

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Новосибирский государственный архитектурно-строительный
университет (Сибстрин)»

На правах рукописи



Прибылов Вячеслав Сергеевич

**АСФАЛЬТОБЕТОН НА ОСНОВЕ
СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ШЛАКОВ С НАНОДОБАВКАМИ**

Специальность 2.1.5 - Строительные материалы и изделия

ДИССЕРТАЦИЯ

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук, профессор
Пичугин Анатолий Петрович

Новосибирск - 2024

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	5
Глава I. Предпосылки и опыт использования шлаковых материалов в составе асфальтобетона дорожных покрытий	12
1.1.Перспективы вовлечения отходов промышленности в дорожное хозяйство	12
1.2.Физико-химические процессы в асфальтобетоне.....	19
1.3.Шлаковые материалы и их применение при строительстве дорожных покрытий из асфальтобетона	24
1.4.Повышение долговечности асфальтобетона дорожных покрытий	27
1.5.Современные методы проектирования асфальтобетонных смесей	30
Выводы по главе I	33
Глава 2. Характеристика материалов и методов исследования	36
2.1.Прецизионность методов и полученных результатов измерений.....	36
2.2.Определение основных физико-механических свойств сталеплавильных шлаков как заполнителей асфальтобетонной смеси.....	38
2.3.Анализ фазового и химического состава сталеплавильных шлаков	43
2.4.Оценка устойчивости структуры и радиологические исследования сталеплавильного шлака.....	46
2.5.Определение сцепления вяжущего со шлаком	48
2.6.Определение основности сталеплавильных шлаков	49
2.7.Определение физико-механических показателей вяжущего.....	49
2.8.Определение основных показателей нанодобавок	51
Выводы по главе II	52
Глава III. Исследование и анализ строительно-технических свойств асфальтобетона на сталеплавильных шлаках.....	53

3.1. Анализ морфологии асфальтовяжущего вещества на основе шлака печь-ковш	53
3.2. Исследование строительно-технических свойств асфальтового бетона на сталеплавильных шлаках.....	56
3.3. Проектирование оптимальных составов асфальтобетонных смесей на основе сталеплавильных шлаков	64
Выводы по главе III.....	72
Глава IV. Объемно-функционально-проектирование асфальтобетонных смесей на основе сталеплавильных шлаков.....	74
4.1. Исследование объемных показателей сталеплавильных шлаков как заполнителей асфальтобетонной смеси	74
4.2. Выбор битумного вяжущего	80
4.3. Определение физико-механических и эксплуатационных характеристик шлакоасфальтобетонной смеси	85
Выводы по главе IV.....	95
Глава V. Физико-химические процессы в асфальтовом бетоне на основе сталеплавильных шлаков, модифицированном нанодобавками.....	96
5.1. Модификация нанодобавками асфальтовяжущего вещества, содержащего сталеплавильные шлаки	96
5.2. Повышение адгезионных свойств битума в шлакоасфальтобетоне за счет модификации нанодобавками	103
5.3. Долговечность асфальтобетона на сталеплавильных шлаках с модифицированным нанодобавками битумом.....	108
Выводы по главе V	114
Глава VI. Техничко-экономическое обоснование результатов исследования.....	116

6.1.Экономическая эффективность применения модифицированной нанодобавкой шлакоасфальтобетонной смеси при строительстве автомобильных дорог	116
6.2.Разработка технологии приготовления шлакоасфальтобетонной смеси.....	121
Выводы по главе VI.....	126
Заключение	127
Список литературы	130
Приложения	148
Приложение № 1. Акт отбора образцов (проб) сталеплавильного шлака	148
Приложение № 2. Патент на изобретение	149
Приложение № 3. Акт внедрения результатов исследования	151
Приложение № 4. Справка о внедрении результатов.....	155

ВВЕДЕНИЕ

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 [1].

Асфальтобетонные покрытия с применением пористых отходов промышленности характеризуются повышенными транспортно-эксплуатационными показателями, обусловленные свойствами сталеплавильного 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 сталеплавильного 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 сталеплавильных шлаков: мартеновский, конвертерный, электросталеплавильный 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 других 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 сталеплавыльных шлаков с нанодобавками повышенной эксплуатационной надежности и долговечности.

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

1. Определение и анализ свойств сталеплавыльного шлака как заполнителя минерального остова асфальтобетонной смеси.
2. Исследование влияния нанодобавок на свойства битумных композиций, содержащих в своем составе сталеплавыльный шлак.
3. Подбор оптимальных составов шлакоасфальтобетонной смеси, отвечающих по физико-механическим характеристикам требованиям НТД.
4. Оценка долговечности асфальтобетона на сталеплавыльных 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 заполнителе создание равномерно распределенной структуры за счет формирования 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 асфальтобетоне 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 сталеплавильных шлаков с нанодобавками.

Предметом исследования являются свойства шлакоасфальтобетона, модифицированного нанодобавками.

Положения, выносимые на защиту:

1. Характер влияния сталеплавильных шлаков на прочность, водостойкость, набухание асфальтобетона при длительном насыщении водой.
2. Состав и объемные свойства шлакоасфальтобетонной смеси, запроектированной по методологии Superpave.
3. Результаты модификации содержащей сталеплавильный 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); 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.

1. ПРЕДПОСЫЛКИ И ОПЫТ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ШЛАКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ В СОСТАВЕ АСФАЛЬТОБЕТОНА ДОРОЖНЫХ ПОКРЫТИЙ

1.1. Перспективы вовлечения отходов промышленности в дорожное хозяйство

Транспортная система является важнейшей частью инфраструктуры и экономики любой страны. В России она является одной из наиболее обширных в мире, включающей более 1089,3 тыс. км автомобильных дорог с твердым покрытием (см. табл. 1.1).

Таблица 1.1 – Протяженность автомобильных в разных странах (по состоянию на 2019 г.) [2]

№ п/п	Страна	Год	Все дороги, тыс. км	в том числе с твердым покрытием		Плотность автомобильных дорог, км дорог на 1000 км ² территории	
				тыс. км	в % от общей протяженности дорог	всего	в том числе с твердым покрытием
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Китай	2018	4846,5	-	63,7	504,8	-
2	Россия	2019	1542,2	1089,3	70,6	90,0	64,0
3	Япония	2017	1224,0	-	82,2	3239,2	-
4	Франция	2018	1103,8	-	100,0	2001,4	-
5	Германия	2006	644,5	-	-	1805,2	-
6	Польша	2018	426,2	-	68,0	1363,0	-
7	Великобритания	2018	422,8	-	100,0	1740,4	-
8	Швеция	2018	222,4	-	23,2	494,4	-
9	Венгрия	2018	215,6	-	37,9	2317,9	-
10	Украина	2019	161,9	-	97,8	280,8	-

Однако, существенная доля дорожной сети работает в режиме перегрузки. Из-за недостатка финансирования значительные проблемы испытывают

региональные и местные автомобильные дороги, из которых 53,6% не соответствует нормативному состоянию [2].

В ноябре 2021 года Правительством России утверждена транспортная стратегия [3], которая предполагает инвестиции свыше 60 трлн рублей до 2035 г. Большая часть этих средств пойдет на автомобильные дороги. С одной стороны, это развитие существующих городских улиц и дорог с твердым покрытием по программе «Безопасные и качественные дороги», с другой – строительство составляющих опорную сеть России высокоскоростных магистралей (например, а/д М-12 «Восток») и прочих дорог высоких категорий, на которые приходится существенная доля всех грузо- и пассажироперевозок. Данная ситуация потребует усилий по обеспечению и поддержанию на таких участках соответствующих НТД показателей ТЭС¹.

От качества проезжей части дорог напрямую зависит их долговечность. Сегодня свыше 70 % отечественной сети дорог имеют покрытия, которые могут быть подвержены в процессе эксплуатации различным деформациям и разрушениям, что может быть связано со следующими факторами [4,5]:

- возрастающая из года в год интенсивность движения транспорта, что существенно сокращает межремонтные сроки службы;
- привязанность продолжительности строительного сезона к климатическим условиям объекта строительства;
- постоянные тенденции роста стоимости расходных материалов, импортозамещение, а также хроническое недофинансирование ремонтных и восстановительных работ.

В таких условиях на первый план выходят дорожно-строительные материалы, которые в процессе их производства, эксплуатации и последующей регенерации позволят продлить жизненный цикл дорожных покрытий и связанные с ним межремонтные сроки за счет минимизации появления дефектов от разрушений под нагрузкой, т.е. увеличить уже упомянутые выше потребительские

¹ Транспортно-эксплуатационное состояние.

качества автомобильной дороги. Асфальтовый бетон является одним из основных конструктивных строительных материалов, применяемых при строительстве, реконструкции и ремонте автомобильных дорог и городских улиц. Несмотря на все его преимущества, асфальтобетонные покрытия подвержены деформациям от действия температур: колееобразованию под действием высоких температур в летний период, трещинообразованию – при отрицательных температурах зимой. Учитывая ежегодный рост грузонапряженности в связи с уровнем автомобилизации, возникает проблема повышения транспортно-эксплуатационных характеристик асфальтового бетона [6,7].

Исполнение поручения Президента России по увеличению межремонтного срока службы до 12 лет стимулирует постоянный поиск более эффективных строительных материалов, которые в условиях сложившейся экономики позволят получить наиболее качественный и надежный продукт в виде дорожного покрытия. Обеспечить это возможно только при условии внедрения в практику строительства новейших достижений науки и техники, рационального использования новых более прочных и дешевых местных материалов, а также расширения сырьевой базы дорожного строительства за счет использования отходов промышленности.

Практика показывает, что строительство автомобильных дорог требует огромного комплекса ресурсов, а в регионах со сложными климатическими условиями - еще и связано со значительными трудностями вследствие экстремальных условий их эксплуатации. Дорожная отрасль является одним из основных потребителей ресурсов природного происхождения. Увеличение в отрасли доли невозобновляемых источников сырья и связанные с этим выбросы в атмосферу способствуют «...усилению антропогенной нагрузки на окружающую среду» [8]. В связи с тем, что объем отходов и вторичных ресурсов современного промышленного производства наряду со стоимостью их размещения, особенно в густонаселенных регионах России, продолжает увеличиваться, возрастает необходимость переработки - рециклинга таких материалов для повторного использования. Распоряжением Правительства России от 10 мая 2016 года № 868 - р были сформулированы «дорожные карты», предусматривающие

существенное сокращение отходов и выбросов в окружающую среду, а также снижение использования природных материалов и невозобновляемых источников электроэнергии.

Одним из приоритетных и конкурентоспособных направлений устойчивого развития промышленности является создание условий для вовлечения техногенных отходов (в качестве сырьевых компонентов) в производство строительных материалов. К таким отходам промышленного производства относят [9,10]:

- золы и шлаки ТЭЦ;
- металлургические (сталеплавильные) шлаки;
- шламы (нефелиновые, бокситовые, нефтяные);
- отходы нефтехимических, коксохимических и лесохимических производств;
- отработанные масла;
- полимерные отходы;
- продукты переработки ТБО.

Нерациональное обращение с отходами черной металлургии актуализирует проблему практической утилизации шлаков, включая их внедрение и повсеместное применение предприятиями дорожного хозяйства. Исследования показывают [11], что лишь около трети отходов вторично используется, преимущественно для отсыпки земляного полотна автомобильных дорог муниципального типа (дороги с переходным и низшим типом покрытия), а также щебеночных оснований и асфальтобетонных покрытий дорог различного назначения. При этом абсолютно большая часть металлургических шлаков складывается в отвалах, образуя многотонажные терриконики и негативно влияя на окружающую среду конкретных территорий». Для сравнения, в странах Западной Европы наблюдается обратная картина (см. рис. 1.1). Страны Евросоюза, США и Япония занимают лидирующие позиции в поиске решений по эффективному применению металлургических шлаков в промышленности - на международном уровне его использование достигает ~ 84,4 - 98,4% [12].

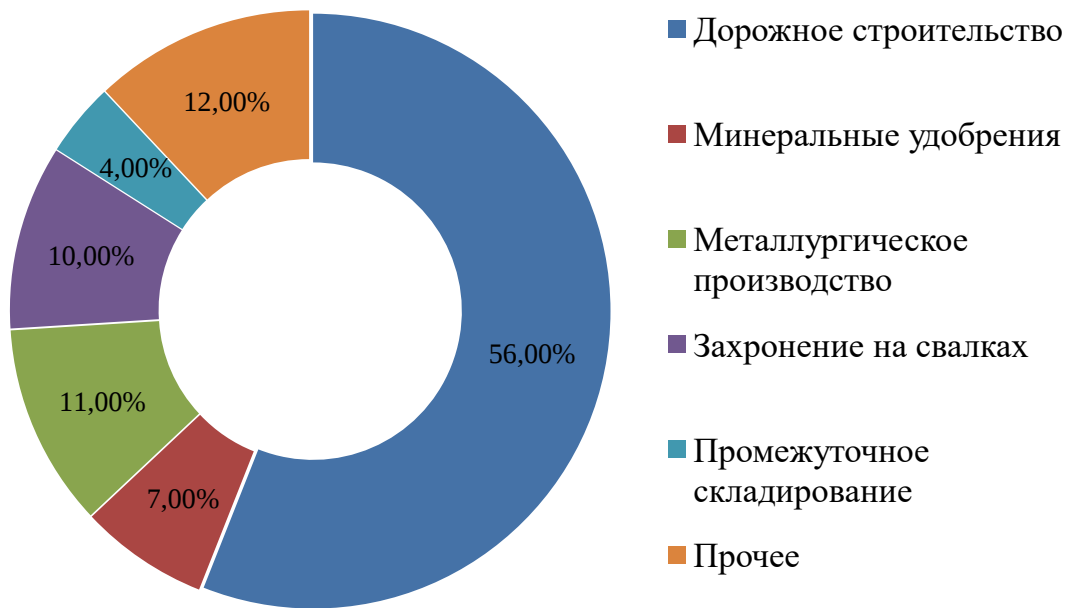


Рисунок 1.1. Использование сталеплавильных шлаков на территории Германии

Здесь уже реализована относительно самостоятельная производственная цепочка и система контроля качества отходов черной металлургии. Следует отметить, что 32,4 - 49,7 % от массы применяемого металлургического (сталеплавильного) шлака в развитых странах используется в дорожном строительстве. В Украине, по состоянию на 2020 - 2021 гг., удельный вес отходов производства: металлургические шлаки, золы уноса и т.д. - при осуществлении закупок работ по строительству и текущему ремонту автомобильных дорог общего пользования уже составлял не менее 10 %.

В настоящее время на территории России основные направления доктринальных документов как информационной базы регуляции развития экономических отраслей определяют острую необходимость повышения доли вовлеченных в строительную индустрию альтернативных продуктов переработки промышленных предприятий, а также сокращение доли минерального сырья и его замену промышленными отходами. Сформулированный Бардиным И.П. принцип: «Отходы одних технологических переделов или производств должны служить сырьем для других» - является актуальным и по сей день. Общее количество накопленных отходов в целом по России оценивается в 80–100 млрд тонн. По количеству накопленных отходов лидирует металлургическое производство.

Здесь огромные площади — около 1 млн га — занимают шлаковые отвалы (см. табл. 1.2).

Таблица 1.2 - Характеристика объемов основных типов отходов черной металлургии в млн м³

Экономические районы	1913 – 1969 гг.	1970 – 1979 гг.	1980 – 1989 гг.	1990 – 1995 гг.	Общие объемы, млн м ³
Сталеплавильные шлаки					
Уральский	449,80	362,20	403,50	16,62	1381,70
Западно-Сибирский	123,91	97,44	117,14	50,57	389,10
Восточно-Сибирский	6,43	5,70	6,70	2,29	21,60
Дальневосточный	8,01	8,69	10,51	4,26	31,50
ВСЕГО	588,15	474,03	537,85	73,74	1 823,90

Металлургические шлаки (см. рис. 1.2) представляют собой ценное сырье для приготовления нерудных материалов и минеральных вяжущих, для производства ряда строительных материалов и изделий, являющихся более дешевыми и прочными, чем полученные из природного сырья. Исследования Тулаева А.Я. [13] подтверждают более низкую себестоимость таких шлаковых строительных материалов в сравнении с аналогичной продукцией из горных пород.



Рисунок 1.2. Хранение и сортировка сталеплавильных шлаков в отвалах (Кемеровская область)

На рис. 1.3 представлено сравнение стоимости инертных материалов, разрабатываемых в природных карьерах на территории Кемеровской и Новосибирской области, с аналогичной стоимостью фракционированных шлаковых материалов, предлагаемых ООО «Технология рециклинга» (г. Новокузнецк, Кемеровская область).

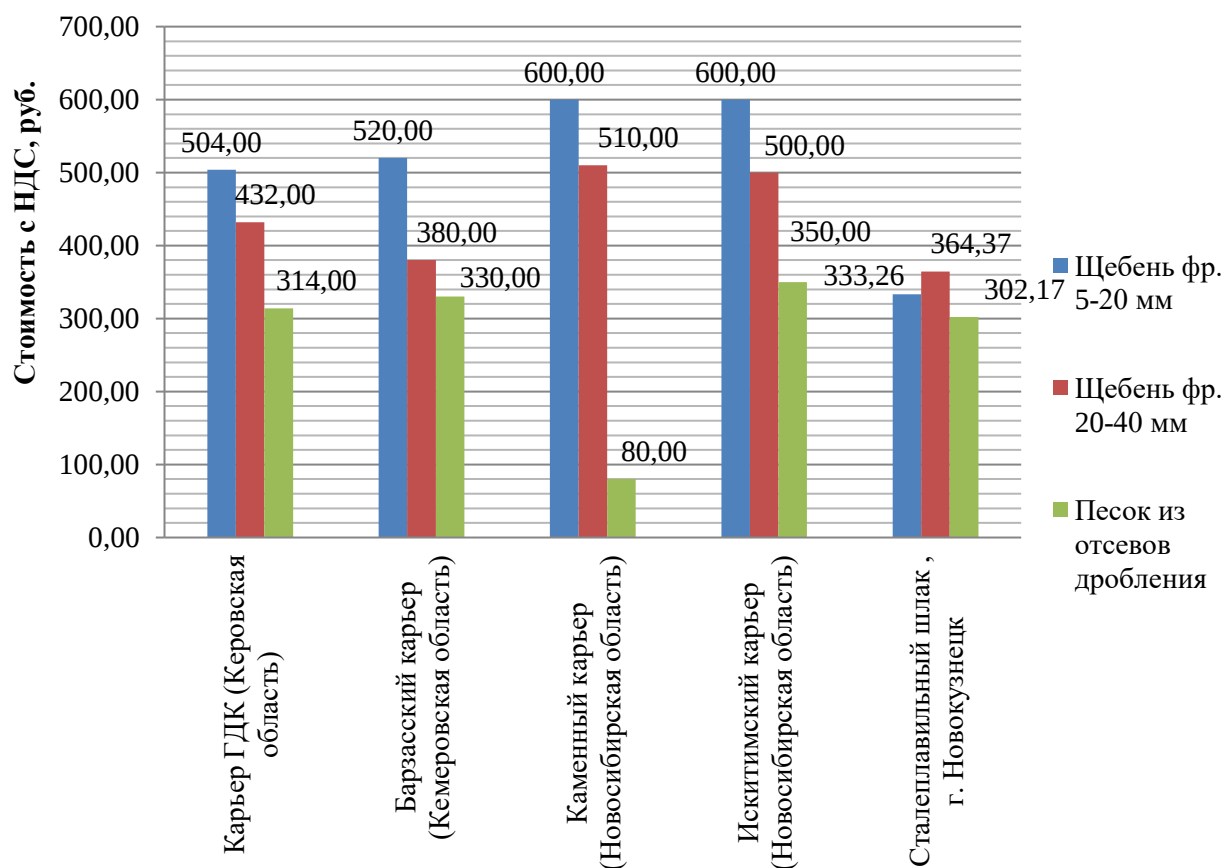


Рисунок 1.3. Сравнение стоимости инертных материалов в Новосибирской области (по состоянию на 2020 год) [14]

Важной составляющей состава отходов черной металлургии являются сталеплавленные шлаки, которые по химическому составу различаются по соотношению CaO/SiO_2 . Их особенность заключается в том, что техногенное сырье уже прошло высокотемпературную обработку, с чем связано формирование кристаллических и аморфных структур, которые оказывают влияние на развитие процессов гидратации. При этом отсутствие органических примесей в составе техногенного сырья предоставляет возможность их вторичного использования на предприятиях стройиндустрии, включая строительство дорог. Установлено, что

в химическом составе сталеплавильных шлаков содержатся одноименные с портландцементным клинкером ионы (кальций, кремний, железо, магний и др.), что определяет возможность их использования в комплексе с минеральными вяжущими, способствуя не только расширению спектра производимых дорожно-строительных материалов, но и экономической целесообразности их применения для целей дорожного строительства.

1.2. Физико-химические процессы в асфальтобетоне

Асфальтобетон на протяжении многих десятилетий остается самым распространенным материалом для устройства покрытий городских улиц и дорог. Асфальтобетонные покрытия действительно имеют неоспоримые преимущества по сравнению с другими типами усовершенствованных покрытий капитальных дорожных одежд [15-18]:

- относительно более дешевая стоимость строительства и эксплуатации;
- возможность применения в разных природно-климатических условиях;
- хорошее сцепление покрытия с шинами транспортных средств;
- полная механизация работ жизненного цикла;
- технологичность и ремонтпригодность покрытий;
- возможность повторного использования – регенерации;
- и др.

Отмечается, что положительные свойства асфальтобетона являются прямым следствием возможности его функционирования в широком диапазоне температуры окружающей среды, восприятия большой номенклатуры видов и сочетаний колесной нагрузки, технологичности изготовления, укладки в покрытие и последующей эксплуатации (см. рис. 1.4).



Рисунок 1.4. Основные виды воздействий на дорожное покрытие в процессе эксплуатации

В процессе эксплуатации происходит непрерывное изменение свойств (обратимых и необратимых) асфальтобетона и как строительного материала, и как конструктивного элемента (слоя износа) многослойной системы дорожного покрытия нежесткого типа.

Асфальтовые бетоны представляют собой высококонцентрированные дисперсные системы, которые характеризуются сильно развитой межфазной поверхностью и высокой концентрацией дисперсной фазы в жидкой и газовой дисперсионных средах [19].

Изучению структуры асфальтобетона и его свойств посвящены работы Урьева Н.Б., Котлярского Э.В., Королева И.В. и др. [20,21,22].

Установлено, что формирование структуры и свойства асфальтобетона зависит не только от свойств и количественного соотношения исходных компонентов в асфальтобетонной смеси, но и физико-химических процессов структурообразования материала.

Сформулированные Королевым И.В. положения «о структурообразовании в конгломератах из органоминеральных смесей» [21] позволяют прогнозировать

характер и природу явлений, протекающих на границе раздела фаз высококонцентрированных дисперсных систем. Рассмотрение особенностей формирования их структуры приводит к необходимости учета специфики контактных взаимодействий, поскольку свойства асфальтобетона зависят от количественных и качественных характеристик, а также свойств контактов между частицами дисперсных фаз через тонкую прослойку битума [22-30]. Следовательно, создание оптимальных условий для формирования структурных контактных связей на границе раздела фаз «вяжущее – минеральный заполнитель» может в значительной мере способствовать образованию смесей с необходимыми технологическими свойствами, а асфальтобетона — с требуемыми показателями ТЭС (см. рис. 1.5).

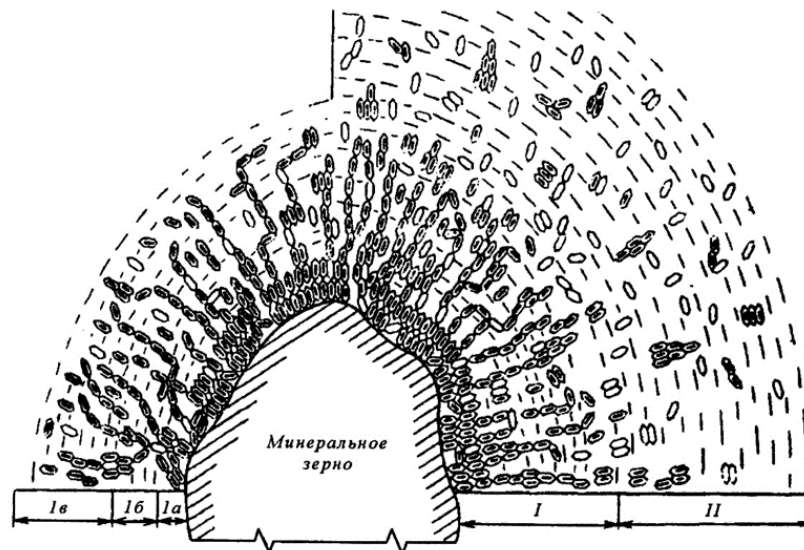


Рисунок 1.5. Строение пленки битума на минеральной частице по Королеву И.В. [22]: I – ориентированный слой; II – объемный битум; I_a – твердообразная зона; I_b – структурированная зона; I_v – диффузная зона

Формирование структуры асфальтового бетона и контактов между его заполнителями происходит на всех стадиях технологического процесса - от приготовления смеси на АБЗ до укладки и уплотнения ее в покрытии автомобильных дорог [31,32].

Прозорова Л.А. в своем исследовании [33] отмечает зависимость свойств вяжущего от характера пористости минеральных составляющих, обуславливающей «фильтрационный эффект», и структурного типа самого битума.

При взаимодействии органического вяжущего с минеральным заполнителем асфальтобетонной смеси происходят сложные физико-химические процессы [34 - 42]:

- физические процессы на границе раздела фаз «вяжущее – минеральный заполнитель» (см. рис. 1.5);
- процессы химической адсорбции, фильтрации вяжущего и его компонентов внутрь минеральных зёрен (хемосорбционные процессы).

