

На правах рукописи



БОДЯКОВ АЛЕКСАНДР НИКОЛАЕВИЧ

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

Специальность 2.1.5. Строительные материалы и изделия

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Белгород – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова»

- Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Маркова Ирина Юрьевна
- Официальные оппоненты: **Бондарев Борис Александрович**,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Липецкий государственный
технический университет»,
профессор кафедры
«Строительное материаловедение и
дорожные технологии»
- Иноземцев Сергей Сергеевич**,
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Национальный
исследовательский Московский
государственный строительный
университет»,
доцент кафедры
«Строительное материаловедение»
- Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Сибирский государственный
автомобильно-дорожный университет»

Защита состоится «31» мая 2024 года в 13⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета 24.2.276.02, созданного на базе ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» по адресу: 308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46, ауд. 214.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова» и на сайте https://gos_att.bstu.ru/dis/Bodyakov

Автореферат разослан «___» _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Суслов Денис Юрьевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 РФФИ 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 ре-

шения 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 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 (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 закономерности 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 ИШ, 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, стабилизи-

рованного 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.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Дефицит качественных минеральных материалов для строительной отрасли вызван рядом причин и обусловлен, прежде всего, ограничениями на добычу из-за соображений экологической безопасности. Возможность замены традиционного минерального сырья, такого как песок и щебень, другими продуктами затруднена, из-за отсутствия материалов, обладающих комплексом требуемых базовых свойств. В качестве альтернативных сырьевых ресурсов для дорожно-строительной отрасли рассматривают отходы различных производств. Однако, для обеспечения широкомасштабного применения некондиционного техногенного сырья требуется применение технологических решений, обеспечивающих придание отходам промышленности комплекс заданных свойств.

Среди многотоннажного перспективного техногенного сырья металлур-

гические шлаки занимают одну из лидирующих позиций. На территории Российской Федерации ежегодно образуется около 30 млн тонн отвальных металлургических шлаков в год. Повторное использование сталеплавильного шлака позволит снизить прессинг на окружающую среду и потребление природных минерально-сырьевых ресурсов. Несмотря на достаточное количество имеющихся схем переработки шлаковых отвалов, на сегодняшний день не в полной мере решена проблема шлакопереработки особых, самораспадающихся шлаков черной металлургии в виду того, что в процессе твердения и охлаждения они быстро превращаются в тонкодисперсный порошок.

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 различных производств путем введения стабилизирующего агента на стадии слива расплава, обеспечивающей образование твердых растворов с высокотемпературными формами двухкальциевого силиката и трансформацией в низкотемпературные полиморфные модификации.

В качестве сырьевых компонентов в работе использованы: пробы металлургических шлаков АО «Оскольский электрометаллургический комбинат (ОЭМК) им. А.А. Угарова» (Белгородская обл., г. Старый Оскол); пыль газоочистных установок дуговых сталеплавильных печей (ДСП) того же предприятия; плав соды кальцинированной щелочной ОХК «Щекиноазот» (Тульская обл., Щекинский р-н, р.п. Первомайский); хромитовый песок ООО «ДИАЛ-ГУПП» (г. Екатеринбург). При апробации работы в производственных условиях использован шлаковый расплав.

Исследование свойств шлака. Для изучения физико-химических свойств и технологических характеристик были отобраны образцы шлака, полученные по различным технологиям, в различные временные интервалы и из различных плавов. Существенных отличий в составе проб шлака не отмечается (табл. 1).

Таблица 1 – Химический состав проб шлака в пересчете на оксиды

№ пробы	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
1	40,49	28,66	17,15	7,71	3,73	1,10	0,32	0,20	0,12	0,12	0,07	0,06
2	39,73	30,04	17,39	8,67	2,39	0,82	0,25	0,17	0,16	0,05	0,04	0,14
3	34,30	29,21	22,12	9,71	3,17	0,67	0,13	0,18	0,22	0,15	0,08	0,15

Примечание: проба № 1 – отвальный шлак гидравлического охлаждения;
 проба № 2 – шлак воздушного охлаждения;
 проба № 3 – шлак гидравлического охлаждения

Согласно полученным данным о химическом составе, исследуемые пробы шлаков являются основными активными материалами в виду преобладания основных оксидов (CaO, Fe₂O₃, MgO, MnO) и значений модуля актив-

ности ($\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$) $M_a=0,10-0,13$.

