

На правах рукописи



ПРИБЫЛОВ ВЯЧЕСЛАВ СЕРГЕЕВИЧ

**АСФАЛЬТОБЕТОН НА ОСНОВЕ
СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ШЛАКОВ С НАНОДОБАВКАМИ**

2.1.5 Строительные материалы и изделия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2024

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)».

Научный руководитель: **Пичугин Анатолий Петрович,**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный аграрный университет», научно-исследовательская часть, главный научный сотрудник

Официальные оппоненты: **Урханова Лариса Алексеевна,**
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), профессор кафедры «Дорожно-строительные материалы»

Балабанов Вадим Борисович,
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет (ИРНИТУ)», заведующий кафедрой «Автомобильные дороги»

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ)»**

Защита состоится 3 декабря 2024 года в 12.00 на заседании диссертационного совета 24.2.510.01 на базе ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет» (Сибстрин)» по адресу: 630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, стр. 113, ауд. 230.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)» и на сайте http://www.sibstrin.ru/dissovet/info_o_zachitah/

Автореферат разослан «__» _____ 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Смирнова Ольга Евгеньевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В современном дорожном строительстве существует ряд проблем и задач в части обеспечения качественным сырьем. Применение местного сырья и отходов промышленности в качестве каменных материалов для производства асфальтобетона может значительно расширить номенклатуру минерально-сырьевой базы дорожно-строительных материалов.

Асфальтобетонные покрытия с применением пористых отходов промышленности характеризуются повышенными транспортно-эксплуатационными показателями, обусловленные свойствами сталеплавленного шлака и характером его взаимодействия с органическим вяжущим и водой. Однако использование шлаковых наполнителей в составе асфальтобетона имеет особенности по сравнению с традиционными каменными материалами. Взаимодействие сталеплавленного шлака с дорожным битумом носит в большей степени механический, а не физико-химический характер.

Ранее проведенные исследования показали, что для суровых климатических условий Сибири долговечность шлакоасфальтобетонных покрытий недостаточна. В этой связи необходимы дополнительные меры по усилению адгезионных свойств вяжущего в битумно-шлаковой композиции.

Применение наноразмерных добавок может значительно улучшить свойства битумно-шлаковых композиций и получить более долговечный и надежный с точки зрения эксплуатации шлакоасфальтобетон на их основе.

Работа выполнена по плану НИР НГАСУ (Сибстрин) шифр 09.17.085 «Использование сталеплавленных шлаков: мартеновский, конвертерный, электросталеплавленный шлак печь – ковш – как компонента строительных смесей».

Степень разработанности темы. Тема работы основана на результатах исследований в области структурообразования асфальтовых бетонов и модификации битумных вяжущих: Урьева Н.Б., Котлярского Э.В., Королева И.В., Горелышева Н.В., Горелышевой Л.А., Быстрова Н.В., Урхановой Л.А., Чулковой И.Л., Королева Е.В., Ставицкого В.А., Лесовика В.С. и др. ученых.

В работе использованы результаты теоретических и экспериментальных исследований структуры, свойств, составов и технологии шлакоасфальтобетонов и битумоминеральных композиций с применением пористых заполнителей советских и российских ученых - Гезенцвея Л.Б., Самодурова С.И., Ковалева Н.С., Тулаева А.Я., Золотарева В.А., Коганзона М.С., Руденского А.В., Расстегаевой Г.А., Пугина К.Г., Подольского В.П., Еремина А.В., Бондарева Б.А., Прозоровой Л.А., Галдиной В.Д. и др., зарубежных ученых – Краюшкиной К., HE Liang, ZHAN

Cheng Gyang, LYU Song G-tao, GRENFELL James, GAO Jie, KOWALSKI Karol J, VALENTIN Jan, XIE Jun, RŽEK Lidija, LING Tian G-qing, Sofilić T., Mladenović A., Sofilić U, Ahmedzade P., Sengoz B., Hunt L., Boyle G и др.

Цель исследования: разработка научно-обоснованных составов и технологии приготовления асфальтобетонных смесей на основе сталеплавильных шлаков с нанодобавками повышенной эксплуатационной надежности и долговечности.

В соответствии с поставленной целью решались следующие **задачи:**

1. Определение и анализ свойств сталеплавильного шлака как заполнителя минерального остова асфальтобетонной смеси.

2. Исследование влияния нанодобавок на свойства битумных композиций, содержащих в своем составе сталеплавильный шлак.

3. Подбор оптимальных составов шлакоасфальтобетонной смеси, отвечающих по физико-механическим характеристикам требованиям НТД.

4. Оценка долговечности асфальтобетона на сталеплавильных шлаках с нанодобавками.

5. Разработка технологии приготовления горячей шлакоасфальтобетонной смеси, модифицированной нанодобавками.

6. Расчет технико-экономической целесообразности применения модифицированной нанодобавками шлакоасфальтобетонной смеси.

Область исследования соответствует паспорту научной специальности 2.1.5 Строительные материалы и изделия, п.9 Разработка составов и совершенствование технологий изготовления эффективных строительных материалов и изделий с использованием местного сырья и отходов промышленности, в том числе повторного использования материалов от разборки зданий и сооружений.

Научная новизна.

1. Установлено, что начальная адгезионная прочность битума к сталеплавильному шлаку вызвана в большей степени не физико-химическим процессом, а механическим взаимодействием, обусловленным особенностями химического состава и повышенной пористостью заполнителя. Выявлен механизм влияния на шлакоасфальтобетон продолжительности насыщения его водой, заключающийся в снижении интенсивности падения показателей $K_{\text{вод}}$ и $R_{20(\text{вод})}$ и стабилизации процесса набухания асфальтобетона на сталеплавильных шлаках (по сравнению с асфальтобетонном на традиционном заполнителе). Добавка из углеродных нанотрубок в количестве 0,05 % от массы битума обеспечивает повышение адгезии, прочности и водостойкости асфальтобетона за счет проявления центров активного взаимодействия с битумным вяжущим.