Влияние поверхности минерального заполнителя распространяется на определенную толщину битумной пленки [42]. Формирование пленки битума обуславливается, прежде всего, хорошим смачиванием минерального заполнителя смеси битумом. Именно смачивание обеспечивает полное обволакивание частиц битумом, в результате чего формируется ориентированный слой битума и происходит физико-химическое взаимодействие его с минеральным материалом. Ивкин А.С. в своей работе [42] отмечает неравномерные по толщине прослойки битума в контактной зоне. Однако, такие битумные пленки, по его мнению, обладают достаточно высокой прочностью сцепления и обеспечивают возможность восстановления контактов между твердыми зёрнами, входящими в состав асфальтобетонной смеси. По этой причине свойства асфальтового бетона определяются особенностями связей, возникающих между отдельными минеральными частицами, и зависят от свойств битума, толщины слоя на минеральной подложке, а также процессов взаимодействия минеральных материалов и битума на их общей поверхности раздела.

При взаимодействии минеральных заполнителей с битумом наряду с физической адсорбцией происходит фильтрация вяжущего и его компонентов внутрь зёрен минерального материала (хемосорбция). Интенсивность этого процесса зависит главным образом от характера пористости минерального заполнителя.

В работах [13, 17, 35, 36, 38-42] показаны сорбционные процессы при взаимодействии пористых заполнителей с битумным вяжущим. Отмечается, что избирательная фильтрация компонентов органического вяжущего в поры

и капилляры минеральных заполнителей с тонкопористой структурой начинается на стадии приготовления асфальтобетонных смесей на АБЗ и продолжается в течение всего периода эксплуатации дорожных покрытий из асфальтобетона. Вглубь материала проникают наименее вязкие компоненты битума – масла. Мелкие поры заполняют смолы. На поверхности минерального заполнителя адсорбируются асфальтены.

В пористом заполнителе значительное количество смол сконцентрировано в порах на поверхности зерен, а часть масел, за счет избирательной диффузии, проникнет внутрь. В результате происходит своего рода модификация вяжущего. Адсорбционные слои битума на поверхности зерен пористого заполнителя несколько обедняются смолами и маслами. Вязкость поверхностных слоев битума возрастает вследствие увеличения концентрации наиболее реакционноспособных асфальтенов и асфальтеновых кислот, что способствует образованию прочных адсорбционных связей на поверхности раздела фаз «вяжущее – минеральный заполнитель». Аккумулируя масляные фракции битума, пористый заполнитель будет в процессе эксплуатации асфальтобетона возвращать их к поверхности контактной зоны и замедлять старение битума в асфальтобетоне.

Так как адгезия битумного вяжущего с поверхностью минерального заполнителя зависит от разности полярностей этих материалов, то очевидно, что малополярный нефтяной битум будет обладать значительным сродством с «основными гидрофобными минеральными материалами» [43].

Взаимодействие битума со шлаками (относительно гидрофобными материалами) протекает интенсивно, так как на их границе «реализуются физические, механические, химические, электростатические и диффузионные процессы, а поэтому адгезионные связи на границе «битум — шлаковый материал» более прочные и устойчивые к воздействию окружающей среды.

Самодуров С.И., Ковалев Н.С. в своих работах [44, 45] отмечали высокую химическую и гидравлической активность металлургических шлаков.

Битум в шлаковом асфальтобетоне почти полностью находится в структурированном состоянии. При контакте с водой в шлаковых материалах

происходят процессы гидратации. При взаимодействии органического вяжущего с продуктами гидратации на разделе фаз образуется прочный адгезионный контакт, устойчивый к длительному воздействию воды и сдвиговым усилиям.

В работах [44 - 46] также было отмечено, что процесс гидратации шлака продолжается на протяжении всего срока службы дорожных покрытий. Данный процесс обуславливается присутствием воды, которая адсорбируется здесь из окружающей среды (воздух, земляное полотно, при выпадении осадков) или вводится непосредственно при укладке и уплотнении покрытия.

Пористая структура зерен шлакового материала обуславливает более развитую удельную поверхность как крупно-, так и мелкозернистых его компонентов в смеси.

Шлаки — это хрупкие и высокопористые материалы, при уплотнении которых происходит дробление зерен в наиболее ослабленных зонах при сравнительно высоких напряжениях. Это приводит к повышению прочности шлаковых материалов за счет ликвидации дефектов структуры при их уплотнении и дроблении. Дробление зерен шлаковых материалов также приводит к увеличению их общей поверхности, при этом оптимальное содержание битума в шлаках изменяется в зависимости от уплотняющей нагрузки и пористости самого шлака [45,46].

1.3. Шлаковые материалы и их применение при строительстве дорожных покрытий из асфальтобетона

О применении различных шлаковых материалов в дорожном строительстве известно давно. Так, например, уже в начале XX века металлургические шлаки широко применялись для дорожного строительства в Англии и США. В 1960-1980 годах их активно использовали и на территории бывшего СССР при строительстве дороги М-05 Киев – Одесса. В Китае, например, применение сталеплавильного шлака началось только в начале 1990-х гг. Однако его

применение в то время было ограничено имеющимися технологиями и оборудованием по переработке. На территории современной России первые опытные участки (не считая промышленные дороги советской эпохи) с применением металлургических (доменных) шлаков в дорожном покрытии появились в 2021 году при строительстве а/д М-12 «Восток» на участке Москва – Казань в рамках реализации проекта «Европа – Западный Китай».

В СССР и на постсоветском пространстве исследованию возможности применения металлургических шлаков в составе асфальтобетона дорожных покрытий были посвящены работы Самодурова С.И., Гезенцева Л.Б., Королева И.В, Тулаева А.Я., Ковалева Н.С., Коганзона М.С. и др. [47-51]. Все вышеперечисленные ученые отмечали, что свойства асфальтобетона со шлаковыми материалами определяются типом шлака и его структурой, от которых, в свою очередь, зависит характер его взаимодействия с битумом.

Особенность асфальтобетонных покрытий со шлаковыми материалами – это более длительный процесс их формирования. Исследования ХАДИ показывают, что в процессе эксплуатации шлакоасфальтобетонных покрытий в них происходит перераспределение пористости — уменьшается объем пор большого диаметра. Такое изменение показателей оказывает положительное влияние на морозостойкость шлакоасфальтобетона. Здесь следует отметить, что опыт ХАДИ оправдывает используемую в Supergravel теорию достижения асфальтобетоном в процессе его эксплуатации под нагрузкой «целевой» величины остаточной пористости без существенных пластических деформаций, которые, в свою очередь, не оказывают влияния на безопасность дорожного движения. Проведенные в БГТУ (Минск, Белоруссия) исследования [52] также подтверждают длительный процесс формирования покрытий из шлакоасфальтобетона – 2 – 5 лет с момента строительства. При этом на них не наблюдается образование колеи и наплывов.

В одно время с советскими и российскими учеными обоснованием возможности применения металлургических шлаков в составе асфальтобетона дорожных покрытий занимались и западные ученые и специалисты дорожной отрасли. Осенью 1994 года в штате Орегон, США, были построены

экспериментальные участки покрытий с использованием 30 % шлака сталеплавильного производства в горячей асфальтобетонной смеси (hot mix asphalt concrete (НМАС)). В проведенных L. Hunt, G. Boyle (США) исследованиях [53] сообщается о повышении устойчивости к колееобразованию и улучшении сцепных свойств «в течение пяти лет наблюдения за покрытиями».

Положительный эффект от применения сталеплавильного шлака как заполнителя минерального остова асфальтобетонной смеси также демонстрируют исследования Р. Ahmedzade, В. Sengoz (Турция). Установлено, что асфальтобетонные смеси с его использованием, имеют более высокую пористость, адгезию с вяжущим, благодаря структуре поверхности и химическому составу, форме частиц [54]. Высокая поронепрерывность заполнителей из сталеплавильного шлака может повысить водонепроницаемость в асфальтобетонных смесях и улучшить сопротивление скольжению и аквапланированию, а адгезия с битумом может решить проблему проникания влаги в нижележащие слои дорожной одежды в связи с повреждением покрытия. Эти свойства способствуют повышению качества асфальтобетонных смесей и покрытий с их использованием, и уровню безопасности дорожного движения по ним.

Повышенные транспортно-эксплуатационные показатели асфальтобетона на шлаковых материалах подтверждают результаты исследований, полученные уже в 2020 году учеными 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 при совместном участии лабораторий транспортного и гражданского строительства университетов Китая, Мельбурна, стран Евросоюза - Польши, Чехии, Словении и др. Для обеспечения стабильности физико-механических свойств шлакоасфальтобетона в покрытии предполагается предварительное выдерживание такого шлака в отвалах в течение не менее полугода. Несмотря на повышенную пористую структуру, увеличение в объеме сталеплавильного шлака в воде составляет около 1,1 %, что объясняет хорошую объемную стабильность асфальтобетона на шлаковых материалах.

Промышленные испытания показали, что шлаковые асфальтобетонные смеси обладают значительным сопротивлением износу поверхностей и антискользящим действием аналогично базальтовым покрытиям. Проведенные Sofilić T., Mladenović A., Sofilić U. (Словения) исследования [55] свидетельствуют о повышенной износостойкости дорожных покрытий на сталеплавильных шлаках.

Несмотря на положительные характеристики асфальтового бетона на шлаковых материалах, Расстегаевой Г.А. отмечается [56,57] негативное влияние пористости шлакового щебня на эксплуатационные свойства асфальтобетона. Выборочная диффузия летучих фракций битума в минеральный материал приводит к его преждевременному старению в покрытии., Сравнивая шлакоасфальтобетон с высокопористым асфальтобетоном из природных минеральных заполнителей, Гезенцевей Л.Б., Руденский А.В. пришли к выводу о недостаточной их водостойкости. Однако, наблюдения за уже построенными покрытиями показали высокую их устойчивость к циклам переменного замораживания – оттаивания.

Приведенные выше результаты исследований отечественных и зарубежных ученых свидетельствуют о необходимости дополнительного исследования долговечности асфальтобетона на сталеплавильных шлаках, связанного с особенностями его структуры.

1.4. Повышение долговечности асфальтобетона дорожных покрытий

Опыт и условия эксплуатации покрытий из асфальтобетона свидетельствуют о преждевременном снижении показателей их транспортно-эксплуатационного состояния, связанном, с одной стороны, с увеличением интенсивности движения транзитного транспорта, увеличением осевых нагрузок, с другой – с изменением условий эксплуатации и дорожно-эксплуатационных воздействий, в связи с чем возникают различные деформации и разрушения [58-71]. Таким образом, одной из

основных проблем при строительстве и эксплуатации асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог является повышение их долговечности.

Под долговечностью асфальтобетона в соответствии с ГОСТ Р 59280-2020² понимается свойство асфальтобетона сопротивляться постепенному накоплению деформаций под действием циклических напряжений до момента разрушения.

Значительное влияние на долговечность асфальтовых бетонов оказывает присутствие в нем воды. Она способствует отслаиванию битумного связующего с поверхности минерального заполнителя и значительно понижает механическую прочность композиции. При водонасыщении адсорбционные слои воды, понижая поверхностную энергию, облегчают образование новых поверхностей в асфальтобетоне при его деформировании. Расклинивающее действие водных пленок, разъединяющих минеральные зерна и отслаивающих битумные слои, усиливает разрушающий эффект. Здесь эксплуатационную надежность и долговечность дорожных покрытий можно повысить за счет оптимизации структуры асфальтобетонных смесей и асфальтобетонов. Плотность – это важный показатель, характеризующий структуру асфальтобетона, его прочностные и реологические свойства. Завьялов М.А., Кириллов А.М. в своем исследовании [72] подтверждают данную теорию. Уплотнение, по их мнению, приводит «...к повышению числа связей в материале - адгезионных и когезионных - и, как следствие, к увеличению прочности». Плотность здесь коррелируется с пористостью материала. Известно, что остаточная пористость должна быть не менее 1,5 – 2 % объема асфальтового бетона, что необходимо для компенсации тепловых колебаний объема вяжущего и минеральной части при изменении значений температуры.

Интенсивность изменения прочности и деформативных свойств асфальтового бетона, вызываемая колебаниями температуры внешней среды или покрытия, называется теплоустойчивостью. Повышение теплоустойчивости

² ГОСТ Р 59280-2020 Дороги автомобильные общего пользования. Смесей асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. Метод определения усталостной долговечности при непрямом растяжении. - Введ. 2021-02-01.

асфальтовых материалов в наибольшей степени проявляется при оптимальных структурах, для которых характерным признаком служит предельное сближение зерен и частиц твердой фазы [73]. Отсутствие достаточной теплоустойчивости асфальтового бетона в области высоких температур приводит к образованию пластических деформаций в покрытии, то есть потере деформационной устойчивости. В асфальтобетоне могут возникать остаточные деформации в виде наплывов, волн и сдвигов.

Деформационную устойчивость асфальтового бетона в области отрицательных температур характеризует трещиностойкость. Обеспечение требуемой трещиностойкости является одной из основных задач продления срока службы дорожных покрытий, и тем самым, сокращения затрат на ремонтные работы в будущем. Результаты проведенных во второй половине XX века исследований в области предотвращения образования низкотемпературных трещин сводились к рекомендациям по изменению состава асфальтобетона и введению в него различного рода добавок. Предлагаемые решения в большей или меньшей степени помогали лучше прогнозировать долговечность дорожных покрытий, но не решали проблемы в целом.

Установлено, что одной из причин появления в дорожном асфальтобетонном покрытии деформаций и разрушений является старение битума. Под старением битума понимают всю совокупность обратимых и необратимых изменений его химического состава и структурно-механических свойств, происходящих в процессе его хранения, технологической переработки и эксплуатации. Борисенко Ю.Г., Савченко Т.С. в своей работе [73], к числу основных факторов, вызывающих старение вяжущего, относят «взаимодействие компонентов битума с кислородом воздуха и водой, колебания температур, воздействие инфракрасного и ультрафиолетового излучения, механические нагрузки и др.»

Улучшить свойства битума представляется возможным путем введения в него модификаторов. Битумные вяжущие материалы, как правило, являются отходами процесса нефтепереработки. Поэтому важнейшей задачей модификации таких битумов становится улучшение их физико-механических и химических

свойств, значительно сдерживающих старение вяжущего. Для этого используют введение в их состав различного рода ПАВ и добавок, в том числе углеродных наноматериалов. Применение наномодифицирующих добавок предоставляет возможность при незначительной коррекции технологии приготовления асфальтобетонных смесей увеличить прочностные и сдвиговые характеристики дорожных покрытий при повышенных температурах и улучшить эксплуатационные свойства дорожного полотна под действием транспортной нагрузки [74].

1.5. Современные методы проектирования асфальтобетонных смесей

Обеспечение прочности и устойчивости асфальтобетона в дорожных покрытиях длительное время было обусловлено соответствием физико-механических показателей запроектированного состава требованиям ГОСТ 9128-2013 [75-77]. Считается, что указанные нормируемые показатели прямо или косвенно характеризуют прочность при сжатии и сдвиге, трещиностойкость асфальтобетона в конструктивном слое. В тоже время отмечается невозможность соответствия содержащихся в ГОСТ 9128-2013³ параметров асфальтобетона современным транспортным нагрузкам. Данный вывод основывается не только на том, что уже более 50 лет остаются на одном и том же уровне требования к механическим свойствам материала, но и на невозможности прогнозировать поведение материала в конструкции.

Как показывает мировой опыт, при проектировании оптимальных составов асфальтобетонных смесей большое значение имеют не только местные

³ ГОСТ 9128-2013 Смеси асфальтобетонные, полимерасфальтобетонные, асфальтобетон, полимерасфальтобетон для автомобильных дорог и аэродромов. Технические условия. - Введ. 2014-11-01.

климатические условия, но и применяемые при их приготовлении каменные материалы и вяжущие.

Асфальтобетонные смеси по ГОСТ 9128-2013 и другие, связанные с ним нормативы имеют проблемы в методике подбора и оценки качественных характеристик, которые приводят к дефектам, а выработанная на их основе система контроля приводит к тотальному переуплотнению асфальтобетонных смесей уже на стадии уплотнения покрытия. Это влияет на повышенный износ асфальтобетона вследствие нарушения структуры минерального заполнителя.

Технологические аспекты укладки и уплотнения асфальтобетонных смесей в дорожных покрытиях за последние два десятка лет существенно изменились. Разработка и внедрение системы проектирования смесей по методологии Superpave и подбора вяжущего по критериям PG предоставили отрасли более унифицированный и тщательный выбор материалов и подбор состава асфальтобетонной смеси. Superpave (Superior Performing Asphalt Pavements) – это передовой метод разработки составов асфальтобетонов с высокой эксплуатационной надежностью. В 80-х годах XX века появилось понимание, что вместо существующих (эмпирических) методов Хвима и Маршалла необходим новый фундаментальный метод проектирования состава асфальтобетонной смеси [78]. В 1988 - 1993 гг. США профинансировало проведение стратегической дорожной исследовательской программы (SHRP) с привлечением Института асфальта и ведущих университетов. Программа исследований предназначалась для улучшения эксплуатационных показателей и долговечности дорог США и повышения безопасности автомобильного движения.

Система Superpave применима к плотным горячим асфальтобетонным смесям для слоев оснований и покрытий дорог. В соответствии с [79] такая методология предусматривает установление нового научно обоснованного комплекса показателей качества вяжущих и асфальтобетонов, характеризующих долговечность его долговечность при расчетных климатических и транспортных условиях в течение заданного периода эксплуатации дорожных покрытий.

В литературе [75-81] приводится следующая структура уровней проектирования Superpave (см. рис. 1.6).

Superpave зарекомендовала себя в Европе, США, Канаде, Китае, Саудовской Аравии и др. странах мира. Ее продолжают внедрять и в России под названием СПАС - система объемно-функционального проектирования, адаптировав под местные условия строительства. При заданных нагрузках и климатических условиях она позволяет подбирать для дорожного покрытия оптимальный состав асфальтобетонной смеси.

Применение отвечающих требованиям методологии Superpave асфальтобетонных смесей позволит обеспечить нормативные сроки службы покрытий в условиях высокой интенсивности и грузонапряженности автомобильных дорог при высоких температурах воздуха летом и большого числа переходов через 0 °С в зимний период.

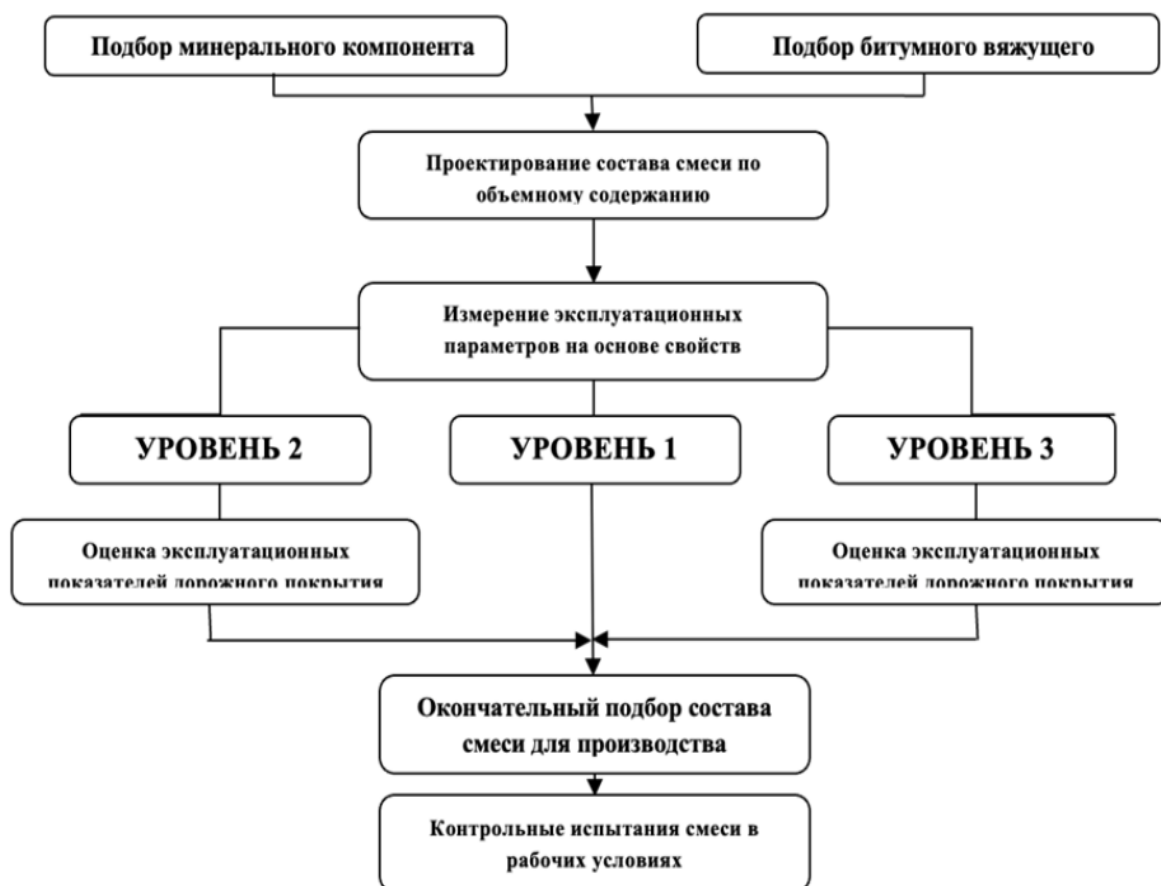


Рисунок 1.6. Структура проектирования асфальтобетона по методике Superpave

Установлено, что в отличие от традиционных смесей по ГОСТ 9128–2013 и ГОСТ 31015–2002⁴ асфальтобетонные смеси SP обладают более высокой устойчивостью к пластическим деформациям в условиях жаркого климата.

Данную методику в России начали применять относительно недавно. Перспективность данного метода подтверждается постоянным ростом объемов его применения на производстве. Так на федеральных автомобильных дорогах Новосибирской области среди применяемых технологий по устройству асфальтобетонного покрытия система объемно – функционального проектирования занимала в 2019 году 16 % всех объемов производства, в 2020 – 41 %, а в 2021 году - уже 64 %.

Следует отметить, что Supergravel позволяет широко применять местные материалы и отходы промышленности, а также использовать при приготовлении асфальтобетонных смесей материал из старых асфальтобетонных покрытий (так называемые RAP - смеси) [82-112].

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ I

1. Повышение требований к межремонтному сроку службы автомобильных дорог стимулирует поиск эффективных строительных материалов, которые в условиях сложившейся экономики позволят получить наиболее качественный и надежный продукт в виде дорожного покрытия. Дорожная отрасль является одним из основных потребителей ресурсов природного происхождения. Увеличение доли в отрасли невозобновляемых источников сырья и связанные с этим выбросы в атмосферу способствуют усилению антропогенной нагрузки на окружающую среду. В связи с тем, что объем отходов и вторичных ресурсов современного промышленного производства наряду со стоимостью их размещения, особенно в густонаселенных регионах России, продолжает увеличиваться, возрастает необходимость переработки - рециклинга таких

⁴ ГОСТ 31015-2002 Смесей асфальтобетонных и асфальтобетон щебеночно-мастичных. Технические условия. - Введ. 2003-05-01.

материалов для повторного использования. Здесь сталеплавильные шлаки представляют собой ценное сырье для приготовления нерудных материалов и минеральных вяжущих, для производства ряда строительных материалов и изделий, являющихся более дешевыми и прочными, чем полученные из природного сырья.

2. Анализ отечественной и зарубежной литературы свидетельствует о невозможности соответствия параметров асфальтобетона, содержащихся в ГОСТ 9128-2013 современным транспортным нагрузкам. Трудности реализации данной проблемы обусловлены с одной стороны сложностью процессов нелинейного деформирования и разрушения битумных материалов, а с другой стороны необходимостью учета влияния внешних факторов - уровня напряжений, температуры, влажности, вида и режимов нагружения, агрессивности окружающей среды и прочее. Оптимальным решением является внедрение в практику дорожного строительства системы объемно-функционального проектирования смесей по методологии (Superpave). Superpave позволяет широко применять местные и вторичные материалы.

В этой связи определенный интерес представляет вовлечение в Superpave отходов сталелитейного производства, в том числе путем полной замены традиционных заполнителей асфальтобетона сталеплавильными шлаками.

3. 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.

4. Долговечность шлакоасфальтобетона в значительной мере зависит от качества битума, от типа и устойчивости его связей с минеральной поверхностью. Применение наноразмерных добавок может значительно улучшить свойства битумных композиций и получить более долговечный и надежный с точки зрения эксплуатации асфальтобетон на их основе.

В соответствии с вышесказанным выдвигается *научная гипотеза* о возможности повышения долговечности и связанных с ней межремонтных

сроков службы дорожных асфальтобетонных покрытий за счет использования в их составе сталеплавильных шлаков и наноразмерных добавок.

2. ХАРАКТЕРИСТИКА МАТЕРИАЛОВ И МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Асфальтобетонная смесь по ГОСТ 9128-2013 – это рационально подобранная смесь минеральных материалов [щебня (гравия) и песка с минеральным порошком или без него] с битумом, взятых в определенных соотношениях и перемешанных в нагретом состоянии.

В исследовании в качестве заполнителей минерального остова асфальтобетонной смеси были использованы сталеплавильные шлаки Новокузнецкого металлургического комбината (г. Новокузнецк, Кемеровская область), в том числе:

1. Мартеновский шлак;
2. Конвертерный шлак;
3. Электросталеплавильный шлак-печь ковш.

В качестве органического вяжущего применялся битум нефтяной дорожный вязкий по ГОСТ 33133-2014⁵ (г. Омск, АО «Газпромнефть» - Омский нефтеперерабатывающий завод).

Сталеплавильные шлаки для испытаний в лаборатории ФГБОУ ВО НГАСУ (Сибстрин) предоставлены ООО «Технологии рециклинга» (г. Новокузнецк, Кемеровская область).

2.1. Прецизионность методов и полученных результатов измерений

Правильность и прецизионность методов и полученных результатов измерений обеспечивалось условиями и установленным порядком отбора точечных проб отходов металлургического производства из штабелей

⁵ ГОСТ 33133-2014 Дороги автомобильные общего пользования. Битумы нефтяные дорожные вязкие. Технические требования. - Введ. 2015-10-01.

в соответствии со схемой (см. рис. 2.1) по ГОСТ 32862-2014⁶, ГОСТ 3344-83⁷. Для определения показателей физико-механических, физико-химических характеристик материалов использованы испытательное оборудование и средства измерений, прошедшие необходимые поверки и аттестацию.