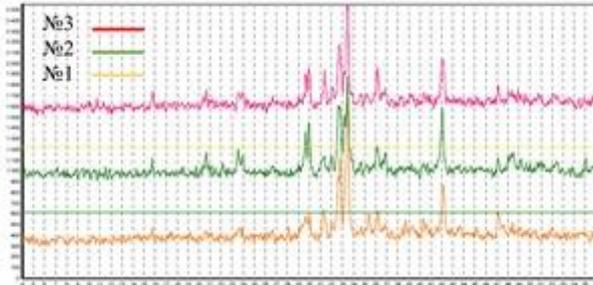


Рис. 1 – Рентгенофазовый анализ проб шлаков ОЭМК

($d(A) = 2,68; 1,933; 1,704; 1,482; 1,450$); $3\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ($d(A) = 4,004; 2,78; 1,910; 1,566$); $\text{MgO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ ($d(A) = 2,02, 2,46$); $2\text{CaO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$ ($d(A) = 3,71; 3,06; 2,85; 2,436$).

Основное различие проб шлаков заключается в степени дефектности частиц шлака в зависимости от технологии охлаждения шлакового расплава (рис. 2).

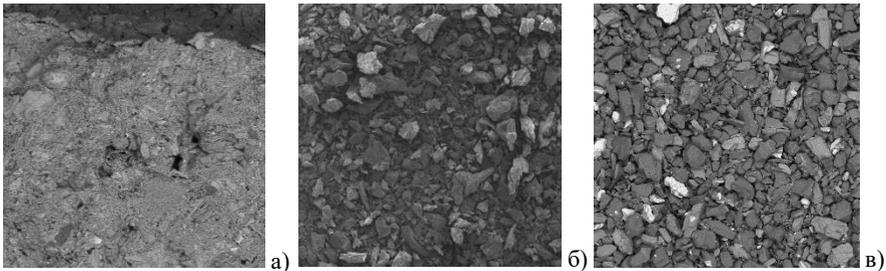


Рис. 2 – Структурные особенности проб шлаков в зависимости от технологии охлаждения: а) отвалный шлак гидравлического охлаждения; б) шлак воздушного охлаждения; в) шлак гидравлического охлаждения

Отвалный шлак характеризуется неоднородной зональной структурой образцов, обусловленной наличием примесных включений и различных дефектов (рис. 3). Примеси в виде оксидов и гидроксидов железа, алюминия, кальция и магния способствуют образованию различных фаз и неоднородному распределению их в кристаллической структуре. Кроме того, при охлаждении шлака происходит выделение газов с образованием пузырьков, которые приводят к образованию структурных зон с различной степенью дефектности. Воздействие высоких температур и механических нагрузок при обработке и транспортировке шлака также оказывает влияние на формирование структурных дефектов. Неоднородная зональная структура шлака без стабилизации обуславливает его конечные свойства.

Исследование свойств стабилизаторов. Проанализированы свойства трех видов отходов различных производств с целью установления возмож-

По данным рентгенофазового анализа (рис. 1) основной фазой до стабилизации шлаков является $\gamma\text{-}2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ ($d(A) = 1,637; 1,800; 1,91; 2,745; 3,01; 3,834; 4,311$); присутствуют: MgO ($d(A) = 2,43; 2,108; 1,49$); $\text{Ca}(\text{OH})_2$

ности и эффективности использования их для кристаллохимической стабилизации основного металлургического шлака.

Используемые в работе стабилизаторы существенно отличаются друг от друга по внешнему виду (рис. 4) и составу (табл. 2).

Несмотря на существенные различия каждый из стабилизаторов содержит в своем составе различное количество и сочетание ионов (Na^+ , Si^{4+} , Mg^{2+} , Al^{3+} , Ca^{2+} , K^+), способных оказывать непосредственное влияние на фазовые превращения в процессе стабилизации. Феррохромовая руда и пыль ДСП характеризуются достаточно высоким содержанием таких ионов (переходные или d-элементы) как: Fe^{3+} , Cr^{3+} (для ФР); Fe^{3+} , Zn^{2+} , Mn^{7+} (для ДСП). Все они представлены в форме оксидов, присутствие которых, как известно, способствует сохранению в составе шлака гидравлически активного двухкальциевого силиката в виде высокотемпературных α - и β -модификаций. Наличие оксида Na_2O в составе содощелочного плава может способствовать снижению температуры межфазных переходов. Таким образом, проведенный анализ химического состава материалов, рассматриваемых в качестве стабилизаторов металлургического шлака, позволил установить целесообразность их использования.

