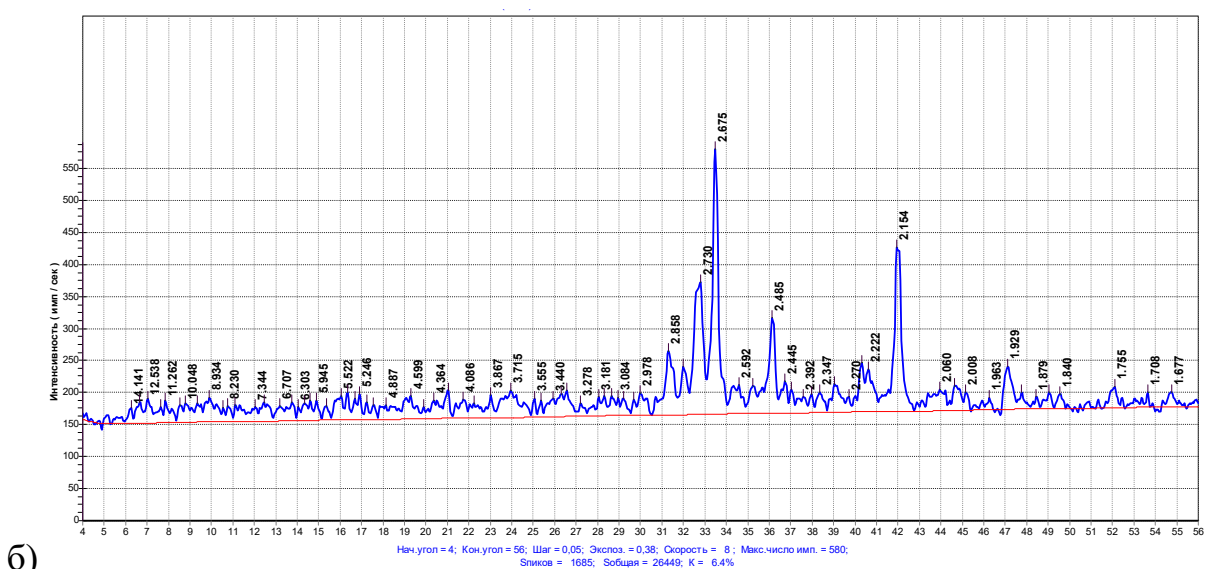
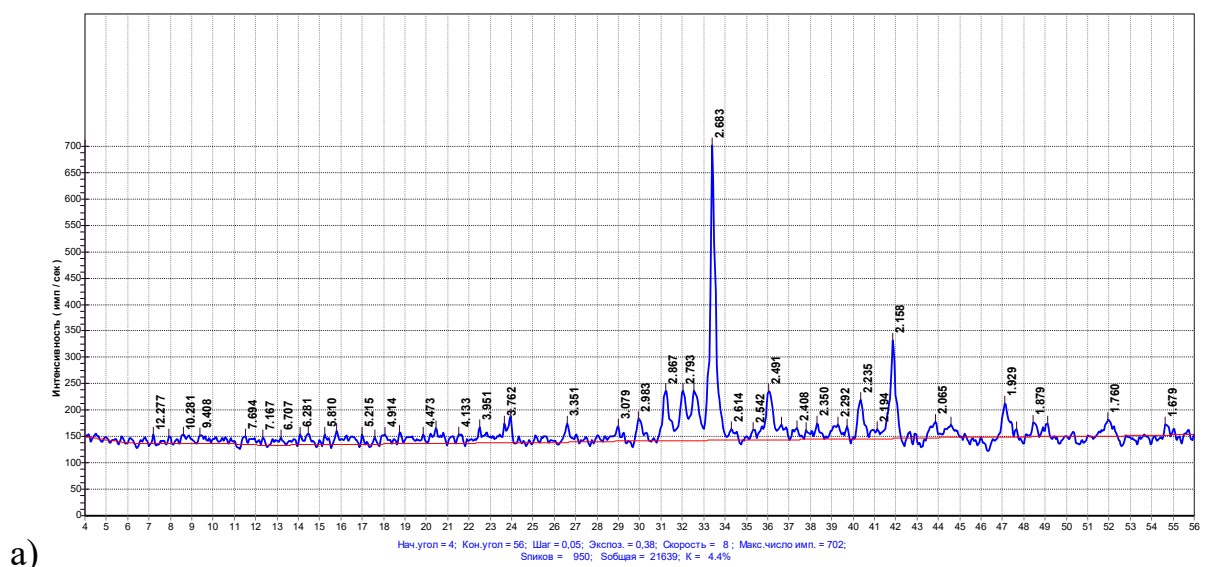


Рисунок 4.3 – РФА стабилизированного шлака при использовании:

а) феррохромовой руды; б) содощелочного плава; в) пыли ДСП

Таким образом, анализ зависимости выхода стабилизированного шлака, его структурных особенностей и фазового состава в присутствии различных стабилизаторов показал, что наиболее эффективным стабилизатором является пыль ДСП. Ее использование в количестве 5 % позволяет получать в лабораторных условиях полностью стабилизированную фракцию шлака с минимальной пористостью и водонасыщением, а также наиболее высокой маркой по морозостойкости. В этой связи дальнейший анализ свойств и структурных особенностей распределения элементов в структуре образцов стабилизированного шлака, напрямую влияющих на количественный выход материала и его структурные особенности, полученного как в лабораторных, так и в условиях реального производства, производился с использованием наиболее эффективного стабилизатора – пыли ДСП.

4.2 Особенности введения стабилизатора в шлаковый расплав

При проведении лабораторных исследований, для установления влияния компонентов стабилизатора на стабильность шлаковой системы, стабилизаторы равномерно перемешивались с исходным шлаком, после этого производился нагрев полученной смеси. Для установления возможности масштабирования эксперимента в промышленных условиях навеску вводили в расплав шлака в виде бумажного конверта (для имитации бумажного мешка), закрепленного на конце 1,5 метрового стержня. Так же стабилизатор вводили на дно тигля, обеспечивая слив раскаленного шлака в тигель со стабилизатором.

Проведенный эксперимент выявил следующие технологические проблемы: так как пыль ДСП представляет тонкодисперсный порошок с большой удельной поверхностью, при размещении стабилизатора на дне тигля, и последующего слива в него раскаленного шлака, стабилизатор частично всплывал на поверхности шлака, а некоторое количество частиц пыли улетучивалось в воздух. Таким образом, большая часть пыли не участвовала в процессе стабилизации шлака. Такое поведение стабилизатора в условиях цеха недопустимо и опасно. Введение стабилизатора, помещенного в бумажный пакет, с такой высокой дисперсностью, мо-

жет привести к резкому выбросу ее на поверхность и изливу шлака, что в условиях металлургического предприятия небезопасно. Для проработки безопасных способов введения стабилизатора, представляющего из себя тонкодисперсную пыль, были предложены два способа гранулирования.

Для проработки способов гранулирования отходов металлургического производства в виде пыли газоочистки дуговых сталеплавильных печей было рассмотрено два способа [159]: 1) с применением тарельчатого гранулятора; 2) с применением шнекового гранулятора. Целью окускования являлось получение сферических гранул размером до 20 мм из пыли газоочистки ДСП. Выбор размера гранул обусловлен технологичностью их получения и дальнейшего ввода.

При использовании *тарельчатого гранулятора* в качестве связующей жидкости применяли воду с получением мелкодисперсного распыла через форсунки пневматического распылителя. В лабораторный тарельчатый гранулятор (диаметр тарели 500 мм, высота борта тарели 300 мм) загружали небольшое количество (300 г) пыли газоочистки ДСП. На подвижный слой материала через форсунку пневматического распылителя вводили связующее (воду). После образования зародышей в виде гранул размером 1–2 мм на влажный подвижный слой материала добавляли пыль, что приводило к увеличению размера гранул. После прекращения увеличения размера гранул вводили связующую жидкость для увлажнения слоя и далее вновь добавляли порошок для продолжения увеличения размера гранул. Многократно повторяя эти операции, получали гранулы необходимого размера, которые переваливались через борт тарели в приемную емкость. Полученные гранулы сушили в сушильном шкафу при температуре 105 °С в течение 24 часов. Влажность определяли путем сушки до постоянной массы. Проведенный эксперимент дал возможность оценить трудоемкость рассматриваемого способа.

Полученные гранулы (рисунок 4.4, а) имели приближенную к сферической форму, при этом количество воды составило 9–12 % от массы пыли. Высокое содержание СаО (10–12 %) быстро связывает в мелкодисперсном продукте свободную воду, что приводит к образованию мелких гранул размером 2–5 мм, которые

составляют 80 % от общего количества гранул. Крупные гранулы размером 15–20 мм образуются в результате сцепления между собой мелких гранул и представляют собой шарообразные конгломераты. Гранулы размером 2–5 мм являются оптимальными для дальнейшего применения, так как являются наиболее прочными и лучше распределяются в объеме шлака. Количество связующей жидкости, а также другие режимные параметры процесса гранулирования существенно не повлияли ни на структуру, ни на прочность гранул. Влажность полученных гранул 6–8 %. После испытания на прочность путем сбрасывания гранул 90–95% из них сохранили свою форму и размер. При этом отмечается, что разлом гранулы в процессе испытаний на прочность происходит по границам друз. Это позволяет транспортировать гранулы непосредственно после грануляции в сушилку для обезвоживания. Насыпная плотность высушенных гранул составила 1440 кг/м³. Установка пневматического распылителя непосредственно над тарелью и тонкодисперсный распыл позволяет снизить поднятие пыли во время дозирования мелкодисперсного материала. Скорость грануляции составила 40 кг/ч.

Применение лабораторного *шнекового гранулятора* с получением цилиндрических гранул позволил выявить некоторые существенные отличия. Для эксперимента применялся шнек диаметром 60 мм с шагом 40 мм в зоне формирования гранул через плоскую фильеру (толщина – 3 мм, 54 отверстий диаметром 3 мм) с частотой вращения шнека 30 об/мин. Качество полученных гранул (состояние боковой поверхности гранулы, равномерность истечения жгута из отверстий фильеры) определяли визуально (рисунок 4.4, б). При влажности 16–18 % наблюдалось равномерное истечение жгутов из фильеры, когда достигалась гладкая боковая поверхность жгутов. Увеличение влажности приводило к слипанию жгутов и отделению воды. При снижении влажности наблюдался нагрев фильеры и заклинивание шнека за счет значительное выделение тепла при гидратации свободной извести, входящей в состав пыли, а также налипания и твердение массы на шнеке и внутренних стенках гранулятора. Значительный нагрев фильеры и стенок гранулятора, что приводило к заклиниванию шнека наблюдался в результате грануляции оптимального состава массой более 10 кг.

После испытания на прочность путем сбрасывания 93 % гранул сохранили свою форму и размер. Это позволяет транспортировать гранулы непосредственно после грануляции в сушилку для обезвоживания. Насыпная плотность высушенных гранул составила 1620 кг/м^3 . Скорость грануляции составила 15 кг/ч .

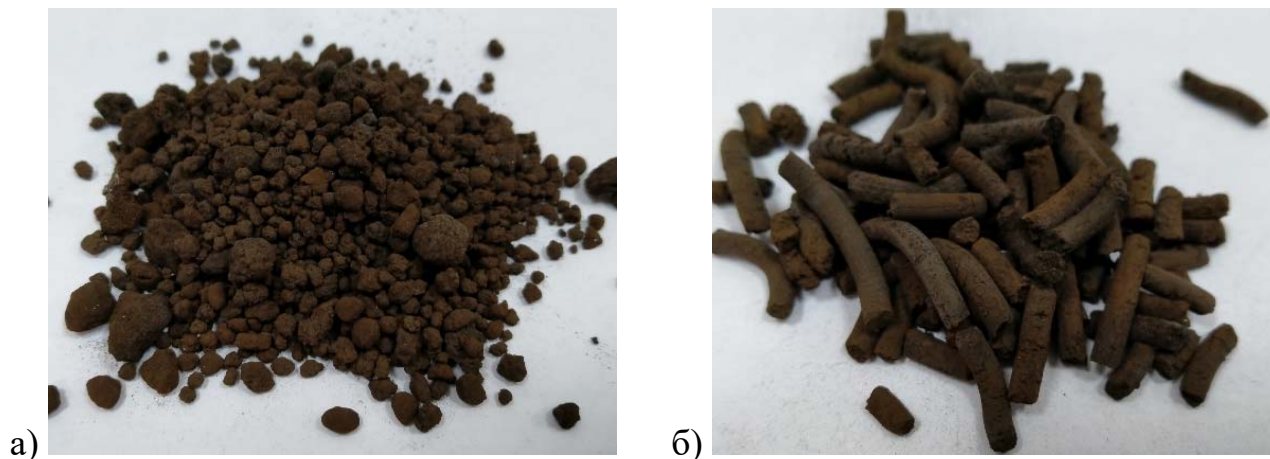


Рисунок 4.4 – Гранулы, полученные с применением:

а) гранулятора тарельчатого типа; б) гранулятора шнекового типа.

Таким образом, благодаря грануляции можно получить стабильный материал, который требует меньших площадей для хранения: насыпная плотность увеличивается с 670 кг/м^3 до 1440 кг/м^3 и 1620 кг/м^3 для гранулятора тарельчатого и шнекового типа, соответственно. Применение в качестве жидкофазного связующего технической воды достаточно для получения гранул с прочностью необходимой для транспортировки в сушильный агрегат. Плотность цилиндрических гранул выше плотности гранул полученных окатыванием, это объясняется возникновением компрессии в рабочей зоне формирования матрицы фильеры. Получение цилиндрических гранул в больших объемах проблематично, тепловыделение при гидратации свободного CaO , входящего в состав пыли, и перемешивание массы приводит к заклиниванию шнека и закупориванию фильеры. Рациональной является схема с использованием гранулятора тарельчатого типа. Скорость грануляции в нем в 2,7 раза выше, по сравнению со шнековым. Это связано со временем необходимым для предварительного доведения до оптимального состава (воды/твердая фаза) для шнекового гранулятора.

4.3 Стабилизация шлакового расплава с применением гранулированной пыли ДСП в лабораторных условиях

В результате достижения воспроизводимости эксперимента осуществлялось введение стабилизатора в виде гранулированной пыли ДСП в лабораторных условиях с применением концентраций, обеспечивающих максимальный выход стабилизированного материала – 2–5 % от массы шлакового расплава [114, 138].

На рисунке 4.5 и 4.6 представлена микроструктура шлифов стабилизированного шлака. Петрографические исследования образцов показали, что шлак имеет плотно-пористое строение округлых пор до видимых глазом пузырей различной формы.

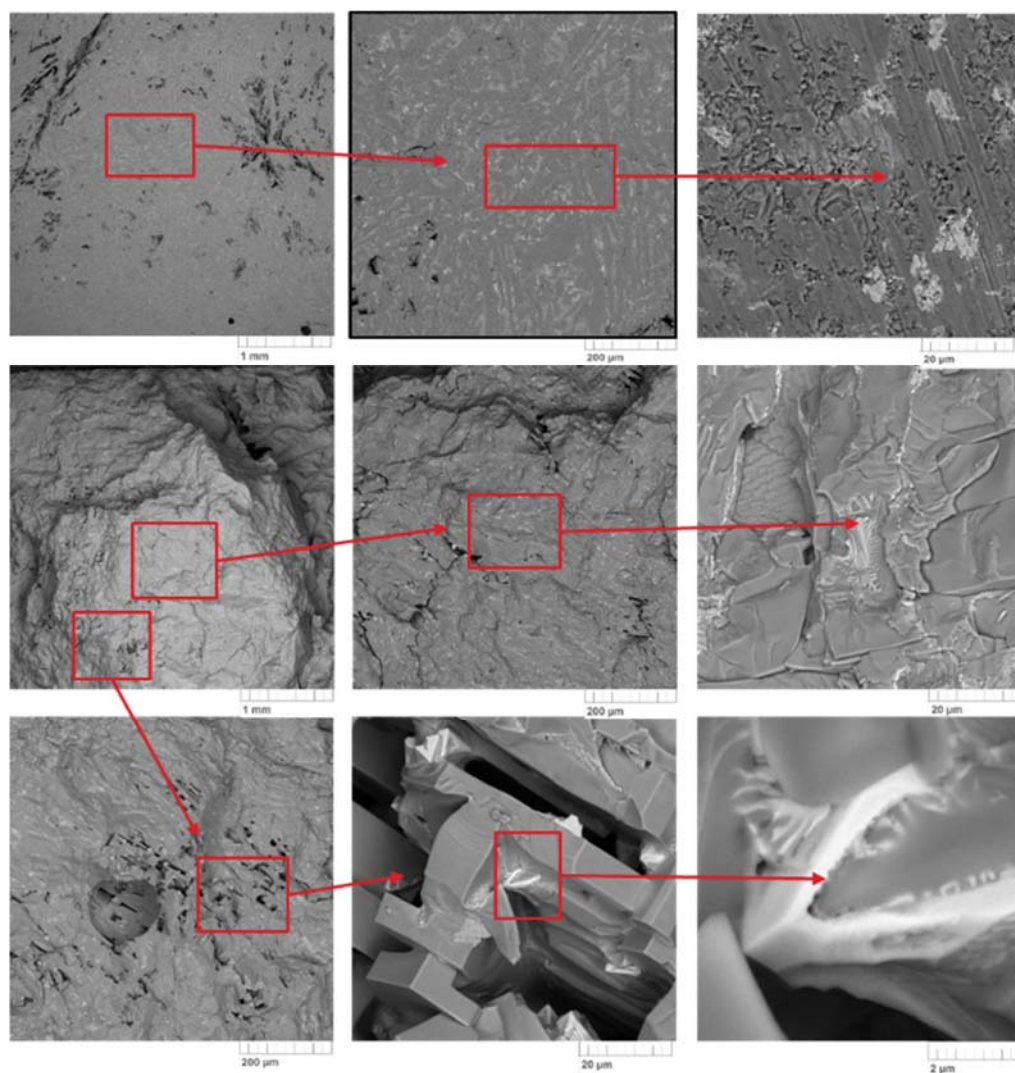


Рисунок 4.5 – Микрофотографии шлифов и сколов шлака, стабилизированного с применением 2 % пыли ДСП

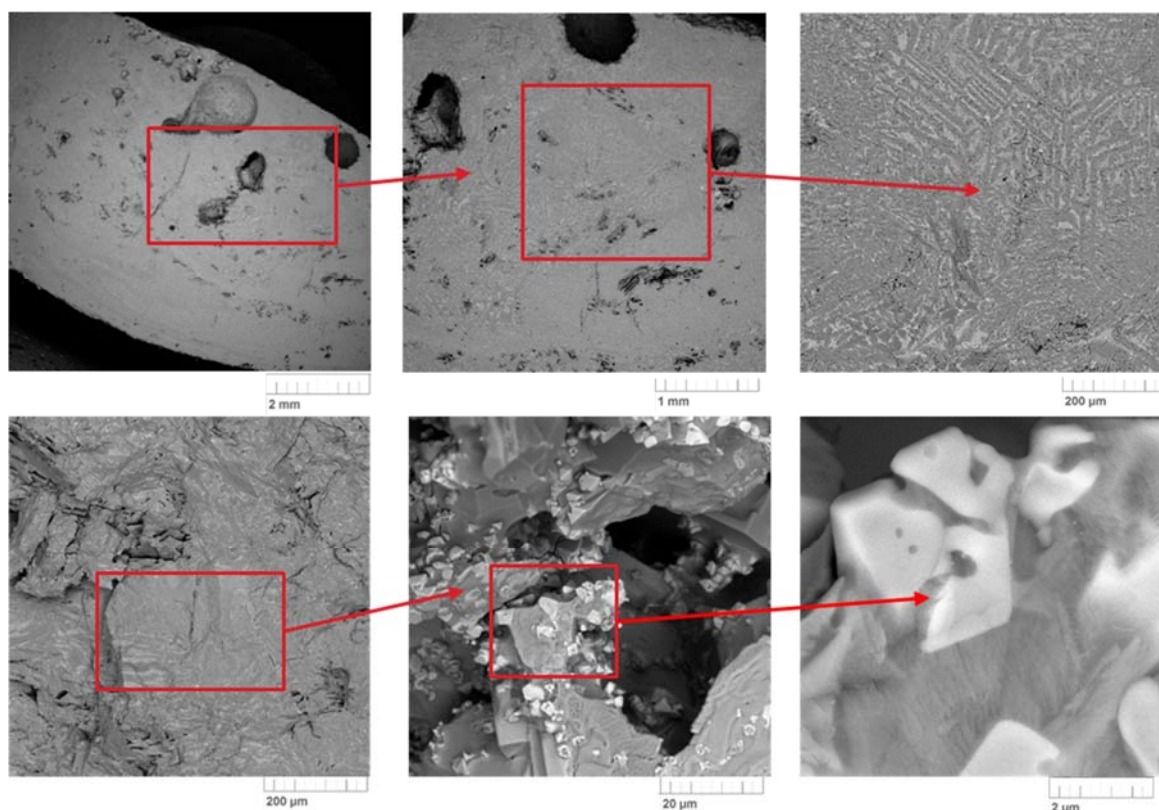


Рисунок 4.6 – Микрофотографии шлифов и сколов шлака, стабилизированного с применением 5 % пыли ДСП

Микроструктура шлака напоминает порфировидное строение: относительно идиоморфные более крупные кристаллы минералов погружены в менее раскристаллизованную, скрытокристаллическую массу этих же минералов. В отдельных шлифах наблюдалась определенная ориентировка кристаллов, хотя преобладают разноориентированные тесно переплетающиеся и, сменяющие друг друга, индивиды и агрегаты.

В микроструктуре стабилизированных образцов отчетливо видны две фазы: кремний содержащие кристаллы белита (матрица) с включениями ферритов кальция ($2\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$). Ферриты кальция формируют трехмерную сетку в матрице равномерно распределяясь по всему объему образца. Трехмерная сетка в шлаке с 2 % стабилизатора образована тонкими пленками. Увеличение стабилизатора до 5 % приводит к формированию дисперсных частиц феррита кальция с большей объемной долей и более равномерным распределением в объеме матрицы.

При рассмотрении карт энергодисперсионного анализа лабораторного об-

разца стабилизированного шлака с использованием 2 % пыли ДСП (95 % выхода стабилизированной фракции шлака) в отличие от исходного образца (рисунок 3.13, глава 3) ярко выражены не отдельные частицы, а сетка дендритов (рисунок 4.7) и наличие протяжённых кристаллов. При этом объемная доля сетки из железистых компонентов и двухкальциевого силиката примерно равны.

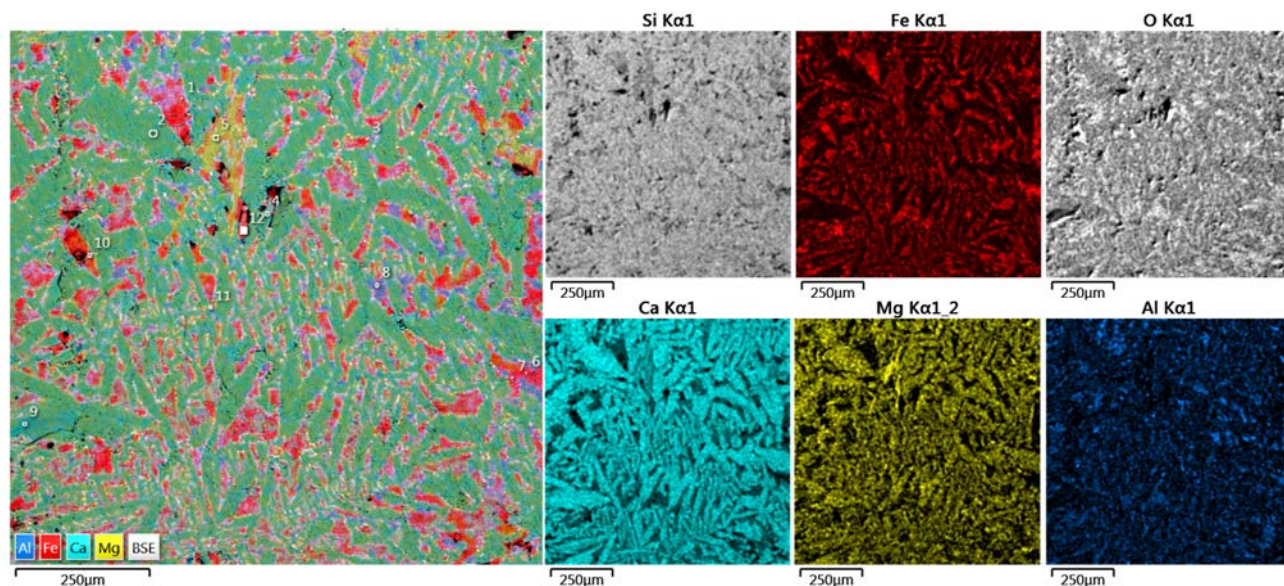


Рисунок 4.7 – Многослойная карта ЭДС анализа шлака после введения 2 % стабилизатора в лабораторных условиях

С увеличением концентрации стабилизатора до 5 % (экстремальное значение выхода стабилизированной фракции шлака) сетка становится гуще (рисунок 4.8). Также видно, что при использовании 5 % стабилизатора объемная доля фазы с содержанием железа намного выше, чем при использовании 2 % пыли ДСП. В результате фазовых превращений в процессе стабилизации под воздействием компонентов в составе пыли ДСП образуется сложная пространственная конфигурация, где оксиды магния находятся на границе железистой и силикатной фаз. Также фиксируются области, в которых отмечается четкое разделение железа и кальция, и области, где эти границы отсутствуют.