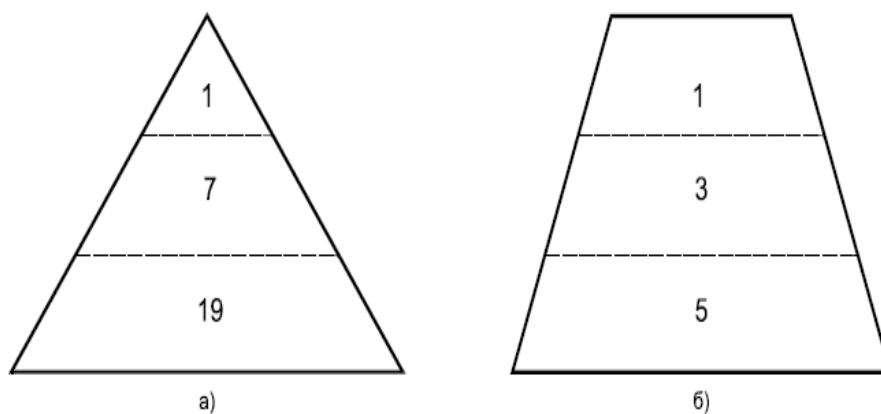


Рисунок 2.1. Схема отбора точечных проб из штабелей конусообразной (а) и призматической (б) форм

Объединенная проба тщательно перемешивалась лопатой, образуя из нее конус, а затем перебрасывалась в новый конус. Данный процесс повторялся три раза.

При образовании конуса каждое количество материала, находящееся на лопате, помещалось на вершину нового конуса таким образом, чтобы зерна могли стекать с вершины конуса на все стороны и равномерно распределяться, в результате чего обеспечивалось перемешивание фракций различной крупности. Третий, последний конус, путем повторяющихся ударов лезвий лопаты о вершину конуса разравнивался до момента, пока его толщина и диаметр не станут равными.

Затем проба делилась на четыре части двумя перпендикулярно пересекающимися между собой диагоналями. Две противоположенные четверти удалялись, а две оставшиеся лопатой соединялись вместе.

⁶ ГОСТ 32862-2014 Дороги автомобильные общего пользования. Щебень и песок шлаковые. Отбор проб. - Введ. 2015-07-01.

⁷ ГОСТ 3344-83 Щебень и песок шлаковые для дорожного строительства. Технические условия. - Введ. 1985-01-01.

2.2. Определение основных физико-механических свойств сталеплавильных шлаков как заполнителей асфальтобетонной смеси

В отобранных для испытаний проб сталеплавильного шлака (мартеновский и конвертерный) выделены следующие характерные группы зёрен:

а) зерна, имеющие порфировую структуру (см. рис. 2.2);

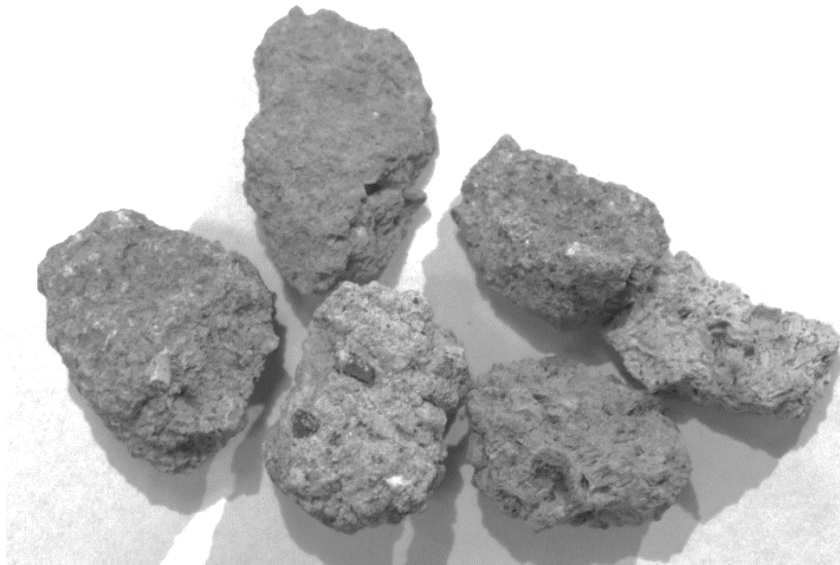


Рисунок 2.2. Зерна сталеплавильного шлака, имеющие порфировую структуру

б) пемзоподобные, сильнопористые, светло – серого цвета различных оттенков, скрытокристаллической структуры (см. рис. 2.3);



Рисунок 2.3. Пемзоподобные зерна сталеплавильного шлака

в) плотные темновато-серого, темновато-зеленоватого и серого цветов с отдельными редкими порами от скрытокристаллической до крупнокристаллической структуры (конвертерный шлак);

г) плотные, грязно – белого, синеватого и других светлых оттенков, с гладким расколом и тупыми ребрами, имеющие значительную хрупкость.

Исследования сталеплавильных шлаков проводились в соответствии с требованиями ГОСТ 3344–83, ГОСТ 8735–88⁸, ГОСТ 8269.0–97⁹, ГОСТ 32826 - 2014¹⁰ – для мартеновского и конвертерного шлаков, используемых в качестве крупного и мелкого заполнителей, и ГОСТ Р 52129–2003 – для шлака печь-ковш соответственно, который предполагается использовать в качестве минерального порошка. Результаты лабораторных испытаний представлены в табл. 2.1 – 2.6, рис. 2.4 – 2.7.

Таблица 2.1- Зерновой состав конвертерного шлака (шлаковый песок)

Остатки на ситах	Отверстия сит, мм					Поддон
	2,5	1,25	0,63	0,315	0,14	
1	2	3	4	5	6	7
Частные, % (a_i)	22,95	15,72	21,23	16,07	18,57	3,92
Полные, % (A_i)	22,95	38,67	59,90	75,97	94,54	98,46

Модуль крупности $M_k = 2,92$

Таблица 2.2 - Зерновой состав мартеновского шлака (шлаковый щебень)

Остатки на ситах	Отверстия сит, мм					Поддон
	40	30	20	10	5	
1	2	3	4	5	6	7
Частные, % (a_i)	1,75	56,80	5,27	31,25	3,80	0,94
Полные, % (A_i)	1,75	58,55	63,82	95,07	98,87	99,81

⁸ ГОСТ 8735-88 Песок для строительных работ. Методы испытаний. - Введ. 1989-07-01.

⁹ ГОСТ 8269.0-97 Щебень и гравий из плотных горных пород и отходов промышленного производства для строительных работ. Методы физико-механических испытаний. - Введ. 1998-07-01.

¹⁰ ГОСТ 32826-2014 Дороги автомобильные общего пользования. Щебень и песок шлаковые. Технические требования. - Введ. 2015-07-01.

Таблица 2.3 - Марка по дробимости металлургического шлака

Вид шлака	Марка по дробимости	Требования ГОСТ 9128–2013
1	2	3
Мартеновский	600 – 800	Соответствует заполнителям для асфальтобетонных смесей типов Б, В марка II – не менее 800
Конвертерный	800 – 1000	

Таблица 2.4 - Содержание зерен пластинчатой (лещадной) и игловатой формы в сталеплавильном шлаке

Вид шлака	Содержание зерен пластинчатой (лещадной) и игловатой формы, % по массе	Требования ГОСТ 9128–2013
1	2	3
Мартеновский	3	Не более (10) 15 % для щебня, не более 25% для отсевов дробления горных пород
Конвертерный	2	
Печь-ковш	0	

Таблица 2.5 - Показатели мартеновского и конвертерного шлаков

Наименование показателя	Вид шлака	
	Мартеновский шлак	Конвертерный шлак
1	2	3
Истинная плотность, кг/м ³	2230	2400
Средняя плотность, кг/м ³	1200	1730

Таблица 2.6 - Показатели шлака печь-ковш

Наименование показателя	Наименование НТД	Требование для МП-2 и отходов промышленного производства	Фактический показатель
1	2	3	4
Зерновой состав мельче			
1,25 мм	ГОСТ Р 52129–2003	Не менее 95	95

Продолжение таблицы 2.6

1	2	3	4
0,315 мм	ГОСТ Р 52129–2003	От 80 до 95	81
0,071 мм	ГОСТ Р 52129–2003	Не менее 60	64
Истинная плотность, кг/м ³	ГОСТ Р 52129–2003	Не нормируется	2730
Средняя плотность, кг/м ³	ГОСТ Р 52129–2003	Не нормируется	1180
Битумоемкость, г	ГОСТ Р 52129–2003	Не более 80	74
Пористость, %	ГОСТ Р 52129–2003	Не более 40%	40
Набухание образцов из смеси порошка с битумом, %	ГОСТ Р 52129–2003	Не более 3%	1,6
Влажность по массе, %	ГОСТ Р 52129–2003	Не более 2,5%	0,17
Водостойкость образцов из смеси порошка с битумом	ГОСТ Р 52129–2003	Не более 0,70	0,70



Рисунок 2.4. Определение показателей физико-механических свойств конвертерного шлака



Рисунок 2.5. Определение показателей физико-механических свойств мартеновского шлака



Рисунок 2.6. Приготовление битумоминеральной смеси из шлака печь-ковш



Рисунок 2.7. Испытание образцов битумоминеральной смеси из шлака печь-ковш на набухание

По результатам анализа показателей физико-механических свойств рассматриваемые сталеплавильные шлаки Новокузнецкого металлургического комбината соответствуют требованиям нормативно-технической документации и могут применяться для приготовления асфальтобетонных смесей по ГОСТ 9128 - 2013 с ограничением по их применению в дорожном покрытии в зависимости от интенсивности движения. Данное ограничение связано с маркой по дробимости сталеплавильного шлака.

2.3. Анализ фазового и химического состава сталеплавильных шлаков

Анализ фазового состава сталеплавильного шлака (печь-ковш) выполнен методом РФА. Рентгенограммы получены на порошковом дифрактометре D8

Advance (Bruker AXS, Германия). Нагрев образца осуществлялся на воздухе, скорость нагрева составляла 0,5 град/мин. Температуры съемки: 30°C, 50°C, 130°C, 170°C, 200°C, 300°C, 30°C (охлаждение). Время выдержки при заданной температуре перед началом съемки составляло 5 мин. Количественный анализ проведен методом Ритвельда (безэталонный метод), расчет выполнен в программе для профильного и структурного анализа Topas 4.2 (Bruker AXS, Германия). Общий вид рентгенограмм образцов приведен на рис. 2.8 - 2.9.

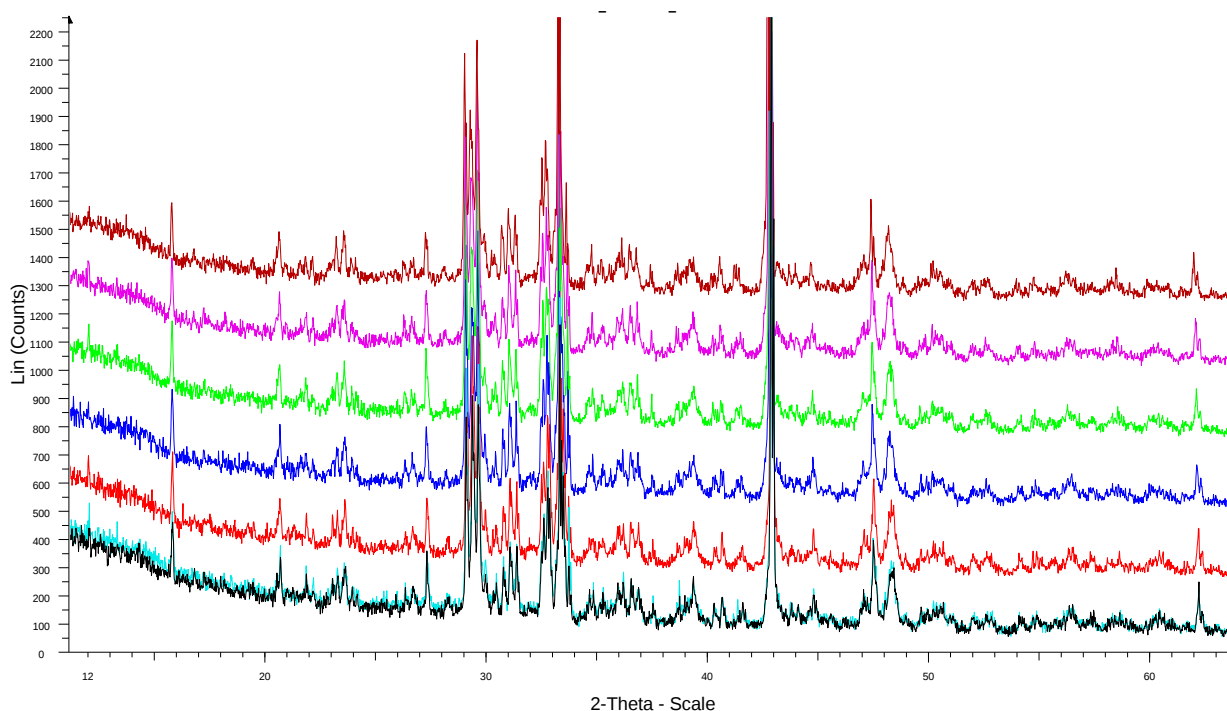


Рисунок 2.8. Общий вид рентгенограмм: 30 °C (обозначен черным цветом), 50 °C (обозначен красным цветом), 130 °C (обозначен синим цветом), 170 °C (обозначен зеленым цветом), 200 °C (обозначен цветом фуксии), 300 °C (обозначен кирпичным цветом), 30 °C, охлаждение (обозначен голубым цветом)

Образец шлака печь-ковш имеет схожий фазовый состав при различных температурах, основными фазами являются CaCO_3 , MgO , $\text{Ca}_3\text{Mg}(\text{SiO}_4)_2$ и Ca_2SiO_4 . Имеется небольшое количество примесных фаз (возможные фазы: Fe_2O_3 , $\text{K}_6\text{Fe}_2\text{O}_5$, $\text{Ca}_2\text{Ti}_5\text{O}_{12}$).

Количественный (в массовых %) фазовый состав образца шлака печь-ковш представлен в табл. 2.8 (в образце могут присутствовать незначительные примеси, основные фазы указаны в таблице).

Таблица 2.8 - Фазовый состав шлака печь-ковш

Температура образца, °C	CaCO ₃	MgO	Ca ₃ Mg(SiO ₄) ₂	Ca ₂ SiO ₄
1	2	3	4	5
30	32,00	16,00	28,00	24,00
50	33,00	16,00	29,00	22,00
130	30,00	15,00	30,00	25,00
170	30,00	14,00	31,00	25,00
200	30,00	15,00	30,00	25,00
300	28,00	14,00	31,00	27,00
30 (охлаждение)	31,00	14,00	29,00	26,00

Рентгенограмма образца шлака печь-ковш, полученная при 30 °C, с идентификацией фазового состава представлена на рис. 2.9.

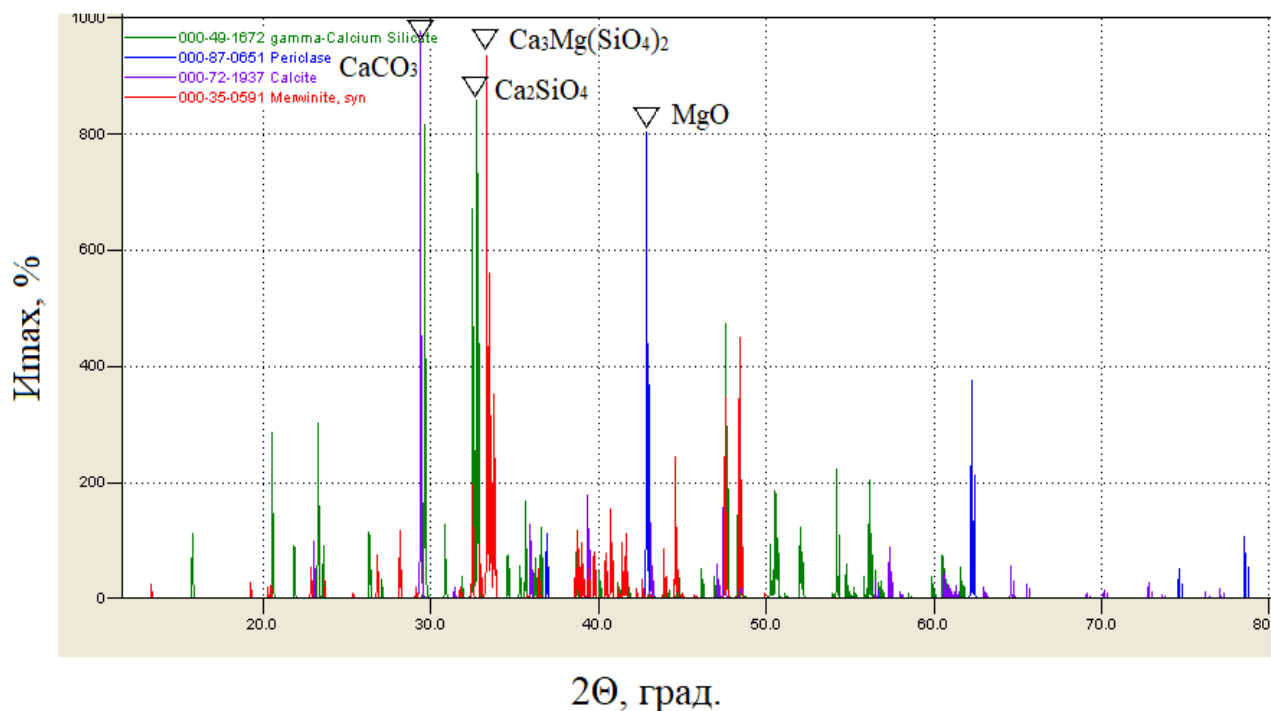


Рисунок 2.9. Рентгенограмма образца шлака печь-ковш:

$I_{\max}$ – интенсивность, %; 2θ – угол дифракции, град.

В исследованном диапазоне температур 30-300 °C значительных изменений фазового состава образца шлака печь-ковш не наблюдается.

Химический состав сталеплавильных шлаков представлен в табл. 2.9.

Таблица 2.9 - Химический состав сталеплавильных шлаков

Вид шлака	Химический состав основных элементов сталеплавильных шлаков, %					
	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	S
Мартеновский	19,63	22,60	36,08	14,06	7,45	0,19
Конвертерный	26,40	20,67	36,73	9,82	6,33	0,06
Печь-ковш	0,95	26,75	55,80	9,72	5,35	1,42

2.4. Оценка устойчивости структуры и радиологические исследования сталеплавильного шлака

Устойчивость структуры зерен сталеплавильных шлаков против распадов определяли путем выдержки шлака в дистиллированной воде в течение 30 суток (сульфидный и железистый распады) по ГОСТ 32858-2014¹¹ и последующего испытания в автоклаве в среде насыщенного пара (силикатный и известковый распады).

Результаты испытаний приведены в табл. 2.10.

Таблица 2.10 - Оценка устойчивости структуры сталеплавильных шлаков

Вид шлака	Потеря массы после испытаний, % по массе		Устойчивость структуры по ГОСТ 32826-2014, ГОСТ 3344-83
	дистиллированная вода	автоклав	
Мартеновский	1,70	3,10	Устойчивая (до 3 % включительно)
Конвертерный	1,20	2,93	
Печь-ковш	1,50	4,11	

Результаты определения сталеплавильных шлаков по ГОСТ 30108-94¹² приведены в табл. 2.11.

¹¹ ГОСТ 32858-2014 Дороги автомобильные общего пользования. Щебень шлаковый. Определение устойчивости структуры зерен шлакового щебня против распадов. – Введ. 2015-07-01.

¹² ГОСТ 30108-94 Материалы и изделия строительные. Определение удельной эффективной активности естественных радионуклидов. – Введ. 1995-01-01.

Таблица 2.11 - Результаты радиологических исследований¹³

Наименование показателя	Результаты исследований Удельная активность (А), Бк/кг					Погрешность исследования, (А*), Бк/кг	Допустимый уровень, Бк/кг ГОСТ 32826-2014	НТД на методы исследований
	Проба 1	Проба 2	Проба 3	Проба 4	Проба 5			
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Цезий-137	29	37	2	4	10	3	До 740 (включ.) - в пределах территории нас. пункта. Св. 740 до 1500 (включ.) – вне нас. пункта. ¹⁴	ГОСТ 30108-94
Калий-40	0	0	105	116	107	60		
Радий-226	114	128	103	140	101	117		
Торий-232	29	39	24	32	28	10		
Аэфф	151	179	144	191	151	-		
Среднее значение Аэфф	163					32		

¹³ Радиологические исследования выполнены при непосредственном участии аккредитованного испытательного лабораторного центра ФБУЗ «Центр гигиены и эпидемиологии в Кемеровской области», филиал по г. Новокузнецку и Новокузнецкому району.

¹⁴ Для дорожного строительства.

2.5. Определение сцепления вяжущего со шлаком

Проведено исследование качества сцепления битумного вяжущего с поверхностью шлакового щебня (мартеновский шлак), заключающееся в визуальной оценке степени сохранности пленки битума на зернах щебня после его кипячения в дистиллированной воде (см. рис. 2.10).

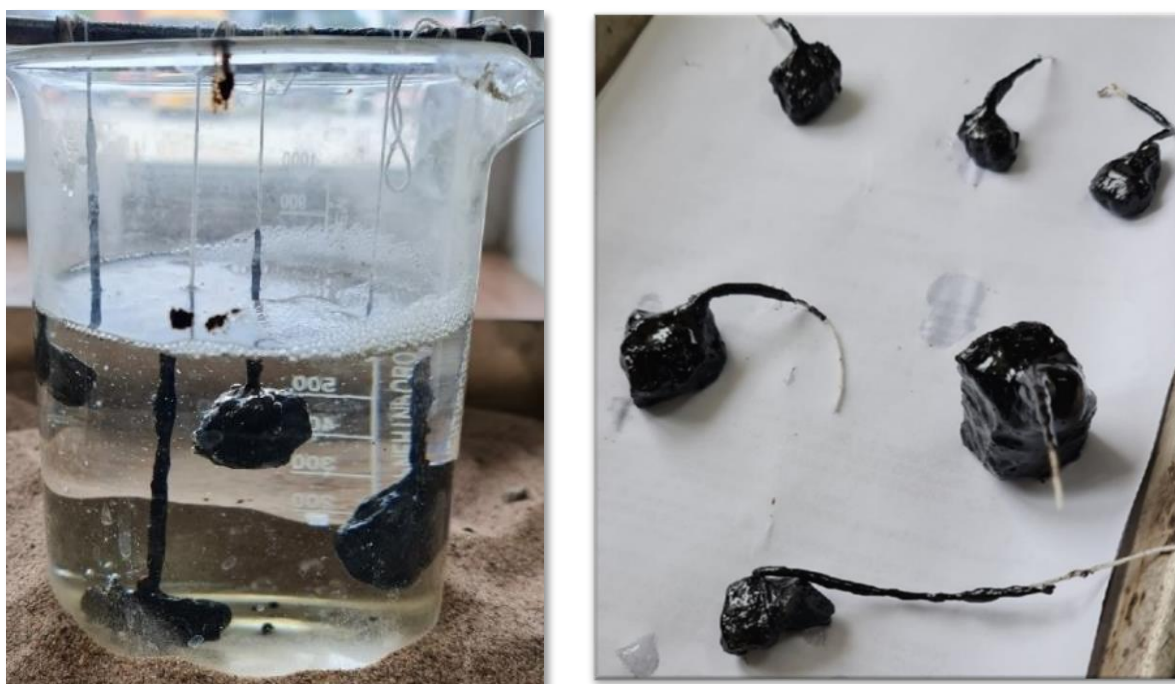


Рисунок 2.10. Испытание шлакового щебня по ГОСТ 12801-98¹⁵

Щебень шлаковый выдержал испытания на **«отлично»**. Пленка вяжущего после кипячения полностью сохранилась на поверхности зерен.

На традиционном щебне (гранит, диабаз) пленка вяжущего также сохранилась на поверхности, но при этом отделилась от острых углов и ребер (оценка «хорошо» по ГОСТ 12801-98).

¹⁵ ГОСТ 12801-98 Материалы на основе органических вяжущих для дорожного и аэродромного строительства. Методы испытаний. – Введ.. 1999-01-01.

2.6. Определение основности сталеплавильных шлаков

Проведена оценка основности исследуемых сталеплавильных шлаков по величине рН водной вытяжки. В подтверждение данных табл. 2.9 исследования показали, что шлаки Новокузнецкого металлургического комбината (мартеновский, конвертерный, шлак печь-ковш) являются основными. Также проведенные исследования подтверждают и гидравлическую активность электросталеплавильного шлака печь-ковш ($\text{pH} = 8-9$, см. рис. 2.11).