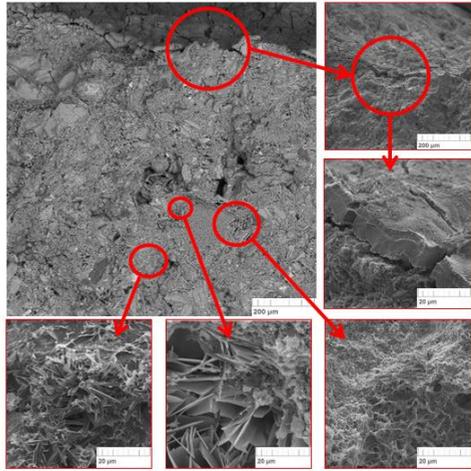


Рис. 3 – Микроструктура отвального шлака

Феррохромовая руда и пыль ДСП характеризуются достаточно высоким содержанием таких ионов (переходные или d-элементы) как: Fe^{3+} , Cr^{3+} (для ФР); Fe^{3+} , Zn^{2+} , Mn^{7+} (для ДСП). Все они представлены в форме оксидов, присутствие которых, как известно, способствует сохранению в составе шлака гидравлически активного двухкальциевого силиката в виде высокотемпературных α - и β -модификаций. Наличие оксида Na_2O в составе содощелочного плава может способствовать снижению температуры межфазных переходов. Таким образом, проведенный анализ химического состава материалов, рассматриваемых в качестве стабилизаторов металлургического шлака, позволил установить целесообразность их использования.



Рис. 4 – Внешний вид стабилизаторов:

а) феррохромовая руда (ФР); б) содощелочной плав (СП); в) пыль ДСП

Таблица 2 – Химический состав стабилизаторов

Вид стабил.	Na_2O	SiO_2	MgO	Al_2O_3	Cl	CaO	SO_3	Fe_2O_3	K_2O	ZnO	MnO	Cr_2O_3
ФР	–	1,6	9,36	15,1	–	0,41	0,03	27,3	0,04	–	0,28	41,2
СП	97,88	0,69	0,39	0,36	0,24	0,09	0,08	0,05	0,04	–	–	–
ДСП	8,05	6,51	4,35	0,48	0,55	10,87	1,16	54,62	6,19	3,85	2,33	0,35

Исследование влияния кристаллохимической стабилизации на свойства шлака. Для установления возможности и эффективности использования отходов различного вида в качестве стабилизаторов в лабораторных условиях пробу распавшегося сталеплавильного шлака воздушного охлаждения помещали в высокотемпературные тигли и расплавляли в плавильной печи с эжекционной горелкой ППЭГ-5/15 при температуре 1460–1480 °С, 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. В процессе охлаждения на воздухе модельный шлак полностью распадался в порошок. Затем в такую же навеску шлака добавляли стабилизатор, предварительно перемешав в сухом состоянии непосредственно перед плавкой. Навеску 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 %. Оценка стабилизированной части шлака проводили визуально. Для оценки процентного выхода стабилизированной фракции шлакового щебня производили отсеивание нестабилизированной части через сито с размером ячейки 0,63 мм. Расчет распавшейся фракции оценивали по массе просеянного вещества.

Исследование макро- и микроструктуры образцов (рис. 5) стабилизированного в лабораторных условиях шлака позволило выявить отличия в пористости материала в зависимости от применяемого стабилизатора. Введение феррохромовой руды в шлаковый расплав приводит к формированию крупных вытянутых пор, до 1500 мкм в длину и до 200 мкм в ширину (рис. 5, а), что 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, с размерами <500 мкм во всех направлениях (рис. 5, б). Наиболее плотная структура стабилизированного шлака отмечается при использовании пыли ДСП (рис. 5, в). Размер пор от 10 до 500 мкм в разных направлениях, но 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.

Оценка процента выхода стабилизированного шлака в зависимости от вида и количества вводимого стабилизатора (рис. 6) показала, что максимальной эффективностью в качестве стабилизатора характеризуется пыль ДСП, обеспечивая 98–100 % выход, что на 20 и 30 % больше, чем при использовании содощелочного плава и феррохромовой руды соответственно.