2. Введение углеродных нанотрубок в количестве 0,05 % от массы битума обеспечивает асфальтобетону на сталеплавильном шлаковом

заполнители создание равномерно распределенной структуры за счет центров кристаллизации и включения их в физико-химическое взаимодействие, что подтверждается упрочнением всей структуры шлакоасфальтобетона, ростом термостабильности и деформационной устойчивости, отмечаемыми по результатам термомеханических, микроструктурных и спектральных исследований.

3. Фотоэлектроколориметрическими и ИК - спектральными исследованиями установлена длительная стабилизация первоначальных свойств и упрочнение битумного вяжущего в шлакоасфальтобетоне при введении углеродных нанотрубок в количестве 0,05 % от массы битума, приводящие к увеличению морозостойкости на 25 – 35 % и снижению величины колееобразования почти в 2 раза за счет повышения адгезионных сил в контактной зоне между минеральным шлаковым заполнителем и битумным вяжущим, улучшения физико-механических и деформативных характеристик, обеспечивая в целом увеличение сроков службы и долговечности асфальтобетонного покрытия.

Теоретическая значимость работы.

Расширены знания о характере и процессах взаимодействия битумных вяжущих с пористыми заполнителями на основе отходов производств.

Установлены теоретические закономерности между продолжительностью насыщения шлакоасфальтобетона водой и показателями его строительно-технических свойств.

Научно подтверждена необходимость модификации битума битумно-шлаковой композиции наноразмерными добавками для повышения ее адгезионной прочности.

Установлен вид и оптимальное содержание нанодобавки в асфальтобетонной смеси, содержащей сталеплавильный шлак, обеспечивающей устойчивость шлакоасфальтобетона к внешним факторам, и, как следствие, повышающей его долговечность в дорожном покрытии.

Практическая значимость работы.

Получены составы плотной и пористой шлакоасфальтобетонных смесей при полном замещении каменных заполнителей сталеплавильными шлаками, физико-механические показатели которых (R_{50} , R_{20} и сдвигоустойчивость) превышают аналогичные показатели традиционного асфальтобетона в 1,3 – 1,6 раза.

Установлены оптимальные рецептурные и технологические параметры приготовления асфальтобетонной смеси, содержащей сталеплавильный шлак и запроектированной по методологии Superpave. Асфальтобетонная смесь включает битумное вяжущее марки PG, мас. % 3,9 – 4,5 (сверх 100 %), отходы металлургического производства при следующем соотношении компонентов, мас. %: щебень шлаковый фр. 8-16 мм - 35,4 – 42,4; щебень

шлаковый фр. 4-8 мм - 18,2 – 25,2; песок шлаковый фр. 0-4 мм - 37,4 – 41,4 (Патент на изобретение № 2787268).

Разработана технологическая документация на приготовление горячей шлакоасфальтобетонной смеси с добавкой углеродных нанотрубок (далее – УНТ), способствующая достижению требуемых технико-экономических показателей, и выполнена апробация предлагаемых решений на производстве. Применение УНТ в составе шлакоасфальтобетонной смеси позволило уменьшить себестоимость ее приготовления на АБЗ на 6,7 % по сравнению с асфальтобетонной смесью из щебня горных пород без добавок.

Методология и методы исследования. При проведении исследований использован комплексный подход решения поставленных задач, включающий статистическую обработку результатов, современные физико-химические методы изучения структурообразования материала и его свойств: ИК-спектроскопию, фотоэлектроколориметрию, термомеханику, микроструктурный анализ. В работе использовались действующие нормативно-технические документы, применимые к данному объекту исследования.

Объектом исследования являются асфальтобетонные смеси и асфальтобетон на основе сталеплавительных шлаков с нанодобавками.

Предметом исследования являются свойства шлакоасфальтобетона, модифицированного нанодобавками.

Положения, выносимые на защиту:

1. Характер влияния сталеплавительных шлаков на прочность, водостойкость, набухание асфальтобетона при длительном насыщении водой.

2. Состав и объемные свойства шлакоасфальтобетонной смеси, запроектированной по методологии Supergave.

3. Результаты модификации содержащей сталеплавительный шлак асфальтобетонной смеси наноразмерными добавками.

Степень достоверности. Достоверность результатов работы определяется подтверждением полученных экспериментальных данных результатами опытно-промышленных испытаний, использованием современных методов исследований с применением поверенных приборов и аттестованного оборудования, апробированных методик измерения.

Реализация результатов исследований. Качественная характеристика возможных экономических последствий от реализации намеченных результатов:

- снижение себестоимости асфальтобетонных смесей для производителей и расценок для рынка дорожного строительства;
- повышение объемов ремонтных и строительных работ в дорожно-строительной сфере при сокращении объемов финансирования;
- продление межремонтных сроков службы дорожных покрытий;

- вовлечение в производство асфальтобетонных смесей вторичного сырья и сокращение отвалов металлургических производств;
- уменьшение экологической нагрузки и штрафных санкций за нарушения экологических требований;
- сокращение объемов использования невозобновляемых источников сырья при приготовлении асфальтобетонных смесей для целей дорожного строительства.

Производственное апробирование результатов проводилось в строительной компании Кемеровской области ООО «Спецремонт» (г. Новокузнецк).

Личный вклад. Автором проводился выбор методов исследования, постановка задач, проведение экспериментальных испытаний, анализ и обобщение полученных данных.