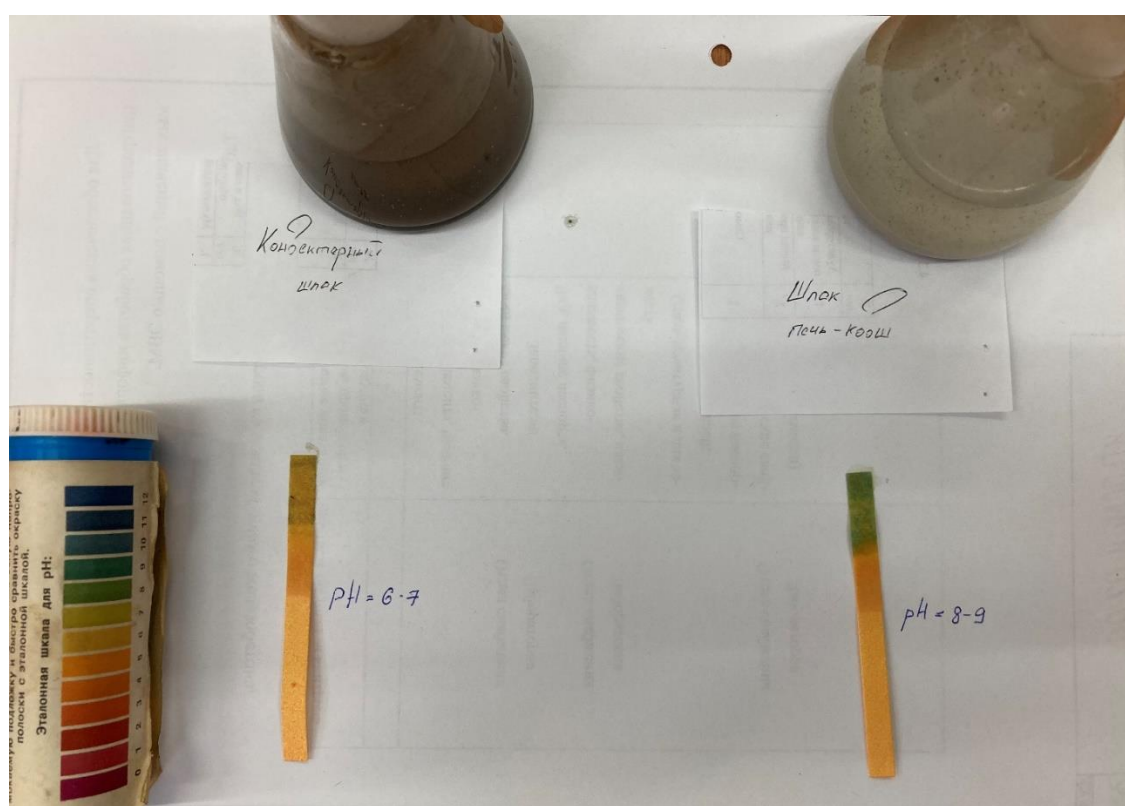


Рисунок 2.11. Исследование основности сталеплавильных шлаков

2.7. Определение физико-механических показателей вяжущего

Результаты испытаний битума приведены в табл. 2.12. Рассматриваемый битум БНД 70/100 соответствует требованиям ГОСТ 33133-2014.

Таблица 2.12 – Результаты испытаний битума

№ п/п	Наименование показателя	Ед. изм.	Требования к испытываемой продукции		Результаты испытаний	Соответствие нормативно- технической документации
			Наименование нормативно- технической документации	Нормативное значение показателей		
1	2	3	4	5	6	7
1	Глубина проникания иглы при 25 °С	0,1 мм	ГОСТ 33133-2014	71-100	77	Соответствует
2	Температура размягчения по кольцу и шару	°С		не ниже 47	50,2	Соответствует
3	Растяжимость при 0 °С	см		не менее 3,7	3,7	Соответствует
4	Температура хрупкости	°С		не выше -18	-27	Соответствует
5	Изменение температуры размягчения после старения	°С		не более 7	6,8	Соответствует
6	Температура вспышки в открытом тигле	°С		не ниже 230	320	Соответствует
7	Измерение массы образца после старения	%		не более 0,6	0,2	Соответствует

2.8. Определение основных показателей нанодобавок

Наноразмерные добавки в работе представлены нанопорошками¹⁶ Al_2O_3 , SiO_2 , ZnO , $\text{Mg}(\text{OH})_2$ и углеродными нанотрубками TUBALLTM.

Оксид алюминия Al_2O_3 . Порошок белого цвета. Материал содержит не менее 95 % масс Al_2O_3 , остальное (5 %) – алюминий Al и сорбированные газы. Соответствует ТУ 1791-003-36280340-2008 (Россия).

Оксид кремния SiO_2 . Порошок белого цвета. Материал содержит не менее 99,8 % масс SiO_2 , остальное (0,2 %) - сорбированные газы O_2 , Cl_2 .

Оксид цинка ZnO . Порошок белого цвета. Материал содержит не менее 98 % масс ZnO , остальное (2 %) - цинк Zn и сорбированные газы O_2 , Ar, N_2 . Соответствует ТУ 1791-002-36280340-2005 (Россия).

Гидроксид магния $\text{Mg}(\text{OH})_2$. Порошок светло-серого цвета. Материал содержит не менее 90 % масс $\text{Mg}(\text{OH})_2$.

Углеродные нанотрубки TUBALLTM производства OCSiAl (г. Новосибирск)¹⁷. Материал содержит не менее 80 % масс одностенных графеновых нанотрубок. Соответствует ТУ 2166-001-91735575-2014 (Россия).

Результаты определения основных показателей нанодобавок приведены в табл. 2.13.

Таблица 2.13 - Основные показатели наноразмерных добавок

Показатели	Ед. изм.	Вид нанодобавок				
		Оксид алюминия Al_2O_3	Оксид кремния SiO_2	Оксид цинка ZnO	Гидроксид магния $\text{Mg}(\text{OH})_2$	Углеродные нанотрубки TUBALL
1	2	3	4	5	6	7
Размерность	10^{-9}м	2...50	до 60	10...80	20... 100	1,2...50

¹⁶ Материал изготовлен методом электрического взрыва проводника в кислородосодержащей атмосфере.

¹⁷ до 2022 года.

Продолжение таблицы 2.13

1	2	3	4	5	6	7
Плотность	г/см ³	2,65...2,74	1,96... 2,60	5,3... 5,65	2,10... 2,45	2,4...2,9
Насыпная плотность	кг/м ³	520...710	80...320	400... 450	300... 600	140...550
Удельная поверхность	м ² /г	100...120	314...438	8...17	5...15	90...120

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ II

1. По результатам анализа показателей физико-механических свойств рассматриваемые сталеплавильные шлаки Новокузнецкого металлургического комбината соответствуют требованиям нормативно-технической документации и могут применяться для приготовления асфальтобетонных смесей по ГОСТ 9128 - 2013 с ограничением по их применению в дорожном покрытии в зависимости от интенсивности движения.

2. Проведенные исследования показали, что сталеплавильные шлаки:

- не подвержены распаду, обладают устойчивой структурой (C1);
- относятся к негорючим веществам по ГОСТ 30244-94¹⁸ и по степени воздействия на организм человека к 4-му классу токсичности (малоопасные) по ГОСТ 12.1.007-76¹⁹;
- по величине значений суммарной удельной эффективной активности естественных радионуклидов $A_{\text{эфф}}$ соответствуют гигиеническим нормативам (класс материала – I) и могут применяться для строительства дорог и аэродромов без ограничений.

¹⁸ ГОСТ 30244-94 Материалы строительные. Методы испытаний на горючесть. – Введ. 1996-01-01.

¹⁹ ГОСТ 12.1.007-76 Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности. - Введ. 1977-01-01.

3. ИССЛЕДОВАНИЕ И АНАЛИЗ СТРОИТЕЛЬНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АСФАЛЬТОБЕТОНА НА СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ШЛАКАХ

3.1. Анализ морфологии асфальтовяжущего вещества на основе шлака печь-ковш

Для оценки основных эксплуатационных показателей шлакоасфальтобетонных смесей были приготовлены и исследованы образцы асфальтовяжущего вещества (битумно-шлаковой композиции) на основе шлака печь-ковш (см. рис. 3.1). Приготовление образцов асфальтовяжущего вещества (далее – АВВ) выполнено в металлических формах $d = 50,5 \pm 1,0$ мм в соответствии с требованиями ГОСТ Р 52129–2003²⁰ п.7.6, п.7.7.

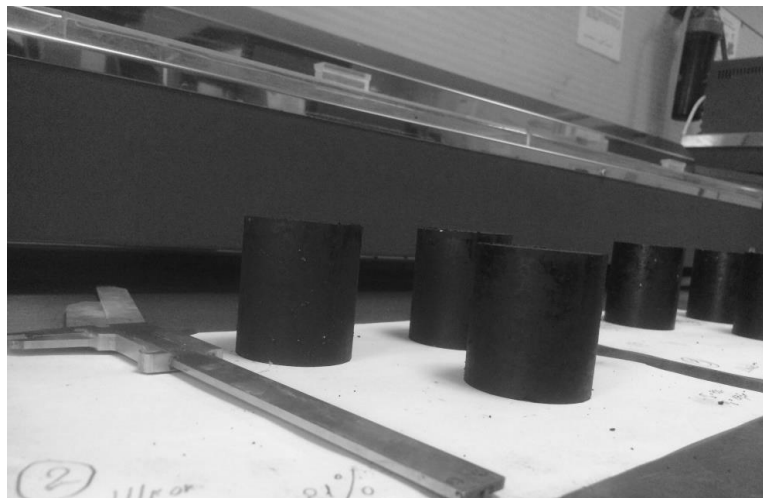


Рисунок 3.1. Образцы асфальтовяжущего вещества на основе сталеплавильного шлака печь-ковш

В качестве вяжущего был применен битум нефтяной дорожный вязкий марки БНД 70/100 по ГОСТ 33133–2014²¹. Установлено, что для обеспечения требуемой

²⁰ГОСТ Р 52129-2003 Порошок минеральный для асфальтобетонных и органоминеральных смесей. Технические условия. - Введ. 2003-10-01.

²¹ГОСТ 33133-2014 Дороги автомобильные общего пользования. Битумы нефтяные дорожные вязкие. Технические требования. – Введ. 2015-10-01.

степени водонасыщения от 4 до 5 % расход вяжущего для приготовления образцов – цилиндров должен составлять 21 % от массы минеральной части, то есть соотношение Б/МП = 0,21. Температура приготовления образцов АВВ составляла 150 – 160 °С и соответствовала требованиям ГОСТ Р 52129–2003 как для отходов промышленного производства.

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.

Результаты проведенных исследований свидетельствуют о возникновении в структуре исследуемого материала замкнутых пор (см. рис. 3.2).

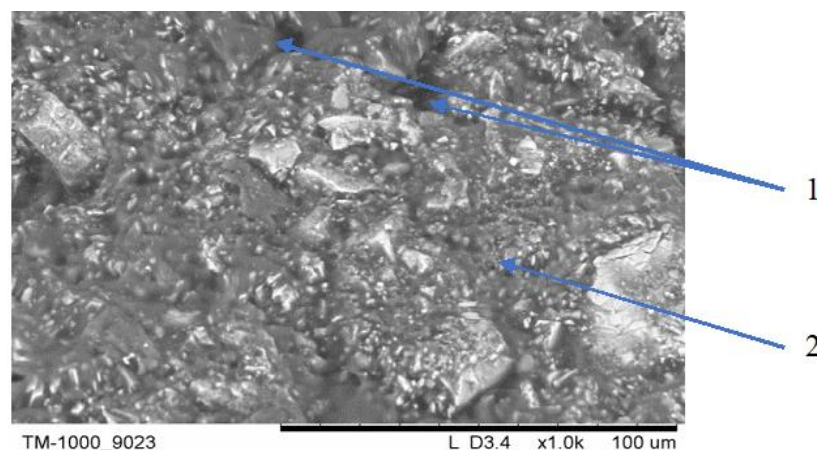


Рисунок 3.2. Морфология асфальтовяжущего вещества на сталеплавильном шлаке:

1 – система замкнутых пор; 2 – битумное вяжущее + шлак печь-ковш

Последние, учитывая их размеры, позволят 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 асфальтобетонных покрытий.

Длительное насыщение водой образцов АВВ на основе шлака печь-ковш позволило установить связь между продолжительностью насыщения его водой и величиной водостойкости (см. рис. 3.3).

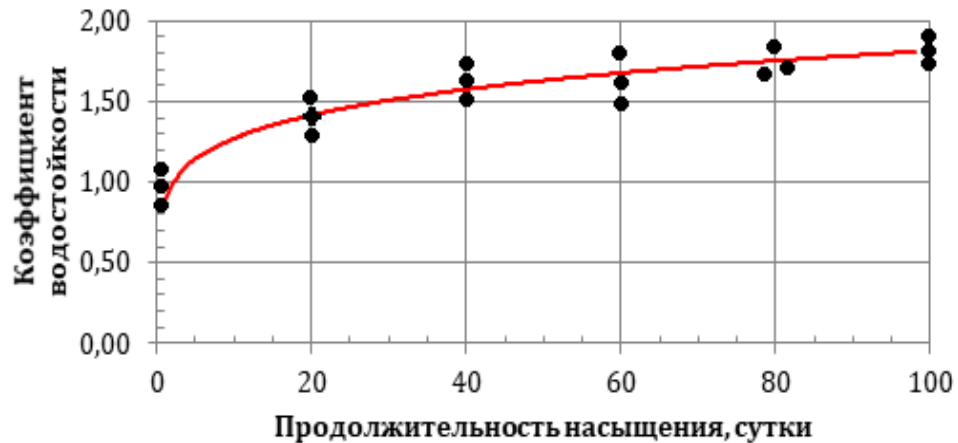


Рисунок 3.3. Зависимость водостойкости асфальтовяжущего вещества на сталеплавильном шлаке от продолжительности водонасыщения образцов водой

Такую зависимость можно представить в следующем виде (3.1):

$$y = 0,8916x^{0.1541},$$

где x — это продолжительность насыщения водой, сут., y — коэффициент водостойкости. Ошибка аппроксимации составляет не более 4 %.

Полученная в результате эксперимента длительная водостойкость образцов АВВ (свыше 1,0), превышающая установленные требования по ГОСТ 9128–2013²² и ГОСТ Р 52129–2003, предопределена способностью сталеплавильного шлака к кристаллизации уже как гидравлического вяжущего. Образуется так называемая коагуляционно-кристаллизационная микроструктура.

Результаты исследования говорят о том, что в условиях насыщения водой в материале протекают процессы гидратации, которые придают асфальтобетону на шлаковых заполнителях необходимую водостойкость и прочность, увеличивая ее с течением времени по степенной зависимости.

²² ГОСТ 9128-2013 Смеси асфальтобетонные, полимерасфальтобетонные, асфальтобетон, полимерасфальтобетон для автомобильных дорог и аэродромов. Технические условия. - Введ. 2014-11-01.

3.2. Исследование строительно-технических свойств асфальтового бетона на сталеплавильных шлаках

Верхние слои покрытий дорожных одежд наиболее часто подвергаются воздействию влаги и циклам перехода через 0 °С. При этом вода может проникать в покрытие как вследствие выпадения осадков в виде дождя или мокрого снега, так и при насыщении длительно стоящей талой или поверхностной водой в условиях необеспеченного поверхностного водоотвода городских улиц и дорог. Известно [113], что в следствие такого водонасыщения асфальтобетона возможно отслоение битумных пленок от поверхности каменного материала, нарушение адгезионных и когезионных связей. При замораживании вода в порах расширяется, что приводит сначала к возникновению микроразрушений в материале, а в дальнейшем, при увеличении циклов замораживания – оттаивания, к деформациям и разрушениям самого покрытия.

Цель исследования – определение ключевых показателей строительно-технических свойств асфальтобетонных смесей и асфальтобетона на сталеплавильных шлаках, характеризующих повышенную эксплуатационную надежность дорожных покрытий, путем моделирования негативного воздействия на материал внешних факторов. В качестве определяющих приняты показатели водостойкости и набухания шлакоасфальтобетона при его длительном насыщении водой.

Для подтверждения указанного в п.3.1 предположения о характере изменения структурных связей в шлакоасфальтобетоне с коагуляционных на коагуляционно-кристаллизационные при длительном воздействии воды были проведены лабораторные испытания образцов-цилиндров размером $71,4 \pm 1,5$ мм по ГОСТ 12801–98²³ п.6.1, табл. 5, в металлических формах $d=71,4 \pm 1,5$ мм (см. рис. 3.4).

²³ГОСТ 12801–98 Материалы на основе органических вяжущих для дорожного и аэродромного строительства. Методы испытаний. – Введ. 1999-01-01.

В качестве составляющих минеральный остов заполнителей использованы шлаки - мартеновский, конвертерный, шлак печь-ковш.

Выдерживание образцов в воде осуществлялось в течение 28 суток при температуре $20 \pm 2^\circ\text{C}$.



Рисунок 3.4. Образцы шлакоасфальтобетонной смеси

В качестве эталонных были приняты результаты лабораторных испытаний образцов плотной мелкозернистой асфальтобетонной смеси тип Б марки П следующего состава:

- щебень фр.5-20 мм (диабаз) по ГОСТ 8267-93²⁴ – 43,2%;
- песок из отсеков дробления фр.0-5мм (диабаз) по ГОСТ 31424-2010²⁵ – 48,8 %;
- минеральный порошок МП -1 по ГОСТ Р 52129-2003²⁶ – 3,8 %;
- битум БНД 70/100 по ГОСТ 33133-2014²⁷ - 4,2%.

Полученные показатели сведены в гистограммы, см. рис. 3.5 – 3.8.

²⁴ГОСТ 8267-93 Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия. – Введ. 1995-01-01.

²⁵ГОСТ 31424-2010 Материалы строительные нерудные из отсеков дробления плотных горных пород при производстве щебня. Технические условия. – Введ. 2011-07-01.

²⁶ГОСТ Р 52129-2003 Порошок минеральный для асфальтобетонных и органоминеральных смесей. Технические условия. – Введ. 2003-10-01.

²⁷ГОСТ 33133-2014 Дороги автомобильные общего пользования. Битумы нефтяные дорожные вязкие. Технические требования. - Введ. 2015-10-01.

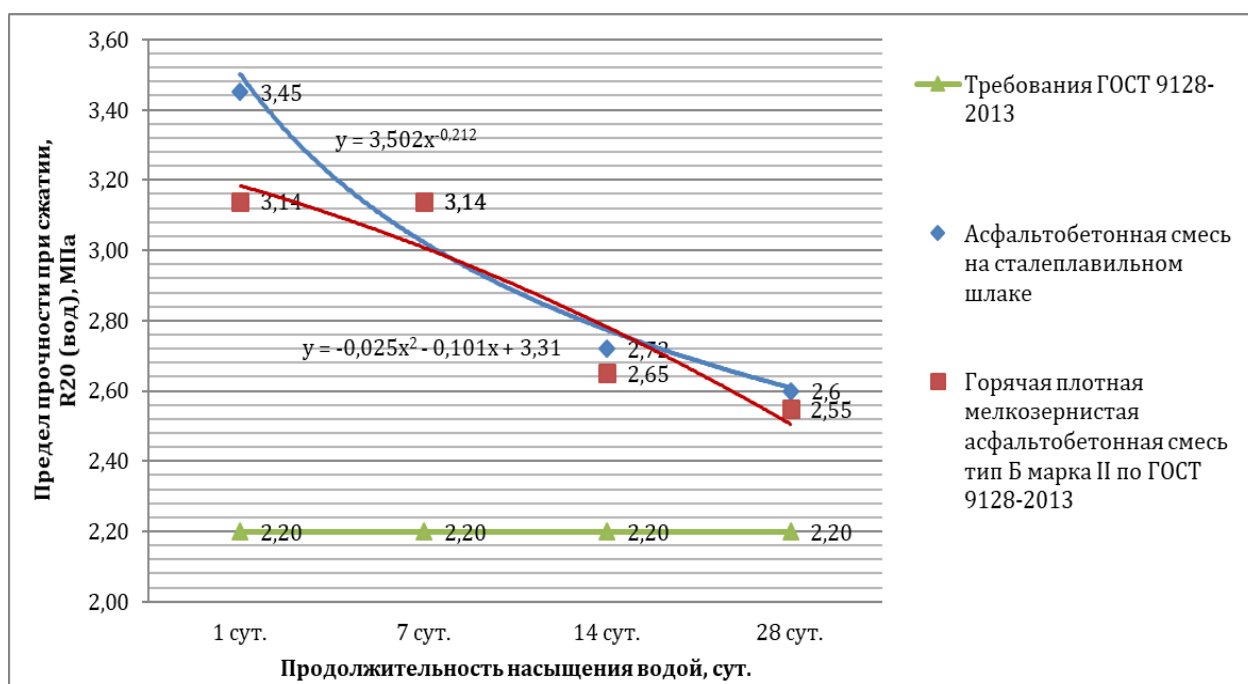


Рисунок 3.5. Зависимость предела прочности при сжатии шлакоасфальтобетона при температуре 20°C от продолжительности насыщения водой [113]

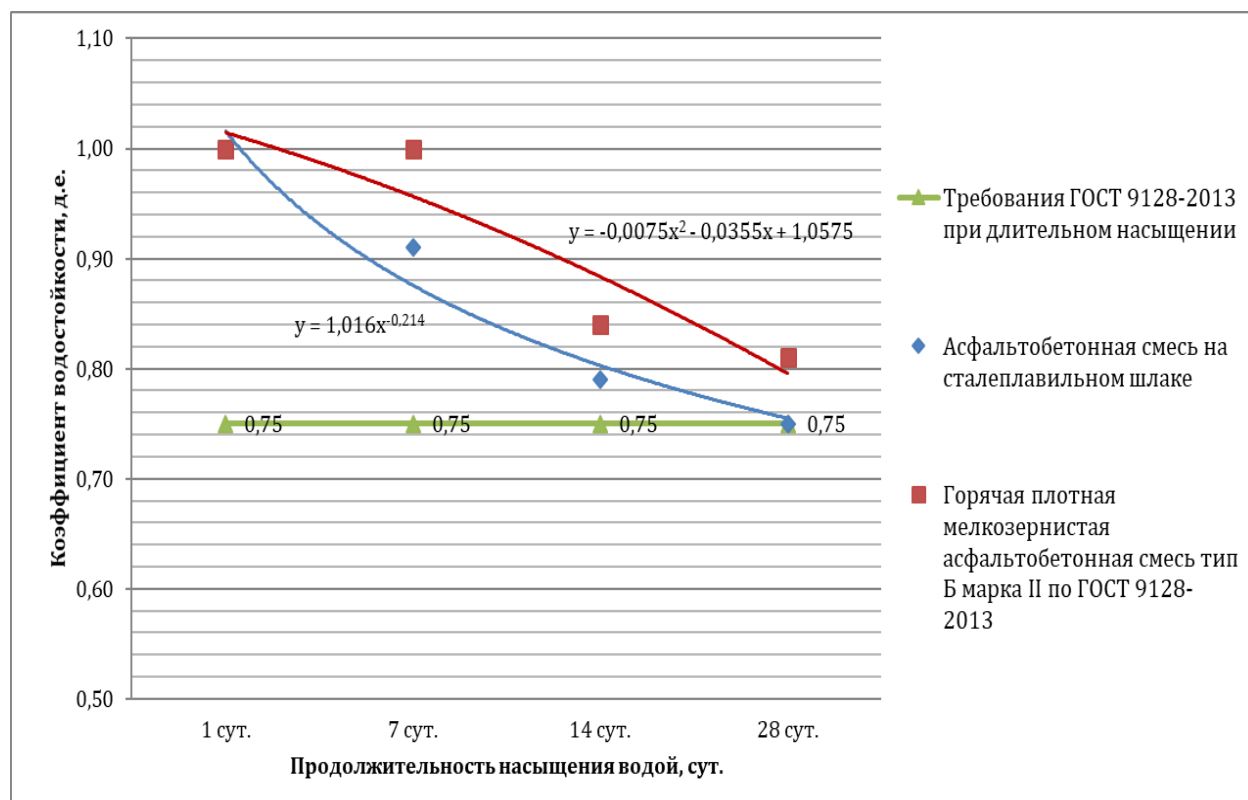


Рисунок 3.6. Зависимость коэффициента водостойкости шлакоасфальтобетона от продолжительности насыщения водой [113]

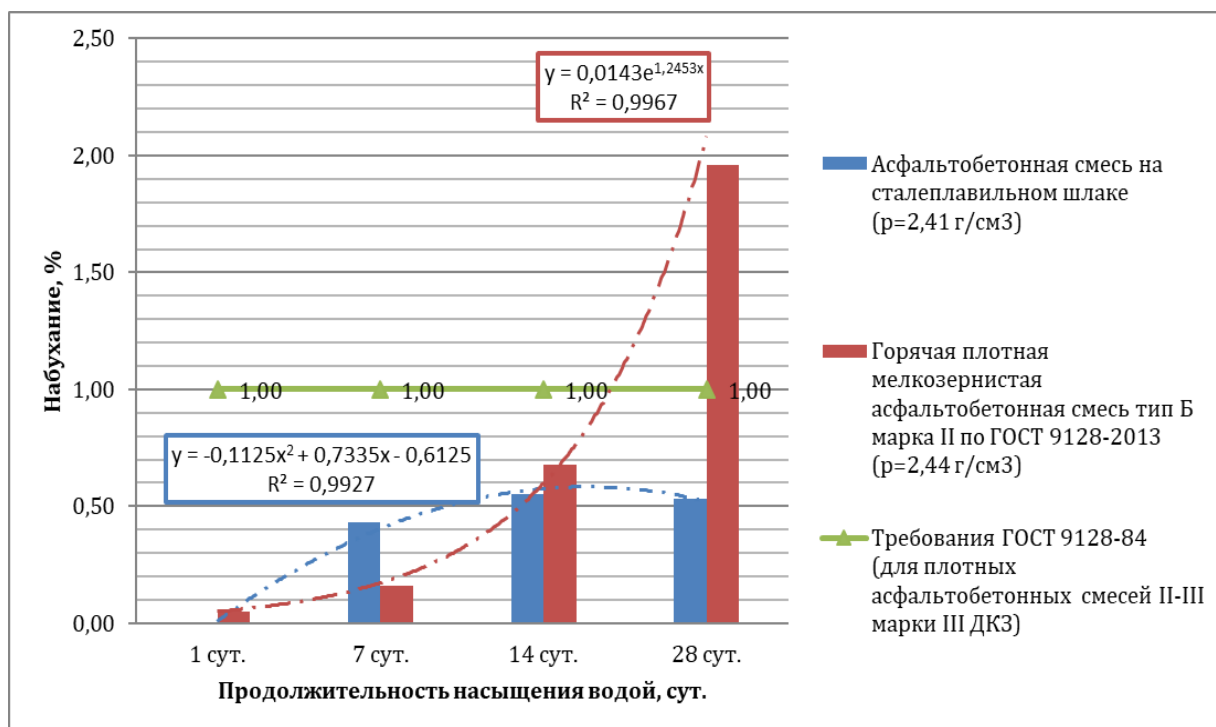


Рисунок 3.7. Зависимость набухания шлакоасфальтобетона от продолжительности насыщения водой [113]

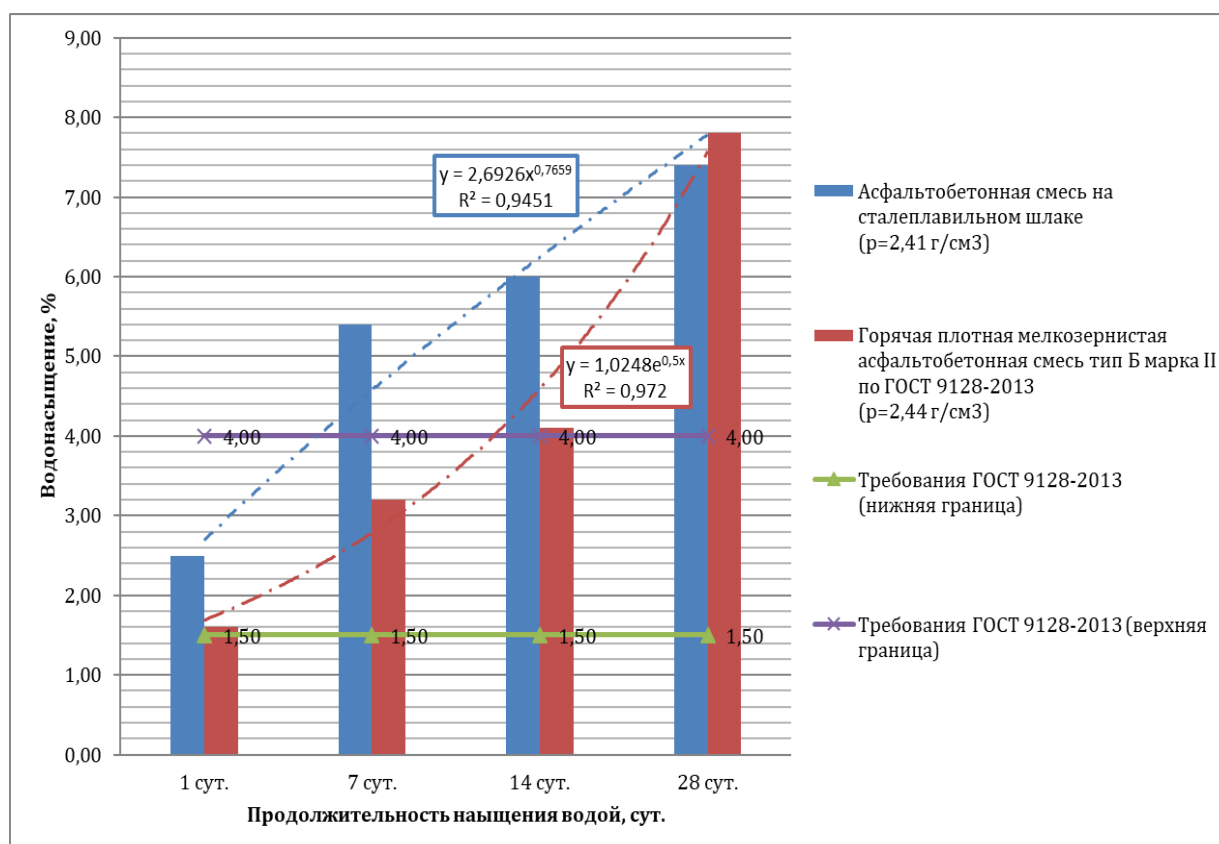


Рисунок 3.8. Зависимость водонасыщения шлакоасфальтобетона от продолжительности насыщения водой [113]

Регрессионный анализ полученных данных позволяет 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 ($K_{\text{вод}} = R_{\text{вод}20}/R_{20}$). 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 - шлака.