По данным рентгенофазового анализа (рисунок 4.9), в составе стабилизированных шлаков ОЭМК основными фазами после стабилизации являются: окерманит $\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2$ ($d(A) = 1,758; 2,036; 2,463; 2,861; 3,077; 3,709; 5,507$), $2\text{CaO} \cdot$

$\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ ($d(A) = 1,611; 1,673; 1,956; 2,462; 2,697; 3,015; 4,264$), магнезиоферрит $\text{MgO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ($d(A) = 1,235; 1,291; 1,513; 2,140; 2,471$).

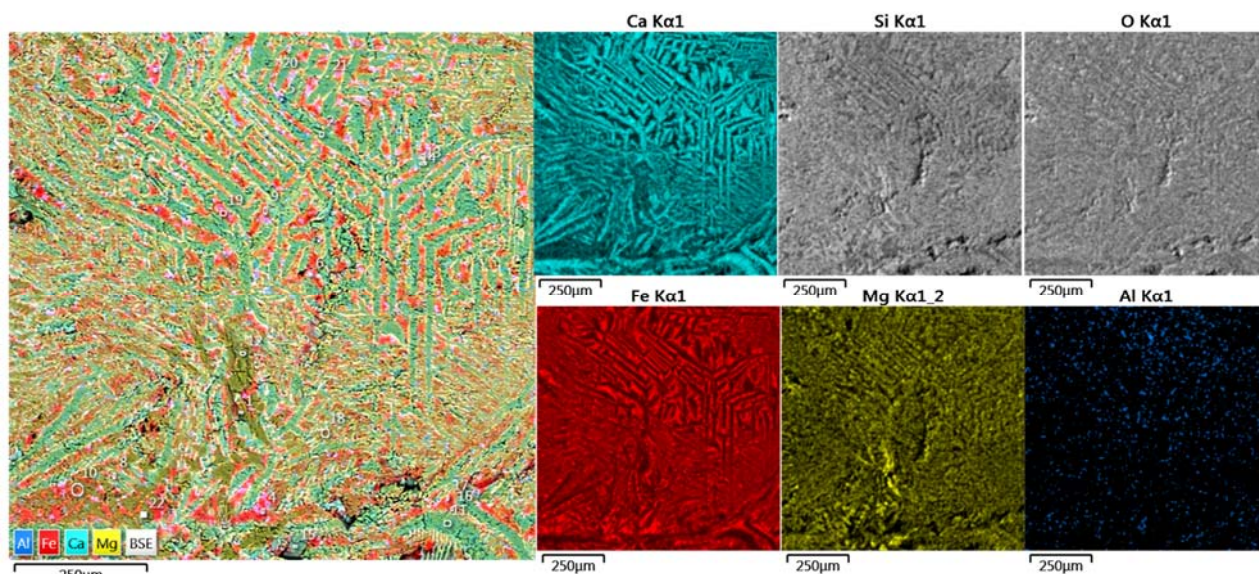


Рисунок 4.8 – Многослойная карта ЭДС анализа шлака после введения 5 % стабилизатора в лабораторных условиях.

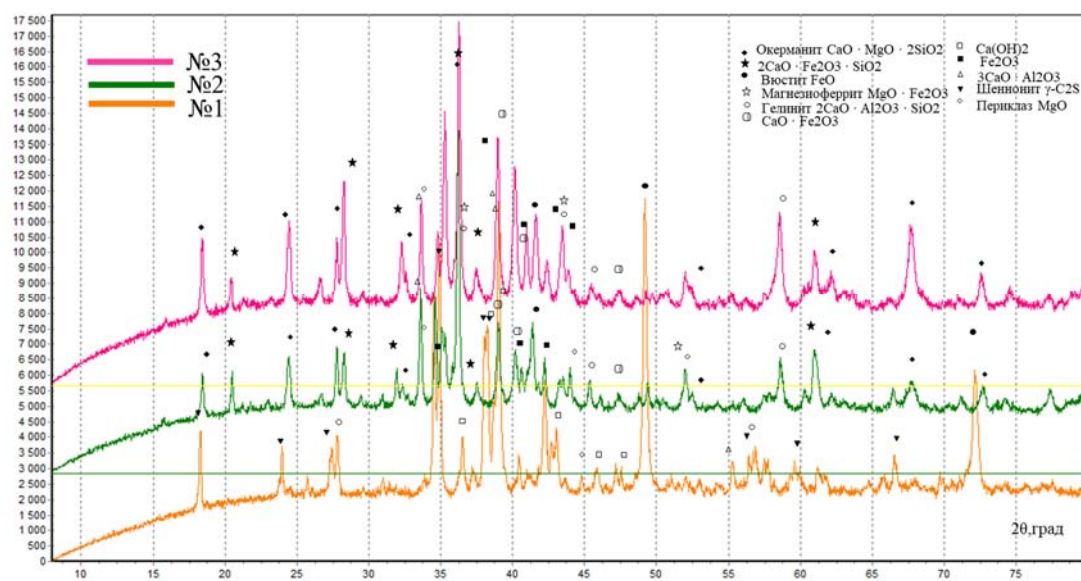


Рисунок 4.9 – Сравнительный рентгенофазовый анализ шлака:

№ 1 – распавшийся шлак; № 2 – стабилизированный шлак с использованием 2 % пыли ДСП; № 3 – стабилизированный шлак с использованием 5% пыли ДСП

Присутствуют MgO ($d(A) = 2,43; 2,108; 1,49$), вюстит FeO ($d(A) = 2,468; 2,141; 1,492$), $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ($d(A) = 4,004; 2,78; 1,910; 1,566$), $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ ($d(A) =$

2,02, 2,46), геленита $2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ ($d(A) = 3,71; 3,06; 2,85; 2,436$), $\text{CaO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ ($d(A) = 2,69; 2,67; 2,238; 1,838; 1,832$), Fe_2O_3 ($d(A) = 2,536; 1,626; 1,484$).

Все кремнекислородные соединения имеют две области сильного поглощения: $1250\text{--}830\text{ см}^{-1}$ и $500\text{--}400\text{ см}^{-1}$ (рисунок 4.10). Кремнекислородные группы расположены в соответствии с возрастающим отношением $\text{Si}:\text{O}$. В то время как интервал длин волн уменьшается, область сильного поглощения принимает более короткие волны. В спектре были обнаружены две основные области поглощения $1000\text{--}800\text{ см}^{-1}$, которые характеризуют структуру оливина (монтичеллита), а также три полосы, две из которых были интенсивными и широкими, расположенные в области $1000\text{--}850\text{ см}^{-1}$, разделенные интервалами $80\text{--}100\text{ см}^{-1}$.

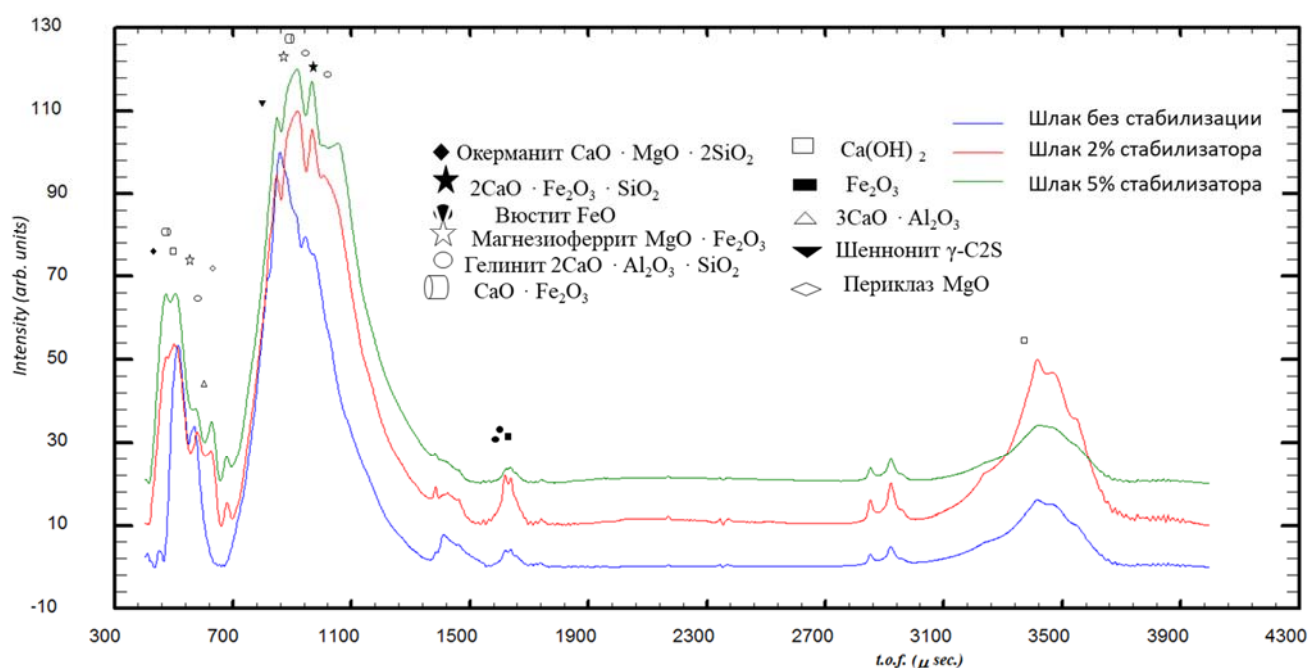


Рисунок 4.10 – ИК-спектральный анализ шлака

Три полосы поглощения средней интенсивности в области $650\text{--}450\text{ см}^{-1}$, относящихся к группе SiO_4 . В области $450\text{--}280\text{ см}^{-1}$ обнаруживаются полосы октаэдра XO_6 (где X – Mg, Na, Ca и др.) Основные причины мультиплетности полосы SiO_4 является снятие вырождения при более низкой симметрии группы SiO_4 в решетке и резонансные взаимодействия между трансляционно неэквивалентными тетраэдрами. Величина расщепления возрастает при частично ковалентном характере связей сложного аниона с катионами. Ортосиликат кальция

C_2S обнаруживает интенсивные полосы валентных колебаний Si-O в интервале частот $1000\text{--}800\text{ см}^{-1}$, далее вблизи 500 см^{-1} – колебание, связанное с внутренними деформационными колебаниями сложного аниона. В силу понижения симметрии тетраэдра в области $933\text{--}983\text{ см}^{-1}$ обнаруживается не менее трех полос. Наблюдается также расщепление трижды вырожденного деформационного колебания SiO_4 . Полосы валентных OH^- колебаний, относящихся к структурным гидроксильным группам, обнаруживаются в области $3750\text{--}3200\text{ см}^{-1}$. Участие гидроксильной группы в водородной связи приводит к понижению частоты валентных OH^- колебаний. Замещение октаэдрического алюминия железом проявляется в смещении полос OH^- групп к более низким частотам $2800\text{--}3000\text{ см}^{-1}$. В области $3675\text{--}3025\text{ см}^{-1}$ соответствует гидроксильным группам координированным с $2\text{Mg}\cdot\text{Fe}^{2+}$ (3660 см^{-1}), Mg и 2Fe^{2+} (3648 см^{-1}) и 3Fe^{2+} (3625 см^{-1}). Полосы поглощения 410, 520 и 920 характерны для ларнита. Интенсивные полосы поглощения в области $1300\text{--}1600\text{ см}^{-1}$ может принадлежать RO -фазе.

В лабораторных условиях были определены основные физико-механические характеристики стабилизированного шлака (таблица 4.1–4.2).

Таблица 4.1 – Физико-механические свойства каменного материала пробы СШ

Фракция, мм	Потеря массы при испытании на прочность, %		Марка по прочности	Потеря массы при испытании на прочность, %		Марка по истираемости
	Факт. значения	Норма по ГОСТ 3344		Факт. значения	Норма по ГОСТ 3344	
5–10	13,75	до 15	1200	25,18	25–35	ИШ

Все физико-механические показатели определялись для фракции 5–10 мм, выбранная фракция обуславливается тем, что стабилизированный шлак фракции крупнее 20 мм составил 56 %, и для проведения физико-механических испытаний требуется наименьший объем материала.

Весь полученный материал дополнительно дробился и объединялся в фракцию 5–10 мм. По результатам лабораторных испытаний проб (таблица 4.1–4.2)

стабилизированный шлак соответствует марке по прочности в водонасыщенном состоянии М1200, марке по истираемости в полочном барабане ИП, марке по морозостойкости F50 и устойчивости структуры УС1.

Таблица 4.2 – Физико-механические свойства каменного материала СШ 5–10

R _{сж} , МПа (актив- ность)	Потеря массы при испытании на морозостойкость, %		Марка по моро- зостойкости	Устойчивость щебня против распада, %		Устойчивость структуры
	Факт. значения	Норма по ГОСТ 3344, не более		Факт. значения	Норма по ГОСТ 3344	
0,17 (НА)	4,16	5	F 50	0,13	до 3	УС1

Исследования показали, что равномерное распределение стабилизатора в объеме обрабатываемого шлакового расплава ДСП обеспечивает стабилизацию высокотемпературных форм двухкальциевого силиката, исключая силикатный распад в процессе и после его охлаждения. Введение 5 % стабилизатора в шлаковый расплав является оптимальным. Стабилизацию шлака обеспечивают ферриты кальция, формирующиеся при использовании стабилизирующего вещества близкого по составу с обрабатываемым шлаком. Полученный каменный материала по своим физико-механическим свойствам можно классифицировать как щебень, который можно применять при строительстве и реконструкции автомобильных дорог в качестве оснований. Стабилизация шлакового расплава обеспечит исключение образования тонкодисперсной пыли γ -распада двухкальциевого силиката, что приведет к снижению негативного воздействия продуктов распада на окружающую среду.

4.4 Анализ свойств шлака, полученного в результате масштабирования технологии стабилизации с применением гранулированной пыли ДСП в условиях реального производства

С учетом экспериментального подтверждения целесообразности и эффективности использования гранулированной пыли ДСП с целью кристаллохимиче-

ской стабилизации в лабораторных условиях была произведена апробация технологии стабилизации в условиях цеха [50]. Гранулы стабилизатора вводились в мешках в шлаковую чашу в один или два приема. Объем введения добавки рассчитывается в зависимости от массы шлака в производимой выплавке.

Наличие в составе гранулированной пыли ДСП оксидов кальция, калия, натрия, марганца, помимо трехвалентного оксида железа способствует равномерному распределению оксида железа в объеме обрабатываемого шлака. Смешиваясь со шлаковым расплавом, частицы гранулированной пыли ДСП нагреваются. Температура ее плавления составляет 1250–1270 °С, при этом температура шлака во время слива составляет 1400–1420 °С, благодаря этому происходит полное расплавление и распределение стабилизатора в шлаковом объеме.

Последующие сливы шлака после первоначального введения стабилизатора обеспечивают дополнительное перемешивание стабилизатора и образование твердых растворов с высокотемпературными формами двухкальциевого силиката. При этом в структуре двухкальциевого силиката ($2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$) происходит частичная замена ионов SiO_2 на ионы Fe_2O_3 с образованием ферритов кальция ($2\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$). Твердый раствор оксида железа в высокотемпературных формах двухкальциевого силиката не претерпевает полиморфных превращений кристаллической решетки, и шлак приобретает устойчивую против распада структуру.

Шлак, обработанный таким образом, устойчив к распаду не только в процессе охлаждения, но и при последующем длительном хранении и использовании.

Промышленная апробация изложенного способа стабилизации осуществлялась при выплавке стали (рисунок 4.11) в электросталеплавильном цехе ОЭМК им. А.А. Угарова.

В результате введение стабилизатора осуществлялось в шлаковой чаше в 3 этапа в количестве 2 % от массы шлака во время слива в полиэтиленовых мешках массой 30 кг (рисунок 4.11, а).

Первое введение стабилизатора производилось после заполнения расплавом 1/3 объема шлаковой чаши, что значительно снижает количество включений металла, находящегося на дне чаши, в структуру шлака в процессе его стабилиза-

ции. При этом снижение температуры шлакового расплава во временной отрезок его слива, обусловленное разогревом стенок шлаковой чаши и определило минимально требуемую концентрацию вводимого стабилизатора.



Рисунок 4.11 – Промышленная апробация технологии стабилизации в условиях цеха: а) введение стабилизатора в шлаковый ковш во время слива; б) слив стабилизированного шлака в шлаковую траншею; в) охлаждение стабилизированного шлака в шлаковой траншее; г) стабилизированный шлак после охлаждения; д) дробильно-сортировочная установка; е) стабилизированный шлак после магнитной сепарации и сортировки

Введение стабилизатора во второй временной отрезок слива, обеспечило полную стабилизацию шлака в объеме слива. Слив из шлаковой чаши (рисунок

4.11, б) с этой плавки кантовался на специальной площадке (рисунок 4.11, в). После остывания шлака производился его визуальный осмотр (рисунок 4.11, г). После охлаждения шлаковая смесь была пропущена через дробильно-сортировочный комплекс (рисунок 4.11, д). Кусковой стабилизированный шлак (рисунок 4.11, е) был испытан по стандартным методикам.

После прохождения стабилизированного шлака, полученного в промышленных условиях в виде монолитного (кусового) материала, через дробильно-сортировочную установку и осуществления его магнитной сепарации был получен каменный материал с размером фракции более 20 мм – 58,69 %.

На основании анализа химического состава шлака до и после стабилизации (таблица 4.3) установлено, что существенных колебаний не отмечается.

Таблица 4.3 – Химический состав представительных проб шлака до и после стабилизации

Наименование	Содержание оксидов, %												
	CaO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	Al ₂ O ₃	MnO	Cr ₂ O ₃	P ₂ O ₅	TiO ₂	SO ₃	SrO	K ₂ O	Na ₂ O
Отвальный шлак	40,49	28,66	17,15	7,71	3,73	1,10	0,32	0,20	0,12	0,12	0,08	0,07	0,06
Стабилизированный шлак	37,59	29,80	18,09	10,52	2,23	0,78	0,22	0,08	0,14	0,05	0,08	0,08	0,22

Следовательно, ионы стабилизатора при взаимодействии с расплавом и в результате его остывания встроились в кристаллическую решетку шлака, как это предполагает кристаллохимическая стабилизация, не изменяя состав исходного сырья.

При этом, существуют некоторые отличия в фазовом составе (рисунок 4.12) между стабилизированным и отвальным шлаком, что связано с перекристаллизацией шлака путем введения стабилизатора. Так по данным рентгенофазового анализа (рисунок 4.12), в составе шлаков ОЭМК основной фазой до стабилизации яв-

ляется γ - $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ($d(A) = 1,637; 1,800; 1,91; 2,745; 3,01; 3,834; 4,311$), присутствуют: MgO ($d(A) = 2,43; 2,108; 1,49$), Ca(OH)_2 ($d(A) = 2,68; 1,933; 1,704; 1,482; 1,450$), $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ($d(A) = 4,004; 2,78; 1,910; 1,566$), $\text{MgO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ($d(A) = 2,02, 2,46$), геленита $2\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$ ($d(A) = 3,71; 3,06; 2,85; 2,436$). Одной из важнейших отличительных особенностей шлаков ОЭМК, является значительное содержание железосодержащих фаз – $\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ ($d(A) = 2,69; 2,67; 2,238; 1,838; 1,832$), $\text{CaO}\cdot 2\text{FeO}$ ($d(A) = 2,585; 2,233; 1,59$), вюстит FeO ($d(A) = 2,468; 2,141; 1,492$), Fe_2O_3 ($d(A) = 2,536; 1,626; 1,484$). В ряде проб шлаков присутствуют кальциймагниево-силикатов типа мервинита ($d(A) = 2,84; 2,68; 2,41; 2,30; 2,20; 2,16; 1,88; 1,53$).

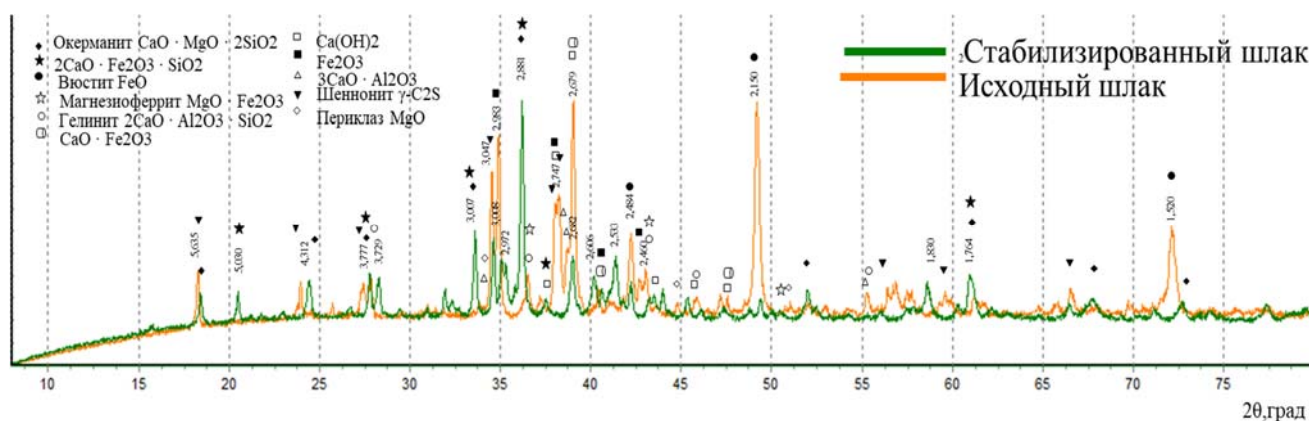


Рисунок 4.12 – Рентгенофазовый анализ электросталеплавильного шлака

Основными фазами после стабилизации являются: окерманит $\text{CaO}\cdot\text{MgO}\cdot 2\text{SiO}_2$ ($d(A) = 1,758; 2,036; 2,463; 2,861; 3,077; 3,709; 5,507$), $2\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$ ($d(A) = 1,611; 1,673; 1,956; 2,462; 2,697; 3,015; 4,264$), магнезиоферрит $\text{MgO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ ($d(A) = 1,235; 1,291; 1,513; 2,140; 2,471$); присутствуют MgO ($d(A) = 2,43; 2,108; 1,49$), вюстит FeO ($d(A) = 2,468; 2,141; 1,492$), $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ($d(A) = 4,004; 2,78; 1,910; 1,566$), $\text{MgO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ($d(A) = 2,02, 2,46$), геленита $2\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$ ($d(A) = 3,71; 3,06; 2,85; 2,436$). $\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$ ($d(A) = 2,69; 2,67; 2,238; 1,838; 1,832$), Fe_2O_3 ($d(A) = 2,536; 1,626; 1,484$).

По результатам стабилизации видно, что при полной стабилизации γ - $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ исчезает за счет преобразования части $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ в $2\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$ по схеме $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow 2\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$.

Оставшийся C_2S стабилизируется в виде $\beta-C_2S$, при этом общее количество $2CaO \cdot SiO_2$ снижается с 100,0 до 55,0 масс. %, при этом оставшаяся часть $2CaO \cdot SiO_2$ полностью состоит из $\beta-2CaO \cdot SiO_2$, а содержание $2CaO \cdot Fe_2O_3 \cdot SiO_2$ повышается.