Апробация работы. Материалы диссертационной работы докладывались и обсуждались на 12 научно-практических конференциях и симпозиумах регионального, всероссийского и международного уровней: XV, XVI МНТК «Актуальные вопросы архитектуры и строительства» (Новосибирск, 2022, 2023); Проект - конкурс ФАУ «РОСДОРНИИ» «Акселератор дорожной отрасли» (Москва, 2020, 2021); Международный симпозиум «Современные ресурсосберегающие материалы и технологии: перспективы и применение» (Новосибирск, 2020); Международная научно-практическая конференция «Интеграция науки, образования и производства – основа реализации плана нации (Сагиновские чтения №12)» (Караганда (Казахстан), 2020); III международная научная конференция «Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности» (Казань, 2020); III, IV МНТК «Качество. Технологии. Инновации» (Новосибирск, 2020, 2021, 2024); International conference on the topic of «Innovations in construction, energy-saving technologies, construction and seismic safety of buildings and structures» (Namangan (Таджикистан), 2019); МНТК, посвященная 50 - летию Института строительства и архитектуры ПГТУ «Актуальные проблемы строительного и дорожного комплексов» (Йошкар-Ола, 2019); Международная научно-практическая конференция «Ресурсосбережение и экология строительных материалов» (Курск, 2018).

Основные теоретические, методологические, научные и практические результаты используются в учебном процессе кафедры «Строительные материалы, стандартизация и сертификация» ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин)» при подготовке бакалавров и магистров по направлению «Строительство», профиль подготовки «Автомобильные дороги».

Публикации. По теме диссертации опубликовано 15 работ, из которых в изданиях, рекомендованных ВАК – 8, в изданиях, индексируемых

Scopus – 1, в сборниках научных трудов докладов на научно-технических конференциях и других изданиях – 6.

Получен патент РФ на изобретение №2787268 (09.01.2023).

Объем и структура диссертационной работы. Диссертация состоит из 6 глав, 9 основных выводов, списка литературы, включающего 146 наименований, содержит 155 страниц текста, 54 рисунка, 43 таблицы и 4 приложения.

Автор выражает искреннюю признательность и благодарность докторам технических наук, профессорам Пименову А.Т., Машкину Н.А., доктору биологических наук, профессору Барахтеновой Л.А. за ценные советы и рекомендации при подготовке диссертационной работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дано обоснование актуальности темы диссертационной работы, рассмотрены цель и задачи исследования, изложены научная новизна и значимость результатов работы.

В первой главе (Предпосылки и опыт использования шлаковых материалов в составе асфальтобетона дорожных покрытий) рассмотрены проблемы применения пористых отходов металлургических производств в дорожном строительстве и их влияние на долговечность дорожных покрытий.

В диссертации выдвигается **научная гипотеза** о возможности повышения долговечности и связанных с ней межремонтных сроков службы дорожных асфальтобетонных покрытий на основе сталеплавильных шлаков за счет использования в их составе наноразмерных добавок. Сложность решения этого вопроса связана с одной стороны с многообразием трудно поддающихся математическому описанию факторов внешнего воздействия (транспортного, погодного и др.), с другой – со сложностью недостаточно полно изученных внутренних физико-химических процессов в шлакоасфальтобетоне как сложном композиционном материале.

Вторая глава (Характеристика материалов и методов исследования). В исследовании в качестве заполнителей минерального остова асфальтобетонной смеси были использованы сталеплавильные шлаки Новокузнецкого металлургического комбината - мартеновский шлак, конвертерный шлак, электросталеплавильный шлак печь-ковш.

Анализ фазового состава сталеплавильных шлаков выполнен методом РФА на порошковом дифрактометре D8 Advance при температурах 30 – 200 °С (характеризующих нагрев заполнителей асфальтобетонной смеси). Основными фазами являются: CaCO_3 – 28...32 %, MgO – 14...15 %, $\text{Ca}_3\text{Mg}(\text{SiO}_4)_2$ – 28...31 % и Ca_2SiO_4 – 22...27 %. Имеется небольшое количество примесных фаз (Fe_2O_3 , $\text{K}_6\text{Fe}_2\text{O}_5$, $\text{Ca}_2\text{Ti}_5\text{O}_{12}$).

Химический состав сталеплавильных шлаков представлен следующими соединениями: Fe_2O_3 - 0,95 ... 26,40 %; SiO_2 - 20,67... 26,75 %; CaO - 36,08... 55,80 %; MgO - 9,72 ... 14,06 %; Al_2O_3 - 5,35...7,45 %; S - 0,06...1,42 %.

Исследуемые шлаки являются основными. Подтверждена активность шлака печь-ковш как гидравлического вяжущего, пригодного для применения в качестве минерального порошка при приготовлении асфальтобетонных смесей.

Свойства шлака печь-ковш оценивались на соответствие требованиям ГОСТ Р 52129-2003 как минерального порошка марки МП-2 (порошковые отходы промышленности).

По прочности (марка по дробимости) мартеновский и конвертерный шлаки соответствуют заполнителям для асфальтобетонных смесей типов Б, В марка II по ГОСТ 9128-2013. Марка по морозостойкости шлака F200 по ГОСТ 3344-83.

Проведенные исследования показали, что рассматриваемые сталеплавильные шлаки не подвержены распаду, обладают устойчивой структурой (С1); по величине значений суммарной удельной эффективной активности естественных радионуклидов $A_{\text{эфф}} = 163 \pm 32$ Бк/кг соответствуют гигиеническим нормативам (класс материала – I) и могут применяться для строительства дорог и аэродромов без ограничений.

В третьей главе (Исследование и анализ конструктивно-технических свойств асфальтобетона на сталеплавильных шлаках) представлены полученные результаты исследования основных эксплуатационных характеристик шлакоасфальтобетонных смесей и шлакоасфальтобетона на сталеплавильных шлаках.

Анализ морфологии и показателей физико-механических свойств асфальтовяжущего вещества на основе шлака печь-ковш показал, что прогнозируемая сдвигоустойчивость, водостойкость и трещиностойкость шлакоасфальтобетона, связанная с его структурой, позволяет укладывать его в местах, подверженных сдвиговым деформациям в условиях знакопеременных температур.

Установлено, что при использовании в качестве минерального порошка шлака печь-ковш в структуре исследуемого материала образуется система замкнутых пор (см. рис. 1), позволяющая исключить возможность проникновения в них воды, а напряжения на их границах будут гораздо ниже предела прочности на растяжение самого асфальтобетона.