Вышеуказанное падение прочности происходит в пределах регламентируемых ГОСТ 9128-2013 значений для длительной водостойкости 0,75 д.е. По мере «включения» в работу шлака печь-ковш, обладающего активными свойствами медленноотвердеющего вяжущего (см. п. 3.1), протеканием реакции гидратации с водой (химическое связывание воды), происходит постепенное нарастание показателей физико-механических свойств. Данное обстоятельство подтверждается падением во временном промежутке 14 – 28 сутки показателей набухания с 0,55 до 0,53 (- 4 %) и «затухание» процесса дальнейшего насыщения образцов шлакоасфальтобетона водой (прирост на 28 сутки составляет + 1,4 %, тогда как у традиционного асфальтобетона + 3,7 %, см. рис. 3.7 – 3.8).

Также следует отметить, что несмотря на более высокое содержание частиц менее 0,071 мм (шлак печь-ковш), шлакоасфальтобетон менее подвержен набуханию, чем асфальтобетон на традиционном заполнителе.

Такое изменение показателей во времени свидетельствует о замещении отслоившихся битумных пленок кристаллизационными связями, и образованием в шлакоасфальтобетоне коагуляционно-кристаллизационной структуры.

Визуальным подтверждением вышесказанного могут служить результаты выжигания битума с образцов, насыщаемых в течение 21 суток водой, в муфельной печи при 540 ± 10 °C в течение не менее 45 мин. Образцы шлакоасфальтобетона (Б) сохранили свою форму и размеры (см. рис. 3.9). Образцы обычного асфальтобетона (А) превратились в рыхлую массу минерального заполнителя.



Рисунок 3.9. Образцы асфальтобетона после выжигания вяжущего в муфельной печи (через 21 сутки после насыщения водой): на традиционных заполнителях (А) и сталеплавильном шлаке (Б) [113]

На рис. 3.10 представлена многофакторная математическая модель изменения водостойкости шлакоасфальтобетона, которая может быть описана следующим уравнением регрессии (3.2):

$$K_{\text{вод}}, \text{ д.е.} = 5,6551 - 0,0758x - 3,3505y + 0,0001x^2 + 0,0263xy + 0,5788y^2 \quad (3.2),$$

где x - продолжительность насыщения шлакоасфальтобетона водой, сут.;

y - прочность при сжатии шлакоасфальтобетона при 20°C в водонасыщенном состоянии, МПа.

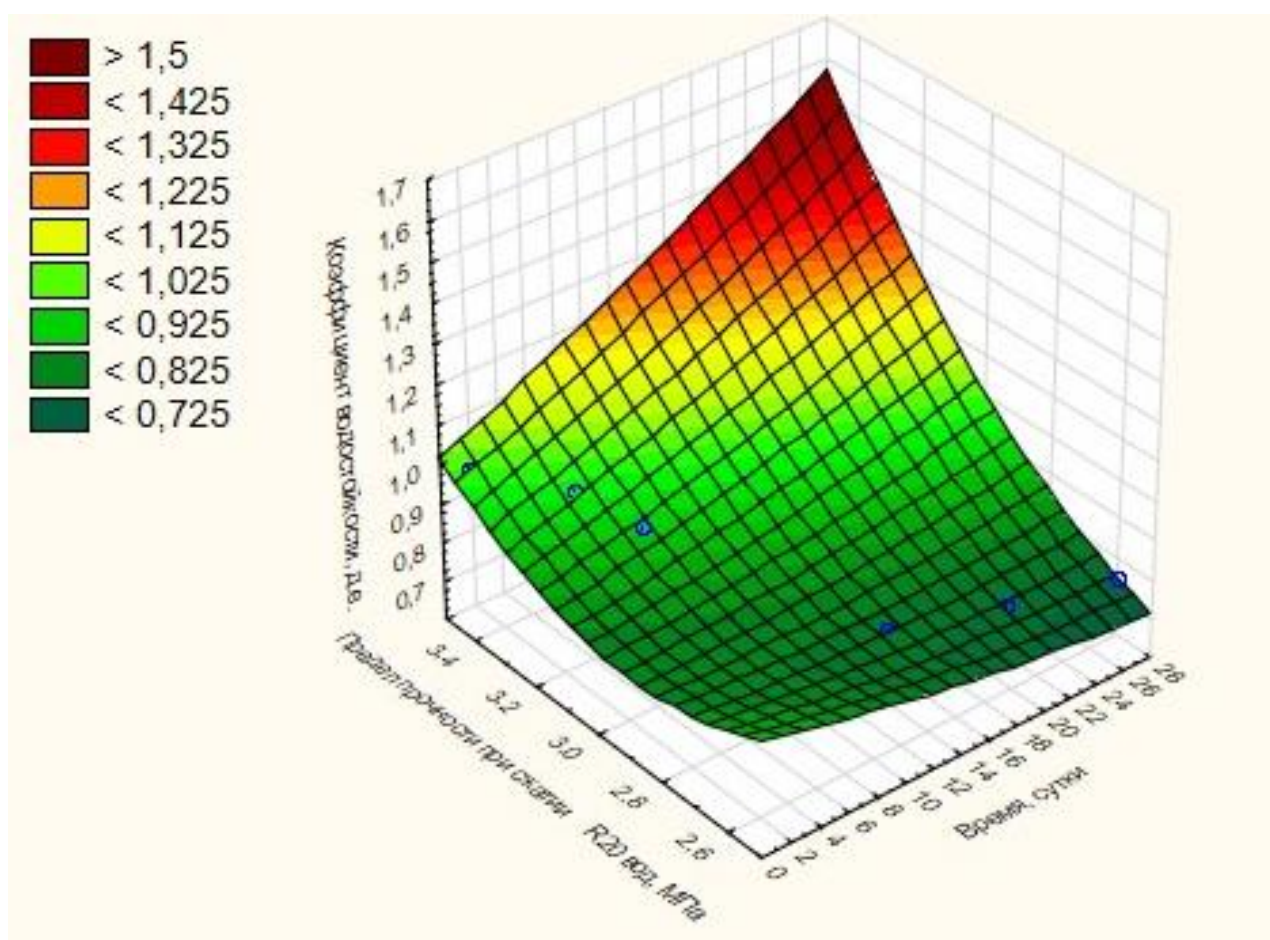


Рисунок 3.10. Математическая модель, отражающая зависимость между величиной водостойкости шлакоасфальтобетона, продолжительностью его насыщения водой (x) и прочностью при сжатии при 20°C в водонасыщенном состоянии (y)

На рис. 3.11 представлена многофакторная математическая модель изменения величины набухания шлакоасфальтобетона, которая может быть описана следующим уравнением регрессии (3.3):

Набухание, % = $0,5747 + 0,1995x - 0,4876y + 0,0023x^2 - 0,0415xy + 0,0874y^2$ (3.3)

где x - продолжительность насыщения шлакоасфальтобетона водой, сут.;

y - водонасыщение шлакоасфальтобетона, %.

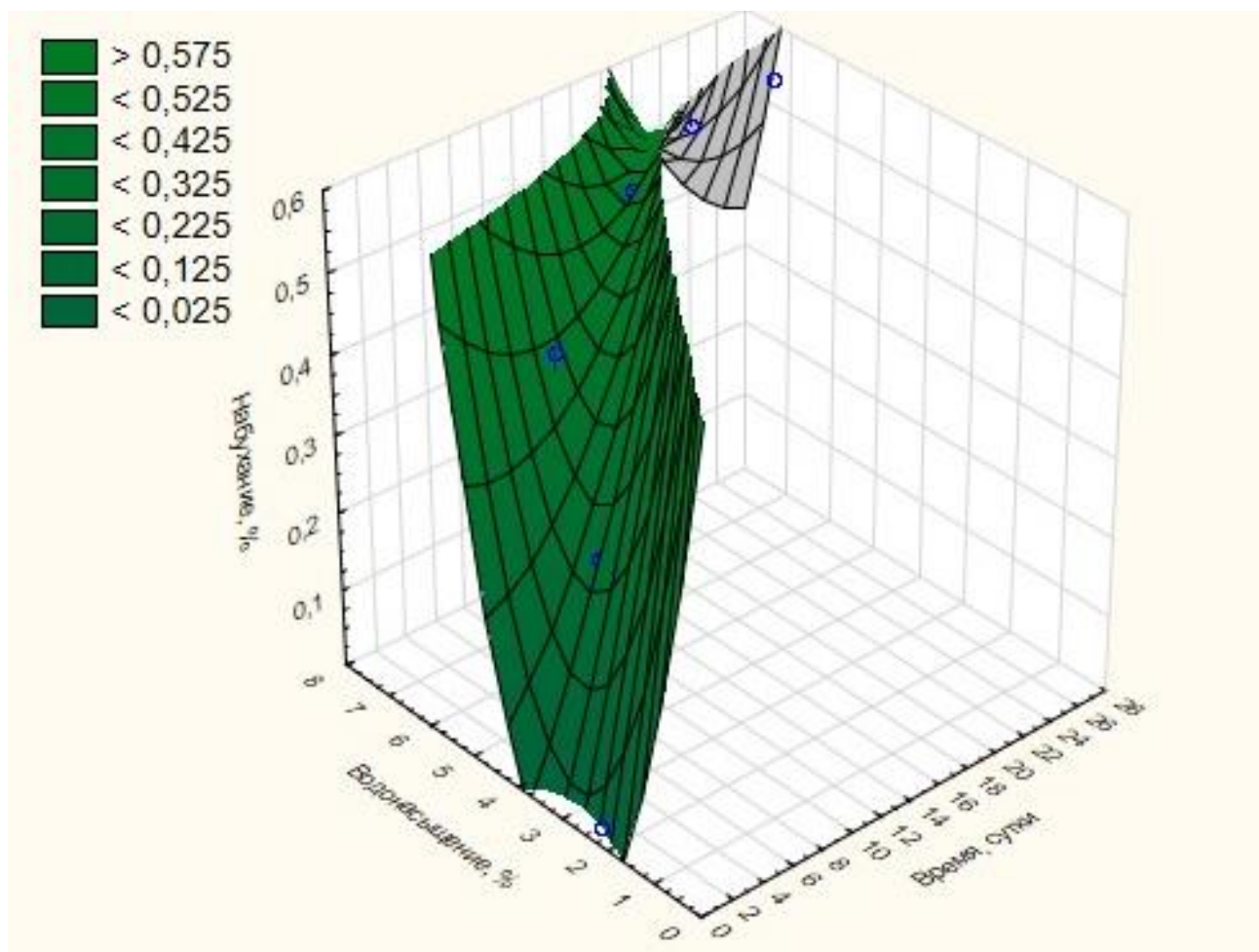


Рисунок 3.11. Многофакторная математическая модель, отражающая зависимость между величиной набухания шлакоасфальтобетона, продолжительностью его насыщения водой (x) и степенью водонасыщения (y)

3.3. Проектирование оптимальных составов асфальтобетонных смесей на основе сталеплавильных шлаков

Результаты проведенных нами исследований [113-118] позволили подобрать оптимальные составы плотной и пористой шлакоасфальтобетонных смесей (см. табл. 3.1-3.2).

Таблица 3.1 - Материалы для приготовления плотной асфальтобетонной смеси на шлаковых заполнителях

Вид заполнителя	Содержание, % ²⁸
1	2
шлак мартеновский смеси фр. 5-20 мм	36,05 – 42,05
шлак конвертерный фр. 0-5 мм	39,86 – 45,86
шлак электросталеплавильный печь-ковш	10,88 – 13,88
битум нефтяной дорожный вязкий	5,21 – 6,21

Таблица 3.2 - Материалы для приготовления пористой асфальтобетонной смеси на шлаковых заполнителях

Вид заполнителя	Содержание, %
1	2
шлак мартеновский фр. 20-40 мм	11,35 – 17,35
шлак мартеновский смеси фр. 5-20 мм	25,71 – 31,71
шлак конвертерный фр. 0-5 мм	44,85 – 50,85
шлак электросталеплавильный печь-ковш	3,28 – 6,28
битум нефтяной дорожный вязкий	3,81 - 4,81

²⁸ битум в 100% смеси

Подбор составов осуществлялся с учетом обеспечения максимальной плотности и минимальной пористости минеральной части шлакоасфальтобетонных смесей по предельным кривым. (см. рис. 3.12 - 3.14).

Применяемый отвальный шлак не подвергался предварительной переработке за исключением его фракционной сегрегации.



Рисунок 3.12. Определение показателей физико-механических свойств шлакоасфальтобетона

Таблица 3.3 - Зерновой состав минеральной части запроектированной шлакоасфальтобетонной смеси, соответствующей мелкозернистой плотной асфальтобетонной смеси тип Б по ГОСТ 9128-2013

Наименование заполнителей асфальтобетонной смеси	Содержание зерен мельче данного размера, остатки на ситах в % по массе								
	20 мм	10 мм	5 мм	2,5 мм	1,25 мм	0,63 мм	0,315 мм	0,16 мм	0,071 мм
шлак мартеновский смеси фр. 5-20 мм	35,38	15,33	8,65	-	-	-	-	-	-
шлак конвертерный фр. 0-5 мм	45,00	42,41	37,90	29,06	23,01	14,84	8,66	1,51	-
шлак электросталеплавильный печь-ковш	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	13,00	10,43	9,10	6,38
битум нефтяной дорожный вязкий	-	-	-	-	-	-	-	-	-
зерновой состав минеральной части запроектированной смеси	93,38	70,74	59,55	42,06	36,01	27,84	19,08	10,61	6,38
зерновой состав минеральной части мелкозернистой плотной асфальтобетонной смеси тип Б, табл.3 ГОСТ 9128-2013 (для верхних слоев покрытий)	90-100	70-100	50-60	38-48	28-37	20-28	14-22	10-16	6-12

Таблица 3.4 - Зерновой состав минеральной части запроектированной шлакоасфальтобетонной смеси, соответствующей крупнозернистой пористой асфальтобетонной смеси по ГОСТ 9128-2013

Наименование материала	Содержание зерен мельче данного размера, остатки на ситах в % по массе									
	40 мм	20 мм	10 мм	5 мм	2,5 мм	1,25 мм	0,63 мм	0,315 мм	0,16 мм	0,071 мм
шлак мартеновский фр. 20-40 мм	13,65	-	-	-	-	-	-	-	-	-
шлак мартеновский смеси фр. 5-20 мм	30,00	24,76	-	-	-	-	-	-	-	-
шлак конвертерный фр. 0-5 мм	50,00	50,00	47,12	42,11	32,29	25,57	16,49	9,62	1,68	-
шлак электросталеплавильный печь-ковш	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	5,00	4,01	3,75	2,45
битум нефтяной дорожный вязкий	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
зерновой состав минеральной части запроектированной смеси	98,65	79,76	52,12	47,11	37,29	30,57	21,49	13,63	5,43	2,45
зерновой состав минеральной части пористой крупнозернистой смеси, табл. 2 ГОСТ 9128-2013	90-100	75-100	52-88	40-60	28-60	16-60	10-60	8-37	5-20	2-8

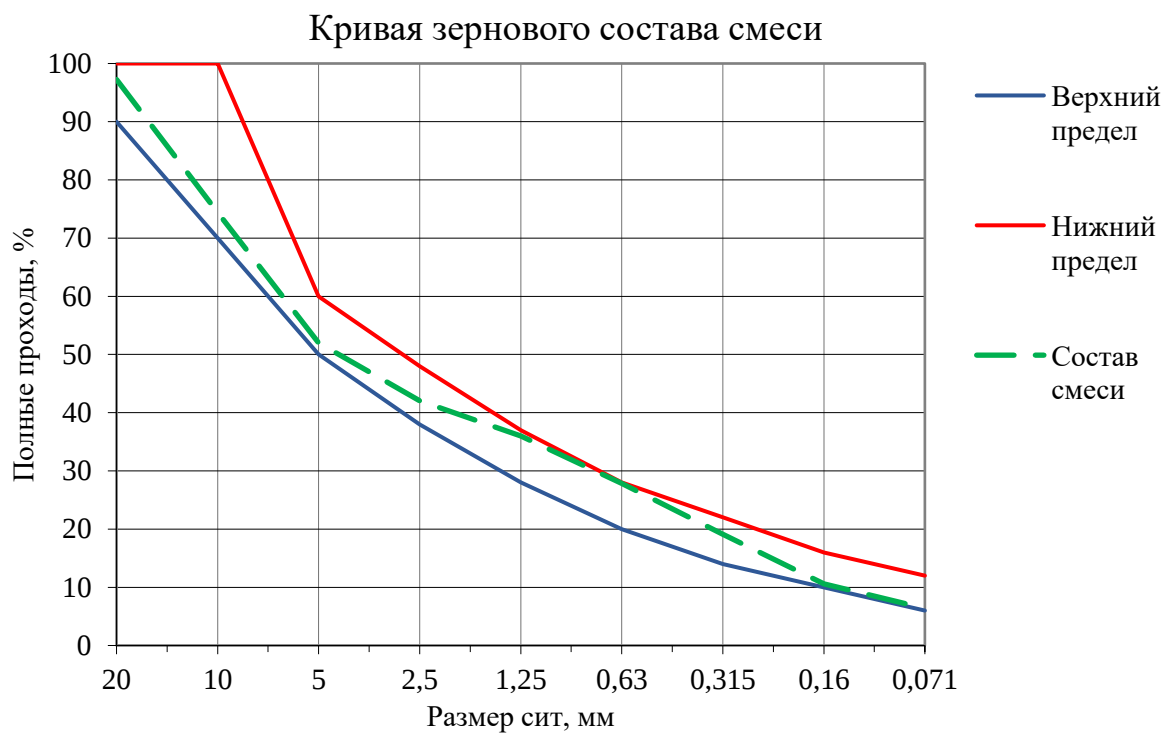


Рисунок 3.13. Кривая зернового состава минеральной части плотной шлакоасфальтобетонной смеси

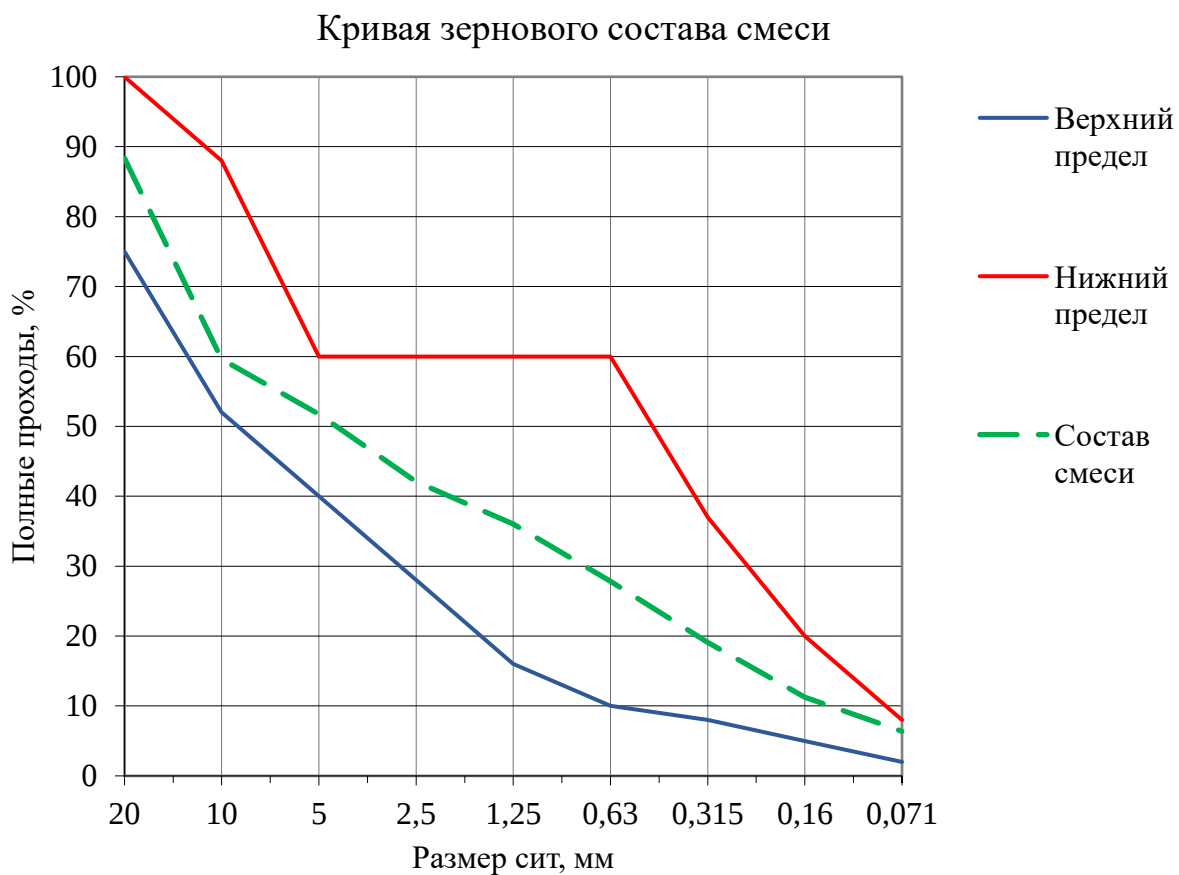


Рисунок 3.14. Кривая зернового состава минеральной части пористой шлакоасфальтобетонной смеси

Анализ показателей запроектированных шлакоасфальтобетонных смесей (см. табл. 3.3 – 3.6) указывает на их соответствие ГОСТ 9128-2013 и ОДМ 218.3.087-2017 [119], несмотря на несколько более высокую исходную битумоемкость шлакового заполнителя.

Таблица 3.5 - Результаты определения показателей физико-механических свойств плотной шлакоасфальтобетонной смеси

Наименование показателя	Единицы измерения	Запроектированная плотная шлакоасфальтобетонная смесь	Мелкозернистая плотная асфальтобетонная смесь тип Б марка II по ГОСТ 9128-2013 (для II-III ДКЗ)	Шлаковая асфальтобетонная смесь по ОДМ 218.3.087-2017
1	2	3	4	5
Средняя плотность	г/см ³	2,43	не нормируется	не нормируется
Водонасыщение	%	1,7	1,5	8-10
Предел прочности при сжатии, при температуре 50°C R ₅₀	МПа	2,6	не менее 2,0	не менее 1,0
Предел прочности при сжатии, при температуре 20°C R ₂₀	МПа	4,4	не менее 2,2	не менее 2,2
Предел прочности при сжатии, при температуре 0°C R ₀	МПа	7,0	не более 12,0	не более 12,0
Водостойкость	-	0,87	не менее 0,85	не менее 0,85
Сдвигоустойчивость по: - коэффициенту внутреннего трения	-	0,88	не менее 0,81	не менее 0,81

Продолжение таблицы 3.5

1	2	3	4	5
Сдвигоустойчивость по: - сцеплению при сдвиге при температуре 50°C	МПа	0,66	не менее 0,35	не менее 0,35
Трещиностойкость по пределу прочности на растяжение при расколе при температуре 0°C и скорости деформирования 50 мм/мин	МПа	2,8-3,0	3,0-6,5	2,5-6,0

На рис. 3.15 представлено сравнение показателей физико-механических свойств запроектированной плотной шлакоасфальтобетонной смеси с мелкозернистой асфальтобетонной смесью, соответствующей типу Б марке II по ГОСТ 9128-2013.