Результаты испытаний свидетельствуют о том, что при стабилизации синтезированного $2CaO \cdot SiO_2$ с помощью добавки на основе отходов металлургического производства, работают сразу два механизма стабилизации: не боратная стабилизация высокотемпературной модификации C_2S ионами щелочных металлов; химическая стабилизация за счет преобразования $2CaO \cdot SiO_2$ в более стабильные фазы, в данном случае в $2CaO \cdot Fe_2O_3 \cdot SiO_2$.

Анализ структурных особенностей шлака до стабилизации (рисунок 4.13) и после показал следующее (рисунок 4.14).

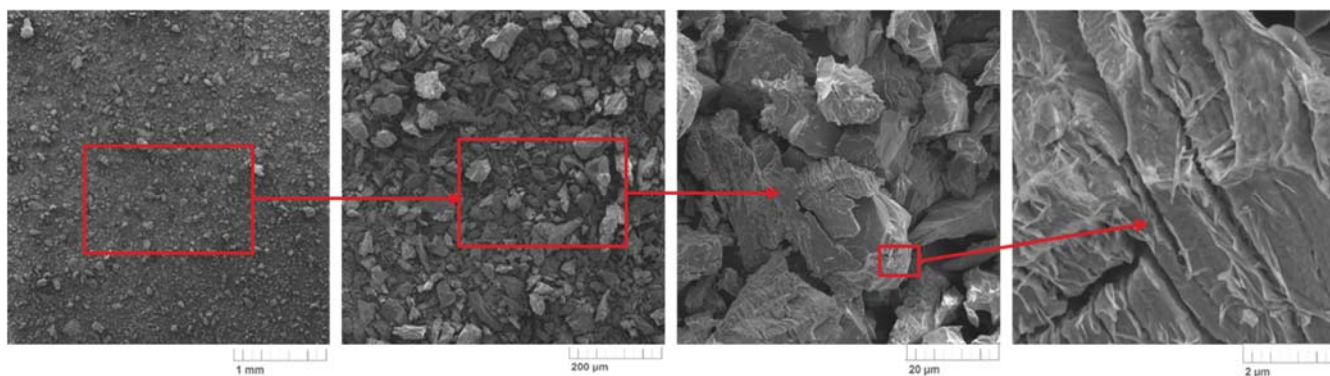


Рисунок 4.13 – Микрофотографии исходного шлака после распада

В исходном состоянии кристаллическая структура шлака имеет неоднородное, зональное строение, обусловленное закономерным распределением примесей и включений (рисунок 4.13). Отдельные поликристаллы монтichelлита в виде зерен растут свободно до соприкосновения друг с другом. Толщина этих кристаллов не превышает 400 нм. Магнезиоферрит представлен изометричными округлыми кристаллами, образующими плотные агрегаты. На микрофотографии шлака четко фиксируются кристаллы мервинита, имеющие округлую форму, кристаллы ларнита похожи на кристаллы мервинита.

В микроструктуре стабилизированных образцов (рисунок 4.14) выделяются

две фазы: кремнийсодержащие кристаллы белита – матрица с включениями ферритов кальция ($2\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$); ферриты кальция формируют трехмерную сетку в матрице, равномерно распределяясь по всему объему образца. Стабилизированный шлак не обладает активностью, поэтому полученные высокие прочностные и деформативные характеристики обеспечиваются сразу после стабилизации и не меняются с течением времени, в отличие от отвального шлака.

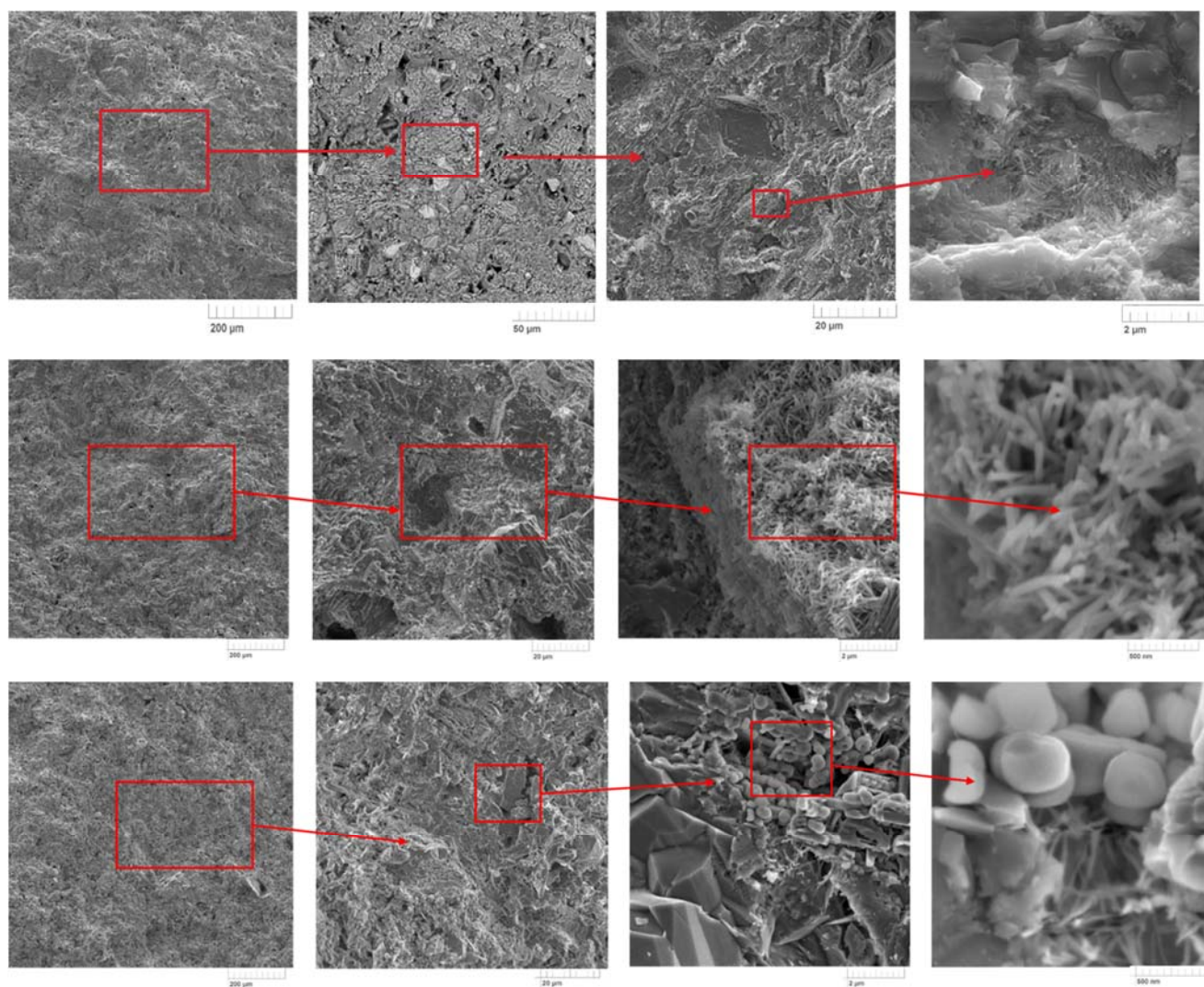


Рисунок 4.14 – Микрофотографии шлака после стабилизации

Изучение карт энергодисперсионного анализа при использовании минимальной концентрации стабилизатора – пыли ДСП – в количестве 2 % в условиях реального производства (рисунок 4.15), при которой обеспечивается высокий процент выхода стабильной фракции в лабораторных условиях, показал, что в результате формируется материал с достаточно однородной структурой и фазовым

составом. Однако, имеются некоторые различия в формировании структуры между образцами, полученными в лабораторных и промышленных условиях, что, прежде всего, обусловлено отличительными особенностями процесса стабилизации.

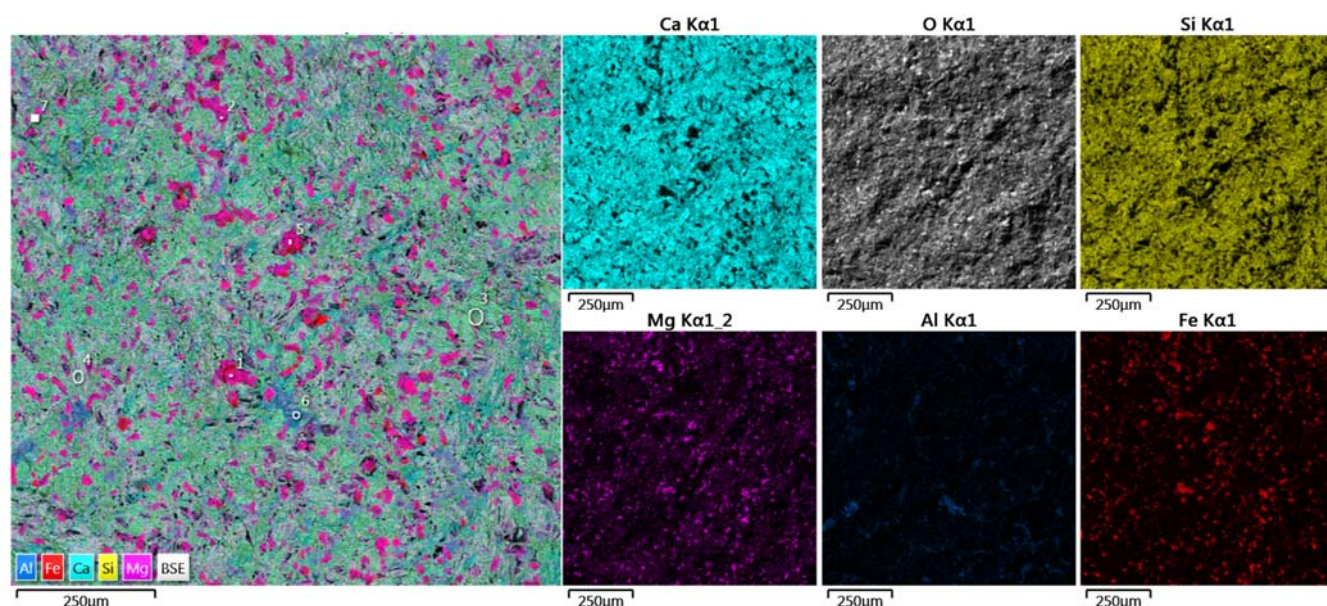


Рисунок 4.15 – Многослойная карта ЭДС анализа шлака после введения 2 % стабилизатора в заводских условиях

Прежде всего, следует отметить, что в результате стабилизации получен материал со сплошной объемной структурой, матрица которого в основном представлена оксидами кремния и кальция. Присутствуют отдельные включения железа и магния, при этом отмечены следы алюминия по железу, что может свидетельствует о сложном фазовом составе. Также присутствуют отдельные включения алюминия. Таким образом, карта имеет вид иерархической структуры, где металлические элементы равномерно распределены в кальциево-кремниевой матрице. Отмечается так же наличие зародышей дендритов или кристаллов продолговатой и вытянутой формы, но их размер существенно отличается от полученных в лабораторных условиях [138].

На основании проведенного анализа состава и структурных особенностей установлено, что в результате кристаллохимической стабилизации шлака с использованием гранулированной пыли ДСП в количестве 2 % в условиях реально-

го производства на предприятии АО «ОЭМК им. А.А. Угарова» состав конечного материала не претерпевает существенных изменений в химическом составе. Однако, следует отметить изменения в фазовом составе, которые свидетельствуют об эффективности применяемого стабилизатора. Кроме того, в результате масштабирования технологии стабилизации получен материал с менее дефектной структурой по сравнению с лабораторными образцами.

4.5 Анализ физико-механических свойств стабилизированного шлака

Определение физико-механических характеристик полученного конечного материала является важнейшим этапом исследования, позволяющим установить возможность его применения в дорожном строительстве и определить его функциональное назначение. Испытания шлакового щебня как каменного материала для дорожного строительства проводили с использованием ГОСТ 3344–83, а также ГОСТ 8269.0–97 [165]. Это обусловлено областью применения полученного стабилизированного шлака и широкого распространения материала внутри страны.

Анализ физико-механических характеристик отвального и стабилизированного шлакового щебня показал следующее (таблица 4.4). Насыпная плотность щебеночных смесей отвального шлака 0–20 и 20–60 мм составляют 1310 и 1384 кг/м³ соответственно. Этот показатель колеблется в зависимости от зернового состава смесей, и, чем крупнее зерна каменного материала, тем ниже значение насыпной плотности. Насыпная плотность щебня из стабилизированного шлака находится в том же диапазоне значений, что свидетельствует о характерной для шлака плотности упаковки зерен материала.

Определение активности (таблица 4.4) шлаков по значению предела прочности образцов-цилиндров, изготовленных из шлакового теста максимальной плотности (2330 кг/м³) при подобранном количестве воды (влажность – 13 %) показало, что к активным относятся все пробы отвального шлака. Стабилизированный шлак характеризуется низкой прочностью при сжатии, что свидетельствует

об отсутствии активности. Высокие прочностные и деформативные характеристики стабилизированного шлака наблюдаются сразу после стабилизации и не меняются с течением времени, в отличие от отвального шлака.

Таблица 4.4 – Физико-механические свойства щебня до и после стабилизации

Проба	ρ_n , кг/м ³	$R_{сж}$, МПа	Устойчивость против распада щебня (потеря массы при испытании, %)		
			для сульфидного и железистого распада	для силикатного и известкового распада	Марка
ОШ 0–20	1384	2,7 (А)	1,44	2,53	УС 2
ОШ 20–60	1310	2,8 (А)	1,01	2,79	
ОШ 0–600	–	3,1 (А)	1,56	3,22	
СШ 0–60	1360	0,25 (НА)	0,06	0,09	УС1
Норма по ГОСТ	не норм.	<u>ОШ 2,5–5</u> СШ < 1	<u>ОШ 3–5</u> СШ < 3		

Примечание: ОШ – отвальный шлак; СШ – стабилизированный шлак.

Определение устойчивости щебня против распада (таблица 4.5) показала, что отвальные шлаки всех фракций (0–20, 20–60, 0–600 мм) имеют среднеустойчивую структуру УС2. При этом стабилизированный шлак отличается устойчивой структурой УС1.

Анализ данных таблицы 4.3 показывает, что марка по прочности отвального шлака составляет от 300 до 800 в зависимости от фракции и исходного сырья.

Средневзвешенная марка по прочности отвального шлака составляет 800. Наименьшую марку имеет щебень фракции 20–40 полученный из смеси 0–600, это объясняется тем, что в кусковом материале процесс карбонизации протекает значительно менее интенсивно, из-за меньшей площади поверхности контакта с воздухом. Марка щебня из стабилизированного шлака составляет от 1000 до 1200. Средневзвешенная марка по прочности стабилизированного шлака состав-

ляет 1200. Указанные прочностные показатели обеспечиваются сразу после охлаждения шлака. Это позволяет использовать шлак сразу после завершения технологического процесса, в связи с чем отпадает необходимость продолжительного вылеживания шлака в отвалах.

Таблица 4.5 – Определение марки шлакового щебня по прочности

Проба	Фракция, мм	Марка по прочности	Потеря массы при испытании на прочность	
			Фактические значения, %	Норма по ГОСТ 3344, %
ОШ 0–600	5–10	600	36,25	35–45
	10–20		38,32	
	20–40	300	47,99	45–55
ОШ 0–20	5–10	800	26,30	25–35
	10–20		27,52	
ОШ 20–60	20–40	800	33,80	
	40–60		34,56	
СШ	5–10	1200	13,87	до 15
	10–20		14,02	
	20–40		14,81	
	40–60	1000	15,38	15–25

Марка отвального шлакового щебня по истираемости (таблица 4.6) различных фракций не превысила IIV, в то время как марка по истираемости стабилизированного шлака III. Это позволяет сделать вывод о большей устойчивости к механическому и ударному износу структуры стабилизированного шлака.

При определении марки по морозостойкости (таблица 4.7) установлено, что пробы шлакового щебня не подверженного стабилизации не соответствуют даже минимальным требованиям для марки F15. В свою очередь, усредненная проба

стабилизированного шлака соответствует марке по морозостойкости F50.

Таблица 4.6 – Определение истираемости шлакового щебня

Проба	Фракция, мм	Марка по истираемости	Потеря массы при испытании на истираемость	
			Фактические значения, %	Норма по ГОСТ 3344, %
ОШ 0–600	5–10	ИIV	52,26	45–60
	10–20		58,22	
	20–40		58,72	
ОШ 0–20	5–10		47,22	
	10–20		52,13	
ОШ 20–60	20–40		54,27	
СШ	5–10	ИИ	25,72	25–35
	10–20		26,13	
	20–40		26,85	

Таблица 4.7 – Определение морозостойкости шлака

Проба	Фракция, мм	Потеря массы при испытании на морозостойкость		
		Норма по ГОСТ 3344, %	Фактические значения, %	Марка по морозостойкости
ОШ 0–20; 20–60; 0–600	5–10	10	34,2	—
	10–20		35,5	
	20–40		40,1	
СШ	5–10	5	4,07	F50
	10–20		4,18	
	20–40		4,31	

Удельная эффективная активность естественных радионуклидов (таблица

4.8) для фракций 0–20, 20–60 и 0–600 мм, а также стабилизированного шлака соответствует нормативным требованиям для строительства дорог и аэродромов и может применяться без ограничений.

Таблица 4.8 – Удельная эффективная активность естественных радионуклидов

Определяемые показатели	Результаты испытаний $\pm\Delta$			Норма по ГОСТ 30108–94
	ОШ 0–20; 20–60	ОШ 0–600	СШ	
Удельная активность радия-226, Бк/кг	51 ± 9	53 ± 9	45 ± 8	Не норм.
Удельная активность калия-40, Бк/кг	< 45	< 33	< 44	
Удельная активность тория-232, Бк/кг	21 ± 4	17 ± 4	17 ± 4	
Эффективная удельная активность ($A_{эфф}$) природных радионуклидов, Бк/кг	79 ± 11	75 ± 11	67 ± 10	< 740

Таким образом, анализ совокупности нормируемых параметров проб отвалного шлакового щебня и щебня из стабилизированного шлака позволил установить, что в результате стабилизации улучшаются физико-механические свойства получаемого материала. Так, кристаллохимическая стабилизация печного шлака при введении лишь 2 % гранулированной пыли ДСП во время слива позволила улучшить нормируемые показатели шлакового щебня, а именно: марку по прочности с 800 до 1200, марку по истираемости с ИIV до ИIII, устойчивость структуры с УС2 до УС1, морозостойкость до F50. Улучшенные характеристики позволяют расширить области применения шлакового щебня в дорожном строительстве. Физико-механические свойства полученного каменного материала позволяют применять его для устройства слоев оснований, а также в составе композиционных материалов для устройства покрытий в конструкциях дорожных одежд.

4.6 Выводы

1. Анализ зависимости выхода стабилизированного шлака, его структурных особенностей и фазового состава в присутствии различных стабилизаторов показал, что наиболее эффективным стабилизатором является пыль ДСП. Ее использование в количестве 5 % позволяет получать в лабораторных условиях полностью стабилизированную фракцию шлака с минимальной пористостью и водонасыщением, а также наиболее высокой маркой по морозостойкости. В этой связи дальнейший анализ свойств и структурных особенностей распределения элементов в структуре образцов стабилизированного шлака, напрямую влияющих на количественный выход материала и его структурные особенности, полученного как в лабораторных, так и в условиях реального производства, производился с использованием наиболее эффективного стабилизатора – пыли ДСП.

2. Благодаря грануляции можно получить стабильный материал, который требует меньших площадей для хранения: насыпная плотность увеличивается с 670 кг/м^3 до 1440 кг/м^3 и 1620 кг/м^3 для гранулятора тарельчатого и шнекового типа, соответственно. Применение в качестве жидкофазного связующего технической воды достаточно для получения гранул с прочностью необходимой для транспортировки в сушильный агрегат. Плотность цилиндрических гранул выше плотности гранул полученных окатыванием, это объясняется возникновением компрессии в рабочей зоне формования матрицы фильеры. Получение цилиндрических гранул в больших объемах проблематично, тепловыделение при гидратации свободного CaO , входящего в состав пыли, и перемешивание массы приводит к заклиниванию шнека и закупориванию фильеры. Рациональной является схема с использованием гранулятора тарельчатого типа. Скорость грануляции в нем в 2.7 раза выше по сравнению с шнековым, это связано со временем необходимым для предварительного доведение до оптимального состава (воды/твердая фаза) для шнекового гранулятора.

3. Исследования показали, что равномерное распределение стабилизатора в объеме обрабатываемого шлакового расплава ДСП обеспечивает стабилизацию высокотемпературных форм двухкальциевого силиката, исключая силикатный

распад в процессе и после его охлаждения. Введение 5 % стабилизатора в шлаковый расплав является оптимальным. Стабилизацию шлака обеспечивают ферриты кальция, формирующиеся при использовании стабилизирующего вещества близкого по составу с обрабатываемым шлаком. Полученный каменный материал по своим физико-механическим свойствам можно классифицировать как щебень, который можно применять при строительстве и реконструкции автомобильных дорог в качестве оснований. Стабилизация шлакового расплава обеспечит исключение образования тонкодисперсной пыли γ -распада двухкальциевого силиката, что приведет к снижению негативного воздействия продуктов распада на окружающую среду.

4. На основании проведенного анализа состава и структурных особенностей установлено, что в результате кристаллохимической стабилизации шлака с использованием гранулированной пыли ДСП в количестве 2 % в условиях реального производства на предприятии АО «ОЭМК им. А.А. Угарова» состав конечного материала не претерпевает существенных изменений в химическом составе. Однако, следует отметить изменения в фазовом составе, которые свидетельствуют об эффективности применяемого стабилизатора. Кроме того, в результате масштабирования технологии стабилизации получен материал с менее дефектной структурой по сравнению с лабораторными образцами.

5. Анализ совокупности нормируемых параметров проб отвалного шлакового щебня и щебня из стабилизированного шлака позволил установить, что в результате стабилизации улучшаются физико-механические свойства получаемого материала. Так, кристаллохимическая стабилизация печного шлака при введении лишь 2 % гранулированной пыли ДСП во время слива позволила улучшить нормируемые показатели шлакового щебня, а именно: марку по прочности с 800 до 1200, марку по истираемости с ИIV до ИП, устойчивость структуры с УС2 до УС1, морозостойкость до F50. Улучшенные характеристики позволяют расширить области применения шлакового щебня в дорожном строительстве. Физико-механические свойства полученного каменного материала позволяют применять его для устройства слоев оснований, а также в составе композиционных материалов для устройства покрытий в конструкциях дорожных одежд.

5 ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ СТАБИЛИЗАЦИИ ШЛАКА ДЛЯ ЩЕБНЯ ОСНОВАНИЙ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ

5.1 Технологические особенности стабилизации шлака

Получение стабилизированного щебня на основе шлака базируется на существующей технологии переработки шлаковых расплавов с минимальным количеством новых агрегатов и минимальным изменением существующей технологии за исключением устройства линии по грануляции стабилизатора.

В работе предлагается схема, описывающая порядок операций, процесса получения стабилизированного щебня с учетом подготовки стабилизатора, заключающейся в грануляции стабилизатора (рисунок 5.1).



Рисунок 5.1 – Схема процесса получения стабилизированного щебня с учетом подготовки стабилизатора

Процесс работы газоочистных установок дуговых сталеплавильных печей включает следующие основные этапы: газы, образующиеся в процессе плавления

стали, проходят через газоотводные каналы и попадают на газоочистную установку. На первом этапе очистки газов используются сухие пылеуловители, такие как циклоны и мультициклоны. Они улавливают крупные частицы пыли под воздействием центробежной силы. После прохождения сухих пылеуловителей газы направляются на сепарацию, где происходит отделение твердых частиц от газовых потоков. Это осуществляется с помощью специальных аппаратов, таких как скрубберы или электрофилтры [160–164, 166].

Технологическая схема получения стабилизированного щебня с учетом подготовки стабилизатора предлагается ниже на рисунке 5.2.