Данное обстоятельство в процессе эксплуатации дорожного покрытия при отрицательных температурах воздуха (ниже температуры хрупкости самого битума) позволяет исключить образование низкотемпературных макротрещин, тем самым сохраняя требуемую сплошность и ровность поверхности шлакоасфальтобетонного покрытия.

Длительное насыщение водой образцов асфальтовязующего вещества на основе сталеплавильного шлака печь-ковш позволило установить связь между продолжительностью насыщения его водой и величиной водостойкости (см. рис. 2). Такую зависимость можно представить виде: $y=0,8916x^{0.1541}$, где x – это продолжительность насыщения водой, сут., y – коэффициент водостойкости $K_{\text{вод}}$. Ошибка аппроксимации составляет не более 4 %.

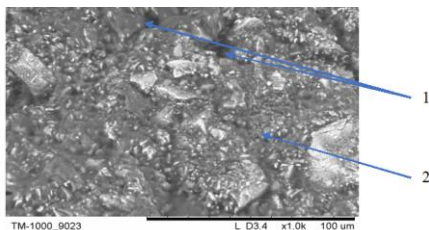


Рисунок 1. Морфология асфальтовязующего вещества на сталеплавильном шлаке: 1 – система замкнутых пор; 2 - битумное вяжущее + шлак печь-ковш.

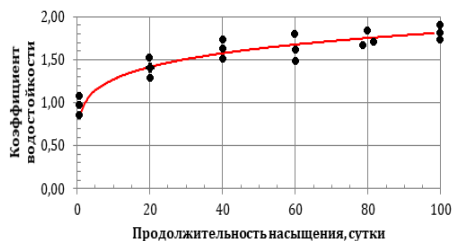


Рисунок 2. Зависимость $K_{\text{вод}}$ асфальтовязующего вещества на сталеплавильном шлаке от продолжительности водонасыщения водой

Для подтверждения характера изменения структурных связей в шлакоасфальтобетоне с коагуляционных на коагуляционно-кристаллизационные при длительном воздействии воды проведены испытания образцов на прочность и набухание при температуре $20 \pm 2^\circ\text{C}$.

Анализируя полученные уравнения регрессии (см. рис. 3-6), можно сделать следующий вывод. По мере увеличения продолжительности насыщения шлакоасфальтобетона водой происходит уменьшение предела прочности при сжатии при температуре 20°C и связанного с ним коэффициента водостойкости ($K_{\text{вод}} = R_{20(\text{вод})}/R_{20}$) по степенной зависимости. Данное обстоятельство может быть связано с постепенным заполнением водой внешних и внутренних пор шлакоасфальтобетона, и связанным с этим частичным отслоением битумных пленок с поверхности крупного и мелкого заполнителя. Здесь следует отметить, что вышеуказанное падение прочности происходит в пределах регламентируемых ГОСТ 9128-2013 значений для длительной водостойкости. По мере «включения» в работу шлака печь-ковш, обладающего активными свойствами медленноотвердеющего вяжущего, протеканием реакции гидратации с водой происходит снижение интенсивности падения показателей $K_{\text{вод}}$ и $R_{20(\text{вод})}$ (по сравнению с асфальтобетонном на традиционном заполнителе), о чем также свидетельствует падение на данном временном промежутке показателей набухания и «затухание» процесса дальнейшего насыщения шлакоасфальтобетона водой.

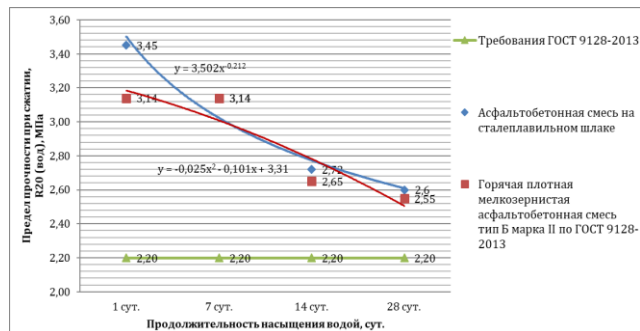


Рисунок 3. Зависимость предела прочности при сжатии шлакоасфальтобетона при температуре 20°C от продолжительности насыщения водой

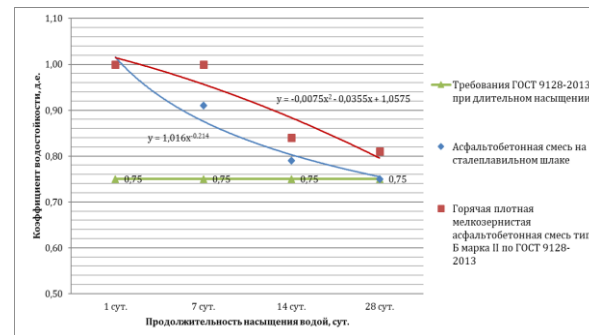


Рисунок 4. Зависимость коэффициента водостойкости $K_{вод}$ шлакоасфальтобетона от продолжительности насыщения водой

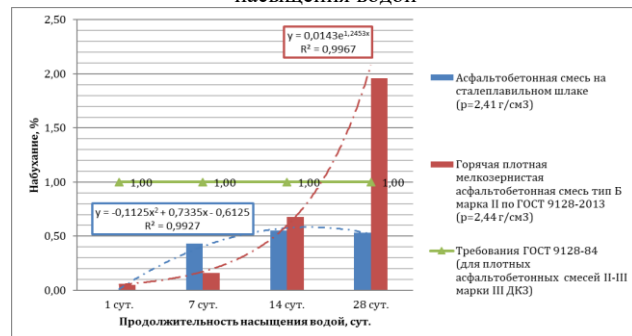


Рисунок 5. Зависимость набухания шлакоасфальтобетона от продолжительности насыщения водой

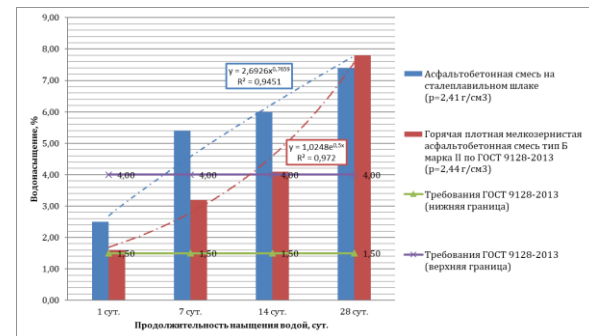


Рисунок 6. Зависимость водонасыщения шлакоасфальтобетона от продолжительности насыщения водой

Четвертая глава (Объемно-функциональное проектирование асфальтобетонных смесей на основе сталеплавыльных шлаков).