Сравнительный анализ полученных результатов показывает, что эксплуатационные характеристики шлакоасфальтобетона, представленные показателями R_{50} , R_{20} и сдвигоустойчивости превышают аналогичные показатели традиционного асфальтобетона в 1,3 – 1,6 раза. Остальные показатели асфальтобетона на шлаковых заполнителях находятся в пределах нормативных значений.



Рисунок 3.15. Сравнение показателей физико-механических характеристик асфальтобетонных смесей

Таблица 3.6 - Результаты определения показателей физико-механических свойств пористой шлакоасфальтобетонной смеси

Наименование показателя	Единицы измерения	Запроектированная пористая шлакоасфальтобетонная смесь	Крупнозернистая пористая асфальтобетонная смесь марка П по ГОСТ 9128-2013	Шлаковая асфальтобетонная смесь по ОДМ 218.3.087-2017
1	2	3	4	5
Средняя плотность	г/см ³	2,37	не нормируется	не нормируется
Водонасыщение	%	12,8	4-10	14-18
Водостойкость	-	0,95	не менее 0,60	не менее 0,70
Предел прочности при сжатии, при температуре 50°C R ₅₀	МПа	1,67	не менее 0,50	не менее 0,50

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ III

1. В условиях насыщения водой в асфальтовяжущем веществе на основе сталеплавильных шлаков (печь-ковш) протекают процессы гидратации, которые придают асфальтобетону на шлаковых заполнителях необходимую водостойкость и прочность, увеличивая ее с течением времени по степенной зависимости: $y=0,8916x^{0,1541}$, где x – это продолжительность насыщения водой, сут., y – коэффициент водостойкости.

2. Трещиностойкость асфальтового бетона на сталеплавильных шлаках при длительном насыщении водой обеспечивается за счет внутрипоровой структуры, исключающей появление макротрещин на этапе эксплуатации в дорожном покрытии.

3. При длительном воздействии воды в шлакоасфальтобетоне происходит изменение структурных связей с коагуляционных на коагуляционно-

кристаллизационные. Через 14-21 сутки водонасыщения снижается интенсивность падения показателей $K_{\text{вод}}$ и $R_{20(\text{вод})}$ 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.

4. Получены оптимальные составы шлакоасфальтобетонных смесей с полным замещением природного заполнителя (щебня, песка и минерального порошка) на сталеплавильный шлак, соответствующие требованиям нормативно-технических документов. При этом физико-механические характеристики асфальтобетона на сталеплавильных шлаках, представленные показателями прочности при сжатии при 20°C, 50°C и сдвигоустойчивости превышают аналогичные показатели традиционного асфальтобетона в 1,3 – 1,6 раза.

4. ОБЪЕМНО-ФУНКЦИОНАЛЬНОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ НА ОСНОВЕ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ШЛАКОВ

4.1. Исследование объемных показателей сталеплавильных шлаков как заполнителей асфальтобетонной смеси

Для приготовления асфальтобетонной смеси была произведена подготовка исходных компонентов – заполнителей и их испытание в соответствии с требованиями стандартов для получения объемных показателей.

Мартеновский сталеплавильный шлак был просушен, и из него путем просеивания и смешивания в необходимых пропорциях получен шлаковый щебень необходимых для объемно-функционального проектирования фракций.

Шлаковый песок (конвертерный шлак) был промыт через сито с размером ячеек 0,063 мм. Далее определены их фактический зерновой состав в соответствии с ГОСТ 33860-2014²⁹ (см. рис. 4.1).

Качество применяемого материала было проверено на соответствие требованиям ГОСТ Р 58401.1-2019, ГОСТ 32826-2014³⁰, результаты испытаний сведены в табл. 4.1.

Таблица 4.1 - Физико-механические показатели мартеновского шлака

Наименование показателя	Фракция 4-8 мм	Фракция 8-16 мм
1	2	3
Активность шлака	НА ³¹	НА
Гранулометрический состав	90/10	90/10
Содержание пылевидных и глинистых частиц	0,4	0,3

²⁹ ГОСТ 32860-2014 Дороги автомобильные общего пользования. Щебень и песок шлаковые. Определение гранулометрического состава. – Введ. 2015-07-01.

³⁰ ГОСТ 32826-2014 Дороги автомобильные общего пользования. Щебень и песок шлаковые. Технические требования. – Введ. 2015-07-01.

³¹ Неактивный шлаковый материал по ГОСТ 32826-2014.

Продолжение таблицы 4.1

1	2	3
Содержание зерен пластинчатой (лещадной) и игловатой формы, марка Количество, %	Л10 1,55%	Л10 1%
Сопротивление дроблению и износу Потеря массы при испытании	ИЗ 23	ИЗ 24,5
Дробимость, марка Потеря массы при испытании	М600 23,5	М600 25
Содержание металлических примесей, поддающихся ручной сортировке, %	1,8	1,8
Объемная плотность	2,285	2,281



Рисунок 4.1. Подготовка сталеплавильного шлака к испытаниям

Испытания сталеплавильных шлаков показали его применимость в качестве заполнителя минеральной части смесей для легких и нормальных условий движения по ГОСТ Р 58401.1-2019³² (см. табл. 4.2 - 4.4) для асфальтобетонных смесей, запроектированных по системе объемно-функционального проектирования Supergrape.

Таблица 4.2 - Результаты испытаний шлакового щебня фр. 4-8 мм из мартеновского шлака

№ п/п	Наименование показателя	Ед. изм.	Требования к испытываемой продукции		Результаты испытаний	Соответствие НТД
			Наименование НТД	Нормативное значение показателей		
1	2	3	4	5	6	7
1	Содержание зерен пластинчатой (лещадной) и игловатой формы (5:1)	%	ГОСТ Р 58401.1-2019	не более 10	1,55	Соответствует
2	Марка по дробимости (потеря массы при испытании)	-	ГОСТ Р 58401.1-2019 ГОСТ 32817-2014	не ниже М400	М600 (5%)	Соответствует
3	Содержание пылевидных и глинистых частиц	%	ГОСТ 32859-2014	не более 1,0	0,4	Соответствует
4	Сопротивление дроблению и износу, для марки И3	%	ГОСТ 32816-2014	20-25	23	Соответствует

³² ГОСТ Р 58401.1-2019 Дороги автомобильные общего пользования. Смесей асфальтобетонных дорожных и асфальтобетон. Система объемно-функционального проектирования. Технические требования. Введ. 2019-06-01.

Продолжение таблицы 4.2

1	2	3	4	5	6	7	
5	Содержание металлических примесей, поддающихся ручной сортировке, %	%	ГОСТ 32861-2014	не более 5,0	1,80	Соответст вует	
6	Объемная плотность	г/ см³	ГОСТ Р 58402.6 - 2019	-	2,285	-	
7	Содержание слабых зерен	%	ГОСТ 32861-2014	не более 15	3,06	Соответст вует	
Зерновой состав		Диаметр отверстий сит, мм					
		16	11,2	8	5,6	4	2
Полные проходы, %		100,00	100,0 0	98,32	55,14	26,60	1,73
Треб. ГОСТ 32826-2014 к полн. проходам		100	90- 100	85-100	-	0-35	0-5

По испытанным показателям щебень шлаковый фракции 4 - 8 мм соответствует требованиям ГОСТ 32826-2014, ГОСТ Р 58401.1-2019.

Таблица 4.3 - Результаты испытаний шлакового щебня фр. 8-16 мм из мартеновского шлака

№ п/п	Наименование показателя	Ед. изм.	Требования к испытываемой продукции		Результаты испытаний	Соответствие НТД
			Наименование НТД	Нормативное значение показателей		
1	2	3	4	5	6	7
1	Содержание зерен пластинчатой (лещадной) и игловатой формы (5:1)	%	ГОСТ Р 58401.1-2019	не более 10	1,00	Соответствует

Продолжение таблицы 4.3

1	2	3	4	5		6	7		
2	Марка по дробимости (потеря массы при испытании)	-	ГОСТ Р 58401.1-2019 ГОСТ 32817-2014	не ниже М400		М600 (5%)	Соответствует		
3	Содержание пылевидных и глинистых частиц	%	ГОСТ 32859-2014	не более 1,0		0,4	Соответствует		
4	Сопротивление дроблению и износу, для марки ИЗ	%	ГОСТ 32816-2014	20-25		24,50	Соответствует		
5	Содержание металлических примесей, поддающихся ручной сортировке, %	%	ГОСТ 32861-2014	не более 5,0		1,80	Соответствует		
6	Объемная плотность	г/см ³	ГОСТ Р 58402.6-2019	-		2,281	-		
7	Содержание слабых зерен	%	ГОСТ 32861-2014	не более 15		3,06	Соответствует		
Зерновой состав			Диаметр отверстий сит, мм						
			31,5	22,4	16	11,2	8	5,6	4
Полные проходы, %			100	100	97,93	33,04	6,13	2,96	0,85
Треб. ГОСТ 32826-2014 к полн. проходам			100	100	90-100	-	0-10	-	0-5

По испытанным показателям щебень шлаковый фракции 8 - 16 мм соответствует требованиям ГОСТ 32826-2014, ГОСТ Р 58401.1-2019.

Таблица 4.4 - Результаты испытания шлакового песка фр. 0-4 мм
из конвертерного шлака

№ п/п	Наименование показателя	Ед. изм.	Требования к испытываемой продукции					Результаты испытаний	Соответствие НТД	
			Наименование НТД		Нормативное значение показателей					
1	2	3	4		5			6	7	
1	Модуль крупности	-	ГОСТ 32826-2014		2,8-3,3			3,17	Соответствует	
2	Класс	-	ГОСТ 32826-2014		-			II	-	
3	Группа	-	ГОСТ 32826-2014		-			крупный	-	
4	Марка по дробимости (потеря массы при испытании)	-	ГОСТ 32826-2014		не ниже М400			800 (13%)	Соответствует	
5	Объемная плотность	г/см³	-		-			2,342	-	
6	Эквивалент песка	%	ГОСТ Р 58401.1-2019		не менее 40			50	Соответствует	
7	Содержание глины в комках	%	ГОСТ 32826-2014		не более 1			0,00	Соответствует	
Зерновой состав		Диаметр отверстий сит, мм								
		8	5,6	4	2	1	0,5	0,25	0,125	0,063
Полные остатки, %		0,0	0,0	1,0 2	17,43	45,17	74,10	87,60	92,30	96,50
Треб. ГОСТ 32730-2014 к полн. остаткам на ситах		до 2	-	до 12	-	-	св.55 до 75		не менее 90	-

Песок шлаковый фракции 0-4 мм относится к пескам повышенной крупности II класса, по испытанным показателям соответствует требованиям ГОСТ 32826-2014, ГОСТ Р 58401.1-2019.

Исследование показателей электросталеплавильного шлака печь-ковш и его оценка соответствия требованиям объемно-функционального проектирования Superpave представлены в Главах 2,3.

4.2. Выбор битумного вяжущего

В соответствии с [120] для Новосибирской области устанавливается максимальная и минимальная температура воздуха за период не менее 20 лет по эмпирическим зависимостям ГОСТ Р 58400.3-2019. Для анализа расчетных температур регионов Западной Сибири были использованы статистические данные за период с 2000 по 2019 года.

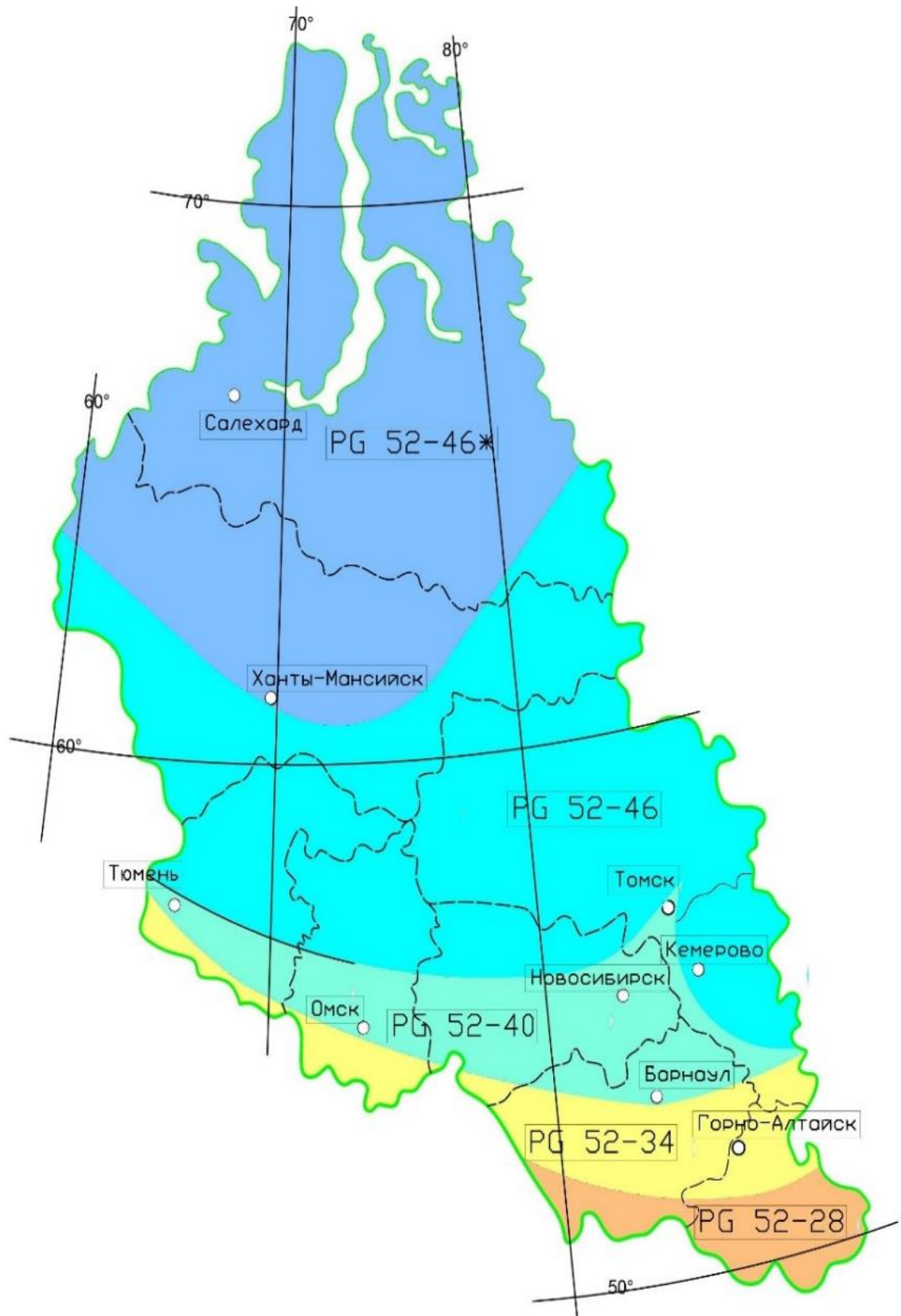
При назначении битума марки PG X-Y принимается корректировка, учитывающая среднюю скорость транспортного потока, исходную максимальную расчетную температуру слоя и условия движения. (см. табл. 4.5).

Таблица 4.5 - Значения коррекции вяжущего в зависимости от скорости движения

Исходная максимальная расчетная температура слоя, °C	Значение коррекции k, °C			
	Условия движения			
	Легкие (Л)	Нормальная (Н)	Тяжелые (Т)	Экстремально тяжелые (Э)
От 52,0 включ.	2,8	10,3	15,5	17,7

Используя карту районирования территории Западной Сибири по эксплуатационным температурам асфальтобетонных покрытий для Новосибирской области (см. рис. 4.2) и корректировку на подвижную нагрузку - легкие условия движения - была подобрана марка вяжущего PG 58-40, где 58 – верхнее значение марки, соответствующее расчетной максимальной температуре слоя на глубине 20 мм от поверхности покрытия с надежностью 98%; 40 – нижнее значение марки, соответствующее расчетной минимальной температуре покрытия.

Карта районирования построена по результатам статистических расчетов в соответствии с ГОСТ Р 58400.3-2019. Расчет марки PG для территории Новосибирской области приведен в табл. 4.6 - 4.7.



* - Экстремальные условия движения

Рисунок 4.2. Карта районирования территории Западной Сибири по эксплуатационным температурам асфальтобетонных покрытий [120]

Таблица 4.6 - Расчет марки РГ для территории Новосибирской области

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Показатели/год	2019	2018	2017	2016	2015	2014	2013	2012	2011	2010
Средняя максимальная годовая семидневная температура (семидневная температура), град	29,27	28,03	30,09	29,77	28,64	31,66	28,00	31,69	28,06	30,36
Средняя максимальная температура, град	29,54									
Отклонение от среднего	-0,27	-1,51	0,55	0,23	-0,90	2,12	-1,54	2,15	-1,48	0,82
Квадрат отклонения	0,07	2,28	0,30	0,05	0,80	4,49	2,37	4,61	2,20	0,67
Самая низкая температура, град	-40,10	-37,20	-32,80	-36,10	-38,30	-37,90	-33,70	-41,40	-38,50	-41,60
Средняя минимальная температура, град	-38,25									
Отклонение от среднего	-1,86	1,05	5,45	2,15	-0,05	0,35	4,55	-3,15	-0,25	-3,36
Квадрат отклонения	3,44	1,09	29,65	4,60	0,00	0,12	20,66	9,95	0,07	11,26
Годовые градусы D	1764,2	1647,0	1758,9	1945,3	1804,2	1722,2	1483,4	2070,1	1805,0	1668,7
№ п/п	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Показатели/год	2009	2008	2007	2006	2005	2004	2003	2002	2001	2000
Средняя максимальная годовая семидневная температура (семидневная температура), град	27,96	28,80	29,24	29,54	29,76	32,87	30,51	28,01	29,70	28,83
Средняя максимальная температура, град	29,54									
Отклонение от среднего	-1,58	-0,74	-0,30	0,00	0,22	3,33	0,97	-1,53	0,16	-0,71
Квадрат отклонения	2,50	0,55	0,09	0,00	0,05	11,10	0,95	2,33	0,03	0,51
Самая низкая температура, град	-39,8	-40,6	-32,1	-43	-35,9	-33,6	-36,8	-36,5	-45	-44
Средняя минимальная температура, град	-38,25									
Отклонение от среднего	-1,55	-2,36	6,15	-4,76	2,35	4,65	1,45	1,75	-6,76	-5,76
Квадрат отклонения	2,42	5,55	37,76	22,61	5,50	21,58	2,09	3,05	45,63	33,12
Годовые градусы D	1624,40	1740,00	1747,70	1793,70	1835,00	1869,60	1969,20	1772,20	1834,60	1717,20

Таблица 4.7 - Расчет марки PG для территории Новосибирской области

Наименование показателя	Результаты расчета
1	2
Географическая широта, град	55,03
Глубина от поверхности покрытия Н, мм	20
Табличное значение стандартного нормального распределения Z (98%)	2,055
Стандартное отклонение семидневных температур воздуха, s макс	1,38
Стандартное отклонение самых низких температур воздуха, s мин	3,70
Максимальная расчетная температура (X) с надежностью N = 98% по ГОСТ Р 58400.3-2019 (Приложение А), град**	51,31
Скорректированная максимальная расчетная температура (X) с надежностью N = 98% по ГОСТ Р 58400.3-2019 (Приложение А), град	54,11
Минимальная расчетная температура (Y) с надежностью N = 98% по ГОСТ Р 58400.3-2019 (Приложение А), град	-37,84
Координата X {34, 40, 46, 52, 58, 64, 70, 76, 82}	
Координата Y {-10; -16; -22; -28; - 34; - 40; -46; -52}	
Марка вяжущего по ГОСТ Р 58400.2— 2019	PG 58(Л)-40

Битумное вяжущее марки PG 58-40 по физико-механическим показателям соответствует требованиям ГОСТ Р 58400.1-2019 (см. табл. 4.8).

Таблица 4.8 - Результаты испытания битумного вяжущего PG 58-40

№ п/п	Наименование показателя	Ед. изм.	Требования к испытываемой продукции		Результаты испытаний	Соответствие НТД
			Наименование НТД	Нормативное значение показателей		
1	2	3	4	5	6	7
Исходное битумное вяжущее						
1	Температура вспышки	°С	ГОСТ Р 58400.1-2019	не ниже 230	280	Соответствует

Продолжение таблицы 4.8

1	2	3	4	5	6	7
2	Динамическая вязкость, при температуре испытания 135°C	Па·с	ГОСТ Р 58400.1-2019	не более 3	1,04	Соответствует
3	Сдвиговая устойчивость $G^*/\sin\delta$ при 10 рад/с, при температуре испытания 64°C	кПа		не менее 1	1,60	Соответствует
Битумное вяжущее, состаренное по методу RTFOT						
4	Изменение массы после старения	%	ГОСТ Р 58400.1-2019	не более ± 1	0,5	Соответствует
5	Сдвиговая устойчивость ($G^*/\sin\delta$) при 10 рад/с, при температуре испытания 64°C	кПа		не менее 2,2	2,40	Соответствует
Битумное вяжущее, состаренное по методу PAV						
6	Усталостная устойчивость ($G^*\cdot\sin\delta$) при 10 рад/с, при температуре испытания 22°C	кПа	ГОСТ Р 58400.1-2019	не более 5000	1060	Соответствует
7	Низкотемпературная устойчивость при температуре испытания минус 18 °C: Жесткость S; Параметр m	кПа		не более 300 не менее 0,3	153,2 0,324	Соответствует Соответствует

4.3. Определение физико-механических и эксплуатационных характеристик шлакоасфальтобетонной смеси

На первом этапе было запроектировано четыре различных пробных зерновых состава шлакоасфальтобетонной смеси (см. табл. 4.9), три из которых – с преобладающим содержанием одной из фракций в каждом составе, и один – с примерно равным количеством применяемых материалов.

Таблица 4.9 - Зерновые составы шлакоасфальтобетонной смеси

№ п/п	Наименование материала	Состав №1	Состав №2	Состав №3	Состав №4
1	2	3	4	5	6
1	Шлак мартеновский фр. 8-16 мм	57,0%	33,0%	22,0%	22,0%
2	Шлак мартеновский фр. 4-8 мм	18,0%	33,0%	55,0%	25,0%
3	Шлак конвертерный фр. 0-4 мм	18,0%	31,0%	20,0%	50,0%
4	Шлак электросталеплавильный печь-ковш	7,0%	3,0%	3,0%	3,0%

Состав минерального заполнителя каждого из вариантов смеси подбирался таким образом, чтобы зерновой состав минеральной составляющей смеси соответствовал требованиям табл. 3 ГОСТ Р 58401.1 – 2019. Графики зерновых составов представлены на рис. 4.3.

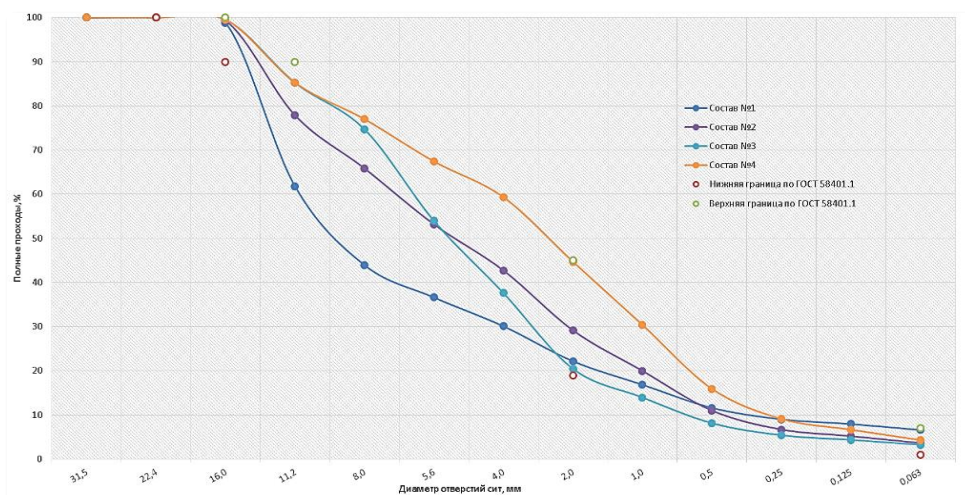


Рисунок 4.3. Графики зерновых составов минеральной части

У каждого запроектированного состава определены объемные свойства в соответствии с ГОСТ Р 58401.3 – 2019³³.

Общая объемная плотность минерального заполнителя G_{sb} , г/см³, входящего в состав шлакоасфальтобетонной смеси, г/см³, рассчитывается по формуле (4.1):

$$G_{sb} = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_n}{\frac{P_1}{G_1} + \frac{P_2}{G_2} + \dots + \frac{P_n}{G_n}}, \quad (4.1)$$

где $P_1, P_2, \dots, P_n$ - количество каждого отдельного минерального заполнителя в шлакоасфальтобетонной смеси, %;

$G_1, G_2, \dots, G_n$ - объемные плотности входящего в состав шлакоасфальтобетонной смеси минерального заполнителя, г/см³.

Максимальная плотность входящего в состав шлакоасфальтобетонной смеси минерального заполнителя, G_{sa} , г/см³, для каждой проектируемой смеси рассчитывается по формуле (4.2):

$$G_{sa} = \frac{P_1 + P_2 + \dots + P_n}{\frac{P_1}{G_{a1}} + \frac{P_2}{G_{a2}} + \dots + \frac{P_n}{G_{an}}}, \quad (4.2)$$

где $P_1, P_2, \dots, P_n$ - количество в шлакоасфальтобетонной смеси каждого отдельного минерального заполнителя, %;

$G_1, G_2, \dots, G_n$ - объемные плотности входящего в состав шлакоасфальтобетонной смеси минерального заполнителя, г/см³;

$G_{a1}, G_{a2}, \dots, G_{an}$ - максимальные плотности входящего в состав шлакоасфальтобетонной смеси минерального заполнителя, г/см³.