На сегодняшний день после циклона пыль не получила широкого применения и нуждается в захоронении [166]. Захоронение пыли осуществляется на специальных полигонах, где пыль засыпается слоем грунта. Это предотвращает попадание пыли в атмосферу и предотвращает загрязнение окружающей среды. Полигон оборудуется специальными защитными сооружениями, которые предотвращают распространение пыли за его пределы. Пыль доставляется на полигон в специальных контейнерах или транспортных средствах, которые обеспечивают ее изоляцию от окружающей среды. На полигоне пыль засыпается слоем грунта, который обеспечивает ее изоляцию от атмосферы и предотвращает ее распространение. После захоронения пыли полигон контролируется на предмет возможных утечек пыли и при необходимости проводятся дополнительные мероприятия по его защите.

Для использования в качестве стабилизатора пыль транспортируется в специальных контейнерах или транспортных средствах, которые обеспечивают ее изоляцию от окружающей среды в специальные бункеры накопители. Далее происходит процесс гранулирования с помощью тарельчатого гранулятора. Гранулятора имеет форму тарели (или чаши) и вращается вокруг своей оси. Подготовленный материал загружается в смесительную камеру (пространство между внутренней стенкой чаши и наружной поверхностью тарели) гранулятора. Тарельчатая чаша начинает вращаться, и материал перемещается по смесительной камере.

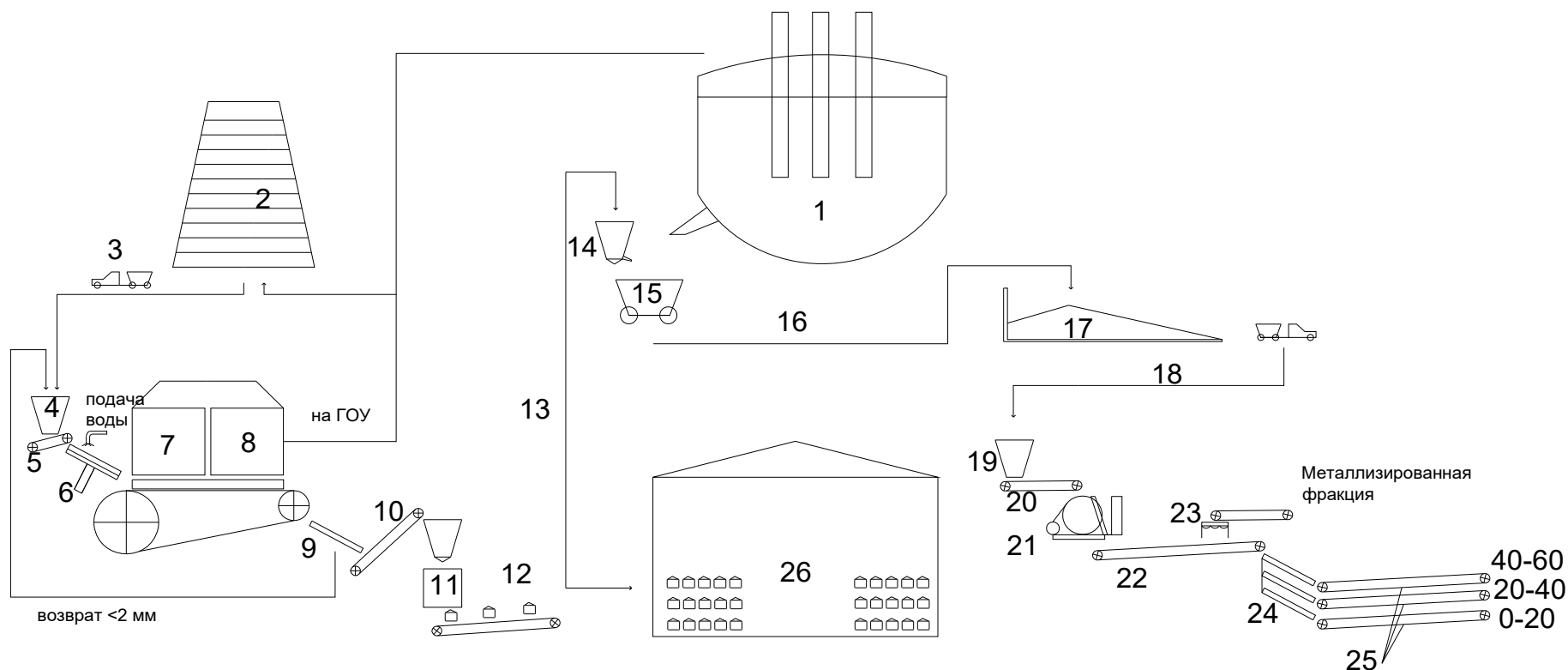


Рисунок 5.2– Технологическая схема получения стабилизированного щебня с учетом подготовки стабилизатора:

- 1 – ДСП; 2 – Газоочистные установки ДСП; 3 – Транспортировка пыли в бункер-дозатор; 4 – Бункер-дозатор; 5 – Ленточный питатель; 6 – Торельчатый гранулятор; 7 – Камера сушки; 8 – Камера охлаждения; 9 – Виброгрохот; 10 – Ленточный питатель; 11 –Упаковщик с бункером накопителем; 12 – Лента транспортер; 13 – Подача в ЭСПЦ; 14 – Бункер с управляемым затвором/распределитель; 15 – Шлаковая чаша; 16 – Транспортировка в шлаковый отвал; 17 – Слив и охлаждение стабилизированного шлака в отвале; 18 – Транспортировка на дробильно-сортировочную установку; 19 – Бункер накопитель; 20 – Ленточный питатель; 21 – Щековая дробилка; 22 – Ленточный питатель; 23 – Магнитный сепаратор; 24 – Виброгрохот; 25 – Ленточный конвейер; 26 – Склад для стабилизатора

В это время осуществляется тонкодисперсный распыл воды в качестве связующего агента. В зависимости от угла наклона тарели регулируется крупность полученных гранул. Если требуется гранулировать еще материал, процесс повторяется снова.

После чего гранулы попадают в сушильную установку, состоящую из двух камер: камера сушки и камеры охлаждения. При этом пыль из камер удаляется и возвращается в газоочистные установки ДСП. Охлажденные гранулы сортируются по размеру, гранулы с диаметром < 2 мм отправляются обратно в бункер накопитель для повторной грануляции. Остальные гранулы упаковываются для хранения или отправляется непосредственно в цех в бункер накопитель с управляемым затвором или распределителя (также может использоваться мостовой кран с грейферным ковшом) установленный над шлаковой чашей. Во время скачивания шлака из печи в него производится введение стабилизатора в несколько этапов. За счет применения распределителя обеспечивается равномерность введения гранул в шлаковый расплав. При осуществлении стабилизации в несколько этапов, массу стабилизатора разбивают на несколько порций и вводят во время скачивания металлургического шлака в шлаковую чашу непосредственно в струю и на поверхность расплава (равномерно) в процессе скачивания 1-я порция – $2/3$ от выбранного процентного содержания сразу же после первого слива шлака в шлаковую чашу, первое введение стабилизатора начинается после заполнения расплавом $1/5$ объема шлаковой чаши, что значительно снижает количество включений металла, находящегося на дне чаши в структуру шлака (в процессе его стабилизации). При этом снижение температуры шлакового расплава в этот временной отрезок его слива, обусловленное разогревом стенок шлаковой чаши. Вторая порция – $1/3$ от выбранного процентного содержания сразу же после второго слива шлака в шлаковую чашу равномерно непосредственно в струю и на поверхность расплава при сливе шлака [78].

Далее по существующей технологии переработки шлака, он транспортируется в шлаковый отвал, где осуществляется его слив и охлаждение. После охлаждения шлак отправляется на дальнейшую переработку, включающую отделение металлизированных включений в виде скрапа и скардовин.

Апробация технологии получения стабилизированного шлака производилась на предприятии АО «ОЭМК им. А.А. Угарова» во время выплавки стали в цеху 10136 плавка 17 чаша (приложение А).

Кусковой шлак подается на установку, где она сначала проходит через предварительное измельчение. Это позволяет разрушить крупные куски шлака на более мелкие фрагменты для последующего дробления. После предварительного измельчения порода попадает в дробильную установку. Здесь она измельчается при помощи различных типов дробилок, которые могут быть щековыми, конусными или роторными. В зависимости от требуемого размера щебня, порода может проходить через несколько стадий дробления [167].

Полученный щебень проходит через сортировочные грохоты, которые разделяют его на фракции с разными размерами частиц. Сортировка выполняется автоматически с использованием сортировочных машин. На этом этапе определяются основные характеристики щебня – прочность, насыпная плотность, активность и морозостойкость. Эти параметры проверяются в лаборатории или непосредственно на площадке перед использованием щебня в строительстве. Готовый щебень засыпается в конусы. Щебень также может быть сразу отгружен потребителю для использования в строительных работах. Отсеянную металлизированную фракцию отправляют на повторную переплавку.

Таким образом, для щебня из стабилизированного шлакового расплава непосредственно на электрометаллургическом предприятии не требуется существенной модернизации технологической линии по переработке шлаковых расплавов, достаточно включить операцию по грануляции пыли ДСП. Для осуществления подготовки гранул из пыли ДСП необходимо организовать зону грануляции, зону высушивания и охлаждения, а также зоны сортировки и упаковки.

5.2 Расчет конструкций дорожных одежд с использованием стабилизированного шлака

С целью обоснования целесообразности и эффективности применения стабилизированного шлака в качестве щебня для оснований автомобильных дорог

произведен сравнительный расчет конструкций равнопрочных автомобильных дорог трех видов [168]. Согласно ПНСТ 542–2021, автомобильные дороги в Белгородской области относятся к III технической категории, что обеспечивает достаточную пропускную способность для реального транспортного потока на объектах регионального и межмуниципального значения во время развития региона. Соответственно, расчет выполнен для конструкций, соответствующих требованиям III технической категории.

Одна модель использует типовую конструкцию дорожной одежды, две другие модели используют устройство нижнего слоя основания из стабилизированного шлака с заменой песка на стабилизированный шлаковый песок. Во втором варианте смесь С4 заменяется на ШПС 0–60 из стабилизированного шлака, песок заменяется на крупный песок из стабилизированного шлака, полученный после дробления и сортировки. В третьем варианте используется стабилизированный шлаковый щебень фракции 20–60, с заклинкой фракцией 0–20, а также песок заменяется на крупный песок из стабилизированного шлака, полученный после дробления и сортировки

На основе данных, представленных в таблицах 5.1–5.4, был проведен автоматизированный расчет с использованием лицензионной программы «CREDO-RADON» с автоматическим изменением параметров для соответствия заданным критериям.

Таблица 5.1 – Климатические характеристики

№ п/п	Наименование параметра	Значение
1	Дорожно-климатическая зона	4
2	Схема увлажнения рабочего слоя	1
3	Регион	Нет данных
4	Рельеф района	Равнинный
5	Количество расчетных дней в году, дней	145
6	Номер изолинии границы термического сопротивления дорожной одежды	III

№ п/п	Наименование параметра	Значение
7	Глубина промерзания грунта, см	100 (по карте)
8	Среднегодовая температура, градусы	7.7

Таблица 5.2 – Данные о дороге

№ п/п	Наименование параметра	Значение
1	Категория дороги	IV
2	Количество полос движения	1
3	Номер расчетной полосы	1
4	Тип конструкции дорожной одежды	Усовершенствованный облегченный
5	Срок службы покрытия, лет	24
6	Межремонтный срок покрытия, лет	12
7	Коэффициент надежности	0,85
8	Поперечный профиль дороги	Односкатный
9	Ширина полосы движения, м	4,50
10	Ширина обочины, м	0,50
11	Ширина укрепленной части обочины, м	0,50
12	Заложение откоса, 1:m	1 : 3
13	Вогнутость продольного профиля	Не учитывается
14	Высота насыпи, м	1,50
15	Грунт рабочего слоя	Суглинок легкий
16	Коэффициент уплотнения	0,95
17	Расчетная влажность грунта, доли ед.	Вычислена по методике: 0,630
18	Частичная замена грунта	Не предусмотрена
19	Конструктивные мероприятия, снижающие влажность и/или влияющие на расчет дренирующего слоя	Не предусмотрены

Эта программа использует последнюю версию нормативной документации для расчета различных компонентов дорожных конструкций. Кроме того, данная

программа уникальна, так как она не только выполняет расчеты в соответствии с имеющейся нормативной документацией, но также позволяет пользователям задавать свои собственные параметры, позволяя получать не типовые конструктивные решения.

Таблица 5.3 – Расчетная нагрузка

№ п/п	Наименование параметра	Значение
1	Нагрузка определяется	по ПНСТ 542-2021
2	Расчетная нагрузка	Стандартная
3	Вид расчетной нагрузки	Динамическая
4	Тип колеса	Двухбаллонное
5	Нормативная статическая нагрузка на ось, Q _{расч.ось} кН	100,00
	Давление в шинах p, МПа	0,60
	Диаметр штампа D, см	37,10

Таблица 5.4 – Состав автомобильного потока

№ п/п	Наименование параметра	Значение
1	Состав движения	Неизвестен
2	Коэффициент роста интенсивности, доли ед.	1,040
3	Расчетное суточное число приложений приведенной нагрузки на исходный год службы, ед./сут.	47
4	Расчетное суточное число приложений на полосу приведенной нагрузки на последний год службы, ед./сут.	116,84
5	Суммарное расчетное число приложений на полосу за весь срок службы, ед.	236937
6	Требуемый модуль упругости, МПа	180

В результате произведенного расчета (приложение Б) определены толщины каждого слоя конструкций дорожных одежд, из которых складывается общая толщина конструкции, обеспечивающая модуль упругости и запас прочности конечной конструкции (рисунок 5.3–5.5).

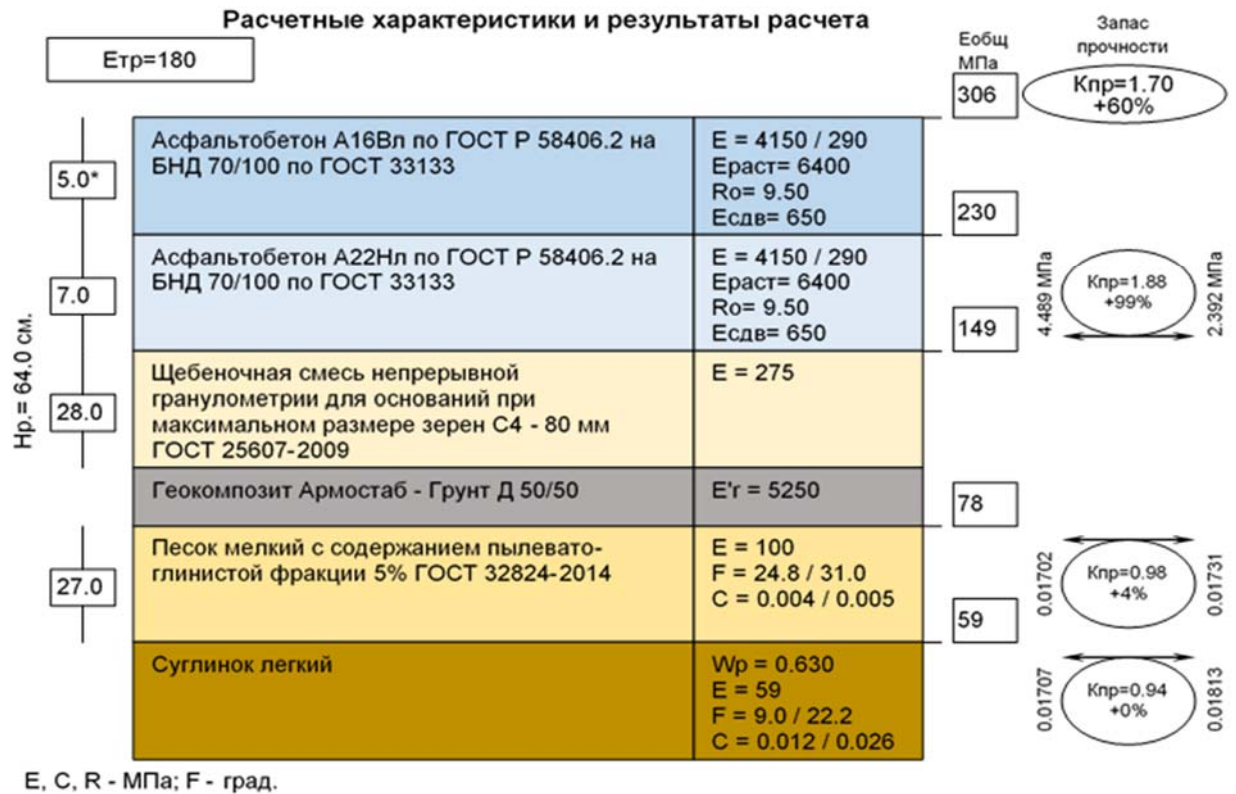


Рисунок 5.3 – Стандартная конструкция дорожной одежды для III категории с использованием традиционных материалов

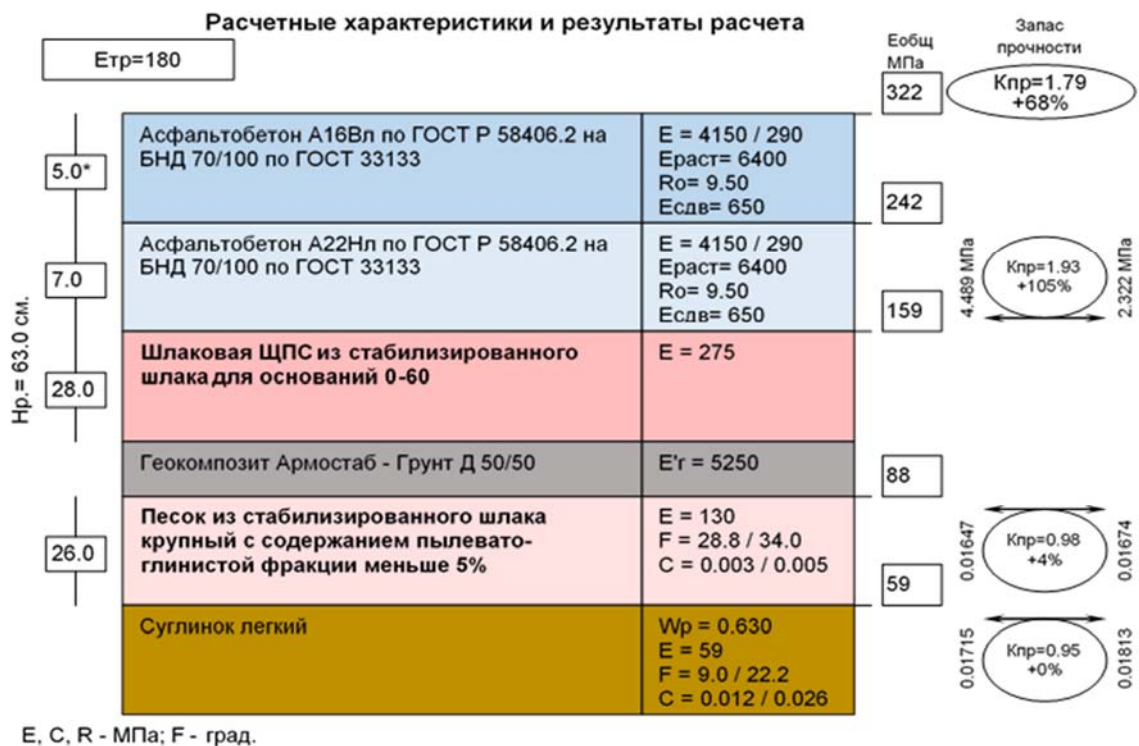


Рисунок 5.4 – Конструкция дорожной одежды для III категории с использованием ЩПС и песка из стабилизированного шлака



Рисунок 5.5 – Конструкция дорожной одежды для III категории с использованием щебня и песка из стабилизированного шлака

На основании результатов расчета установлено, что использование стабилизированного ЦПС в качестве основания и замена песка на песок из стабилизированного шлака позволяет уменьшить толщину конструкции на 1 см. Использование в качестве замены щебень стабилизированный шлаковый щебень фракции 20–60 с заклиной стабилизированным шлаком 0–20 и заменой песка на песок из стабилизированного шлака также позволяет уменьшить толщину конструкции на 1 см.

В результате это позволяет увеличить запас прочности вышележащих слоев щебня на 6 % и 9 % соответственно, а запас прочности верхнего слоя покрытия из плотного асфальтобетона на 8 % и 13 % соответственно. В свою очередь общий модуль упругости разработанной конструкции (вариант 2, рисунок 5.4) на 5 % и (вариант 3, рисунок 5.5) на 8 % соответственно, выше по сравнению с традиционной (вариант 1, рисунок 5.3) и составили 322 и 331 МПа соответственно.

На основании результатов автоматизированного расчета дорожных конструкций III технической категории установлено, что использование стабилизированного шлака в виде щебня, песка и щебеночно-песчаных смесей позволяет уменьшить общую толщину конструкции. В то же время, это приводит к увеличению общего модуля упругости и, следовательно, к увеличению запаса прочности верхних конструктивных слоев. Кроме того, применение указанных материалов обеспечивает повышение устойчивости дороги к различным видам нагрузок и воздействий, а также к износу. Это, в свою очередь, способствует продлению срока службы дорожной конструкции и снижению затрат на ее обслуживание.

5.3 Технико-экономическое обоснование устройства оснований автомобильных дорог с применением стабилизированного шлака

Национальным проектом «Безопасные и качественные автомобильные дороги» в качестве одной из приоритетных задач развития транспортной сети Российской Федерации обозначено существенное увеличение доли автомобильных дорог регионального значения и городских агломераций при использовании местных сырьевых ресурсов и общем снижении стоимости дорожного строительства

Экономическая эффективность от внедрения ресурсосберегающих технологий в дорожном строительстве может быть значительной. Снижение затрат на материалы и энергию приводят к снижению стоимости строительства дорог, что в свою очередь должно стимулировать развитие экономики региона и повышение качества жизни населения. Кроме того, использование инновационных технологий может способствовать созданию новых рабочих мест и развитию малого и среднего бизнеса. Одной из таких инновационных технологий является применение стабилизированного шлака в конструкциях дорожных одежд.

Стабилизированный шлак представляет собой продукт, полученный в результате стабилизации электрометаллургических шлаков, и обладает рядом преимуществ перед традиционными материалами для устройства оснований дорог. Использование стабилизированного шлака позволяет снизить затраты на строи-

тельство дорог по сравнению с использованием традиционных материалов, таких как песок, щебень и щебеночно-песчаные смеси. При этом шлаковые основания обладают высокой прочностью и устойчивостью к воздействию внешних факторов, что обеспечивает долговечность автомобильных дорог и снижает затраты на их ремонт и обслуживание. Применение стабилизированного шлака в строительстве автомобильных дорог не оказывает негативного влияния на окружающую среду и соответствует экологическим требованиям.

Для обоснования экономической эффективности конструкций, описанных в разделе 5.2, произведены сметные расчеты строительства разработанных конструкций (Приложение В) с помощью комплекса программного обеспечения «Гранд – СМЕТА» версия 2021.2 [169]. Сметные расчёты для строительства автомобильных дорог были выполнены базисно-индексным методом в базисном ценовом уровне, который принят за 1 января 2000 года. Затем эти расчёты были переведены в актуальный ценовой уровень при помощи текущих индексов изменения сметной стоимости, специально предназначенных для категории работ «Строительство автомобильных дорог». Данные индексы учитывают изменения цен на строительные материалы, оборудование, заработную плату рабочих и другие факторы, влияющие на стоимость строительства. Такой подход позволяет получить наиболее точную оценку стоимости работ, а также оперативно учитывать изменения экономической ситуации.

Базисно-индексный метод расчета стоимости строительства предполагает использование текущих цен на материалы и работы путем их умножения на соответствующие индексы изменения сметной стоимости. Этот метод используется в программе «Гранд – СМЕТА» и включает следующие этапы: Составление локальной сметы на основе действующих сметных норм и расценок с учетом объемов работ и единичных расценок; Определение индексов изменения сметной стоимости на основе данных о текущих ценах на ресурсы и статистической информации; Умножение единичных расценок на объемы работ и на индексы изменения сметной стоимости для получения стоимости каждого вида работ. Суммирование стоимостей всех видов работ для определения общей стоимости строитель-

ства объекта. Учет дополнительных затрат, связанных с накладными расходами, плановыми накоплениями, непредвиденными обстоятельствами и т.д. Результаты расчета всех трех вариантов приведены в таблице 5.5 в ценах на 01.01.2000 года, с переводом в цены на 1 квартал 2024 года [169–175].