Исследования сталеплавыльных шлаков показали его применимость в качестве заполнителя минеральной части для легких и нормальных условий движения по ГОСТ Р 58401.1-2019 для асфальтобетонных смесей, запроектированных по системе объемно-функционального проектирования Superpave.

В соответствии с методикой ГОСТ Р 58401.3-2019 получен состав асфальтобетонной смеси, соответствующий марке SP-16Л (битум сверх 100 %): щебень шлаковый фр. 8-16 мм - 35,4–42,4 %; щебень шлаковый фр. 4-8 мм - 18,2–25,2 %; песок шлаковый фр. 0-4 мм - 37,4–41,4 %; битумное вяжущее марки PG - 3,9–4,5 %.. Выбор марки асфальтобетонной смеси обусловлен маркой по дробимости и гранулометрическим составом шлакового щебня.

Расчет оптимального состава шлакоасфальтобетонной смеси выполнен из условия соответствия содержания воздушных пустот в минеральном заполнителе требованиям ГОСТ Р 58401.1–2019 при количестве оборотов вращательного уплотнителя $N_{пр} = 75$ для легких условий движения транспортного потока.

Используя карту районирования территории Западной Сибири по эксплуатационным температурам асфальтобетонных покрытий для Новосибирской области и корректировку на подвижную нагрузку, была принята марка битумного вяжущего PG 58-40.

Пятая глава (Физико-химические процессы в асфальтовом бетоне на основе сталеплавыльных шлаков, модифицированном нанодобавками).

Использование шлаковых заполнителей имеет некоторые особенности по сравнению с традиционными каменными материалами, выражающиеся в увеличенном объеме открытой пористой структуры заполнителя. Этот факт напрямую связан с повышением адгезии битумного вяжущего к шлаковому заполнителю и упрочнению зоны контакта за счет вхождения битума в пористую структуру минерального компонента. Однако следует отметить, что само взаимодействие носит в большей степени механический характер, а не физико-химический.

Определяющим фактором здесь может выступать введение наноразмерных добавок в битумное вяжущее. Положительный результат достигается за счет проявления активности наночастиц, являющихся центрами кристаллизации в битумном вяжущем, способствующим упрочнению всей структуры асфальтового бетона на сталеплавыльных шлаках.

Для оценки модифицирующего влияния нанодобавок в присутствии заполнителя из сталеплавыльных шлаков был выполнен комплекс термомеханических исследований. В качестве наноразмерных добавок

исследованы приготовленные в виде паст - оксид алюминия, диоксид кремния, оксид цинка, гидроксид магния, углеродные нанотрубки TUBALL¹ (далее – УНТ). Количество вводимых наноматериалов составляло 0,005 - 0,100 % от массы битума.

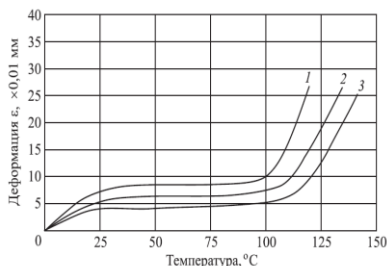


Рисунок 7. Термомеханические кривые модифицированного битумного вяжущего с различными нанодобавками:

1- без добавок; 2 - оксид алюминия, диоксид кремния, оксид цинка, гидроксид магния;
3 - УНТ

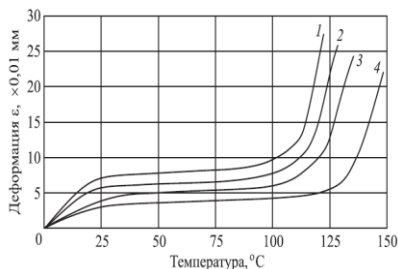


Рисунок 8. Термомеханические кривые модифицированного битумного вяжущего с различным содержанием углеродных нанотрубок:

1- без добавок; 2 - УНТ 0,01 %;
3 - УНТ 0,1 %;
4 - УНТ 0,05 %

Результаты исследования показали, что все нанодисперсные частицы изменяют строительно-технические, технологические и эксплуатационные характеристики асфальтовых композиций, способствуя расширению температурного диапазон применения битумного вяжущего. Наибольший эффект был достигнут при введении в качестве модифицирующей нанодобавки УНТ.

При рациональном введении УНТ в количестве 0,05 % от массы битума отмечается наивысшая сопротивляемость системы воздействию усилиям: повышается термостабильность битумно-шлаковой композиции на 20–25 %, улучшаются ее физико-механические и деформативные характеристики, обеспечивая в целом увеличение сроков службы асфальтового бетона на сталеплавильных шлаках в дорожном покрытии (см. рис. 7, 8).

Для изучения адгезии битумного вяжущего к шлакам сталеплавильного производства использовался фотометр КФК-3-«ЗОМЗ». Использование метода фотоэлектроколориметрии здесь объясняется простотой и доступностью проведения исследований, и достаточной степенью точности определений.

¹ Применяемые УНТ представляют собой графеновые одностенные углеродные нанотрубки TUBALL™. Производство OCSiAl (г. Новосибирск).

Результаты определения показателя адгезии (А) модифицированного нанодобавками битумного вяжущего к сталеплавильным шлакам (после обработки в течение одного часа в ацетоне) представлены в табл. 1.

Наименьшей адгезией обладают составы без нанодобавок (от 28 до 35 %). При введении в битумное вяжущее 0,01 % УНТ от массы битума отмечено увеличение адгезионной прочности более чем в 1,5 раза, а введение 0,05 % УНТ приводит к дальнейшему повышению этого показателя в 2–2,5 раза.