Плотность заполнителя шлакоасфальтобетонной смеси G_{se} , г/см³, с учетом абсорбированного вяжущего рассчитывается по формуле (4.3):

$$G_{se} = G_{sb} + 0,8 * (G_{sa} - G_{sb}), \quad (4.3)$$

где 0,8 - коэффициент, учитывающий абсорбцию минерального заполнителя.

Объем абсорбированного в минеральный заполнитель вяжущего, V_{ba} , см³, рассчитывается по формуле (4.4):

³³ ГОСТ Р 58401.3 – 2019 Дороги автомобильные общего пользования. Смеси асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. Система объемно-функционального проектирования. Правила проектирования. – Введ. 2019-06-01.

$$V_{ba} = W_s * \left(\frac{1}{G_{sb}} - \frac{1}{G_{se}} \right), \quad (4.4)$$

где W_s - масса общего минерального заполнителя в 1 см³ смеси, г, рассчитанная по формуле (4.5):

$$W_s = \frac{P_s * (1 - V_a)}{\frac{P_b}{G_b} + \frac{P_s}{G_{se}}}, \quad (4.5)$$

где P_s - количество минерального заполнителя в смеси, в долях, принимаемое равным 0,95;

V_a - объем воздушных пустот, принятый равным 0,04 см³ в 1 см³ асфальтобетонной смеси;

P_b - количество вяжущего, в долях, принятый равным 0,05;

G_b - плотность вяжущего, г/см³.

Эффективный (расчетный) объем вяжущего V_{be} , см³, рассчитывается по формуле (4.6):

$$V_{be} = 0,176 - 0,0675 * \log(S_n), \quad (4.6)$$

где S_n - номинально максимальный размер заполнителя в проектируемой смеси.

Формула устанавливает эмпирическое соотношение между ПМЗ и V_{be} при содержании воздушных пустот в смеси, равным 4,0 %, а также соотношение между ПМЗ и номинально максимальным размером зерен минерального заполнителя.

Далее в соответствии с п. 4.3 ГОСТ Р 58401.3 – 2019 для каждого из пробных зерновых составов шлакоасфальтобетонной смеси №№ 1-4 определено первоначальное количество вяжущего.

Первоначальное количество вяжущего в асфальтобетонной смеси P_b , % по массе, для приготовления проектируемых асфальтобетонных смесей рассчитывается по формуле (4.7):

$$P_b = 100 * \left(\frac{G_b * (V_{be} + V_{ba})}{G_b * (V_{be} + V_{ba}) + W_s} \right) \quad (4.7)$$

Результаты расчетов объемных свойств пробных составов сведены в табл. 4.10.

Таблица 4.10 - Расчет первоначального количества вяжущего

№ п/п	Наименование расчетной величины	Ед. изм.	Состав №1	Состав №2	Состав №3	Состав №4
1	2	3	4	5	6	7
1	Общая объемная плотность минерального заполнителя, G_{sb}	г/ см ³	2,556	2,503	2,465	2,531
2	Общая максимальная плотность, G_{sa}	г/ см ³	2,712	2,704	2,717	2,695
3	Плотность заполнителя асфальтобетонной смеси, G_{se}	г/ см ³	2,681	2,664	2,667	2,662
4	Объем абсорбированного вяжущего, V_{ba}	см ³	0,041	0,054	0,069	0,043
5	Масса общего минерального заполнителя в 1 см ³ , W_s	г	2,241	2,228	2,231	2,227
6	Эффективный (расчетный) объем вяжущего, V_{be}	см ³	0,095	0,095	0,095	0,095
7	Первоначальное количество вяжущего в асфальтобетонной смеси, P_b	%	5,4	6,0	6,5	5,6

Для каждого из четырех пробных зерновых составов шлакоасфальтобетонной смеси изготовлено по три пробы (см. рис. 4.4). Количество оборотов вращательного уплотнителя было выбрано исходя из условий движения (см. табл. 4.11).

Таблица 4.11 - Требования к числу оборотов вращательного уплотнителя

Условия движения по количеству приложений АК-11,5	Число оборотов вращательного уплотнителя			Категория и класс автомобильной дороги
	$N_{нач}$	$N_{пр}$	N_{max}	
1	2	3	4	5
Л	7	75	115	Дороги обычного типа, категории V с минимальной интенсивностью движения

Воздушные пустоты P_a , %, и содержание пустот в минеральном заполнителе ПМЗ, %, для образцов, уплотненных во вращательном уплотнителе с числом оборотов, равным $N_{пр}$, рассчитывается по формулам (4.8, 4.9):

$$P_a = 100 * \left(1 - \frac{G_{mb}}{G_{mm}}\right), \quad (4.8)$$

$$\text{ПМЗ} = 100 * \left(1 - \frac{G_{mb} * P_s}{G_{sb}}\right), \quad (4.9)$$

где G_{mb} - объемная плотность уплотненного образца, г/см³;

G_{mm} - максимальная плотность асфальтобетонной смеси, г/ см³;

P_s - количество минерального заполнителя в асфальтобетонной смеси, доли единиц;

G_{sb} - общая объемная плотность минерального заполнителя, входящего в состав шлакоасфальтобетонной смеси, г/ см³.

После этого для каждого из пробных составов №№ 1-4 вычислено содержание пустот, наполненных битумным вяжущим ПНБ, %, по формуле (4.10):

$$\text{ПНБ} = 100 * \frac{(\text{ПМЗ} - P_a)}{\text{ПМЗ}} \quad (4.10)$$

Выбор оптимального зернового состава шлакоасфальтобетонной смеси выполнен по результатам расчетных данных в соответствии с ГОСТ Р 58401.3 – 2019, Приложение В (см. табл. 4.12).

Таблица 4.12 - Выбор оптимального зернового состава асфальтобетонной смеси

Объемные свойства	Ед. изм.	Состав №1	Состав №2	Состав №3	Состав №4	Требования ГОСТ Р 58401.1 – 2019
1	2	3	4	5	6	7
Объемная плотность уплотненного образца, G_{mb}	г/см ³	2,364	2,278	2,248	2,417	-
Максимальная плотность асфальтобетонной смеси, G_{mm}	г/см ³	2,475	2,396	2,351	2,489	-
Первоначальное количество вяжущего, P_b	%	5,4	6,0	6,5	5,6	-

Продолжение таблицы 4.12

1	2	3	4	5	6	7
Содержание воздушных пустот при $N_{нач}$	%	11,7	15,1	12,0	10,3	$\geq 9,5$
Содержание воздушных пустот при $N_{пр}$	%	4,49	4,94	4,40	2,89	$4 \pm 0,3$
Содержание пустот в минеральном заполнителе ПМЗ	%	12,5	14,1	14,5	10,7	Не менее 13,5
Содержание пустот, заполненных битумным вяжущим ПНВ	%	63,9	65,0	69,4	73,0	от 65 до 78

Анализ приведенных в табл. 4.12 результатов испытаний показывает:

- содержание воздушных пустот при $N_{пр}$ в образцах смеси № 1, № 2 и № 3 превышает требуемое значение по ГОСТ Р 58401.1 – 2019, а в образце № 4 - ниже требуемого значения;
- содержание пустот в минеральном заполнителе (ПМЗ) образцов смеси №№ 1,4 ниже допустимого значения по ГОСТ Р 58401.1 – 2019;
- содержание пустот, заполненных битумным вяжущим (ПНВ), в образце смеси №1 ниже требуемого значения по ГОСТ Р 58401.1 – 2019.

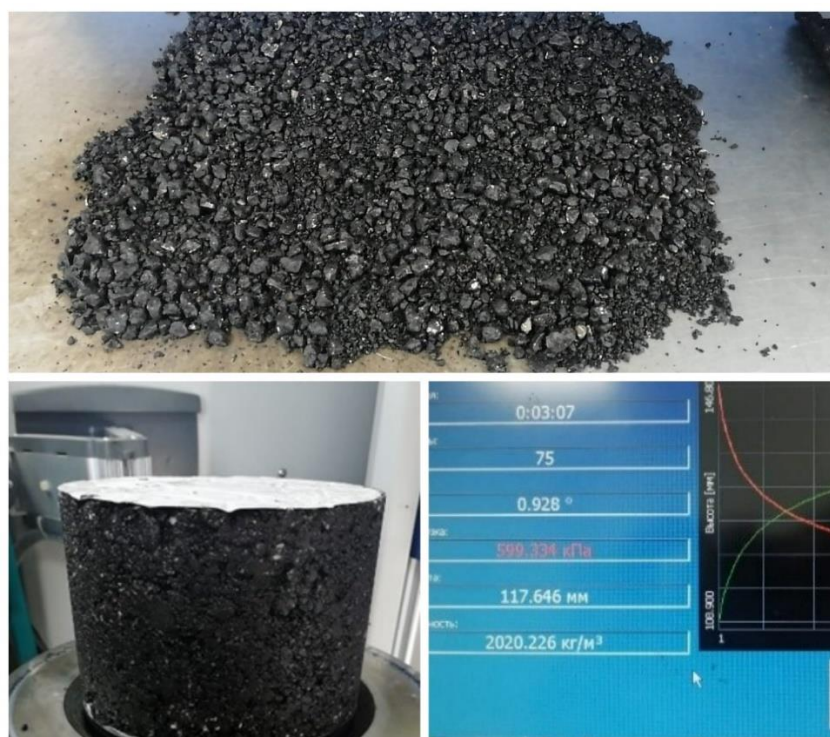


Рисунок 4.4. Изготовление образцов шлакоасфальтобетонной смеси на гираторе

Для того чтобы определить скорректированные значения ПМЗ, ПНВ были проведены расчеты, предусмотренные п. 4.5 ГОСТ Р 58401.3 – 2019. По результатам расчетов было уточнено количество вяжущего до значения, при котором содержание воздушных пустот соответствует требуемому по ГОСТ Р 58401.1 – 2019. Результаты расчетов сведены в табл. 4.13.

Таблица 4.13 - Расчет корректировочных значений

Объемные свойства	Ед. изм.	Состав №1	Состав №2	Состав №3	Состав №4	Требования ГОСТ Р 58401.1 – 2019
1	2	3	4	5	6	7
Рассчитанные отклонения						
Отклонения от требуемого количества воздушных пустот, ΔP_a	%	-0,49	-0,94	-0,40	-7,09	-
Рассчитанное изменение в количестве вяжущего ΔP_b	%	0,2	0,38	0,16	2,84	-
Изменение содержания пустот в минеральном заполнителе $\Delta ПМЗ$	%	-0,1	-0,19	-0,08	-1,42	-
Предполагаемые значения свойств асфальтобетонных смесей						
Предполагаемое количество вяжущего P_{be} ,	%	5,6	6,3	6,7	8,4	-
Предполагаемое значение ПМЗ	%	12,35	13,92	14,29	9,3	Не менее 13,5
Предполагаемое содержание воздушных пустот при $N_{нач}$ с учетом изменения содержания воздушных пустот ΔP_a	%	12,2	14,45	12,4	9,2	$\geq 9,5$

По результатам расчета корректировочных значений установлено, что пробные зерновые составы № 1,4 по величине содержания воздушных пустот ПМЗ, ПНВ не соответствуют требованиям ГОСТ Р 58401.1 – 2019. Принимая во внимание более высокое содержание вяжущего в составе № 3, для дальнейшего проектирования шлакоасфальтобетонной смеси выбран вариант зернового состава № 2.

С выбранным вариантом зернового состава минеральной части (№ 2) было изготовлено 4 варианта шлакоасфальтобетонных смесей с различным содержанием битума: с проектным количеством – 6,3 %; на 0,5% менее – 5,8 %; на 0,5% более – 6,8 %; на 1,0% более – 7,3 %.

Лучшие результаты для выбранного варианта зернового состава минерального заполнителя по результатам испытаний показала шлакоасфальтобетонная смесь с содержанием вяжущего меньше проектного значения на 0,5 %. Состав смеси приведен в табл. 4.14.

Таблица 4.14 - Состав шлакоасфальтобетонной смеси SP

№ п/п	Наименование материала	Состав смеси (битум сверх 100%)	Состав смеси (битум в 100%)
1	2	3	4
1	Шлак мартеновский фр. 8-16 мм	33,0	31,2
2	Шлак мартеновский фр. 4-8 мм	33,0	31,2
3	Шлак конвертерный фр. 0-4 мм	31,0	29,3
4	Шлак электросталеплавильный печь-ковш	3,0	2,7
5	Битум марки PG	5,8	5,6

Показатели физико-механических и эксплуатационных свойств шлакоасфальтобетонной смеси приведены в табл.4.15.

Таблица 4.15 - Показатели физико-механических свойств
шлакоасфальтобетонной смеси

№ п/п	Наименование показателя		Ед. изм.	Требования к испытываемой продукции		Результаты испытаний	Соответствие НТД
				Наименование НТД	Нормативное значение показателей		
1	2	3	4	5	6	7	
1	Объемная плотность	г/см ³	-	-	2,291	-	
2	Максимальная плотность	%	-	-	2,389	-	
3	Воздушные пустоты	N _{нач}	%	ГОСТ Р 58401.1-2019	14,4	11,5	Соответствует
		N _{пр.}			4,10	4,0	Соответствует
		N _{макс}			2,7	2,5	Соответствует
4	Пустоты в минеральном заполнителе (ПМЗ)	%			от 11,5 до 13,5	13,57	Соответствует
5	Содержание пустот, заполненных битумным вяжущим (ПНБ)	%			от 65 до 78	69,8	Соответствует
6	Коэффициент водостойкости TSR	,		ГОСТ Р 58401.1-2019	не менее 0,80	0,82	Соответствует
7	Стойкость к колееобразованию	мм		ГОСТ Р 58401.1-2019	≤3,5	не оценивалось	не оценивалось
8	Отношение пыль/вяжущее	Н			0,6-1,6	1,53	Соответствует

Аналогичным образом запроектирован и запатентован состав шлакоасфальтобетонной смеси по методологии Superpave при отсутствии в минеральной части шлака печь-ковш (Патент РФ № 2787268, см. табл. 4.16).

Таблица 4.16 - Состав шлакоасфальтобетонной смеси SP [121]

№ п/п	Наименование материала	Состав смеси (битум в 100%)
1	2	3
1	Шлак мартеновский фр. 8-16 мм	35,4 – 42,4
2	Шлак мартеновский фр. 4-8 мм	18,2 – 25,2
3	Шлак конвертерный фр. 0-4 мм	37,4 – 41,4
4	Битум марки PG	3,9 – 4,5

Результаты испытаний шлакоасфальтобетонной смеси приведены в табл. 4.17.

Таблица 4.17 - Показатели физико-механических свойств шлакоасфальтобетонной смеси [121]

№ п/п	Наименование показателя		Ед. изм.	Требования к испытываемой продукции		Результаты испытаний	Соответствие НТД
				Наименование НТД	Нормативное значение показателей		
1	2		3	4	5	6	7
1	Объемная плотность		г/см ³	-	-	2,149	-
2	Максимальная плотность		%	-	-	2,239	-
3	Воздушные пустоты	N _{нач}	%	ГОСТ Р 58401.1-2019	11,5	11,5	Соответствует
		N _{пр.}			4,0	4,0	Соответствует
		N _{макс}			2,5	2,5	Соответствует
4	Пустоты в минеральном заполнителе (ПМЗ)		%			от 11,5 до 13,5	11,6

Продолжение таблицы 4.17

1	2	3	4	5	6	7
5	Содержание пустот, заполненных битумным вяжущим (ПНБ)	%		от 65 до 78	65,9	Соответствует
6	Коэффициент водостойкости TSR	,	ГОСТ Р 58401.1-2019	не менее 0,80	0,82	Соответствует
7	Стойкость к колесобразованию	мм	ГОСТ Р 58401.1-2019	$\leq 3,5$	не оценивалось	не оценивалось
8	Отношение пыль/вяжущее	Н		0,6-1,6	1,1	Соответствует

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ IV

1. Испытания сталеплавильных шлаков показали 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.

2. В лабораторных условиях в соответствии с методикой объемно-функционального проектирования получен состав шлакоасфальтобетонной смеси, соответствующий марке SP-16Л. Асфальтобетонная смесь включает битумное вяжущее марки PG по ГОСТ Р 58400.1-2019, мас. % 3,9 – 4,5 (сверх 100%). В качестве заполнителя содержит в своем составе 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 РФ на изобретение № 2787268 (09.01.2023), см. Приложение № 2).

5. ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ В АСФАЛЬТОВОМ БЕТОНЕ НА ОСНОВЕ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ ШЛАКОВ, МОДИФИЦИРОВАННОМ НАНОДОБАВКАМИ

5.1. Модификация нанодобавками асфальтовяжущего вещества, содержащего сталеплавильные шлаки

Использование сталеплавильных шлаков в составе асфальтового бетона имеет некоторые особенности по сравнению с традиционными каменными материалами. Этот факт напрямую связан с повышением адгезии битума к сталеплавильному шлаку и упрочнению зоны контакта за счет вхождения компонентов вяжущего в пористую структуру шлака. Здесь следует отметить, что само взаимодействие носит в большей степени механический характер, а не физико-химический [122].

С целью определения влияния наноразмерных добавок на технологические и эксплуатационные характеристики асфальтовяжущего вещества (далее – АВВ) в структуре асфальтобетона на сталеплавильном шлаке исследованы приготовленные в виде паст дисперсные нанодобавки (см. табл. 2.13, Глава II).

Количество вводимых в АВВ наноматериалов составляло от 0,005 до 0,100 % от массы битума.

В качестве составляющих АВВ минеральных компонентов применены предварительно измельченные до удельной поверхности 2800 - 3100 см²/г мартеновский и конвертерный шлаки, а также битум нефтяной дорожный вязкий по ГОСТ 22245 - 90³⁴, имеющий следующие показатели [122]:

- | | |
|--|-----------------------------------|
| - теплопроводность | - 0,50 - 0,60 Вт/м*°С; |
| - вязкость (твердость) | - 0,80 - 1,10 г/см ³ ; |
| - растяжимость (пластичность) при 25°С | - 60 - 130 см; |
| - размягчение | - 38 - 43 °С. |

³⁴ ГОСТ 22245-90 Битумы нефтяные дорожные вязкие. Технические условия. – Введ.1991-01-01.

Для обеспечения равномерности распределения в разогретом битуме нанодобавок (без влияния на его структуру и свойства) было использовано 5 - 7 % таллового масла³⁵.

Первый этап – исследование свойств модифицированного нанодобавками вяжущего без сталеплавильного шлака (см. рис. 5.1). В нагретый до 120 – 140 °С битум добавлялась предварительно подготовленная смесь таллового масла с нанодобавкой. Время перемешивания битумной композиции до однородной массы составило 3-5 мин.

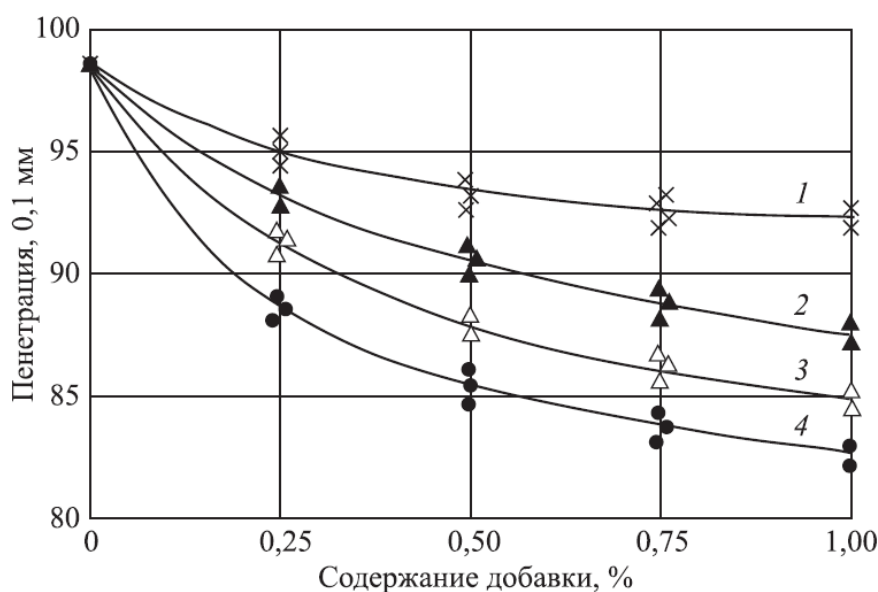


Рисунок 5.1. Влияние нанодобавок на пенетрацию битума при температуре 25 °С:
1 – оксид алюминия, гидроксид магния; 2 – оксид цинка;
3 – диоксид кремния; 4 – углеродные нанотрубки TUBALL™ [122].

График на рисунке 5.1 демонстрирует снижение показателей пенетрации модифицированного нанодобавками битума при температуре 25 °С по сравнению с бездобавочным вариантом. Максимальное снижение показателей пенетрации происходило до содержания 0,50 % от массы битума практически всех нанодобавок, далее наблюдался менее интенсивный процесс [122]. Минимальное снижение – на уровне 5 - 7 % – наблюдается при использовании Al₂O₃ и Mg(OH)₂ (кривая 1 на рисунке 4.1). Существенное свыше 20 % снижение показателей пенетрации достигается при использовании углеродных нанотрубок TUBALL™.

³⁵ От массы битума

Остальные нанодобавки снижают искомый показатель на 10 - 13 % (кривые 2,3 на рисунке 5.1).

Подобная картина наблюдается при определении пенетрации модифицированного нанодобавками битума при 0 °С. Однако, значительных изменений здесь не наблюдается, и все показатели находятся примерно в одном диапазоне значений в пределах 5 - 7 % (см. рис. 5.2).

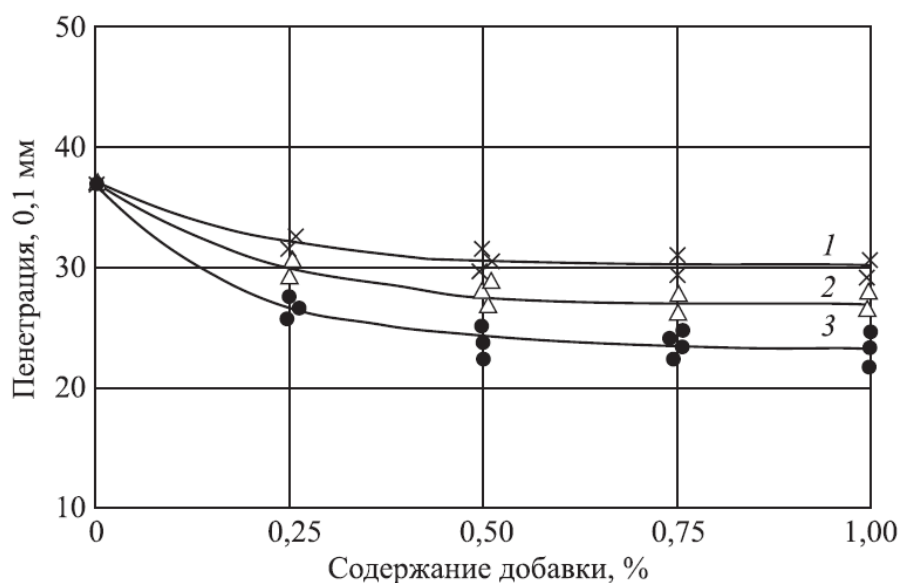


Рисунок 5.2. Влияние нанодобавок на пенетрацию битума при температуре 0 °С [122]: 1 – оксид алюминия, гидроксид магния; 2 – оксид цинка, диоксид кремния; 3 - углеродные нанотрубки TUBALL™.

Проведенные исследования доказывают влияние нанодобавок на свойства битума в процессе его эксплуатации - температуру размягчения и растяжимость, что имеет важное значение при использовании модифицированной битумной композиции в практике дорожного строительства (см. рис. 5.2 – 5.3).

Установлено, что изменение % - содержания в битуме нанодобавок в сторону увеличения не приводит к существенному изменению в характере представленных на рис. 5.3 кривых. Данную ситуацию можно объяснить увеличением количества центров кристаллизации в модифицированном нанодобавками битуме. Увеличение содержания наноразмерных частиц приводит к ослаблению химических связей и привлечению большего числа молекул из состава битумного вяжущего, в пределах 600-800, что согласуется с данными [122-128].

Модифицирующее действие нанодобавок можно представить в виде компонентов, обеспечивающих эффект, проявляемый эффективно в случае максимальной адгезии как к введенным наночастицам, так и когезии самого битума, т.е. чем выше адгезия тел, тем будет выше устойчивость системы к внешним факторам.

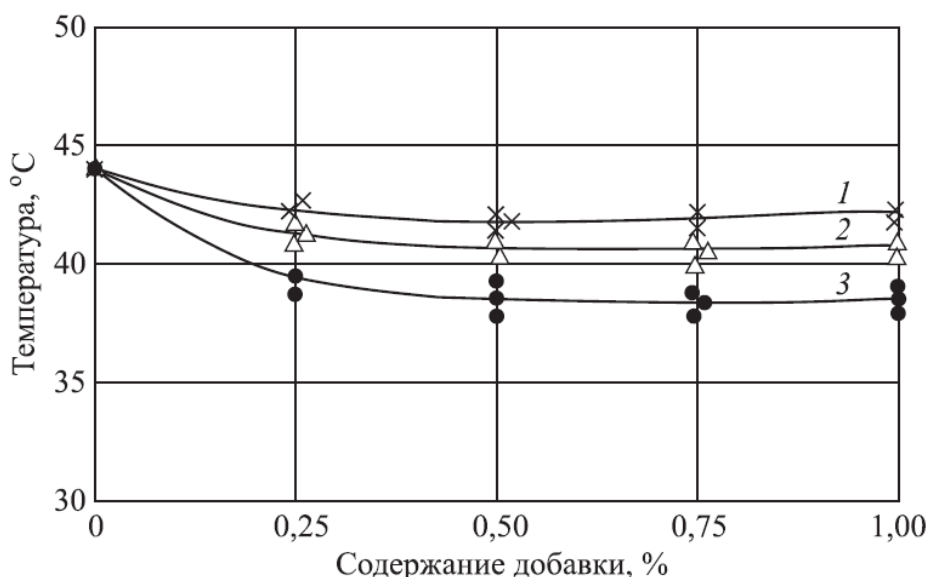


Рисунок 5.3. Влияние нанодобавок на температуру размягчения битума [122]:
1 – углеродные нанотрубки TUBALL™; 2 – оксид цинка, диоксид кремния;
3 – оксид алюминия, гидроксид магния.