Таблица 5.5 – Стоимость строительства 100 м² автомобильной дороги

III технической категории дорожной одежды

Уровень цен	Стоимость строительства 100 м ² дороги, руб. с НДС		
	Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3
2000 года	37 412,41	31 180,00	33 671,16
1 квартал 2024 года	403 305,78	336 120,40	362 975,10

По результатам расчета строительство типовой конструкции дорожной одежды обойдется в 403 305,78 рублей что на 15,04 % больше, чем при использовании 2 варианта с устройством ЩПС и на, 10,11 % больше, чем при устройстве 3 варианта. Устройство 2 варианта дешевле на 5,56 %. Большая эффективность 2 варианта связана с уменьшением стоимости ЩПС по сравнению с фракционным щебнем, за счет исключения операции по грохочению и сортировки на фракции, а также с уменьшением количества выполняемых операций (отсутствует необходимость проведения операции по расклиниванию щебня. При этом 3 конструкция увеличивает суммарный модуль упругости на 2,72 %.

Внедрение инновационных ресурсо- и энергосберегающих технологий в строительство автомобильных дорог является актуальной задачей, поскольку это позволяет не только снизить стоимость материальных затрат, но и решить проблему дефицита инертных материалов в некоторых регионах России. Кроме того, применение техногенного сырья в виде шлака с улучшенными физико-механическими свойствами способствует снижению толщины конструкций при обеспечении необходимых прочностных параметров конструкций автомобильных дорог.

5.4 Внедрение результатов работы

Для широкоформатного внедрения результатов работы разработаны следующие нормативные документы:

- рекомендации по использованию отходов электрометаллургического производства для получения высокопрочных каменных материалов для дорожного строительства (приложение Г);
- стандарт организации СТО 02066339–054–2023 «Гранулированный стабилизирующий агент на основе пыли дуговых сталеплавильных печей. Технические условия» (Приложение Д);
- стандарт организации СТО 02066339–055–2023 «Высокопрочные каменные материалы из стабилизированного металлургического шлака. Технические условия» (Приложение Е).

Оценка физико-механических свойств щебня, полученного из стабилизированного шлака на соответствие требованиям ГОСТ 3344–83 «Щебень и песок шлаковые для дорожного строительства. Технические условия» (с Изменениями № 1), проводилась в дорожно-строительной лаборатории на базе ООО «СтройМонтажКонсалтинг» (Приложение Ж).

Апробация укладки стабилизированного шлака в качестве слоя основания осуществлялась при строительстве на объекте «Строительство и реконструкция автомобильной дороги М5 «Урал» – от Москвы через Рязань, Пензу, Самару, Уфу до Челябинска на участке км 1564+000 – 1609+000, Челябинская область (III этап) на участке нового строительства протяженностью 0,3 км (Приложение К).

На основании комплекса проведенных исследований подписан протокол о намерениях с ООО «СтройМонтажКонсалтинг» об использовании результатов по технологии стабилизации шлака для щебня оснований автомобильных дорог при реализации работ на объекте «Строительство и реконструкция автомобильной дороги М5 «Урал» – от Москвы через Рязань, Пензу, Самару, Уфу до Челябинска на участке км 1564+000 – 1609+000, Челябинская область (III этап) (Приложение И).

Теоретические положения, результаты научно-исследовательской работы и

промышленного внедрения используются в учебном процессе при подготовке бакалавров направления 08.03.01 – «Строительство» образовательных программ «Автомобильные дороги и аэродромы», «Экспертиза и технологии перспективных материалов»; магистров направлений 08.04.01 – «Строительство» образовательной программы «Автомобильные дороги»; специалистов по направлению 08.05.02 – «Строительство, эксплуатация, восстановление и техническое прикрытие автомобильных дорог, мостов и тоннелей» профиль «Строительство (реконструкция), эксплуатации и техническое прикрытие автомобильных дорог» (Приложение Л).

5.5 Выводы

1. Для щебня из стабилизированного шлакового расплава непосредственно на электрометаллургическом предприятии не требуется существенной модернизации технологической линии по переработке шлаковых расплавов, достаточно включить операцию по грануляции пыли ДСП. Для осуществления подготовки гранул из пыли ДСП необходимо организовать зону грануляции, зону высушивания и охлаждения, а также зоны сортировки и упаковки.

2. На основании результатов автоматизированного расчета дорожных конструкций III технической категории установлено, что использование стабилизированного шлака в виде щебня, песка и щебеночно-песчаных смесей позволяет уменьшить общую толщину конструкции. В то же время, это приводит к увеличению общего модуля упругости и, следовательно, к увеличению запаса прочности верхних конструктивных слоев. Кроме того, применение указанных материалов обеспечивает повышение устойчивости дороги к различным видам нагрузок и воздействий, а также к износу. Это, в свою очередь, способствует продлению срока службы дорожной конструкции и снижению затрат на ее обслуживание.

3. Внедрение инновационных ресурсо- и энергосберегающих технологий в строительство автомобильных дорог является актуальной задачей, поскольку это позволяет не только снизить стоимость материальных затрат, но и решить про-

блему дефицита инертных материалов в некоторых регионах России. Кроме того, применение техногенного сырья в виде шлака с улучшенными физико-механическими свойствами способствует снижению толщины конструкций при обеспечении необходимых прочностных параметров конструкций автомобильных дорог.

4. Апробация укладки стабилизированного шлака в качестве слоя основания осуществлялась при строительстве на объекте «Строительство и реконструкция автомобильной дороги М5 «Урал» – от Москвы через Рязань, Пензу, Самару, Уфу до Челябинска на участке км 1564+000 – 1609+000, Челябинская область (III этап) на участке нового строительства протяженностью 0,3 км.

5. Для широкоформатного внедрения результатов работы разработаны нормативные документы: рекомендации по использованию отходов электрометаллургического производства для получения высокопрочных каменных материалов для дорожного строительства; стандарт организации СТО 02066339–054–2023 «Гранулированный стабилизирующий агент на основе пыли дуговых сталеплавильных печей. Технические условия»; стандарт организации СТО 02066339–055–2023 «Высокопрочные каменные материалы из стабилизированного металлургического шлака. Технические условия».

6. Теоретические положения, результаты научно-исследовательской работы и промышленного внедрения используются в учебном процессе при подготовке бакалавров направления 08.03.01 – «Строительство» образовательных программ «Автомобильные дороги и аэродромы», «Экспертиза и технологии перспективных материалов»; магистров направлений 08.04.01 – «Строительство» образовательной программы «Автомобильные дороги»; специалистов по направлению 08.05.02 – «Строительство, эксплуатация, восстановление и техническое прикрытие автомобильных дорог, мостов и тоннелей» профиль «Строительство (реконструкция), эксплуатация и техническое прикрытие автомобильных дорог».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги выполненного исследования. Дополнены теоретические представления о процессах фазо- и структурообразования при формировании каменного материала в результате кристаллохимической стабилизации шлакового расплава пылью дуговых сталеплавильных печей. Установлены закономерности влияния состава и концентрации стабилизаторов на комплекс физико-механических свойств каменных материалов из стабилизированного шлака и их структурные особенности.

технологическое решение, обеспечивающее получение высокопрочного каменного материала для дорожного строительства в виде стабилизированного шлака, заключающееся в кристаллохимической стабилизации шлакового расплава дисперсными отходами электрометаллургического производства. Введение 2–5 % стабилизатора в виде гранулированной пыли дуговых сталеплавильных печей в состав шлакового расплава обеспечивает получение каменных материалов пригодных как для дорожного строительства, так и для строительной отрасли в целом. Отсутствие в составе дорогостоящих боратовых компонентов и низкая стоимость применяемого стабилизатора позволяет получить шлаковый щебень устойчивой структуры с требуемыми физико-механическими характеристиками и низкой себестоимостью.

Предложен механизм фазо- и структурообразования шлака в процессе кристаллохимической стабилизации шлакового расплава. Стабилизирующий эффект достигается за счет присутствия в составе вводимых компонентов ионов кальция, калия, натрия, марганца, встраивающихся в кристаллическую структуру минералов, за счет чего образуются твердые растворы, понижающие температуру полиморфных превращений. Это позволяет предотвратить силикатный γ -распад за счет фиксации полиморфной структуры C_2S в высокотемпературных α - и β -модификациях. В результате формируется материал с прочными связями, устойчивыми с течением времени, обеспечивающими повышение физико-механических характеристик шлака.

Установлены закономерности влияния рецептурно-технологических пара-

метров получения стабилизированного шлака, а именно состава, концентрации пыли дуговых сталеплавильных печей и способа его введения на реологические свойства расплава, определяющие условия гидродинамического слияния вводимых компонентов при кристаллохимической стабилизации самораспадающихся металлургических шлаков.

Установлены рецептурно-технологические параметры получения стабилизированного шлака путем кристаллохимической стабилизации шлакового расплава пылью дуговых сталеплавильных печей, обеспечивающие получение высокопрочного каменного материала с маркой по прочности М1200, по морозостойкости F50, по истираемости III, устойчивостью структуры УС1, что позволяет классифицировать его как шлаковый щебень, пригодный для строительства и реконструкции автомобильных дорог в качестве оснований и покрытий.

Разработана технология стабилизации, включающая гранулирование пыли ДСП и введение в шлаковый расплав на стадии его слива.

Предложены альтернативные конструкции и произведен расчет дорожных одежд с применением полученного шлакового щебня.

Полученные результаты могут быть **рекомендованы** для использования: в производстве – при стабилизации шлакового расплава на электросталеплавильных предприятиях, а также на дорожно-строительных предприятиях для строительства, ремонта и реконструкции автомобильных дорог; в учебном процессе – при подготовке специалистов, бакалавров и магистров по направлениям «Строительство, эксплуатация, восстановление и техническое прикрытие автомобильных дорог, мостов и тоннелей» и «Строительство».

Перспективы дальнейших исследований целесообразно рассматривать в направлении расширения областей применения полученного каменного материала стабильной структуры, в качестве заполнителя для асфальто- и цементобетон.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Транспортная стратегия Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/727294161>.

2. Национальный проект «Безопасные качественные дороги» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://bkdrf.ru/?region=%D0%91%D0%B5%D0%BB%D0%B3%D0%BE%D1%80%D0%BE%D0%B4%D1%81%D0%BA%D0%B0%D1%8F%20%D0%BE%D0%B1%D0%BB%D0%B0%D1%81%D1%82%D1%8C>.

3. Национальный проект «Региональная и местная дорожная сеть» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://xn--80aapampemcchfmo7a3c9ehj.xn--plai/projects/bezopasnye-kachestvennye-dorogi/regionalnaya-i-mestnaya-dorozhnaya-set>.

4. *Nevskaya, M.A.* Challenges and opportunities of state regulation of the innovation process in the Russian mineral resources sector / M.A. Nevskaya, O.A. Marinina // Academy of Strategic Management Journal. – 2017. – Т. 16. – Р. 149.

5. *Скутин, А.И.* О качестве щебня, применяемого в транспортном строительстве / А.И. Скутин // Инновационный транспорт. – 2019. – № 1(31). – С. 25–28.

6. *Семенов, А.А.* Российский рынок щебня и гравия: итоги последних лет / А.А. Семенов // Строительные материалы. – 2010. – №. 3. – С. 17–19.

7. *Савчук, В.Б.* Особенности перевозки щебня в 2017 г. (IV международная конференция: рынок щебня России. 15.06.2017, Москва) / В.Б. Савчук // Вестник транспорта. – 2018. – № 3. – С. 32–37.

8. *Zenkov, I.V.* et al. Cumulative production potential of quarries to supply crushed stone factories in Russia: An overview // Eurasian Mining. – 2021. – №. 1. – С. 45–48.

9. *Кузьмич, Н.П.* Расширение ресурсной базы строительного комплекса на основе применения местного сырья и энергоресурсоэффективных технологий /

Н.П. Кузьмич // Проблемы современной экономики. – 2012. – № 2(42). – С. 325–328.

10. *Иванков, С.И.* Систематизация методов переработки отходов горно-металлургического комплекса / С. И. Иванков, Л. Я. Шубов, К. Д. Скобелев // Научные и технические аспекты охраны окружающей среды. – 2020. – № 6. – С. 2–93.

11. *Иванков, С.И.* Систематизация многотоннажных отходов и запатентованные технологии их утилизации и переработки / С.И. Иванков, К.Д. Скобелев, Л.Я. Шубов, И.Г. Доронкина // Научные и технические аспекты охраны окружающей среды. – 2020. – № 1. – С. 2–118.

12. *Galitskova, Yu.M.* Efficiency of construction waste recycling / Yu.M. Galitskova, A.A. Mikhasek // RSP 2017 – XXVI R-S-P Seminar 2017 Theoretical Foundation of Civil Engineering, Warsaw, Poland, 21–25 августа 2017 года / Editors: S. Jemioło, A. Zbiciak, M. Mitew-Czajewska, M. Krzemiński and M. Gajewski. – Warsaw, Poland: EDP Sciences, 2017. – 00055.

13. *Limbachiya, M.C.* Performance of recycled aggregate concrete / M.C. Limbachiya, A. Koulouris, J.J. Roberts, A.N. Fried // RILEM International Symposium on Environment-Conscious Materials and Systems for Sustainable Development; 6–7 Sep. 2004, Koriyama, Japan. ISBN 2912143551, URL: <http://dx.doi.org/10.1617/2912143640.015>.

14. *Safiuddin, Md.* Properties of high-workability concrete with recycled concrete aggregate/ Md. Safiuddin, U.J. Alengaram, M.A. Salam, M.Z. Jumaat, F.F. Jaafar, H.B. Saad // Materials Research. – 2011. – Vol. 14. – № 2. – Pp. 1–8.

15. *Yong, P.C.* Utilisation of recycled aggregate as coarse aggregate in concrete / P.C. Yong, D.C.L. Teo // Journal of Civil Engineering Science and Technology. – 2009. – Vol. 1. – № 1. – Pp. 1–6.

16. *Хаджишалапов, Г.Н.* Исследование альтернативных источников сырья для строительной отрасли. Физико-механические свойства модифицированного бетона на основе вторичного щебня / Г.Н. Хаджишалапов, М.П. Нажуев, У.И. Ис-аева, Э.А. Салахов, М.Ш. Абдурахимов, М.Н. Ахмедов // Научные исследования:

итоги и перспективы. – 2023. – Т. 4. – № 2. – С. 52–59.

17. *Муртазаев, С.А.Ю.* Формирование структуры и свойств бетонов на заполнителе из бетонного лома / С.А.Ю. Муртазаев М.Ш. Саламанова, М.И. Гишкалаева // Бетон и железобетон. – 2008. – № 5. – С. 25–28.

18. *Романенко, И.И.* Вторичное использование в дорожном строительстве щебня полученного из дробленого бетона / И.И. Романенко, М.И. Романенко, И.Н. Петровнина [и др.] // Интернет-журнал Науковедение. – 2015. – Т. 7. – № 1(26). – С. 86.

19. *Лупанов, А.П.* Производство асфальтобетонных смесей с добавлением асфальтового гранулята / А.П. Лупанов, В.В. Силкин, А.С. Суханов, Н.В. Гладышев // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2017. – № 4(82). – С. 37–39.

20. *Маконков, А.В.* Исследование перспектив использования асфальтогранулобетонной смеси, полученной методом горячей регенерации / А.В. Маконков, А.Л. Кузьмина, М.Ю. Белозор // Вестник Череповецкого государственного университета. – 2014. – № 2(55). – С. 13–15.

21. *Лупанов, А.П.* Исследование влияния асфальтового гранулята на свойства литого асфальтобетона / А.П. Лупанов, А.С. Суханов, В.В. Силкин [и др.] // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2018. – № 2(44). – С. 201–207.

22. *Губа, В.В.* Асфальтный гранулят в дорожном строительстве / В.В. Губа, Е.И. Горин // Вести Автомобильно-дорожного института. – 2020. – № 3(34). – С. 44–50.

23. *Губа, К.Р.* О целесообразности повторного использования старого асфальтобетона / К.Р. Губа // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2020. – № 1(141). – С. 40–45.

24. *Lupanov, A.P.* Influence of asphalt granulate on asphalt concrete properties / A.P. Lupanov, A.A. Fotiadi, V.V. Silkin, S.A. Gnezdilova, K.M. Gulyaev // AIP Conference Proceedings. – 2023. – Т. 2758. – №. 1.

25. *Bieliatynskiy, A.* Peculiarities of the use of the cold recycling method for the restoration of asphalt concrete pavements / A. Bieliatynskiy // Case Studies in Construc-

tion Materials. – 2022. – Т. 16. – P. 00872.

26. *Jahanbakhsh, H.* Sustainable asphalt concrete containing high reclaimed asphalt pavements and recycling agents: Performance assessment, cost analysis, and environmental impact / H. Jahanbakhsh, M. M. Karimi, H. Naseri, F. M. Nejad // Journal of Cleaner Production. – 2020. – Т. 244. – 118837.

27. *Лупанов, А.П.* Повторное использование асфальтобетона / А.П. Лупанов, В.В. Силкин, В.В. Рудакова [и др.] // СТТ: Строительная техника и технологии. – 2016. – № 4(120). – С. 76–79.

28. *Graiti, A.A.H.* Research about recycling concrete aggregate / A.A.H. Graiti, N.B. Kolosova // International Scientific Review. – 2017. – № 5(36). – P. 26–30.

29. *Киценко, Т.П.* Использование крупного заполнителя из бетонного лома в тяжелых бетонах / Т.П. Киценко, Д.С. Омелянович // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2020. – № 1(141). – С. 99–103.

30. *Каптюшина, А.Г.* Исследование физико-механических свойств щебня из бетонного лома / А.Г. Каптюшина, И.С. Кононов, А.Н. Бакунина // Вестник Вологодского государственного университета. Серия: Технические науки. – 2021. – № 2(12). – С. 59–62.

31. *Морозова, Н.Н.* Бетонные отходы: организация переработки, свойства и применение / Н.Н. Морозова, А.Р. Гиззатуллин, А.П. Аксаков, К.О. Нестерова // Полимеры в строительстве: научный интернет-журнал. – 2022. – № 1(10). – С. 32–46.

32. *Гиззатуллин, А.Р.* Проблема утилизации отходов бетонного лома / А.Р. Гиззатуллин, Н.Н. Морозова, А.В. Павлов [и др.] // Вопросы современной науки и практики. Университет им. В.И. Вернадского. – 2023. – № 3(89). – С. 18–26.

33. *Морозова, Н.Н.* Вовлечение отходов бетонного лома в производство новых материалов / Н.Н. Морозова, А.Р. Гиззатуллин // Теория и практика повышения эффективности строительных материалов: Материалы XVIII Международной научно-технической конференции молодых учёных, посвященной памяти профессора В.И. Калашникова, Пенза, 25–27 октября 2023 года / Под общей редакции М.О. Коровкина и Н.А. Ерошкиной. – Пенза: Пензенский государственный уни-

верситет архитектуры и строительства, 2023. – С. 145–149.

34. *Сидорова, А.С.* Физико-механические характеристики тяжелого бетона с использованием местного вторичного сырья / А.С. Сидорова, С.Г. Анцупова, А.Л. Попов // Строительные материалы. – 2020. – № 9. – С. 9–14.

35. *Украинский, И.С.* Повторное использование бетонного и кирпичного лома в качестве заполнителей в бетон / И.С. Украинский, Л.П. Майорова, Д.А. Саликов [и др.] // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Экология и безопасность жизнедеятельности. – 2023. – Т. 31. – № 2. – С. 291–301.

36. *Murtazaev, S.A.Y.* Strength and strain properties of concrete, comprising filler, produced by screening of waste crushed concrete / S.A.Y. Murtazaev, M.S. Mintsae, M.S. Saydumov, S.A. Aliev, //Modern Applied Science. – 2015. – Т. 9. – №. 4. – С. 32–44.

37. *Đokić, O.* Potential of natural and recycled concrete aggregate mixtures for use in pavement structures / O. Đokić, A. Radević, D. Zakić, B Đokić //Minerals. – 2020. – Т. 10. – №. 9. – P. 744.

38. *Pulyaev, I.* Research of Early Structure Formation Process of Concrete Where Concrete Waste is Used as Crushed Stone / I. Pulyaev, S. Pulyaev //International School on Neural Networks, Initiated by IIASS and EMFCSC. – Cham: Springer International Publishing. – 2022. – С. 1455–1462.

39. *Фомин А.Ю.* Высокопрочный серощебень из карбонатных пород для устройства оснований в конструкциях дорожных одежд / А.Ю. Фомин, Р.Н. Аскарова, В.Г. Хозин //Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. – 2022. – №. 1(59). – С. 54–63.

40. *Черных, Д.И.* Оценка комкуемости карбонаткальциевых отходов при обосновании технологии их гранулирования в искусственный гравий / Д.И. Черных, Е.М. Чернышов, Д.В. Орешкин // Вестник МГСУ – Москва. – 2012 – № 11. – С. 177–180.

41. *Черных, Д.И.* Композиты на основе утилизации техногенного (конверсионного) карбоната кальция. Модели и возможные механизмы структурообразования / Д.И. Черных, Е.М. Чернышов, Н.Д. Потамошнева // Научный вестник Воро-

неж. гос. арх.-строит. ун-та. Строительство и архитектура. – 2014. – № 3(35). – 38 с.

42. *Черных, Д.И.* Оптимизация технологических режимов производства искусственного заполнителя на основе утилизации техногенного (конверсионного) карбоната кальция / Д.И. Черных, Е.М. Чернышов, Н.Д. Потамошнева // Научный вестник Воронеж. гос. арх.-строит. ун-та. Строительство и архитектура. – 2014. – № 3(35). – 51 с.

43. *Черепов, В.Д.* Искусственный каменный материал на основе отсеков дробления карбонатных пород: состав, технологии, свойства: монография / В.Д. Черепов. – Йошкар-Ола: ПГТУ, 2015. – 188 с.

44. *Монтаев, С.А.* Использование гранулированного доменного шлака в составе керамической массы для получения керамического заполнителя (керамдора) / С.А. Монтаев, А.Б. Шингужиева, Н.С. Монтаева [и др.] // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2019. – № 10. – С. 164–168.

45. *Dulaimi, A.* The mechanical evaluation of cold asphalt emulsion mixtures using a new cementitious material comprising ground-granulated blast-furnace slag and a calcium carbide residue / A. Dulaimi, H. K. Shanbara, A. Al-Rifaie // Construction and Building Materials. – 2020. – Т. 250. – 118808.

46. *Gencel, O.* Steel slag and its applications in cement and concrete technology: / O. Gencel, O. Karadag, O. H Oren, T. Bilir // Construction and Building Materials. – 2021. – Т. 283. – 122783.

47. *Nunes, V.A.* Recent advances in the reuse of steel slags and future perspectives as binder and aggregate for alkali-activated materials / V.A. Nunes, P.H.R. Borges // Construction and Building Materials. – 2021. – Т. 281. – 122605.

48. *Шестаков, Н.И.* От металлургического шлака к устойчивому дорожному строительству: оценка возможностей и технологий / Н.И. Шестаков, В.А. Астафьева, В.В. Лебедев, Ю.М. Воликов // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. – 2023. – № 4(44). – С. 74–83.

49. *Левкович, Т.И.* Об утилизации шлаков и освобождении занятых городских территорий промышленных зон с использованием шлака в дорожном строи-

тельстве / Т.И. Левкович, Т.В. Мащенко, З.А. Мевлидинов, Р.С. Синявский // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. – 2017. – № 4(20). – С. 113–122.

50. *Бодяков, А.Н.* Свойства металлургического шлака, стабилизированного в промышленных условиях / А. Н. Бодяков, И. Ю. Маркова, А. А. Логвиненко [и др.] // Региональная архитектура и строительство. – 2023. – № 2(55). – С. 44–51.

51. *Акбердин, А.А.* Стабилизация распадающихся металлургических шлаков / А.А. Акбердин, В.И. Жучков, А.С. Ким [и др.] // Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований. Уральский рынок лома, промышленных и коммунальных отходов: Труды Конгресса с международным участием и Конференции молодых ученых, V Форума, Екатеринбург, 05–09 июня 2017 года. – Екатеринбург: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии Уральского отделения Российской академии наук. – 2017. – С. 160–163.