Рассмотренные стабилизаторы проранжированы в следующей последовательности по увеличению выхода стабилизированного шлака при их использовании: феррохромовая руда → содощелочной плав → пыль ДСП.

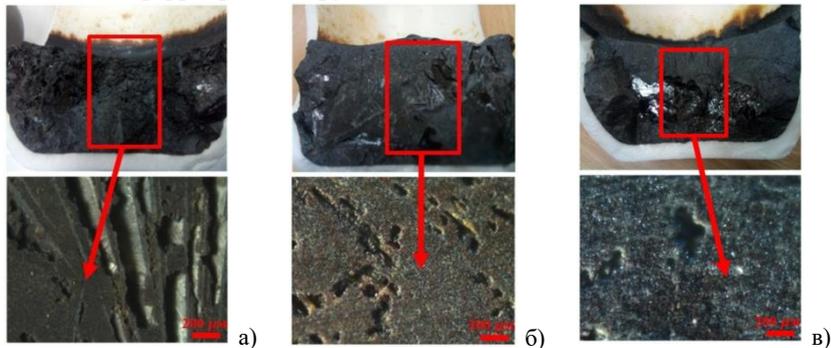


Рис. 5 – Структурные особенности стабилизированного шлака при использовании: а) феррохромовой руды; б) содощелочного плав; в) пыли ДСП

Таким образом, анализ зависимости выхода стабилизированного шлака и его структурных особенностей от вида и содержания стабилизатора показал, что наиболее эффективным стабилизатором является пыль ДСП. Ее использование в количестве от 2 до 5 % позволяет получать полностью стабилизированную фракцию шлака с минимальной пористостью. В этой связи дальнейшие экспериментальные исследования, как в лабораторных, так и в производственных условиях, производился с использованием наиболее эффективного стабилизатора – пыли ДСП.

Петрографические исследования образцов шлака, стабилизированного пылью ДСП (рис. 7) показали, что он имеет плотное строение, с включением округлых пор различной формы.

Шлак характеризуется порфиroidной микроструктурой: относительно идиоморфные более крупные кристаллы погружены в скрытокристаллическую массу. Отмечается определенная ориентировка кристаллов, хотя преобладают разноориентированные тесно переплетающиеся и сменяющие друг друга индивиды и агрегаты.

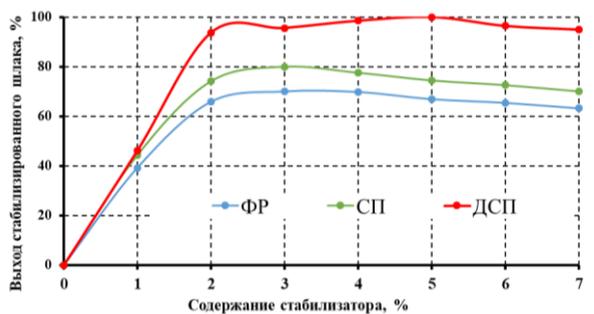


Рис. 6 – Зависимость выхода стабилизированного шлака от содержания и вида стабилизатора

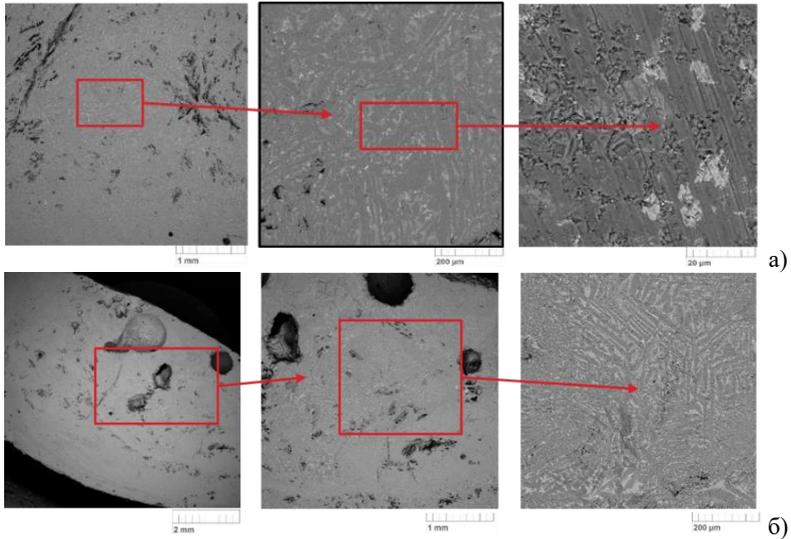


Рис. 7 – Структурные особенности шлифов стабилизированного шлака:
а) 2 % пыли ДСП; б) 5 % пыли ДСП