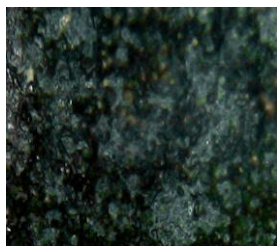
Таблица 1

Показатели адгезии модифицированного нанодобавками битумного вяжущего к сталеплавильным шлакам

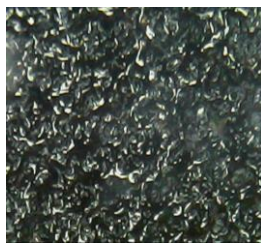
№ п/п	Наименование шлакового заполнителя	УНТ, %	Адсорбция заполнителя a_0 , %	Открытая поверхность заполнителя		Приращение открытой поверхности ΔS , %	Адгезия А, %
				До обработки S_0	После обработки S_0^1		
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Мартеновский	б/д	66,7	8,2	74,2	66,0	34,0
2	Конвертерный	б/д	57,0	5,8	77,5	71,7	28,3
3	Печь-ковш	б/д	63,3	3,9	79,4	65,5	34,5
4	Мартеновский	0,01	57,0	4,5	48,1	43,6	56,4
5	Конвертерный	0,01	66,7	6,3	49,9	43,6	56,4
6	Печь-ковш	0,01	63,3	3,1	49,4	46,3	53,7
7	Мартеновский	0,05	57,0	5,1	26,2	21,1	78,9
8	Конвертерный	0,05	66,7	7,3	29,4	22,1	77,9
9	Печь-ковш	0,05	63,3	3,8	19,8	16,0	84,0
10	Мартеновский	0,10	57,0	6,4	36,6	30,2	69,8
11	Конвертерный	0,10	66,7	5,7	31,7	26,0	74,0
12	Печь-ковш	0,10	63,3	3,6	24,1	20,5	79,5

Сравнение результатов фотоэлектродиметрических исследований с физико-механическими показателями и изучением микроструктуры наполненных модифицированных нанодобавкой УНТ битумно-шлаковых композиций дают право считать сталеплавильный шлаковый заполнитель приемлемым для приготовления асфальтобетонных смесей.

На рис. 9 представлены фотографии микроструктуры модифицированных нанодобавками битумно-шлаковых композиций. Введение УНТ (см рис. 9б) способствует появлению центров кристаллизации и формированию микроструктуры с большей степенью упорядоченности по сравнению с бездобавочным вариантом. В целом данная микроструктура выравнивается за счет формирования таких центров, распределенных по всему полю и обеспечивающих четкость и упорядоченность материала.



а)



б)

Рисунок 9. Микроструктура асфальтового бетона на сталеплавильных шлаках, х 1000: а) без нанодобавок; б) нанодобавка УНТ 0,05 %.

Данное положение хорошо согласуется с результатами фотоэлектроколориметрических исследований, показавших, что данный состав обладает повышенной адгезионной прочностью, которая и образовалась благодаря активному взаимодействию компонентов с равномерным распределением центров кристаллизации УНТ.

Введение наноразмерных частиц способствует усилению сопротивляемости шлакоасфальтобетона климатическим воздействиям и, следовательно, такой композиционный материал может считаться более долговечным по сравнению с традиционными асфальтовыми бетонами. Использование нанодобавки УНТ в количестве 0,05 % от массы битума приводит к увеличению морозостойкости асфальтобетона на сталеплавильных шлаках на 25 – 35 % и снижению величины колееобразования почти в два раза (см. рис. 10 - 11).

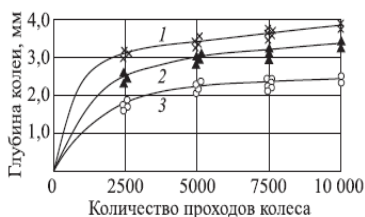


Рисунок 10. Зависимость колееобразования асфальтобетона на сталеплавильных шлаках от количества приложений нагрузки:

- 1 – традиционный асфальтобетон (по ГОСТ 9128-2013);
- 2 - асфальтобетон на сталеплавильных шлаках (без добавок);
- 3 - то же, с нанодобавкой УНТ.

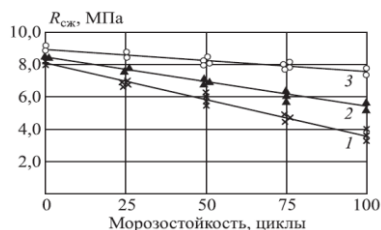


Рисунок 11. Изменение предела прочности при сжатии асфальтобетона на сталеплавильных шлаках с нанодобавками в сравнении с традиционным асфальтобетоном после замораживания и оттаивания при 0°C:

- 1 – традиционный асфальтобетон (по ГОСТ 9128-2013);
- 2 - асфальтобетон на сталеплавильном шлаке (без добавок);
- 3 – то же, с нанодобавкой УНТ 0,05 %.

Подтверждением эффективности введения нанодобавок в составы асфальтового бетона на сталеплавильных шлаках являются результаты ИК-спектроскопии битумного вяжущего до и после проведения испытаний на морозостойкость (100 циклов попеременного замораживания - оттаивания) и колееобразования (прохода 10000 колес на стенде). Основные структурные группы сохранили свои полосы поглощения, хотя некоторые из них усилили или ослабили интенсивность (см. рис. 12).

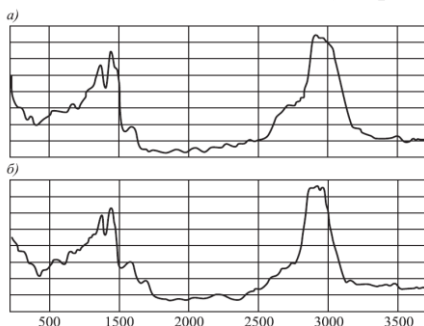


Рисунок 12. ИК-спектры поглощения битумных вяжущих, отобранных из асфальтобетонных смесей на сталеплавильных шлаках до (а) и после (б) испытаний на морозостойкость

Сравнение показателей физико-механических свойств шлакоасфальтобетона с асфальтобетоном на традиционных заполнителях по ГОСТ 9128-2013 приведено в табл. 2.