52. *Гриневич, Н.А.* Металлургические шлаки в дорожном строительстве / Н.А. Гриневич // Актуальные вопросы проектирования автомобильных дорог. Сборник научных трудов ОАО ГИПРОДОРНИИ. – 2014. – № 5(64). – С. 124–129.

53. *Пименов, А.Т.* Применение шлаковых заполнителей в составе асфальтобетона для повышения долговечности дорожных покрытий / А.Т. Пименов, В.С. Прибылов // Вестник Сибирского государственного автомобильно-дорожного университета. – 2019. – Т. 16. – № 6(70). – С. 766–779.

54. *Юдина, Л.В.* Утилизация металлургических и топливных шлаков для дорожного строительства в Удмуртской Республике: монография / Л.В. Юдина. – Ижевск: Книжное издательство «Удмуртия», 1996. – 162 с.

55. *Щербак, С.А.* Характеристика шлаков и их активация / С.А. Щербак, М.А. Елисеева, Н.В. Калиниченко // Вісник Придніпровської державної академії будівництва та архітектури. – 2009. – № 11(140). – С. 4–8.

56. *Зайцев, А.И.* Физическая химия металлургических шлаков / А.И. Зайцев, Б.М. Могутнов, Е.Х. Шахпазов. – М.: Интерконтакт Наука, 2008. – 351 с.

57. *Шаповалов, Н.А.* Шлаки металлургического производства–эффективное

сырьё для получения сухих строительных смесей / Н.А. Шаповалов, Л.Х. Загороднюк, И.В. Тикунова, А.Ю. Щекина, А.В. Шкарин // *Фундаментальные исследования*. – 2013. – №. 1–1. – С. 167–172.

58. *Ларичкин, В.В.* Исследование первичных шлаков электросталеплавильного производства / В.В. Ларичкин // *Наука и техника Казахстана*. – 2021. – № 3. – С. 64–71.

59. *Бодяков, А.Н.* Актуальные проблемы металлургических шлаков / А.Н. Бодяков, Д.В. Бугряшов // *Образование. Наука. Производство: XIII Международный молодежный форум*. – Белгород: Изд-во БГТУ, 2021. – С. 1016–1020.

60. *Гудим, Ю.А.* Современные способы безотходной утилизации шлаков / Ю.А. Гудим, С.Г. Овчинников, И.Ю. Зинуров, // *Сталь*. – 2009. – № 7. – С. 93–95.

61. *Трофимов, М.Г.* Футеровка индукционных печей / М.Г. Трофимов. – М.: Металлургия, 1968. – 288 с.

62. *Жеребцов, С.Н.* Особенности физико-химических свойств флюсов, используемых в технологиях электрошлакового переплава / С.Н. Жеребцов, Е.А. Чернышов // *Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева*. – 2016. – № 1(112). – С. 228–235.

63. *Чуманов, В.И.* Электрошлаковый переплав стали марки 40ХН2МА на опытном флюсе / В.И. Чуманов, И.В. Чуманов // *Электрометаллургия*. – 2018. – № 1. – С. 20–24.

64. *Гольцман, Б.М.* Синтез пористых силикатных материалов при использовании фторида натрия в качестве флюсующей добавки / Б.М. Гольцман, Е.А. Яценко, Л.А. Яценко, В.А. Ирха // *Цветные металлы*. – 2021. – № 6. – С. 44–49.

65. *Марченко, Н.В.* Металлургическое сырьё: учебное пособие / Н.В. Марченко, О.Н. Ковтун // *Сибирский федеральный университет, Институт цветных металлов и материаловедения*. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2017. – 221 с.

66. *Витязь, П.А.* Фуллерены и перспективы их использования в литейном и металлургическом производствах / П.А. Витязь, Н.А. Свидунович, Д.В. Куис [и др.] // *Литье и металлургия*. – 2021. – № 3. – С. 91–96.

67. *Ибраева, О.Т.* Основные направления использования отходов флотации

угля в металлургическом производстве / О.Т. Ибраева, И.К. Ибраев, Г.Ш. Жаксыбаева // Научное обозрение. Технические науки. – 2016. – № 2. – С. 26–31.

68. *Бодяков, А.Н.* Переработка сталелитейных шлаков электродуговых печей / А.Н. Бодяков // Международная научно-техническая конференция молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова: Материалы конференции, Белгород, 30 апреля – 2021 года. – Белгород: Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова, 2021. – С. 1895–1897.

69. *Протасов, А.В.* Эволюция электрометаллургических предприятий: В трех томах. Том 1 / А.В. Протасов, Б.А. Сивак. – Старый Оскол: ООО «Тонкие наукоемкие технологии», 2022. – 264 с.

70. *Шешуков, О.Ю.* Вопросы утилизации рафинировочных шлаков сталеплавильного производства: монография / О.Ю. Шешуков, М.А. Михеенков, И.В. Некрасов, Д.К. Егiazарьян, А.А. Метелкин, О.И. Шевченко; М-во образования и науки РФ; ФГАОУ ВО «УрФУ им. первого Президента России Б.Н.Ельцина», Нижнетагил. технол. ин-т (фил.). – Нижний Тагил: НТИ (филиал) УрФУ, 2017. – 208 с.

71. *Пугин, К.Г.* Снижение экологической нагрузки при обращении со шлаками черной металлургии: монография. / К.Г. Пугин, Я.И. Вайсман, Б.С. Юшков, Н.Г. Максимович. – Пермь: Пермский национальный исследовательский политехнический университет, 2008. – 316 с.

72. *Валуев, Д.В.* Технологии переработки металлургических отходов: учебное пособие / Д.В. Валуев, Р.А. Гизатулин // Национальный исследовательский Томский политехнический университет (ТПУ). – Томск, 2013. – 191 с.

73. *Булатов, К.В.* Перспективы развития технологий переработки отходов черной металлургии / К.В. Булатов, Г.И. Газалеева // Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований: труды V Конгресса с международным участием и Конференции молодых ученых «ТЕХНОГЕН-2021», Екатеринбург, 2021. – С. 21–33.

74. *Юсупходжаев, А.А.* Переработка вторичных техногенных образований в черной металлургии: монография / А.А. Юсупходжаев, Х.Р. Валиев, С.Р. Худоя-

ров. – Ташкент: ТашГТУ, 2014. – 138 с.

75. *Цыбулько, Л.А.* О технологии переработки металлургических отходов / Л.А. Цыбулько // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 1997. – № 3. – С. 37–38.

76. Авторское свидетельство 1776253 СССР. Способ получения строительных материалов из высокоосновных шлаков металлургического производства [Текст] / Боромянская М.В.; заявл. 30.10.1990; опубл. 15.11.1992.

77. Пат. 2041175 РФ. Способ получения строительных материалов из шлака металлургического производства [Текст] / Боромянская М.В.; заявл. 23.09.1992; опубл. 09.08.1995.

78. Пат. 2752914 РФ. Состав и способ стабилизации распадающихся металлургических шлаков [Текст] / Духовный Г.С., Евтушенко Е.И., Рубанов Ю.К. [и др.]; заявл. 29.07.2020; опубл. 11.08.2021.

79. *Толымбекова, Л.Б.* Переработка и повторное использование отходов металлургического предприятия / Л.Б. Толымбекова // Главный энергетик. – 2022. – № 1. – С. 31–35.

80. *Давидюк, А.Н.* Использование шлаков металлургических комбинатов в качестве заполнителя для высокопрочных малоцементных бетонов / А.Н. Давидюк, Д.Н. Богуров, А.Е. Никитин // Технологии бетонов. – 2022. – № 1(180). – С. 19–22.

81. *Нажекенова, А.Ж.* Модифицированный бетон на композиционном вяжущем с использованием металлургических отходов / А.Ж. Нажекенова, К.М. Искаков // Наука и техника Казахстана. – 2019. – № 1. – С. 6–14.

82. *Тюрюханов, К.Ю.* Опыт использования техногенных материалов в строительной отрасли / К.Ю. Тюрюханов, К.Г. Пугин, В.К. Пугина // Транспорт. Транспортные сооружения. Экология. – 2020. – № 1. – С. 54–60.

83. *Nicula, L.M.* Investigations related to the opportunity of using furnace slag in the composition of road cement concrete / L.M. Nicula // Proceedings of the International Conference on Innovative Research Iasi, Iasi, Romania. – 2023. – С. 11–12.

84. *Fan, D.* A new development of eco-friendly Ultra-High performance concrete

(UHPC): Towards efficient steel slag application and multi-objective optimization / D. Fan // *Construction and Building Materials*. – 2021. – Т. 306. – P. 124913

85. *Maslehuddin, M.* Comparison of properties of steel slag and crushed limestone aggregate concretes / M. Maslehuddin, A.M. Sharif, M. Shameem, M. Ibrahim, M.S. Barry // *Construction and building materials*. – 2003. – Т. 17. – №. 2. – С. 105–112.

86. *Chandru, P* Performance evaluation between ternary blended SCC mixes containing induction furnace slag and crushed stone as coarse aggregate / P. Chandru, J. Karthikeyan, A.K. Sahu, K. Sharma, C. Natarajan, // *Construction and Building Materials*. – 2021. – Т. 267. – P. 120953.

87. *Темкин, М.И.* Журнал физической химии. – 2008. – Т. 82. – № 12. – 2399 с.

88. *Кожееуров, В.А.* Термодинамика металлургических шлаков. – М.: Металлургиздат, 1955. – 163 с.

89. *Есин, О.А.* Физическая химия пирометаллургических процессов. – 2-е изд., ч. 2. / О.А. Есин, П.В. Гельд. – М.: Металлургия, 1966. – 703 с.

90. *Жуховицкий, А.А.* Физическая химия: учебник для вузов. – 4-е изд. перераб. и доп. / А.А. Жуховицкий, Л.А. Шварцман. – М.: Металлургия, 1987. – 688 с.

91. *Романенко, А.Г.* Металлургические шлаки. – М.: Металлургия, 1977. – 192 с.

92. *Воскобойников, В.Г.* Свойства жидких доменных шлаков / В.Г. Воскобойников, Н.Е. Дунаев и др. – М.: Металлургия, 1975. – 184 с.

93. *Toop, G.W.* Some new ionic concepts of silicate slags / G.W. Toop // *MASc thesis, University of British Colombia*. – 1960.

94. *Bockris, J.O.M.* Viscosity and the structure of mol-ten silicates/ J.O.M. Bockris, D.C. Lowe // *The Royal Society*. – 1954. – Vol. 226. – Pp. 423–435.

95. *Дюльдина, Э.В.* Оксиды и шлаковые системы. Теория, моделирование, физико-химические исследования: монография / Э.В. Дюльдина, Д.К. Белашенко, Б.Р. Гельчинский. – Магнитогоск: ГОУ ВПО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2007. – 115 с.

96. *Михеенков, М.А.* Особенности формирования фазового состава сталеплавильных шлаков и оценка возможности использования их при изготовлении экобетона / М.А. Михеенков, О.Ю. Шешуков, А.В. Сивцов, Д.К. Егизарьян // VI-й конгресс с международным участием и научно-технической конференцией молодых ученых «Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований» 11-14 июля 2023 г Екатеринбург: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт металлургии Уральского отделения Российской академии наук, 2023. – С. 100–102.

97. *Леонтьев, Л.И.* Технологические особенности переработки шлаков ДСП и АКП в строительные материалы и опыт утилизации рафинировочного шлака в ОАО СТЗ / Л.И. Леонтьев, О.Ю. Шешуков, М.А. Михеенков, А.И. Степанов, М.В. Зуев, И.А. Степанов // *Сталь*. – 2014. – №. 6. – С. 106–109.

98. *Kriskova, L.* Transformation of stainless steel slag toward a reactive cementitious binder / L. Kriskova, M. Eroli, R.I. Iacobescu, S. Onisei, F. Vecchiocattivi, Y. Pontikes // *Journal of the American Ceramic Society*. – 2018. – №. 4. – Pp. 1727–1736.

99. *Durinck, D.* Borate distribution in stabilized stainless-steel slag / D. Durinck, S. Arnout, G. Mertens, E. Boydens, P.T. Jones, J. Elsen, B. Blanpain, P. Wollants // *Journal of the American ceramic society*. – 2008. – №. 2. – Pp. 548–554.

100. *Kim, Y.M.* Influence of minor ions on the stability and hydration rates of β -dicalcium silicate / Y.M. Kim, S.H. Hong // *Journal of the American Ceramic Society*. – 2004. – №. 5. – Pp. 900–905.

101. *Eriksson, J.* MgO modification of slag from stainless steelmaking / J. Eriksson, B. Bjorkman // VII International Conference on Molten Slags Fluxes and Salts. – 2004. – Pp. 455–459.

102. *Engstrom, F.* Hot stage engineering to improve slag valorisation options / F. Engstrom, Y. Pontikes, D. Geysen, P.T. Jones, B. Björkman, B. Blanpain // *International Slag Valorisation Symposium: Katholieke Universitat*, 2011. – Pp. 230–251.

103. *Шюлер, С.* Качество электросталеплавильных шлаков / С. Шюлер, Х.П.

Маркус, Д. Алгермиссен, Д. Мудерсбах // Черные металлы. – 2015. – № 9(1005). – С. 31–41.

104. *Горшков, В.С.* Методы физико-химического анализа вяжущих веществ. [Текст]: практ. пособие / В.С. Горшков, В.В. Тимашев, В.Г. Савельев. – М.: Высш. шк., 1981. – 334 с.

105. *Горшков, В.С.* Физическая химия силикатов и других тугоплавких соединений. / В.С. Горшков, В.В. Савельев, Н.Ф. Федоров. – М.: Высш. шк., 1988. – 395 с.

106. *Торопов, Н.А.* Химия цементов. – М.: Промстройиздат, 1956. – 271 с.

107. *Piatak, N.M.* Environmental characteristics and utilization potential of metallurgical slag / N.M. Piatak // Environmental Geochemistry. Elsevier, 2018. – Pp. 487–519.

108. *Seki, A.* Development of dusting prevention stabilizer for stainless steel slags / A. Seki, Y. Aso, M. Okubo [et al.]. – Kawasaki, Steel Giho. – 1986. – Vol.18. – P. 20–24.

109. *Демин, Б.Л.* Разработка и опробование технологии кристаллохимической стабилизации самораспадающихся сталеплавильных шлаков от установки ковш-печь в условиях северского трубного завода [Текст]: тр. XIII конгресса сталеплавильщиков / Б.Л. Демин, Ю.В. Сорокин, Е.Н. Щербаков [и др.] // Екатеринбург: Эзапринт, 2014. – С. 398–402.

110. *Демин, Б.Л.* Технические решения по переработке самораспадающихся шлаков / Б.Л. Демин, Ю.В. Сорокин, Е.Н. Щербаков [и др.] // Черная металлургия. – 2012. – № 12. – С. 63–70.

111. *Sakamoto, N.* Effect of cooling process to crystallization of stainless steel slag (development of control process of stainless steel slag dusting-1) / N. Sakamoto // Current Advance in Materials and Processes. – 1996. – Vol. 9. – Iss. 4. – P. 803.

112. *Ghosh, S.N.* Review. The chemistry of dicalcium silicate mineral / S.N. Ghosh S.N., P.B. Rao, A.K. Paul, K. Raina // Journal of Material Sciences. – 1979. – Vol. 14. – Iss. 7. – Pp. 1554–1566.

113. *Fruehan, R.J.* Study on the foaming of CaO–SiO₂–FeO slags: Part 1. Foam-

ing parameters and experimental results / R.J. Fruehan, K. Ito // Metallurgical transactions B, 1989. – № 20B(4). – Pp. 509–514.

114. *Bodyakov, A.N.* Stabilization of metallurgical slug from arc steel-making furnaces / A.N. Bodyakov, K.V. Meshkova, G.S. Dukhovny // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. – 2020. – Т. 945. – №. 1. – P. 012082.

115. *Pribulová, A.* Processing and utilization of metallurgical slags / A. Pribulová, P. Futas, D. Baricová // Production engineering archives. – 2016. – Т. 11.

116. Пат 2402498 РФ. Состав для стабилизации распадающегося металлургического шлака [Текст] / Привалова О.Е.; заявл. 22.06.2007; опубл. 27.10.2010.

117. *Демин, Б.Л.* Стабилизация распадающихся ферросплавных и сталеплавильных шлаков / Б.Л. Демин, Ю.В. Сорокин, Л.А. Смирнов, Е.Н. Щербаков // Перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных фундаментальных исследований и НИОКР: ФЕРРОСПЛАВЫ: Труды научно-практической конференции с международным участием и элементами школы молодых ученых, Екатеринбург, 29 октября – 02 2018 года. – Екатеринбург: ООО Издательство и типография «Альфа Принт», 2018. – С. 342–345

118. Пат. 2539228 РФ. Способ стабилизации распадающегося шлака [Текст] / Демин Б.Л., Сорокин Ю.В., Щербаков Е.Н. [и др.]; заявл. 13.06.2012; опубл. 20.01.2015.

119. *Демин, Б.Л.* Стабилизация распадающихся ферросплавных и сталеплавильных шлаков / Б.Л. Демин, Ю.В. Сорокин, Л.А. Смирнов, Е.Н. Щербаков // Перспективы развития металлургии и машиностроения с использованием завершенных фундаментальных исследований и НИОКР: ФЕРРОСПЛАВЫ: Труды научно-практической конференции с международным участием и элементами школы молодых ученых, Екатеринбург, 29 октября – 02 2018 года. – Екатеринбург: ООО Издательство и типография «Альфа Принт», 2018. – С. 342–345.

120. *Сорокин, Ю.В.* Переработка шлаков ЭСПЦ в опытной установке барабанного типа с шаровой насадкой / Ю.В. Сорокин, Б.Л. Демин, Л.А. Смирнов // Сталь. – 2012. – № 3. – С. 70–73.

121. *Горшков, В.С.* Комплексная переработка и использование металлургии-

ческих шлаков в строительстве / В.С. Горшков, С.В. Александров, С.И. Иващенко и др.; под ред. В. С. Горшкова. – М.: Стройиздат, 1985. – 272 с.

122. *Школьник, Я.Ш.* Новая технология и оборудование для переработки шлаковых расплавов / Я.Ш. Школьник, А.Г. Шакуров, М.З. Мандель // *Металлург.* – 2011. – №. 10. – С. 58–60.

123. *Шакуров, А.Г.* Комплексная переработка жидких сталеплавильных шлаков с восстановлением железа и получением качественной товарной продукции / А.Г. Шакуров В.В. Журавлев, В.М. Паршин, Я.Ш. Школьник, А.Д. Чертов // *Сталь.* – 2014. – №. 2. – С. 75–81.

124. *Шакуров, А.Г.* Результаты разработки технологии и оборудования для переработки и стабилизации шлакового расплава в товарный продукт / А.Г. Шакуров, Я.Ш. Школьник, В.В. Журавлев, В.М. Паршин, А.Д. Чертов, В.Н. Ковалев, Д.В. Мороз // *Черная металлургия. Бюллетень научно-технической и экономической информации.* – 2014. – №. 2. – С. 82–86.

125. *Шакуров, А.Г.* Технология и оборудование для переработки и стабилизации жидких сталеплавильных шлаков / А.Г. Шакуров, Я.Ш. Школьник, В.В. Журавлев, И.С. Дубкова, Н.В. Гусева, О.В. Федотов, В.Н. Ковалев // *Проблемы черной металлургии и материаловедения.* – 2013. – №. 2. – С. 44–48.

126. *Бодяков, А.Н.* Анализ методов стабилизации самораспадающихся шлаков / А.Н. Бодяков // «Образование. Наука. Производство»: XII Междунар. молод. форум. – 2020. – С. 1186–1189.

127. *Сорокин, Ю.В.* Стабилизация самораспадающихся шлаков / Ю.В. Сорокин, Б.Л. Демин, В.М. Чижилова, И.А. Ролдугин, А.С. Лавров // *Сталь.* – 2015. – №. 11. – С. 52–56.

128. *Иваница, С.И.* Стабилизация шлаков внепечной обработки стали в условиях ООО «НЛМК-Калуга» / С.И. Иваница, Л.М. Аксельрод, И.В. Кушнерев, С.В. Вербный, Г.С. Ашина, С.А. Коротеев // *Сталь.* – 2018. – №. 1. – С. 20–23.

129. *Кудеярова, Н.П.* Активизация белитовых фаз сталеплавильного шлака в присутствии оксида кальция / Н.П. Кудеярова, Н.П. Бушуева // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова.* – 2016. – №. 5. – С. 151–154.

130. *Шелихов, Н.С.* Романцемент низкотемпературного обжига / Н.С. Шелихов, Р.Р. Сагдиев, Р.З. Рахимов, О.В. Стоянов // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. – Т. 16. – №. 19. – С. 62–65.

131. *Primavera, A.* EAF slag treatment for inert materials' production / A. Primavera, L. Pontoni, D. Mombelli, S. Barella, C. Mapelli // Journal of Sustainable Metallurgy. – 2016. – Т. 2. – С. 3–12.

132. *Li, C.C.* Stabilization and crystal characterization of electric arc furnace oxidizing slag modified with ladle furnace slag and alumina / C.C. Li, C.M. Lin, Y.E. Chang, W.T. Chang, W. Wu, // Metals. – 2020. – Т. 10. – №. 4. – P. 501.

133. *Afolabi, W.N.* Mineral phase crystallization sequence of Delta Steel company (DSC), Ovwian-Aladja, Western Niger Delta Steelmaking slag for use as material in industry / W.N. Afolabi // Int. J. Mater. Sci. Appl. – 2017. – Т. 6. – P. 99.

134. *Salman, M.* Construction materials from stainless steel slags: technical aspects, environmental benefits and aconomic opportunities / M. Salman, M. Dubois, A. Di Maria, Acker K. Van, Balen K. Van // Journal of Industrial Ecology. – 2016. – Vol. 20. – №. 4. – Pp. 854–866.

135. *Fletcher, J.G.* Phase relations in the system CaO-B₂O₃-SiO₂ / J.G. Fletcher, F.P. Glasser // J. Mater. Sci. – 1993. – Vol. 28, 10. – Pp. 2677–2686.

136. *Ghose, A.* Microstructural characterization of doped dicalcium silicate polymorphs / A. Ghose, S. Chopra, J.F. Young // J. Mater. Sci. – 1983. – Vol. 18, 10. – Pp. 2905–2914.

137. *Branca, T.A.* A way to reduce environmental impact of ladle furnace slag / T.A. Branca, V. Colla, R. Valentini // Ironmaking and Steelmaking. – 2009. – Vol. 36. – Pp. 597–602.

138. *Бодяков, А.Н.* Влияние стабилизаторов на состав и структуру металлургического шлака / А.Н. Бодяков, И.Ю. Маркова, В.В. Строкова, М.А. Степаненко // Черные металлы. – 2023. – № 12. – С. 40–48.

139. *Торопов, Н.А.* Диаграммы состояния силикатных систем. Справочник / Н.А. Торопов, В.П. Барзаковский, Н.Н. Курцева, В.В. Лапин. – Л.: Наука, 1969. – 448 с.