По данным энергодисперсионного анализа (рис. 8) установлено, что в структуре стабилизированных образцов отчетливо видны две фазы: кремнийсодержащие кристаллы белита (матрица) с включениями ферритов кальция ($2\text{CaO}\cdot\text{Fe}_2\text{O}_3$).

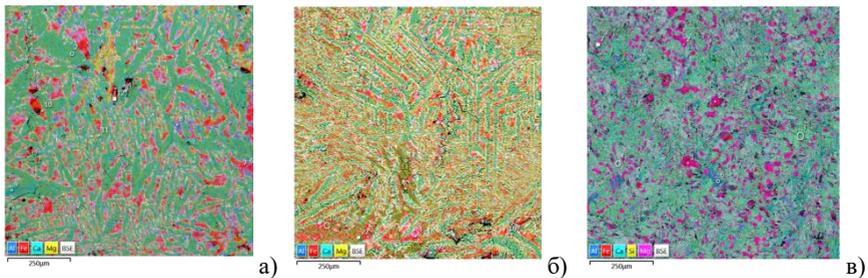


Рис. 8 – Многослойная карта ЭДС анализа стабилизированного шлака:
а) 2 % пыли ДСП в лабораторных условиях; б) 5 % пыли ДСП
в лабораторных условиях; в) 2 % пыли ДСП в заводских условиях

Ферриты кальция формируют трехмерную сетку в матрице равномерно распределяясь по всему объему образца. Трехмерная сетка в шлаке с 2 % стабилизатора образована тонкими пленками (рис. 8, а). Увеличение содержания стабилизатора до 5 % приводит к формированию дисперсных частиц феррита кальция с большей объемной долей и более равномерным распределением в объеме матрицы (рис. 8, б).

При использовании 2 % пыли ДСП у шлака, стабилизированного в лабо-

ракторных условиях, структура представлена сеткой дендритов с наличием протяжённых кристаллов. Объемная доля сетки из железистых компонентов и двухкальциевого силиката примерно равны. С увеличением концентрации стабилизатора до 5 % (рис. 8, б) сетка становится гуще. Объемная доля фазы с содержанием железа значительно 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. При использовании пыли ДСП в условиях реального производства формируется материал с однородной структурой и фазовым составом (рис. 8, в). Однако, имеются некоторые различия в формировании структуры между образцами, полученными в лабораторных и промышленных условиях, что обусловлено отличительными особенностями процесса стабилизации.

По результатам оценки фазового состава (рис. 9) установлено, 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:

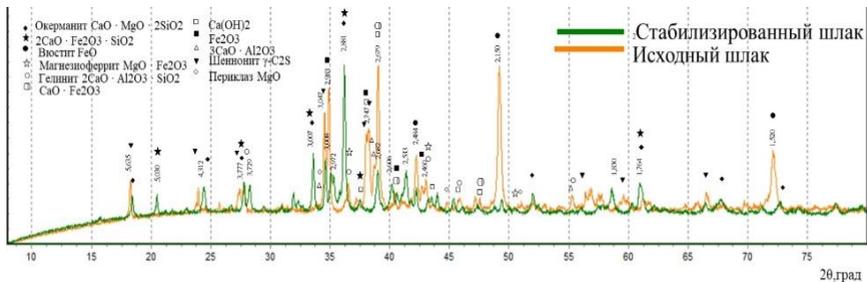
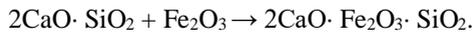


Рис. 9 – Рентгенограмма электросталеплавильного шлака

а) отвалный шлак; б) шлак, стабилизированный в промышленных условиях

По совокупности нормируемых параметров установлено повышение значений физико-механических характеристик стабилизированного шлака (СШ) по сравнению с отвальным (ОШ) (табл. 3, 4).