Таблица 2

Свойства асфальтового бетона на сталеплавильных шлаках

Показатели	Вид асфальтобетона		
	Традиционный по ГОСТ 9128-2013	На сталеплавильном шлаке	На сталеплавильном шлаке с 0,05 % УНТ
Предел прочности при сжатии, МПа, не менее:			
при 50°C	1,3	1,5	1,7
при 20°C	2,5	2,6	2,9
при 0°C	13,0	14,0	15,6
Плотность, кг/м³	2400	2240	2280
Водостойкость, не менее	0,85	0,87	0,91
Водостойкости при длительном водонасыщении, не менее	0,75	0,80	0,84
Остаточная пористость, %	3-7	5,2	4,1
Колееобразование, мм	Менее 3,5	3,0	2,1
Расход битума, %	5,3	4,2	4,2

В качестве исходной принята Ш ДКЗ (Новосибирская область). Марка битумного вяжущего - БНД 70/100 по ГОСТ 33133-2014.

Шестая глава (Технико-экономическое обоснование результатов исследования). Целесообразность применения сталеплавыльных шлаков в составе асфальтобетонных смесей обуславливается их экономической эффективностью, что в условиях реализации в России национальных проектов по ресурсо - и энергосбережению сможет привлечь к такому вторичному сырью дополнительный интерес со стороны подрядных строительных организаций, осуществляющих дорожно-строительные работы вдали от природных карьеров.

Сметная стоимость приготовления запроектированной по методологии Superpave и модифицированной нанодобавкой УНТ (TUBALL™) шлакоасфальтобетонной смеси на АБЗ на 6,7 % ниже соответствующего показателя для асфальтобетонной смеси, приготовленной с применением щебня из горных пород без добавок.

Опытно-промышленные испытания, выполненные в строительной компании Кемеровской области ООО «Спецремонт» (г. Новокузнецк), свидетельствуют о соответствии модифицированных нанодобавками шлакоасфальтобетонных смесей требованиям действующей нормативно-технической базы и о возможности их широкого применения в сфере дорожного хозяйства.

ИТОГИ ВЫПОЛНЕННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Поставленные в работе задачи выполнены, цель достигнута. В результате проведенных исследований установлено следующее:

1. Использование шлаковых заполнителей в составе асфальтобетонных смесей имеет некоторые особенности по сравнению с плотными каменными породами, выражающиеся в увеличенном объеме открытой пористой структуры. Этот факт напрямую связан с повышением адгезии битумного вяжущего к шлаковому заполнителю и упрочнению зоны контакта за счет вхождения битума в пористую структуру минерального компонента. Несмотря на это, в процессе структурообразования асфальтовых бетонов на сталеплавыльных шлаках начальная величина адгезионной прочности не превышает и 35 % от возможного максимального показателя и вызвана в большей степени не физико-химическим процессом, а механическим взаимодействием.

2. Модификация битумов нанодобавками способствует повышению адгезионных сил в контактной зоне между минеральным шлаковым заполнителем и битумным вяжущим. Введение нанодобавки из углеродных нанотрубок в количестве 0,05 % от массы битума обеспечивает создание равномерно распределенной структуры за счет включения в физико-химическое взаимодействие центров кристаллизации, способствующим упрочнению всей структуры асфальтобетона на сталеплавыльных шлаках

и обеспечивающих повышенную адгезию (в 2–2,5 раза) к сталеплавильному шлаковому заполнителю по сравнению с составами без добавок.

3. Введение в битум в качестве модифицирующей нанодобавки углеродных нанотрубок в количестве 0,05 % повышает термостабильность битумно-шлаковой композиции на 20–25 %, улучшает ее физико-механические и деформативные характеристики, обеспечивая в целом увеличение сроков службы асфальтового бетона на сталеплавильных шлаках в дорожном покрытии.

4. Введение нанодобавок способствует усилению сопротивляемости шлакоасфальтобетона климатическим воздействиям и, следовательно, такой композиционный материал может считаться более долговечным по сравнению с традиционными асфальтобетонами. Использование углеродных нанотрубок в количестве 0,05 % от массы битума приводит к увеличению морозостойкости асфальтобетона на сталеплавильных шлаках на 25-35 % и снижению величины колееобразования почти в 2 раза.

5. Одним из важнейших факторов сохранности и эксплуатационной пригодности асфальтового бетона на сталеплавильных шлаках является его сопротивляемость климатическим воздействиям, особенно в водонасыщенном состоянии. В условиях насыщения водой в асфальтоявляющем веществе на основе сталеплавильных шлаков (печковш) протекают процессы гидратации, которые придают асфальтобетону на шлаковых заполнителях необходимую водостойкость и прочность, увеличивая ее с течением времени по степенной зависимости: $y = 0,8916 \cdot x^{0,1541}$, где x – это продолжительность насыщения водой, сут., y - коэффициент водостойкости.

6. При длительном воздействии воды в шлакоасфальтобетоне происходит изменение структурных связей с коагуляционных на коагуляционно-кристаллизационные. Через 14-21 сутки водонасыщения снижается интенсивность падения показателей $K_{вод}$ и $R_{20(вод)}$ и стабилизируется процесс набухания асфальтобетона на сталеплавильных шлаках (по сравнению с асфальтобетонном на традиционном заполнителе), что определяет его большую эксплуатационную надежность на участках покрытий с длительно стоящими поверхностными водами.

7. Трещиностойкость асфальтового бетона на сталеплавильных шлаках обеспечивается за счет внутриводной структуры, исключающей появление макротрещин на этапе эксплуатации в дорожном покрытии.