140. Атлас шлаков [Текст]: справ. изд. [пер. с нем.]. – М.: Металлургия, 1985. – 208 с.
141. *Mombelli, D.* Laboratory investigation of Waelz slag stabilization / C. Mombelli, S. Mapelli, A. Barella, U. Gruttadauria, Di Landro, // Process Safety and Environmental Protection. 2015. – Vol. 94. – Pp. 227–238.
142. *Sorlini, S.* Reuse of steel slag in bituminous paving mixtures/ S. Sorlini, A. Sanzeni, L. Rondi // Journal of Hazardous Materials. – 2012. – Vol. 209–210. – Pp. 84–91.
143. *Brand, A.S.* Steel furnace slag aggregate expansion and hardened concrete properties/ A.S. Brand, J. R. Roesler // Cement and Concrete Composites. – 2015. – Vol. 60. – Pp. 1–9.
144. *Khobotova, E.B.* Mineral composition of dump blast furnace slag / E.B. Khobotova, M.I. Ignatenko, O.G. Storchak [et al.] // Izvestiya. Ferrous Metallurgy. – 2019. – Vol. 62. – №. 10. – Pp. 774–781.
145. *Накамото, К.* ИК-спектры и спектры КР неорганических и координационных соединений: Пер. с англ. Под ред. Ю.А. Пентина. – М.: Мир, 1991. – 536 с.
146. *Смит, А.Л.* Прикладная ИК-спектроскопия: Основы, техника, аналит. применение / А. Смит; Пер. с англ. Б. Н. Тарасевича. – М.: Мир, 1982. – 327 с.
147. *Ефимова, А.И.* Инфракрасная Фурье-спектроскопия / А.И. Ефимова, В.Б. Зайцев, Н.Ю. Болдырев, П.К. Кашкаров – М.: Физический факультет МГУ, 2008. – 133 с.
148. *Крылов, А.С.* Обработка данных инфракрасной фурье-спектроскопии [Препринт]: метод. пособие: препринт. № 832Ф / А.С. Крылов, А.Н. Втюрин, Ю.В. Герасимова; рец. И.Н. Флеров; РАН, СО, Институт физики им. Л.В. Киренского. – Красноярск: ИФ СО РАН, 2005. – 47 с.
149. *Faber, J.* The Powder Diffraction File: present and future / J. Faber, T. Fawcett // Acta Crystallographica Section B: Structural Science. – 2002. – Vol. 58. – Pp. 325–332.
150. *Cranswick, Lachlan M.D.* Hints on Phase Identification Using Powder X-

ray Diffraction / M.D. Lachlan Cranswick. – 1999. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ccp14.ac.uk/poster-talks/phase-id-1999/html/phaseid.htm>.

151. *Немова, С.В.* Подготовка образцов для просвечивающей и сканирующей электронной микроскопии: новые установки от Leica Microsystems для нанесения покрытий / С.В. Немова // Наука та інновації. – 2014. – №. 2–10. – С. 55–60.

152. *Пушкарь, В.Г.* Современные тенденции развития электронной микроскопии // Заместитель главного редактора д. т. н., профессор А.А. Сытник. – 2016. – №. 1. – С. 41.

153. *Солсбери, А.* Сканирующий электронный микроскоп / А. Солсбери, Г. Роулэнд, Д. Кларк // Успехи физических наук. – 1969. – Т. 99. – №. 12. – С. 673–685.

154. *Зеер, Г.М.* Применение сканирующей электронной микроскопии в решении актуальных проблем материаловедения / Г.М. Зеер, О.Ю. Фоменко, О.Н. Ледяева // Журнал Сибирского федерального университета. Химия. – 2009. – Т. 2. – №. 4. – С. 287–293.

155. *Кларк, Э.* Микроскопические методы исследования материалов / Кларк Э., Эберхардт К. Колин Н. – М.: Техосфера, 2007. – 376 с.

156. *Шеин, Е.В.* Современные приборные методы исследования гранулометрического состава, реологических характеристик и свойств поверхности твердой фазы почв / Е.В. Шеин, Е.Ю. Милановский, Д.Д. Хайдапова, Г.С. Быкова, А.А. Юдина, В.В. Честнова, Д.С. Фомин, В.В. Ключева // Вестник Оренбургского государственного университета. – 2015. – №. 6(181). – С. 151–156.

157. *Грег, С.* Адсорбция, удельная поверхность, пористость: пер. с англ. – 2-е изд. / С. Грег, К. Синг – М.: Мир, 1984. – 306 с.

158. *Медведева, А.В.* Классификация методов контроля пористости материалов / А.В. Медведева, Д.М. Мордасов, М.М. Мордасов // Вестник ТГТУ. – 2012. – Том 18. – № 3. – С. 749–754.

159. *Bondarenko, S.N.* Metallurgical Waste Recycling for Transport Construction / S.N. Bondarenko, A.N. Bodyakov, M.S. Lebedev // Lecture Notes in Civil Engineering. – 2021. – Vol. 147. – Pp. 79–84.

160. *Алпатова, А.А.* Исследование процессов пылеобразования при дуговом нагреве металла и свойств пыли с целью её утилизации: дис. канд. техн. наук / Алпатова Анна Андреевна, Нац. исслед. технол. ун-т. – М. – 2016. – 158 с.

161. *Белоусов, В.В.* Теоретические основы газоочистки: учебник для вузов / В.В Белоусов. – М.: Металлургия, 1988. – 256 с.

162. *Рышка, Э.* Защита воздушного бассейна от выбросов предприятий черной металлургии / пер. с польск. А.Л. Семенова; Ред.: Н.И. Перлова. – М.: «Металлургия», 1979. – 240 с.

163. *Свяжин, А.Г.* Пылеобразование при производстве стали и испарение расплавов Fe-C / А.Г. Свяжин, Д.А. Романович, П.К. Рао // Металлург. – 2016. – № 1. – С. 49–53.

164. *Machado da Silva, J.* Characterization study of electric arc furnace dust phases/ J. Machado da Silva, F.A. Brehm // Materials Research. – 2006. - №. 9(1). – Pp. 25–36.

165. *Бодяков, А.Н.* Анализ нормируемых свойств шлакового щебня в результате кристаллохимической стабилизации / А.Н. Бодяков, И.Ю. Маркова, В.В. Строкова, Д.О. Бондаренко, Е.Н. Губарева, А.И. Буковцова // Строительные материалы. – 2023. – № 12. – С. 20–25.

166. *Топоркова, Ю.И.* Обзор методов переработки пылей электродуговой плавки / Ю.И. Топоркова, Д. Блудова, С.В. Мамяченков, О.С. Анисимова // iPolytech Journal. – 2021. – Т. 25. – № 5(160). – С. 643–680. – DOI 10.21285/1814-3520-2021-5-643-680.

167. *Большаков, В.И.* Дробильно-сортировочные установки / В.И. Большаков, Н.Г. Малич, В.С. Блохин // Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии: сборник научных статей. – Днепропетровск: Институт черной металлургии им. З.И. Некрасова. – 2007. – 410 с.

168. *Гусев, Н.К.* Строительство конструктивных слоев аэродромных и дорожных одежд из местных материалов / Н.К. Гусев // Наука и техника в дорожной отрасли. – 2013. – № 2. – С. 21–22.

169. *Холодков, Н.А.* Особенности программы «Гранд-смета» в строительстве

/ Н.А. Холодков, М.М. Винникова, Н.М. Иванова // Молодёжный вестник Новороссийского филиала Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2023. – Т. 3. – №. 3. – С. 117–121.

170. Приказ № 557/пр от 7 июля 2022 года. «Об утверждении Методики определения сметной стоимости строительства, реконструкции, капитального ремонта, сноса объектов капитального строительства, работ по сохранению объектов культурного наследия (памятников истории и культуры) народов Российской Федерации на территории Российской Федерации».

171. Федеральные единичные расценки на строительные работы ФЕР 81-02-27-2001 с изменениями и дополнениями №9, утвержденные приказом Министерства строительства Российской Федерации от 20 декабря 2021 года № 961/пр и № 962/пр.

172. Приказ от 21 декабря 2020 г. № 812/пр «Об утверждении методики по разработке и применению нормативов накладных расходов при определении сметной стоимости строительства, реконструкции, капитального ремонта, сноса объектов капитального строительства. (в ред. Приказа Минстроя РФ от 02.09.2021 N 636/пр)».

173. Приказ от 11 декабря 2020 года № 774/пр «Об утверждении Методики по разработке и применению нормативов сметной прибыли при определении сметной стоимости строительства, реконструкции, капитального ремонта, сноса объектов капитального строительства».

174. Приказ Министерства транспорта РФ от 16 ноября 2012 г. № 402 «Об утверждении Классификации работ по капитальному ремонту, ремонту и содержанию автомобильных дорог».

175. Постановление Правительства Российской Федерации №658 от 30 мая 2017 года «О нормативах финансовых затрат и Правилах расчета размера бюджетных ассигнований федерального бюджета на капитальный ремонт, ремонт и содержание автомобильных дорог федерального значения».

ПРИЛОЖЕНИЯ

Акт о производственном эксперименте по изучению влияния гранулированной пыли на физические свойства шлака

Утверждаю
Генеральный директор
ООО «Уралметком – Оскол»
П.Г. Коршиков
« 10 » 06 2020г.



Акт

О производственном эксперименте по изучению влияния гранулированной пыли ГОУ на физические свойства шлака.

Мы нижеподписавшиеся составили настоящий акт в том, что 10.06.2020 в электросталеплавильном цехе Оскольского электрометаллургического комбината (ОЭМК) во время выплавки стали в цеху (№ плавки 10136, 17 чаша) в шлаковую чашу производили присадку гранулированной пыли ГОУ, количество и последовательность которой разработаны БГТУ им В.Г. Шухова.

С момента заполнения шлаковой чаши в процессе его транспортировки, слива и охлаждения в специально подготовленной площадке (в шлаковой яме) до момента отгрузки в автотранспорт производился мониторинг температуры и визуальное наблюдение за процессом кристаллизации.

Для дальнейшего исследования стабилизированного шлака произведены отборы проб шлака и передача БГТУ им В.Г. Шухова для дальнейшего исследования.

Начальник электросталеплавильного
отдела УТССП
Начальник ОСиС
ООО «Уралметком – Оскол»
канд. техн. наук, доцент
БГТУ им В.Г. Шухова
Заведующий лабораторией
БГТУ им В.Г. Шухова

С.П. Коршиков

Д.А. Супрун

Ю.К. Рубанов

А.Н. Бодяков

Протоколы расчета конструкций дорожной одежды

Расчет дорожной одежды нежесткого типа по методике ПНСТ 542-2021

(стандартная конструкция I вариант)

5. Конструкция дорожной одежды

Таблица 2. Конструкция дорожной одежды

№ слоя	Наименование материала слоя	Толщина слоя, см		Модуль упругости, МПа			Нормативное сопротивление при изгибе, R_o , МПа	Коэффициент m	Коэффициент a	Влажность, W_p , доли ед.	Коэффициент K_d	Сцепление, C_i , МПа		Угол внутреннего трения, F_i		Плотность, ρ , кг/куб. м.
		Минимальная, h_{min}	Максимальная, h_{max}	Упругий, E_{upr}	Сдвига, $E_{сдв}$	Изгиба, $E_{изг}$						Динамика	Статика	Динамика	Статика	
1	Асфальтобетон А16Вл по ГОСТ Р 58406.2 на БНД 70/100 по ГОСТ 33133	5.0*	5.0*	4150	650	6400	9.50	5.50	5.90	-	-	-	-	-	-	2400
2	Асфальтобетон А22-Нл по ГОСТ Р 58406.2 на БНД 70/100 по ГОСТ 33133	7.0	7.0	4150	650	6400	9.50	5.50	5.90	-	-	-	-	-	-	2400
3	Щебеночная смесь непрерывной гранулометрии для оснований при максимальном размере зерен С4 - 80 мм ГОСТ 25607-2009	25.0	50.0	275	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2000
-	Армостаб - Грунт Д 50/50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	Песок мелкий с содержанием пылевато-глинистой фракции 5% ГОСТ 32824-2014	20.0	30.0	100	-	-	-	-	-	-	2.00	0.004	0.005	24.8	31.0	1850
5	Суглинок легкий	-	-	59	-	-	-	-	-	0.630	1.00	0.012	0.026	9.0	22.2	2000

*В расчёте исключена допустимая толщина износа верхнего слоя = 3.0 см.

6. Исходные данные и результаты проверки расчета на морозоустойчивость

Грунт рабочего слоя	Суглинок легкий
Степень пучинистости	Среднепучинистый
Допустимая величина морозного пучения, см	4.80
Коэффициент, учитывающий влияние глубины залегания УГВ	0.5300
Коэффициент, зависящий от степени уплотнения грунта	1.20
Коэффициент, учитывающий влияние гранулометрического состава	1.30
Коэффициент, учитывающий влияние нагрузки от собственного веса	1.0432
Коэффициент, зависящий от расчетной влажности грунта	1.0304

7. Параметры и методика расчета геосинтетического материала в конструкции дорожной одежды

Методика расчета геосинтетического материала	ОДМ 218.5.002-2008
Геосинтетический материал	Армостаб - Грунт Д 50/50
Характеристики материала:	
Поверхностная плотность, г/кв.м	580
Условный модуль деформации, Н/см	5250
Прочность при растяжении, Н/см	500
Относительное удлинение при разрыве, %	12.5
Ширина, м	2.40
Альфа 1	1.25584
Альфа 2	1.24376
Альфа 3	1.89474
Параметры для расчета общего модуля упругости:	
X1	0.24259

X2	0.75472
X3	2.67742
X4	0.17742
X5	0.05025
X6	0.00000
Параметры для расчета растяжения при изгибе:	
X1	0.24259
X2	0.75472
X3	4.12903
X4	0.17742
X5	0.05025
X6	0.00000
Параметры для расчета на сдвиг:	
X1	0.24259
X2	0.75472
X3	0.41935
X4	0.17742
X5	0.05025
X6	0.00000

8. Расчет прочностных характеристик конструкции дорожной одежды

Требуемые коэффициенты прочности по критерию:	
- упругого прогиба	1.06
- сдвига	0.94
- растяжения при изгибе	0.94
Проверка условия прочности по модулю упругости $E_{общ}/E_{тр}$	1.35
Условие прочности	Выполнено
Запас = $(K_{пр}-K_{тр})/K_{тр} * 100\%$	+60%
Проверка условия прочности по растяжению при изгибе слоя	Асфальтобетон А22Нл по ГОСТ Р 58406.2 на БНД 70/100 по ГОСТ 33133

Кпр.расч. = R_n/Gr	1.71
Условие прочности	Выполнено
Запас = $(K_{пр}-K_{тр})/K_{тр} * 100\%$	+81%
Проверка условия прочности по сдвигоустойчивости слоя	Песок мелкий с содержанием пылевато-глинистой фракции 5% ГОСТ 32824-2014
Запас = $(K_{пр}-K_{тр})/K_{тр} * 100\%$	-44%
Кпр.расч. = $T_{пр}/T$	0.52
Условие прочности	Не выполнено
Проверка условия прочности по сдвигоустойчивости слоя	Суглинок легкий
Запас = $(K_{пр}-K_{тр})/K_{тр} * 100\%$	+0%
Кпр.расч. = $T_{пр}/T$	0.94
Условие прочности	Выполнено
Проверка условия прочности по модулю упругости $E_{общ}/E_{тр}$	1.70
Условие прочности	Выполнено
Запас = $(K_{пр}-K_{тр})/K_{тр} * 100\%$	+60%
Проверка условия прочности по растяжению при изгибе слоя	Асфальтобетон А22Нл по ГОСТ Р 58406.2 на БНД 70/100 по ГОСТ 33133
Кпр.расч. = R_n/Gr	1.88
Условие прочности	Выполнено
Запас = $(K_{пр}-K_{тр})/K_{тр} * 100\%$	+99%
Проверка условия прочности по сдвигоустойчивости слоя	Песок мелкий с содержанием пылевато-глинистой фракции 5% ГОСТ 32824-2014
Запас = $(K_{пр}-K_{тр})/K_{тр} * 100\%$	+4%
Кпр.расч. = $T_{пр}/T$	0.98
Условие прочности	Выполнено
Проверка условия прочности по сдвигоустойчивости слоя	Суглинок легкий
Запас = $(K_{пр}-K_{тр})/K_{тр} * 100\%$	+0%
Кпр.расч. = $T_{пр}/T$	0.94
Условие прочности	Выполнено

Таблица 3. Прочностные характеристики конструкции дорожной одежды.

№ слоя	Наименование материала слоя	Расчетная толщина слоя, см	Общий модуль упругости по слоям, Еобщ, МПа	Показатель прочности:			Предельное активное напряжение сдвига в слое, Тпр, МПа	Расчетное активное напряжение сдвига, Т, МПа	Предельное растягивающее напряжение при изгибе, Rн, МПа	Расчетное растягивающее напряжение в слое, Gr, МПа	Расчетная влажность грунта, Wp, доли ед.	Стоимость, руб/кв.м
				критерий	расчетное значение коэф. прочности	величина, запас (+/-), %						
1	Асфальтобетон А16Вп по ГОСТ Р 59406.2 на БНД 70/100 по ГОСТ 33133	5.0*	306	Упругий прогиб	1.70	+60%	-	-	-	-	-	-
2	Асфальтобетон А22Нп по ГОСТ Р 59406.2 на БНД 70/100 по ГОСТ 33133	7.0	230	Растяжение	1.88	+99%	-	-	4.489	2.392	-	-
3	Щебеночная смесь непрерывной granulометрии для оснований при максимальном размере зерен С4 - 80 мм ГОСТ 25607-2009	28.0	149	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	Армостаб - Грунт Д 50/50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	Песок мелкий с содержанием пылевато-глинистой фракции 5% ГОСТ 32824-2014	27.0	78	Сдвиг	0.98	+4%	0.01702	0.01731	-	-	-	-
5	Оуглинок леплый	-	59	Сдвиг	0.94	+0%	0.01707	0.01813	-	-	0.630	-
Суммарная толщина конструкции.		64.0	Итоговая стоимость конструкции:									

*В расчете исключена допустимая толщина износа верхнего слоя = 3.0 см.

9. Определение типа(вида) асфальтобетонных смесей по ГОСТ Р 58401.1, ГОСТ Р 58406.2 в зависимости от условий движения.

Исходные данные:	
Расчетная нагрузка:	100 кН
Расчетный срок службы асфальтобетона для слоев покрытия (межремонтный срок службы)	12
Результаты расчета:	
Асфальтобетонные смеси по	ГОСТ Р 58406.2
Слои покрытия	
Суммарное расчетное значение нагрузок, ед.	131105
Условия движения	легкие условия движения(Л) - до 0.5 млн приложений

Расчет дорожной одежды нежесткого типа по методике ПНСТ 542-2021
(с использованием стабилизированного шлака 2 вариант)

Б. Конструкция дорожной одежды

Таблица 2. Конструкция дорожной одежды

№ слоя	Наименование материала слоя	Толщина слоя, см		Модуль упругости, МПа			Нормативное сопротивление при катбе, R ₀ , МПа	Коэффициент m	Коэффициент a	Влажность, Wp, доли ед.	Коэффициент Ka	Сцепление, C, МПа		Угол внутреннего трения, F, °		Плотность, ρ, кг/куб.м.
		Мини малая, h _{min}	Макс имал ьная, h _{max}	Упругий промб, m	Сдав, E _{сдв}	Наиб, E _{наиб}						динамика	статика	динамика	статика	
1	Асфальтобетон А16Вл по ГОСТ Р 58406 2 на БНД 70/100 по ГОСТ 33133	5.0*	5.0*	4150	650	6400	9.50	5.50	5.90	-	-	-	-	-	-	2400
2	Асфальтобетон А22Нл по ГОСТ Р 58406 2 на БНД 70/100 по ГОСТ 33133	7.0	7.0	4150	650	6400	9.50	5.50	5.90	-	-	-	-	-	-	2400
3	Шлаковая ЦПС из стабилизированного шлака для оснований 0-60	25.0	50.0	275	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2000
-	Армостаб - Грунт Д 50/50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	Песок из стабилизированного шлака крупный с содержанием пылевато-глинистой фракции меньше 5%	20.0	30.0	130	-	-	-	-	-	-	2.00	0.003	0.005	28.8	34.0	2000
5	Оуглинок легкий	-	-	59	-	-	-	-	-	0.630	1.00	0.012	0.026	9.0	22.2	2000

*В расчете исключена допустимая толщина износа верхнего слоя = 3.0 см.

6. Исходные данные и результаты проверки расчета на морозоустойчивость

Грунт рабочего слоя	Суглинок легкий
Степень пучинистости	Среднепучинистый
Допустимая величина морозного пучения, см	4.80
Коэффициент, учитывающий влияние глубины залегания УГВ	0.5300
Коэффициент, зависящий от степени уплотнения грунта	1.20
Коэффициент, учитывающий влияние гранулометрического состава	1.30
Коэффициент, учитывающий влияние нагрузки от собственного веса	1.0432
Коэффициент, зависящий от расчетной влажности грунта	1.0304

7. Параметры и методика расчета геосинтетического материала в конструкции дорожной одежды

Методика расчета геосинтетического материала	ОДМ 218.5.002-2008
Геосинтетический материал	Армостаб - Грунт Д 50/50
Характеристики материала:	
Поверхностная плотность, г/кв.м	580
Условный модуль деформации, Н/см	5250
Прочность при растяжении, Н/см	500
Относительное удлинение при разрыве, %	12.5
Ширина, м	2.40
Альфа 1	1.25375
Альфа 2	1.24154
Альфа 3	1.92653
Параметры для расчета общего модуля упругости:	
X1	0.24259

X2	0.75472
X3	2.67742
X4	0.17742
X5	0.05687
X6	0.00000
Параметры для расчета растяжения при изгибе:	
X1	0.24259
X2	0.75472
X3	4.12903
X4	0.17742
X5	0.05687
X6	0.00000
Параметры для расчета на сдвиг:	
X1	0.24259
X2	0.75472
X3	0.41935
X4	0.17742
X5	0.05687
X6	0.00000

8. Расчет прочностных характеристик конструкции дорожной одежды

Требуемые коэффициенты прочности по критерию:	
- упругого прогиба	1.06
- сдвига	0.94
- растяжения при изгибе	0.94
Проверка условия прочности по модулю упругости $E_{общ}/E_{тр}$	1.43
Условие прочности	Выполнено
Запас = $(K_{пр}-K_{тр})/K_{тр} * 100\%$	+68%
Проверка условия прочности по растяжению при изгибе слоя	Асфальтобетон А22Нл по ГОСТ Р 58406.2 на БНД 70/100 по ГОСТ 33133

Кпр.расч. = R_n/Gr	1.76
Условие прочности	Выполнено
Запас = $(K_{пр}-K_{тр})/K_{тр} * 100\%$	+86%
Проверка условия прочности по сдвигоустойчивости слоя	Песок шлаковый крупный с содержанием пылевато-глинистой фракции 5%
Запас = $(K_{пр}-K_{тр})/K_{тр} * 100\%$	-45%
Кпр.расч. = $T_{пр}/T$	0.51
Условие прочности	Не выполнено
Проверка условия прочности по сдвигоустойчивости слоя	Суглинок легкий
Запас = $(K_{пр}-K_{тр})/K_{тр} * 100\%$	+0%
Кпр.расч. = $T_{пр}/T$	0.95
Условие прочности	Выполнено
Проверка условия прочности по модулю упругости $E_{общ}/E_{тр}$	1.79
Условие прочности	Выполнено
Запас = $(K_{пр}-K_{тр})/K_{тр} * 100\%$	+68%
Проверка условия прочности по растяжению при изгибе слоя	Асфальтобетон А22Нл по ГОСТ Р 58406.2 на БНД 70/100 по ГОСТ 33133
Кпр.расч. = R_n/Gr	1.93
Условие прочности	Выполнено
Запас = $(K_{пр}-K_{тр})/K_{тр} * 100\%$	+105%
Проверка условия прочности по сдвигоустойчивости слоя	Песок шлаковый крупный с содержанием пылевато-глинистой фракции 5%
Запас = $(K_{пр}-K_{тр})/K_{тр} * 100\%$	+4%
Кпр.расч. = $T_{пр}/T$	0.98
Условие прочности	Выполнено
Проверка условия прочности по сдвигоустойчивости слоя	Суглинок легкий
Запас = $(K_{пр}-K_{тр})/K_{тр} * 100\%$	+0%
Кпр.расч. = $T_{пр}/T$	0.95
Условие прочности	Выполнено

Таблица 3. Прочностные характеристики конструкции дорожной одежды.

№ слоя	Наименование материала слоя	Расчетная толщина слоя, см	Общий модуль упругости по слоям, Еобщ, МПа	Показатель прочности:			Пределное активное напряжение сдвига в слое, Тпр, МПа	Расчетное активное напряжение сдвига, Т, МПа	Пределное растягивающее напряжение при сдвиге, Rn, МПа	Расчетное растягивающее напряжение в слое, Gr, МПа	Расчетная влажность грунта, Wp, доли ед.	Стоимость, руб/кв.м
				критерий	расчетное значение коэф. прочности	величина, запас (+/-), %						
1	Асфальтобетон А16Вп по ГОСТ Р 59406.2 на БНД 70/100 по ГОСТ 33133	5.0*	322	Упругий прогиб	1.79	+68%	-	-	-	-	-	-
2	Асфальтобетон А22Нп по ГОСТ Р 59406.2 на БНД 70/100 по ГОСТ 33133	7.0	242	Растяжение	1.93	+105%	-	-	4.489	2.322	-	-
3	Шлаковая ЦПС из стабилизированного шлака для оснований 0-60	28.0	159	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	Армостаб - Грунт Д 50/50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	Песок из стабилизированного шлака крупный с содержанием пылеватоглинистой фракции меньше 5%	26.0	88	Сдвиг	0.98	+4%	0.01647	0.01674	-	-	-	-
5	Суплинок лепий	-	59	Сдвиг	0.95	+0%	0.01715	0.01813	-	-	0.630	-
Суммарная толщина конструкции:		63.0	Итоговая стоимость конструкции:									

*В расчёте исключена допустимая толщина износа верхнего слоя = 3.0 см.