Стабилизация печного шлака в процессе слива позволила повысить нормируемые показатели шлакового щебня: марку по прочности с 300–800 до 1000–1200, по истираемости с ИV до ИШ, устойчивость структуры с УС2 до УС1, обеспечить морозостойкость до F50. Согласно ГОСТ 3344-83 предложенный способ стабилизации обеспечивает получение каменного материала с максимальной прочностью, что позволяет позиционировать его как высокопрочный.

Таблица 3 – Физико-механические свойства каменного материала

Проба	Фракция, мм	Потеря массы при испытании на прочность, %		Марка по прочности	Потеря массы при испытании на истираемость, %		Марка по истираемости				
		Факт. значения	Норма по ГОСТ 3344-83		Факт. значения	Норма по ГОСТ 3344-83					
ОШ 0–600	5–10	36	35–45	600	52	45–60	ИВ				
	10–20	38			58						
	20–40	48	300	59							
ОШ 0–20	5–10	26	25–35	800	47			45–60	ИВ		
	10–20	27,5			52						
ОШ 20–60	20–40	34		800	54					45–60	ИВ
	40–60	35			–						
СШ 0–60	5–10	14	до 15	1200	25,72	25–35	ИШ				
	10–20	14			26,13						
	20–40	15			26,85						
	40–60	15,5			15–25			1000	–		

Таблица 4 – Физико-механические свойства каменного материала

Проба (фракция, мм)	ρ_n , кг/м ³	R _{сж} , МПа (активность)	Потеря массы при испытании на морозостойкость, %		Марка по морозостойкости	Устойчивость против распада щебня, %		Устойчивость структуры
			Факт. значения	Норма по ГОСТ 3344-83, не более		Факт. значения	Норма по ГОСТ 3344-83	
ОШ 0–600	–	3,08 (А)	40,1	10	–	4,8	от 3 до 5	УС 2
ОШ 0–20	1384	2,72 (А)	34,2	10	–	3,9		
ОШ 20–60	1310	2,82 (А)	35,5	10	–	3,8		
СШ 0–60	1360	0,25 (НА)	4,31	5	F 50	0,15	до 3	УС1

Для реализации разработанного способа стабилизации в промышленных условиях предложена технология, включающая гранулирование пыли ДСП на тарельчатом грануляторе с использованием в качестве связующей жидкости воду. Введение гранул стабилизатора в виде мешков, наполненных гранулами стабилизатора, происходит при скачивании металлургического шлака в шлаковую чашу в несколько приемов с использованием мостового крана и бункера с управляемым затвором выходного отверстия при помощи грейферного ковша или распределителя, установленного непосредственно над шлаковой чашей. За счет применения распределителя обеспечивается равномерность введения гранул в шлаковый расплав.

Разработанная технология позволяет при использовании пыли ДСП в количестве 2 % в условиях реального производства обеспечить повышение процента выхода стабильной фракции >20 мм с 56 % в лабораторных условиях, до 59 % – в заводских.

Физико-механические свойства полученного материала позволяют применять его в дорожном строительстве. С использованием каменного материала из стабилизированного металлургического шлака разработана конструкция автомобильной дороги III технической категории, предполагающая замену природного каменного материала. Экономический эффект от применения каменного материала из шлакового щебня с учетом затрат на его стабилизацию составляет порядка 10–15 %.

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.

Теоретически обосновано и экспериментально подтверждено 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 параметров получения стабилизированного шлака, а именно состава, концентрации пыли дуговых сталеплавильных печей и способа её 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 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.

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 цементобетонов.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК

1. **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. (К1, СА(р), ИФ – 0,832)

2. **Бодяков, А.Н.** Свойства металлургического шлака, стабилизированного в промышленных условиях / А.Н. Бодяков, И.Ю. Маркова, А.А. Логвиненко, Л.Н. Боцман, Ю.Н. Огурцова // Региональная архитектура и строительство. – 2023. – № 2 (55). – С. 44–51. (К1, ИФ – 0,328)

В изданиях, входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования, рекомендованных ВАК РФ

3. **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. (К1, Q2)

В изданиях, индексируемых в базе данных Scopus

4. **Dukhovny, G.** Structural analysis of factors influencing the functionality of Subgrade of transport constructions / G. Dukhovny, S. Zolotykh, **A. Bodyakov** // Materials Science Forum. – 2019. – Vol. 945. – Pp. 821–826. (Q3)

5. **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. – Vol. 945. – Article number 012082.