8. Исследование сталеплавильных шлаков показало их применимость в качестве заполнителя минеральной части смесей для легких и нормальных условий движения по ГОСТ Р 58401.1-2019 для асфальтобетонных смесей, запроектированных по системе объемно-функционального проектирования Superpave. Получена шлакоасфальтобетонная смесь, соответствующая марке SP-16Л по ГОСТ Р 58401.1-2019 и содержащая в своем составе: битумное

вяжущее марки РГ 3,9–4,5 % (сверх 100 %), щебень шлаковый фр. 8-16 мм - 35,4–42,4 %, щебень шлаковый фр. 4-8 мм - 18,2–25,2 %, песок шлаковый фр. 0-4 мм - 37,4–41,4 % (Патент РФ № 2787268).

9. Применение углеродных нанотрубок в составе шлакоасфальтобетонной смеси снижает себестоимость ее приготовления на АБЗ на 6,7 % по сравнению с асфальтобетонной смесью из щебня горных пород без добавок. Экономия применения шлакоасфальтобетонных смесей также обусловлена более низкой их плотностью в дорожном покрытии по сравнению с традиционными смесями на каменном материале.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ ОТРАЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ ПУБЛИКАЦИЯХ

Статьи в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ

1. **Прибылов, В.С.** Эффективность модификации битума нанодобавками в асфальтобетоне на сталеплавильных шлаках / В.С. Прибылов, А.П. Пичугин // Эксперт: теория и практика. – 2023. – № 4 (23). – С. 95-100.

2. **Прибылов, В.С.** Долговечность асфальтобетона на сталеплавильных шлаках с модифицированным нанодобавками битумом / В.С. Прибылов, А.П. Пичугин // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2023. – № 4 (772). – С. 14-23.

3. **Прибылов, В.С.** Повышение адгезии битума в асфальтобетоне на сталеплавильных шлаках модификацией нанодобавками / В.С. Прибылов, А.П. Пичугин, А.С. Денисов // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2023. – № 2 (770). – С.16-24.

4. Пичугин, А.П. Модификации битума нанодобавками для асфальтобетона на сталеплавильных шлаках / А.П. Пичугин, **В.С. Прибылов** // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2023. – №1 (769). – С. 50 - 60.

5. **Прибылов, В.С.** Строительно-технические свойства дорожного асфальтобетона на сталеплавильных шлаках / В.С. Прибылов, Д.В. Саркисян, У.О. Завацкая // Вестник ВСГУТУ. – 2022. – № 3 (86). – С. 83-91.

6. Пименов, А.Т. Вовлечение отходов черной металлургии в производство строительных материалов/ А.Т. Пименов, **В.С. Прибылов** // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2021. - № 4 (748). - С. 114-120.

7. Пименов, А.Т. Обоснование возможности применения отходов металлургических производств при строительстве и ремонте дорожных покрытий и оснований/ А.Т. Пименов, **В.С. Прибылов** // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2021. - № 2 (57). – С. 42-48.

8. 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. - № 6 (70). – С. 766-779.

Полученные объекты интеллектуальной собственности

9. Патент РФ № 2787268. Асфальтобетонная смесь, содержащая заполнитель из отходов металлургического производства и битумное вяжущее марки PG / Пименов А.Т., **Прибылов В.С.**, Мурко В.В., Саркисян Д.В. - опубл. «09» января 2023 г. – Бюл. № 1.

Статьи в зарубежных изданиях, индексируемых Scopus и WoS

10. Pimenov A The use of metallurgy waste in the roads sustainability improving/ A Pimenov, L Barakhtenova, **V Pribylov** // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2020. Vol. 962 (2020). P. 022013.

Статьи в других печатных изданиях

11. Пименов, А.Т. Длительная водостойкость асфальтовых бетонов дорожных покрытий на основе порошковых отходов промышленности / А.Т. Пименов, **В.С. Прибылов** // «Качество. Технологии. Инновации»: Материалы IV Международной научно-практической конференции. - 2021. – С. 174-178.

12. Пименов, А.Т. Перспективы использования отходов металлургии при производстве строительных материалов/ А.Т. Пименов, Л.А. Барахтенова, **В.С. Прибылов** // Труды международной научно-практической конференции «Интеграция науки, образования и производства – основа реализации плана нации (Сагиновские чтения №12)». – Караганда, 2020. - С. 459-461.

13. Пименов, А.Т. Строительные смеси различного назначения на основе сталеплавыльных шлаков/ А.Т. Пименов, Л.А. Барахтенова, **В.С. Прибылов** // Сборник научных статей по итогам третьей международной научной конференции «Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности». – 2020. - С. 120-121.

14. Пименов, А.Т. Основы рециклинга отходов металлургии в строительной отрасли/ А.Т. Пименов, Л.А. Барахтенова, **В.С. Прибылов** // Сборник INTERNATIONAL CONFERENCE ON THE TOPIC OF NAMANGAN ENGINEERING – CONSTRUCTION INSTITUTE. - 2019. - С. 155-157.

15. Пименов, А.Т. Модификация составов металлургических шлаков для повышения их гидравлической активности / А.Т. Пименов, **В.С. Прибылов** // Современные материалы, техника и технологии. – 2018. – № 6 (21). – С. 106-112.

16. Пименов, А.Т. Влияние сталеплавыльных шлаков в составе асфальтобетона дорожных покрытий на их свойства в процессе эксплуатации / А.Т. Пименов, **В.С. Прибылов** // Ресурсосбережение и экология строительных материалов, изделий и конструкций : сборник научных трудов Международной научно-практической конференции, Курск, 16 ноября 2018 года / Юго-Западный государственный университет; Россия Московский государственный машиностроительный университет. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2018. – С. 306-309.

Прибылов Вячеслав Сергеевич

**АСФАЛЬТОБЕТОН НА ОСНОВЕ
СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ШЛАКОВ С НАНОДОБАВКАМИ**

Автореферат

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Новосибирский государственный архитектурно-строительный
университет (Сибстрин)

630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113

Отпечатано мастерской оперативной полиграфии
НГАСУ (Сибстрин)

Тираж 100. Заказ