9. Определение типа(вида) асфальтобетонных смесей по ГОСТ Р 58401.1, ГОСТ Р 58406.2 в зависимости от условий движения.

Исходные данные:	
Расчетная нагрузка:	100 кН
Расчетный срок службы асфальтобетона для слоев покрытия (межремонтный срок службы)	12
Результаты расчета:	
Асфальтобетонные смеси по	ГОСТ Р 58406.2
Слои покрытия	
Суммарное расчетное значение нагрузок, ед.	131105
Условия движения	легкие условия движения(Л) - до 0.5 млн приложений

Расчет дорожной одежды нежесткого типа по методике ПНСТ 542-2021
(с использованием стабилизированного шлака 3 вариант)

Б. Конструкция дорожной одежды

Таблица 2. Конструкция дорожной одежды

№ слоя	Наименование материала слоя	Толщина слоя, см		Модуль упругости, МПа			Нормативное сопротивление при сжатии, R _{сж} , МПа	Коэффициент m	Коэффициент a	Влажность, W _p , доли ед.	Коэффициент K _a	Сцепление, C, МПа		Угол внутреннего трения, F, °		Плотность, ρ, кг/м³
		Минимальная, h _{min}	Максимальная, h _{max}	Упругий, E _{упр} , МПа	Сдвинутый, E _{сдв} , МПа	Изгибаемый, E _{изг} , МПа						Динамика	Статика	Динамика	Статика	
1	Асфальтобетон А16Вп по ГОСТ Р 58406-2 на БНД 70/100 по ГОСТ 33133	5,0*	5,0*	4150	650	6400	9,50	5,50	5,90	-	-	-	-	-	-	2400
2	Асфальтобетон А22Нп по ГОСТ Р 58406-2 на БНД 70/100 по ГОСТ 33133	7,0	7,0	4150	650	6400	9,50	5,50	5,90	-	-	-	-	-	-	2400
3	Щебень шлаковый стабилизированный фракции 20-60 мм с заглинистой мелким шлаком 0-20 мм	25,0	50,0	300	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1800
-	Армостаб - Грунт Д 50/50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	Песок из стабилизированного шлака крупный с содержанием пылевато-глинистой фракции меньше 5%	20,0	30,0	130	-	-	-	-	-	-	2,00	0,003	0,005	28,8	34,0	2000
5	Суглинок легкий	-	-	59	-	-	-	-	-	0,630	1,00	0,012	0,026	9,0	22,2	2000

*В расчёте исключена допустимая толщина износа верхнего слоя = 3,0 см.

6. Исходные данные и результаты проверки расчета на морозоустойчивость

Грунт рабочего слоя	Суглинок легкий
Степень пучинистости	Среднепучинистый
Допустимая величина морозного пучения, см	4.80
Коэффициент, учитывающий влияние глубины залегания УГВ	0.5300
Коэффициент, зависящий от степени уплотнения грунта	1.20
Коэффициент, учитывающий влияние гранулометрического состава	1.30
Коэффициент, учитывающий влияние нагрузки от собственного веса	1.0432
Коэффициент, зависящий от расчетной влажности грунта	1.0304

7. Параметры и методика расчета геосинтетического материала в конструкции дорожной одежды

Методика расчета геосинтетического материала	ОДМ 218.5.002-2008
Геосинтетический материал	Армостаб - Грунт Д 50/50
Характеристики материала:	
Поверхностная плотность, г/кв.м	580
Условный модуль деформации, Н/см	5250
Прочность при растяжении, Н/см	500
Относительное удлинение при разрыве, %	12.5
Ширина, м	2.40
Альфа 1	1.23675
Альфа 2	1.22604
Альфа 3	1.88826
Параметры для расчета общего модуля упругости:	
X1	0.24259

X2	0.78167
X3	2.67742
X4	0.19355
X5	0.05627
X6	0.00000
Параметры для расчета растяжения при изгибе:	
X1	0.24259
X2	0.78167
X3	4.12903
X4	0.19355
X5	0.05627
X6	0.00000
Параметры для расчета на сдвиг:	
X1	0.24259
X2	0.78167
X3	0.41935
X4	0.19355
X5	0.05627
X6	0.00000

8. Расчет прочностных характеристик конструкции дорожной одежды

Требуемые коэффициенты прочности по критерию:	
- упругого прогиба	1.06
- сдвига	0.94
- растяжения при изгибе	0.94
Проверка условия прочности по модулю упругости $E_{общ}/E_{тр}$	1.48
Условие прочности	Выполнено
Запас = $(K_{пр}-K_{тр})/K_{тр} * 100\%$	+73%
Проверка условия прочности по растяжению при изгибе слоя	Асфальтобетон А22Нл по ГОСТ Р 58406.2 на БНД 70/100 по ГОСТ 33133

Таблица 3. Прочностные характеристики конструкции дорожной одежды.

№ слоя	Наименование материала слоя	Расчетная толщина слоя, см	Общий модуль упругости и по слоям, Еобщ, МПа	Показатель прочности:			Пределное активное напряжение сдвига в слое, Тпр, МПа	Расчетное активное напряжение сдвига, Т, МПа	Пределное растягивающее напряжение при изгибе, Rн, МПа	Расчетное растягивающее напряжение в слое, Gr, МПа	Расчетная влажность грунта, Wp, доли ед.	Стоимость, руб/кв.м
				критерий	расчетное значение коэф. прочности	величина, запас (+/-), %						
1	Асфальтобетон А16Вл по ГОСТ Р 58406 2 на БНД 70/100 по ГОСТ 33133	5.0*	331	Упругий прогиб	1.84	+73%	-	-	-	-	-	-
2	Асфальтобетон А22Нл по ГОСТ Р 58406 2 на БНД 70/100 по ГОСТ 33133	7.0	252	Растяжение	1.96	+108%	-	-	4.489	2.286	-	-
3	Щебень шлаковый стабилизированный фракции 20-60 мм с заклипкой мелким шлаком 0-20 мм	29.0	167	-	-	-	-	-	-	-	-	-
-	Армостаб - Грунт Д 50/50	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	Песок из стабилизированного шлака крупный с содержанием пылевато-глинистой фракции меньше 5%	25.0	87	Сдвиг	0.99	+5%	0.01596	0.01612	-	-	-	-
5	Суглинок легкий	-	59	Сдвиг	0.96	+1%	0.01692	0.01766	-	-	0.630	-
Суммарная толщина конструкции:		63.0	Итоговая стоимость конструкции:									

*В расчёте исключена допустимая толщина износа верхнего слоя = 3.0 см.

9. Определение типа(вида) асфальтобетонных смесей по ГОСТ Р 58401.1, ГОСТ Р 58406.2 в зависимости от условий движения.

Исходные данные:	
Расчетная нагрузка:	100 кН
Расчетный срок службы асфальтобетона для слоев покрытия (межремонтный срок службы)	12
Результаты расчета:	
Асфальтобетонные смеси по	ГОСТ Р 58406.2
Слои покрытия	
Суммарное расчетное значение нагрузок, ед.	131105
Условия движения	легкие условия движения(Л) - до 0.5 млн приложений

Полнотекстово №

Утверждено приказом № 421 от 4 августа 2020 г. Министра «ФРБ Беларуси» приказом № 557 от 7 июля 2022 г.

Наименование триграммного продукта

ГРДНП-С.И.ИТЭ. Версия 2023.3

Приказ Министра Экономик от 26.12.2019 № 87Е/тр

Приказ Министров - СССР от 24.12.2019 № 421/пр.

Приказ Министров - от 21.12.200 № 81 /пр/

Протокол № 17 от 11.12.2020 № 774/пр.

Результаты привел Министр юстиции России об утверждении дополнений и изменений к основным нормативам

Реквизиты письма Министра Госзда об индексации изменения сметной стоимости «строительства» были взяты с федерального реестра сметных нормативов и размещены в § 4842401 государственной информационной системы ценообразования в строительстве под непосредственным контролем Минздравнадзора. Расчеты индексации изменения сметной стоимости «строительства» сделаны в «Программе Минздравнадзора» – программе-таблице и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации от 5 июля 2014 г. № 3.6/Гр»

Примечание: Пресс-релизы от 8 марта 2020 г. №172пр., приказ Министра России от 31 июня 2020 г. №294/тс, Приказ Министерства России от 30 июля 2020 г. №252пр., Приказ Министерства России от 3 октября 2020 г. №363пр., Приказ Министра России от 09 февраля 2021 г. №514пр., Приказ Министра России от 24 мая 2021 г. №321пр., Повеление министра России от 24 июля 2021 г. №402пр., Приказ Министра России от 14 сентября 2021 г. №574бпр., приказ Министра России от 20 декабря 2021 г. №982апр.

Приказ Министра России от 27.07.2002 № 557/пр.

Приказ Министров =оссии от 24.03.2021 № 63Е/тр

Приказ Министра Эссии от 22.34.2022 № 317/пр

Письмо Министра России от 28.12.2023 № 82453

И

Решением городского совета от 21.01.2019г.

3. БУДУЩЕЕ КРАСНОГО РАЙОНА

Составлен	Евгений Владимирович	Методом
-----------	----------------------	---------

ЛОКАЛЬНЫЙ СМЕТНЫЙ РАСЧЕТ (СМЕТА) № 1

$$(H_2(11000000, 05200000, 00000000), T11 \cup T21 \cup T31 \cup T41)$$

Составлен(а) в текущем (базисном) уровне цен | Квартал 2024 года (71.01.2770)

№ п/п	Обозначения	Наименование работ и затрат	Единица измерения	Количество			Сметная стоимость в базисном уровне цен (в том числе в уровне цен (г. 8) для ресурсов, отсутствующих в ФЭИ), руб.			Индекс	Сметная стоимость в текущем уровне цен, руб.
				на единицу	код функции	всего с учетом коэффициента	на единицу	код функции	всего		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Итого по разделу 1 Вариант 1:											
		Итого прямые затраты (справочно)							26 577,84		394343,74
		в том числе:							0,00		
		Оплата труда рабочих, эксплуатируемых машин							153,02		1376,02
		в том числе оплата труда машинистов (ОТМ)							3470,85		37413,65
		Материалы							148,76		1873,65
		в том числе:							12 950,07		355278,45
		Материалы без учета для ликвидации последствий							0,00		0,00
		Дополнительная перевозка							28 267,74		304776,24
		Строительные работы							4 685,63		50513,25
		Строительные работы							37 412,41		403055,78
		в том числе:							12 726,03		352292,02
		оплата труда							153,02		1376,02
		эксплуатация машин и механизмов							3 470,05		37413,65
		в том числе оплата труда машинистов (ОТМ)							148,76		1873,65
		материалы							28 267,74		304776,24
		накладные расходы							442,29		4767,88
		сметная прибыль							392,28		4238,78
		Дополнительная перевозка (учитывается стоимость строительных работ)							4 635,03		50010,25
		Итого ФОТ (справочно)							302,37		3240,56
		Итого накладные расходы (справочно)							442,29		4767,88
		Итого сметная прибыль (справочно)							192,20		4220,70
		Итого по разделу 1 Вариант 1							37 412,41		403055,78
		в том числе:							0,00		0,00
		материальные ресурсы, отсутствующие в ФЭИ							16 668,75		181345,15
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Итого по разделу 2 Вариант 2:											
		Итого прямые затраты (справочно)							80 253,81		527701,55
		в том числе:							0,00		0,00
		Оплата труда рабочих, эксплуатируемых машин							152,46		1543,52
		в том числе оплата труда машинистов (ОТМ)							3438,03		37061,96
		Материалы							147,74		1856,05
		Строительные работы							26 763,00		288905,14
		в том числе:							37 180,00		336120,40
		оплата труда							152,46		1543,52
		эксплуатация машин и механизмов							3 438,03		37061,96
		в том числе оплата труда машинистов (ОТМ)							147,74		1856,05
		материалы							26 763,00		288905,14
		накладные расходы							498,07		4777,99
		сметная прибыль							388,44		4167,36
		Итого ФОТ (справочно)							299,00		3228,61
		Итого накладные расходы (справочно)							498,07		4777,99
		Итого сметная прибыль (справочно)							388,44		4167,36
		Итого по разделу 2 Вариант 2							31 880,00		336120,40
		в том числе:							0,00		0,00
		материальные ресурсы, отсутствующие в ФЭИ							24 000,77		268349,56
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Итого по разделу 3 Вариант 3:											
		Итого прямые затраты (справочно)							32 700,45		552511,96
		в том числе:							0,00		0,00
		Оплата труда рабочих, эксплуатируемых машин							136,23		1791,96
		в том числе оплата труда машинистов (ОТМ)							1 937,95		43097,00
		Материалы							194,58		1964,77
		Строительные работы							26 406,28		307621,10
		в том числе:							33 671,15		362075,10
		оплата труда							136,23		1791,96
		эксплуатация машин и механизмов							1 937,95		43097,00
		в том числе оплата труда машинистов (ОТМ)							194,58		1964,77
		материалы							26 530,27		307621,10
		накладные расходы							513,51		5635,84
		сметная прибыль							457,19		4929,51
		Итого ФОТ (справочно)							350,01		3701,73
		Итого накладные расходы (справочно)							513,51		5635,84
		Итого сметная прибыль (справочно)							457,19		4929,51
		Итого по разделу 3 Вариант 3							33 671,15		362075,10
		в том числе:							0,00		0,00
		материальные ресурсы, отсутствующие в ФЭИ							25 443,95		297276,88

Титульный лист рекомендаций по использованию отходов электрометаллургического производства для получения высокопрочных каменных материалов для дорожного строительства

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМ. В.Г. ШУХОВА



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной
и инновационной деятельности,
д-р техн. наук, профессор
Т.М. Давыденко

«1» февраля 2023 г.

РЕКОМЕНДАЦИИ
по использованию отходов электрометаллургического производства
для получения высокопрочных каменных материалов
для дорожного строительства

РАЗРАБОТАНО

заведующий кафедрой:

д-р техн. наук, профессор

В.В. Строкова
«26» января 2023 г.

Исполнители:

канд. техн. наук

И.Ю. Маркова
«26» января 2023 г.

соискатель

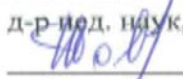
А.Н. Бодяков
«26» января 2023 г.

Белгород 2023 г.

Титульный лист стандарта организации СТО 02066339–054–2023

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ им. В.Г. ШУХОВА
(БГТУ им. В.Г. Шухова)

СТАНДАРТ ОРГАНИЗАЦИИ**СОГЛАСОВАНО:**

Проректор по научной и
инновационной деятельности
д-р техн. наук, профессор
 Т.М. Давыденко
«21» июне 2023 г.

УТВЕРЖДАЮ:

Ректор БГТУ им. В.Г. Шухова,
д-р экон. наук, профессор
 С.Н. Глаголев
«21» июне 2023 г.

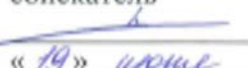
**ГРАНУЛИРОВАННЫЙ СТАБИЛИЗИРУЮЩИЙ АГЕНТ НА ОСНОВЕ
ПЫЛИ ДУГОВЫХ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ПЕЧЕЙ**

Технические условия
СТО 02066339-054-2023

РАЗРАБОТАН:

Научный руководитель:
канд. техн. наук
 И.Ю. Маркова
«19» июне 2023 г.

Исполнители:

соискатель
 А.Н. Бодяков
«19» июне 2023 г.

Белгород 2023 г.

Титульный лист стандарта организации СТО 02066339-055-2023

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
БЕЛГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ им. В.Г. ШУХОВА
(БГТУ им. В.Г. Шухова)

СТАНДАРТ ОРГАНИЗАЦИИ

СОГЛАСОВАНО:

Проректор по научной и
инновационной деятельности
д-р пед. наук, профессор
Т.М. Давыденко
«21» июня 2023 г.

УТВЕРЖДАЮ:

Ректор БГТУ им. В.Г. Шухова,
д-р экон. наук, профессор
С.Н. Глаголев
«19» июня 2023 г.



ВЫСОКОПРОЧНЫЕ КАМЕННЫЕ МАТЕРИАЛЫ ИЗ
СТАБИЛИЗИРОВАННОГО МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО ШЛАКА

Технические условия
СТО 02066339-055-2023

РАЗРАБОТАН:

Научный руководитель:
канд. техн. наук
И.Ю. Маркова
«19» июня 2023 г.

Исполнители:

соискатель
А.Н. Бодяков
«19» июня 2023 г.

Белгород 2023 г.

Акт об испытаниях



АКТ
об испытании щебня,
полученного в результате кристаллохимической стабилизации
шлакового расплава

г. Сим

« 3 » июле 2023 г.

Комиссия в составе: представители от ООО «СтройМонтажКонсалтинг»
начальник дорожно-строительной лаборатории
Л.И. Тамаровская
ведущий инженер-лаборант Ю.А. Сурина
представители от БГТУ им. В.Г. Шухова
д-р техн. наук, проф. В.В. Строкова
канд. техн. наук И.Ю. Маркова
соискатель А.Н. Бодяков

участвовала в оценке физико-механических свойств щебня, полученного из стабилизированного шлака.

Наименование продукции: Щебень, полученный в результате кристаллохимической стабилизации шлакового расплава.

Сведения об образцах, их идентификация: пробы стабилизированного в мешках шлакового щебня различных фракций: 5-10; 10-20; 20-40; 40-60. Образцы предварительно промаркированы.

Дата испытаний образцов: « 3 » июле 2023 г.

Испытания проведены на соответствие требованиям: ГОСТ 3344-83 «Щебень и песок шлаковые для дорожного строительства. Технические условия» (с Изменениями № 1). Физико-механические свойства стабилизированного шлака оценивались в соответствии с ГОСТ 8269.0-97 «Щебень и

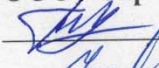
гравий из плотных горных пород и отходов промышленного производства для строительных работ. Методы физико-механических испытаний» (с Изменениями № 1, 2)

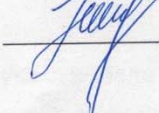
Результаты испытаний шлака стабилизированного в заводских условиях:

Фр, мм	Марка по			Потеря массы при испытании на, %:			Устойчивость против распада
	прочности	истира- емости	морозо- стойкости	прочность	истира- емость	морозо- стойкость	
5-10	1200	ИП	F50	13,15	26,23	3,97	УС1
10-20				13,28	26,56	4,11	
20-40				14,00	27,30	4,12	
40-60	1000			15,12	27,30	4,41	

Физико-механические показатели свойств стабилизированного шлака всех фракций полностью соответствуют требованиям нормативных документов.

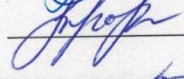
Представители от
ООО «СтройМонтажКонсалдинг»

 Л.И. Тамаровская

 Ю.А. Сурина

Представители
от БГТУ им. В.Г. Шухова

 В.В. Строкова

 И.Ю. Маркова

 А.Н. Бодяков

Протокол о намерениях

ПРОТОКОЛ О НАМЕРЕНИЯХ

г. Сим

«14» июля 2020 г.

Разработанные рецептурно-технологические параметры получения стабилизированного шлака путем кристаллохимической стабилизации шлакового расплава гранулированной пылью дуговых сталеплавильных печей, обеспечивают получение высокопрочного каменного материала с маркой по прочности М1200, по морозостойкости F50, по истираемости ИП, устойчивостью структуры УС1, что позволяет классифицировать его как шлаковый щебень, пригодный для строительства и реконструкции автомобильных дорог в качестве оснований.

Физико-механические свойства полученного материала позволяют применять его в дорожном строительстве без ограничений. С использованием каменного материала из стабилизированного металлургического шлака разработана конструкция автомобильной дороги, предполагающая замену природного каменного материала. Экономический эффект от применения каменного материала из шлакового щебня с учетом затрат на его стабилизацию составляет порядка 15 %

В связи с вышеизложенным, мы нижеподписавшиеся, главный инженер ООО «СтройМонтажКонсалдинг» К.В. Насонов и первый проректор Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова д.т.н., проф. Е.И. Евтушенко, составили настоящий протокол о том, что результаты работы по технологии стабилизации шлака для щебня оснований автомобильных дорог прошли апробацию и испытание, одобрены и будут использованы при реализации работ на объекте «Строительство и реконструкция автомобильной дороги М-5 "Урал" - от Москвы через Рязань, Пензу, Самару, Уфу до Челябинска. Реконструкция автомобильной дороги М-5 "Урал" - от Москвы через Рязань, Пензу, Самару, Уфу до Челябинска на участке км 1564+000 - км 1609+000, Челябинская область (III этап)» согласно рекомендациям и технологическому регламенту, разработанным д.т.н., проф. В.В. Строковой, к.т.н. И.Ю. Марковой и соискателем А.Н. Бодяковым.

Главный инженер
ООО «СтройМонтажКонсалдинг»



К.В. Насонов

Первый проректор
БГТУ им. В.Г. Шухова



Е.И. Евтушенко

Акт об апробации результатов работы



УТВЕРЖДАЮ

Главный инженер

ООО «СтройМонтажКонсалтинг»

К.В. Насонов

2023 г.

АКТ

об апробации результатов научно-исследовательской работы
на тему «Технология стабилизации шлака для щебня оснований автомо-
бильных дорог»

Мы нижеподписавшиеся, представитель ООО «СтройМонтажКонсалдинг» главный инженер К.В. Насонов, с одной стороны, и представители БГТУ им. В.Г. Шухова: заведующий кафедрой материаловедения и технологии материалов, д-р техн. наук, профессор В.В. Строкова; доцент кафедры материаловедения и технологии материалов, канд. техн. наук И.Ю. Маркова; соискатель кафедры материаловедения и технологии материалов А.Н. Бодяков, с другой стороны, составили акт о нижеследующем.

Результаты научно-исследовательской работы Бодякова А.Н. по разработке технологического решения, обеспечивающего кристаллохимическую стабилизацию шлакового расплава для щебня оснований автомобильных дорог были использованы на объекте «Строительство и реконструкция автомобильной дороги М-5 "Урал" - от Москвы через Рязань, Пензу, Самару, Уфу до Челябинска. Реконструкция автомобильной дороги М-5 "Урал" - от Москвы через Рязань, Пензу, Самару, Уфу до Челябинска на участке км 1564+000 - км 1609+000, Челябинская область (III этап)». Стабилизированный шлаковой щебень был использован в качестве нижнего слоя основания дорожной одежды на участке автодороги протяженностью 0,3 км.

От ООО «СтройМонтажКонсалтинг»



К.В. Насонов

от БГТУ им. В.Г. Шухова

В.В. Строкова

И.Ю. Маркова

А.Н. Бодяков

Справка о внедрении результатов работы в учебный процесс

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по образовательной деятельности

В.Г. Шухова,

канд. техн. наук, доцент

В.М. Поляков

«28» августа 2023 г.

**СПРАВКА****о внедрении результатов научно-исследовательской работы
в учебный процесс**

Теоретические положения, результаты научно-исследовательской работы и промышленного внедрения используются в учебном процессе при подготовке бакалавров по направлению 08.03.01 – «Строительство» образовательных программ «Автомобильные дороги и аэродромы», «Экспертиза и технологии перспективных материалов»; магистров направлений 08.04.01 – «Строительство» образовательных программ «Автомобильные дороги» и «Дорожно-строительные материалы и технологии»; специалистов по направлению 08.05.02 – «Строительство, эксплуатация, восстановление и техническое прикрытие автомобильных дорог, мостов и тоннелей» профиль «Строительство (реконструкция), эксплуатация и техническое прикрытие автомобильных дорог».

Зав. кафедрой материаловедения
и технологии материалов,
д-р техн. наук, профессор

В.В. Строкова

Зав. кафедрой автомобильных и
железных дорог им. А.М. Гридчина
канд. техн. наук, доцент

Е.А. Яковлев