6. **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. (Q4)

В сборниках трудов конференций

7. **Крутикова, М.А.** Проблемы утилизации промышленных отходов / М.А. Крутикова, **А.Н. Бодяков**, Д.В. Шестаков // Образование. Наука. Производство: сб. докладов XV Междунар. молодежного форума, 23–24 октября 2023 г. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2023. – С. 67–70.

8. **Крутикова, М.А.** Проблемы распадающихся шлаков черной металлургии / М.А. Крутикова, А.Г. Рыбаков, **А.Н. Бодяков**, И.Ю. Маркова // Научно-технологические инновации и инновации: сб. докладов Междунар. науч.-практ. конф., Белгород: Изд-во БГТУ, 2023. – С. 995–997.

9. **Крутикова, М.А.** Опыт стабилизации металлургических шлаков в России и за рубежом / М.А. Крутикова, **А.Н. Бодяков** // Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова (к 170-летию со дня рождения В.Г. Шухова): сб. докладов, Белгород, 16–17 мая 2023 г. – Белгород: БГТУ, 2023. – Т. 9. – С. 159–163.

10. **Бодяков, А.Н.** Устойчивость шлаковых структур / А.Н. Бодяков // Образование. Наука. Производство: сб. материалов XIV Междунар. молодежного форума, 13–14 октября 2022 г. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2022. – С. 10–14.

11. **Бодяков, А.Н.** Стабилизация распадающихся шлаков дуговых сталеплавильных печей / А.Н. Бодяков, А.М. Иванов, Д.В. Волошкин // Образование. Наука. Производство: сб. материалов XIV Междунар. молодежного форума, 13–14 октября 2022 года. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2022. – С. 7–10.

12. **Духовный, Г.С.** Эффективное использование техногенных отходов металлургических предприятий в дорожном строительстве / Г.С. Духовный, А.А. Логвиненко, **А.Н. Бодяков**, А.П. Ильенко // Мир дорог. – 2022. – № 145. – С. 94.

13. **Бодяков, А.Н.** Актуальные проблемы металлургических шлаков / А.Н. Бодяков, Д.В. Бугряшов // Образование. Наука. Производство: сб. материалов XIII Междунар. молодежного форума, 08–09 октября 2021 года. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2021. – С. 1016–1020.

14. **Бодяков, А.Н.** Переработка сталелитейных шлаков электродуговых печей / А.Н. Бодяков // Междунар. науч.-техн. конф. молодых ученых БГТУ им. В.Г. Шухова, Белгород, 30–20 апреля 2021 г. – Белгород: БГТУ, 2021. – С. 1895–1897.

15. **Бодяков, А.Н.** Анализ методов стабилизации самораспадающихся шлаков / А.Н. Бодяков // Образование. Наука. Производство: сб. материалов

ХII Междунар. молодежного форума, 01–20 октября 2020 года. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2020. – С. 1186–1189.

16. **Бодяков, А.Н.** Дорожные одежды с использованием шлаков / Г.С. Духовный, О.В. Попков, А.А. Логвиненко, К.В. Мешкова // Мир дорог. – 2019. – № 118. – С. 64–65.

17. **Бодяков, А.Н.** Исследование возможности эффективного использования негранулированного отвального шлака в конструкции дорожных одежд автомобильных дорог общего пользования / А.Н. Бодяков, С.Н. Бодяков, В.О. Андриенко, С.Н. Бондаренко, К.В. Мешкова, Г.С. Духовный // Образование. Наука. Производство: сб. материалов X Междунар. молодежного форума, 01–15 октября 2018 года. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2018. – С. 1201–1204.

Объекты интеллектуальной собственности

18. **Пат. RU 2752914.** Состав и способ стабилизации распадающихся металлургических шлаков // Г.С. Духовный, Е.И. Евтушенко, Ю.К. Рубанов, А.Н. Бодяков, В.В. Деев, С.Н. Бондаренко. Правообладатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова». Опубл. 11.08.21.

БОДЯКОВ АЛЕКСАНДР НИКОЛАЕВИЧ

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

Специальность 2.1.5. Строительные материалы и изделия

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 29.03.2024
Формат 60×84/16. Усл. печ. л. 1,16. Тираж 100 экз. Заказ № 50

Отпечатано в Белгородском государственном
технологическом университете им. В.Г. Шухова
308012, г. Белгород, ул. Костюкова, 46