Положительно это может сказаться в случае растягивающих напряжений, характерных практически для всех покрытий из асфальтобетона. Помимо межмолекулярного взаимодействия значительную роль в когезионной прочности играет взаимодействие внутри битумной композиции и, в первую очередь, воздействие нанодобавок на упрочнение всей системы. Известно, что лучший результат достигается при сшивании цепей молекул за счет химического взаимодействия, то есть образования между цепями электровалентных связей, что сказывается на показателях растяжимости битумной композиции в присутствии нанодобавок (см. рис. 5.4) [122, 126-131].

Использование рассмотренных выше нанодобавок оказывает существенное влияние на растяжимость битума, при чем наибольшие изменения наблюдаются при введении углеродных нанотрубок TUBALL™. В то же время введение $Mg(OH)_2$

приводит к минимальному снижению качественных характеристик битумного вяжущего.

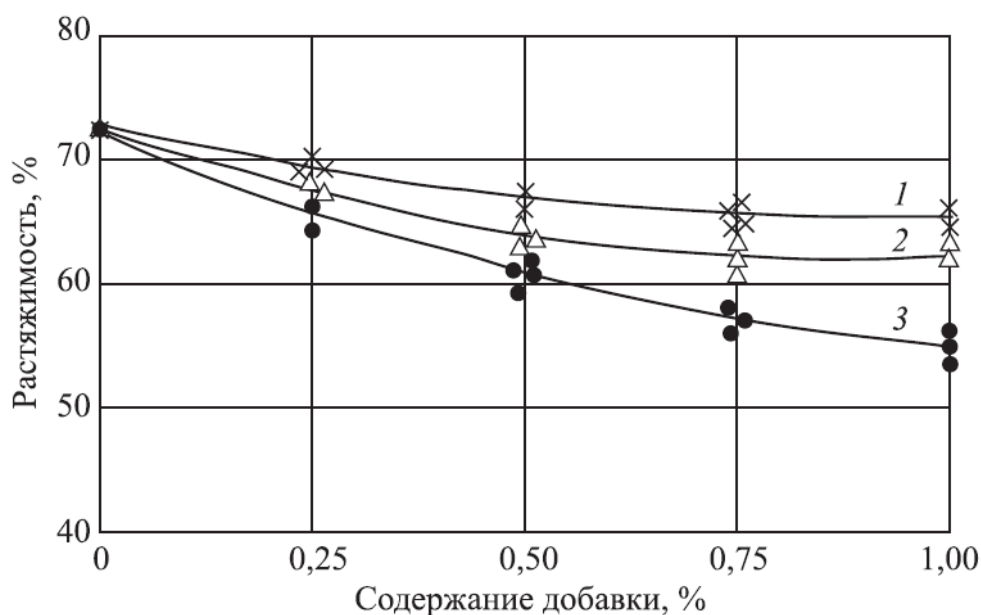


Рисунок 5.4. Влияние нанодобавок на растяжимость битума [122].:
 1 – оксид алюминия, гидроксид магния; 2 – оксид цинка, диоксид кремния;
 3 – углеродные нанотрубки TUBALL™.

Особый интерес представляет изучение влияния нанодобавок на свойства АВВ. Для этого был проведен комплекс термомеханических исследований, которые подтвердили результаты ранее проведенных физико-механических испытаний модифицированного нанодобавками битумного вяжущего.

Исследования деформативных характеристик образцов – таблеток модифицированного нанодобавками АВВ проведены на термомеханических весах В.А. Каргина (см. рис. 5.5): диаметр образца 6 мм при толщине $2,5 \pm 0,1$ мм. Сжимающая нагрузка $8,3 \text{ г/мм}^2$. Повышение температуры происходило со скоростью $3 \text{ }^{\circ}\text{C/мин}$. [122,128,132].

Результаты показали, что все нанодобавки без исключения оказывают усиливающее влияние на свойства АВВ. Однако наибольшее усиление, проявляемое в снижении деформации и увеличении температурного перехода – температуры текучести – было отмечено при введении в битум углеродных нанотрубок TUBALL™, что подтверждается работами [122-132].

Дальнейшие испытания были проведены на составах с использованием углеродных нанотрубок TUBALL™.

На рис. 5.6 приведены термомеханические кривые АВВ с различным процентным содержанием углеродных нанотрубок TUBALL™.

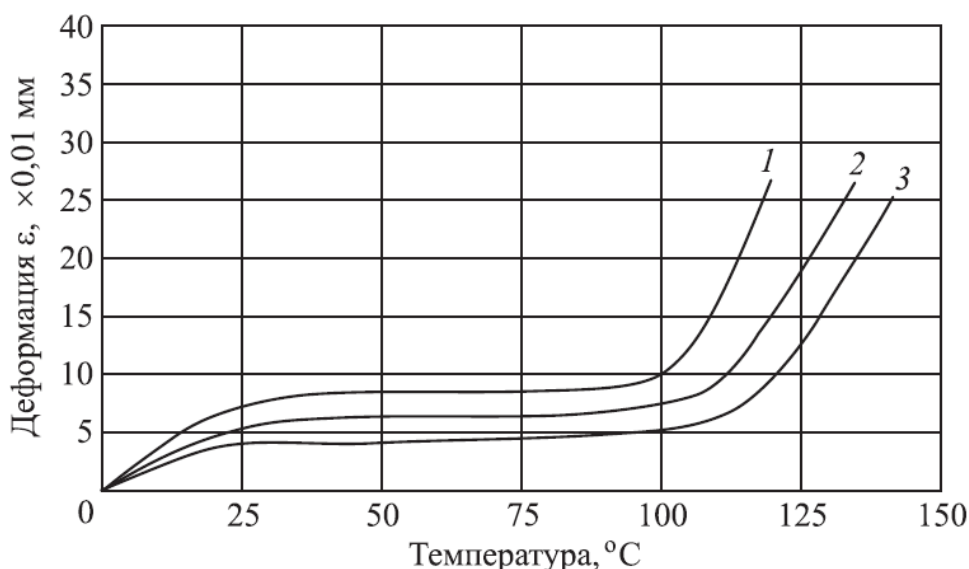


Рисунок 5.5 Термомеханические кривые модифицированного нанодобавками АВВ [122]:

1- без добавок; 2 - оксид алюминия, диоксид кремния, оксид цинка, гидроксид магния %; 3 - углеродные нанотрубки TUBALL™.

Результаты проведенных исследований свидетельствуют об изменении надмолекулярных структур битумно-шлаковой композиции путем введения наноразмерных добавок. Это в свою очередь приводит к повышению деформационной устойчивости таких композиций в 2-3 раза. Температурная стабильность также увеличивается на 20 - 25 °С. Данное обстоятельство может характеризовать модифицированные нанодобавками битумно-шлаковые композиции (АВВ) как более упорядоченные за счет появления активных центров из наноразмерных частиц. При этом обеспечивается более прочная структура, где молекулы битума взаимодействуют со сталеплавильным шлаком в комплексе, а не изолированно.

Установлено, что при рациональном введении углеродных нанотрубок TUBALL™ в количестве 0,05 % от массы битума отмечается наивысшая

сопротивляемость битумно-шлаковой композиции внешним воздействиям, т.е. такие составы обладают большей сопротивляемостью к сжимающим усилиям. Это проявляется в меньших значениях деформации при разных температурных условиях.

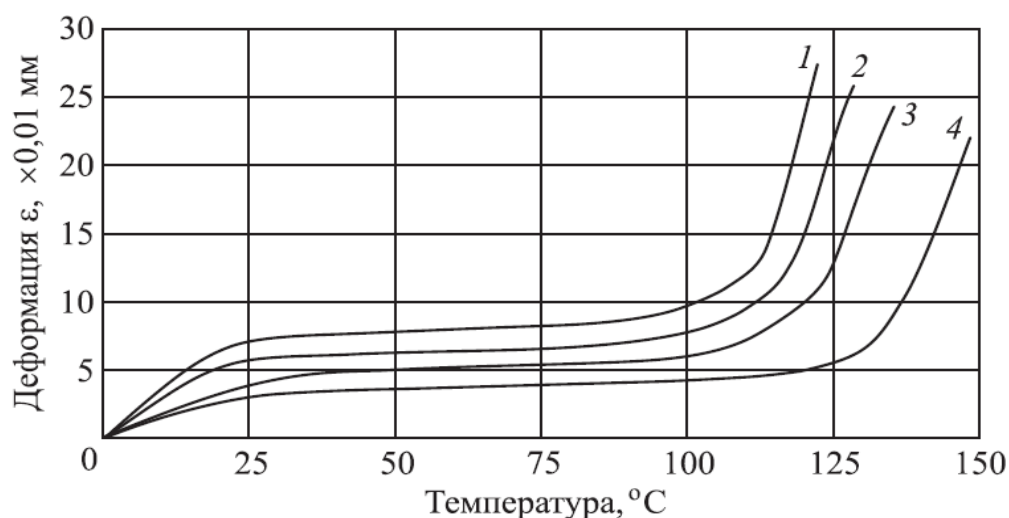


Рисунок 5.6. Термомеханические кривые модифицированного АБВ с различным содержанием углеродных нанотрубок TUBALL™ [122]:
1 - без добавок; 2 - 0,01%; 3 - 0,1%; 4 - 0,05%

Повышение количества центров кристаллизации влечет за собой ослабление химических связей. На рис. 5.6 кривая 4 отвечает рациональному расходу нанодобавки TUBALL™. Увеличение расхода нанодобавки выше оптимального уровня (кривая 3) негативно сказывается на качестве композиционного материала, снижая показатели его деформативных свойств и термостабильность. Рекомендуемый диапазон связываемых молекул из состава вяжущего составляет 600-800, что согласуется с [131,133].

Повышение интервала пластичности битума и связанной с ним температурной устойчивости самой битумно-шлаковой композиции (АБВ) с применением углеродных нанотрубок TUBALL™ способствует повышению водостойкости и морозостойкости асфальтобетона на сталеплавильных шлаках. Формирование упорядоченной структуры вяжущего (АБВ) благодаря усилению зоны контакта «битум – сталеплавильный шлак» увеличивает срок службы дорожных асфальтобетонных покрытий.

5.2. Повышение адгезионных свойств битума в шлакоасфальтобетоне за счет модификации нанодобавками

Для оценки влияния углеродных нанотрубок TUBALL™ (далее - УНТ) на адгезионные свойства битумного вяжущего проведены фотоэлектроколориметрические исследования с изучением микроструктуры битумно-шлаковой композиции (далее – АВВ). Методика проведения исследований была принята в соответствии с [131, 134]. Ниже приводится порядок получения экспериментальных и расчетных характеристик.

Метод фотоэлектроколориметрии для изучения адгезии битумного вяжущего к минеральному заполнителю был выбран в связи с его простотой, доступностью и достаточной степенью точности проведения исследований. Это позволило изучить адсорбционную активность шлаковых заполнителей, а также помогло установить степень взаимодействия модифицированного нанодобавкой битумного вяжущего со сталеплавильным шлаком.

Методика проведения исследования была описана в [135]. Материал АВВ измельчался до частиц размером от 2,5 до 5 мм. Полученные образцы весом 1 г помещались в 20 мл раствора красителя. Далее навеска встряхивалась в течение 15 минут. После этого готовый раствор оставлялся на 24 часа для определения его концентрации.

Для оценки адгезии битумного вяжущего к сталеплавильному шлаку использовался фотоэлектрический фотометр КФК-З-«ЗОМЗ».

Принцип измерения, в частности, коэффициента светопропускания, заключается в сравнении светового потока, прошедшего через кювету с контрольной и исследуемой жидкостями.

Адсорбция красителя определялась путем сравнения полученных на приборе оптических плотностей, и вычислялась по формуле (5.1):

$$a = \frac{D_0 - D_1}{D_0} * 100\%, \quad (5.1)$$

где D_0 – исходная плотность раствора красителя;

D_1 – равновесная плотность раствора красителя после контактирования с битумной смесью.

Были испытаны образцы АВВ³⁶, состоящие из битумного вяжущего с наноразмерными добавками и тонкомолотого заполнителя из сталеплавленного шлака соотношением 1:4 с тонкостью измельчения до удельной поверхности 2500-3000 см²/г. Смеси формировались в нормальных температурно-влажностных условиях в течение 24 часов.

Для выяснения величины и характера изменений адгезионной связи между модифицированным битумом и заполнителем подготовленные пробы подвергались воздействиям агрессивных сред по ускоренному режиму путем обработки ацетоном. Такая обработка давала возможность нарушать сцепление заполнителя с битумом и получать открытую поверхность зерен сталеплавленного шлака, способствуя интенсивной адсорбции красителя из раствора.

Краситель - метиленовый синий - не поглощается битумным вяжущим. Данное обстоятельство означает, что его адсорбция АВВ связана в основном только со свойствами и активностью заполнителя, его способностью создавать прочный контакт. Тогда отношение адсорбции красителя до и после обработки ацетоном будет являться открытой поверхностью заполнителя в битумно-шлаковой композиции (5.2, 5.3):

$$S_0 = \frac{a_n}{a_0} * 100\%, \quad (5.2)$$

$$S_0^1 = \frac{a_n^1}{a_0} * 100\%, \quad (5.3)$$

где S_0 и S_0^1 - открытая поверхность заполнителя в АВВ до обработки и после обработки композиций в ацетоне.

Относительная величина показателя адгезии «А» была определена по формуле (5.4):

$$A = 100 - (S_0^1 - S_0) \text{ или } A = 100 - \Delta S_0 (\%), \quad (5.4)$$

³⁶ Асфальтовяжущее вещество

где $\Delta S = S_0^1 - S_0$ – это приращение открытой поверхности заполнителя после обработки в химической среде.

Результаты определения показателя адгезии модифицированного нанодобавками битумного вяжущего к сталеплавивильным шлакам после обработки в течение 1 часа в ацетоне представлены в табл. 5.2.

Таблица 5.2 - Показатели адгезии битумного вяжущего с нанодобавками к сталеплавивильным шлакам после обработки ацетоном [135]

№ п/п	Наименование шлакового заполнителя	Содержание УНТ, %	Адсорбция заполнителя a_0 , %	Открытая поверхность заполнителя		Приращение открытой поверхности ΔS , %	Адгезия А, %
				До обработки S_0	После обработки S_0^1		
1	Мартеновский	Без добавки	66,7	8,2	74,2	66,0	34,0
2	Конвертерный	Без добавки	57,0	5,8	77,5	71,7	28,3
3	Шлак печь-ковш	Без добавки	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	Шлак 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	Шлак 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	Шлак печь-ковш	0,10	63,3	3,6	24,1	20,5	79,5

Анализ полученных результатов показал, что сталеплавивильные шлаки имеют разную адгезионную способность к битумному вяжущему и, следовательно, различную активность в отношении данного модифицированного состава. Самый низкий показатель адгезии наблюдается в АВВ без нанодобавок ($A = 28...35$ %, см. табл. 5.2). В целом невысокая адгезия сталеплавивильного шлака объясняется наличием гидроксильной пленки на поверхности зерен кварца, что ухудшает

контакт заполнителя с битумным вяжущим, а, следовательно, прочность шлакоасфальтобетона в целом. Введение 0,01 % УНТ от массы битума приводит к увеличению адгезионной прочности более чем на 1,5 раза, а 0,05 % УНТ – в 2 - 2,5 раза. Увеличение количества нанодобавки до 0,10 % не приводит к пропорциональному повышению адгезии из-за избытка центров кристаллизации и ухудшения структуры модифицированного битумного вяжущего на поверхности заполнителя. Данные предположения согласуются с рядом работ [136-140].

Сопоставление фотоэлектроколориметрии с результатами определения показателей физико-механических свойств модифицированных нанодобавкой УНТ битумно-шлаковых композиций позволяют считать сталеплавильный шлак пригодным для приготовления асфальтобетонных смесей.

На рис. 5.7 представлены фотографии микроструктуры АВВ, модифицированных нанодобавкой УНТ.

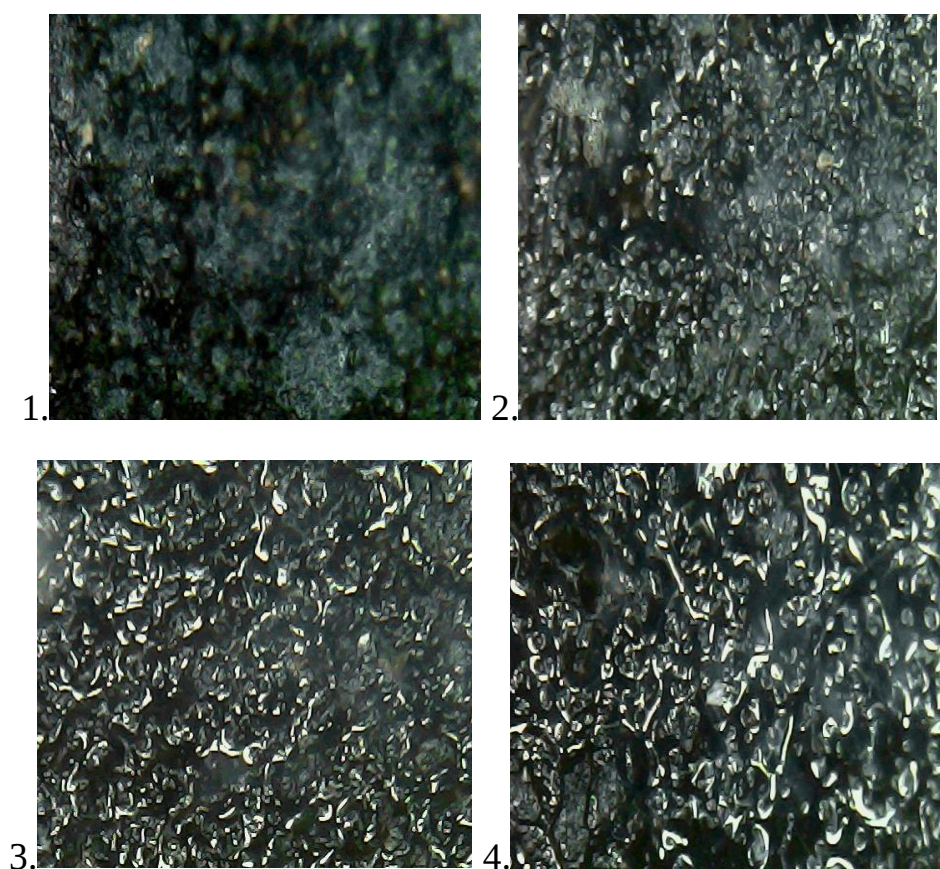


Рисунок 5.7. Микроструктура АВВ на сталеплавильных шлаках, $\times 1000$:
1 – без нанодобавок; 2 - 0,01 % УНТ; 3 - 0,05 УНТ %; 4 - 0,10 УНТ %.

Изучение микроструктуры позволило осуществить сравнение структурных превращений на этапах формирования конгломератного материала при изменениях рецептур, связанных с различным % дозировки нанодобавки УНТ.

Представленный на рис. 5.7 (1) фрагмент АВВ без наноразмерной добавки характеризуется рыхлой неупорядоченной микроструктурой, формирование которой не отличается равномерно распределенными фазами практически по всему полю видимости микроскопа.

Добавка УНТ в количестве 0,01 % от массы битума (см. рис. 5.7 (2)) способствует образованию центров кристаллизации и формированию более упорядоченной микроструктуры материала, более четкой и организованной, по сравнению с АВВ без добавок.

Более упорядоченный вид имеют микроструктуры АВВ с добавкой 0,05% УНТ от массы битума (см. рис. 5.7 (3)). Такой состав отличается равномерно распределенными центрами кристаллизации, присутствующими в достаточном для обеспечения прочной связи между битумным вяжущим и шлаковым заполнителем объеме. Вывод хорошо согласуется с результатами фотоэлектроколориметрических исследований, которые демонстрируют повышенную адгезионную прочность данного состава битумно-шлаковой композиции, которая и сформировалась благодаря активному взаимодействию компонентов с равномерным распределением центров кристаллизации УНТ.

При дальнейшем увеличении количества нанодобавки УНТ (см. рис. 5.7 (4)) выявлены нарушения в структуре и распределении центров кристаллизации АВВ, вызванные избытком активных частиц, способных взаимодействовать с фрагментами битумного вяжущего. Такой переизбыток приводит к нарушению упорядоченности и ухудшению показателей физико-механических свойств. Полученные результаты находят свое подтверждение в неравномерности структурных образований и снижении адгезионной прочности модифицированного битумного вяжущего. Приведенные выводы хорошо согласуются с результатами термомеханических и физико-механических исследований, что было описано в п. 4.1.

Таким образом, при формировании структуры асфальтового бетона на основе сталеплавильного шлака обеспечивается начальный показатель адгезионной прочности не более 35% от максимально возможной величины, и вызвана она в большей степени не физико-химическим процессом, а механическим взаимодействием. Введение нанодобавки из УНТ в количестве 0,05 % от массы битума обеспечивает создание равномерно распределенной структуры за счет включения в физико-химическое взаимодействие центров кристаллизации, обеспечивающих повышенную адгезию к сталеплавильному шлаковому заполнителю.

5.3. Долговечность асфальтобетона на сталеплавильных шлаках с модифицированным нанодобавками битумом

Проведенные ранее исследования [140-144] показали, что эксплуатационная надежность и долговечность покрытий из асфальтобетона зависят:

- от свойств составляющих заполнителей (минеральный остов, вяжущее, добавки);
- технологических особенностей приготовления на АБЗ;
- погоднo-климатических условий и особенностей эксплуатации;
- и др.

Несмотря на гидрофобность традиционных составов асфальтобетонных смесей на этапе их укладки и уплотнения в дорожном покрытии, данное свойство имеет тенденцию к снижению с течением времени. При этом асфальтобетонные смеси на сталеплавильном шлаке с нанодобавкой УНТ, как уже было показано нами ранее (см. Глава III), обладают повышенной водостойкостью, превышающей на 12 – 18 % показатели обычных композитов. Это объясняется образованием прочной плёнки на границе с пористым заполнителем, которая усиливает контактную зону и обеспечивает формирование прочных физико-химических связей. Результаты испытаний на морозостойкость показывают, что физико-

механические характеристики асфальтобетона на сталеплавильном шлаке с добавками наноразмерных частиц снижаются, но в меньшей степени, чем у традиционных материалов. Данный процесс также уже был рассмотрен при проведении фотоэлектроколориметрических исследований, см. п. 5.2.

На рис. 5.8 приведены результаты исследований модифицированного нанодобавками асфальтобетона на сталеплавильных шлаках (далее – СПШ) на морозостойкость. Полученные кривые показывают, что сокращение прочностных характеристик асфальтобетона на СПШ, несмотря на общую тенденцию, на 15 - 20 % ниже аналогичного показателя для материала на каменном заполнителе.

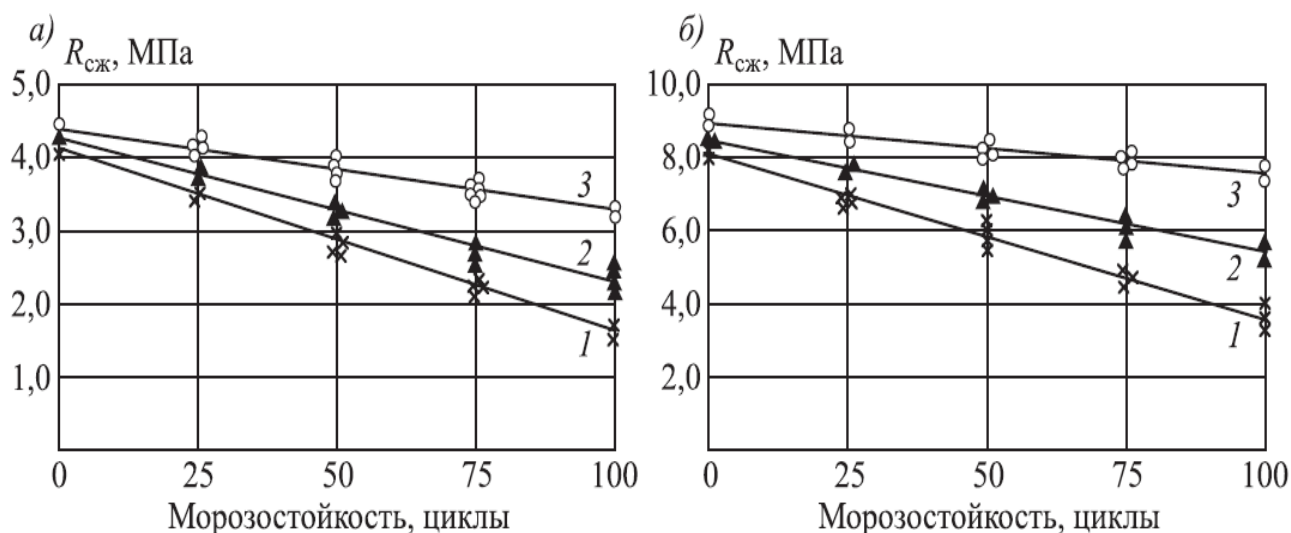


Рисунок 5.8. Изменение предела прочности при сжатии модифицированного нанодобавкой УНТ шлакоасфальтобетона в сравнении с традиционным асфальтобетоном после замораживания и оттаивания [145]

а) при 20 °С; б) при 0 °С:

- 1 – традиционный асфальтобетон;
- 2 – асфальтобетон на СПШ без добавок;
- 3 – то же, с нанодобавкой УНТ (0,05 %)

Эта разница становится более заметной для композиций с нанодобавкой. После 50 циклов попеременного замораживания и оттаивания потеря прочности модифицированных УНТ составов не превышает 12 %, в то время как бездобавочный вариант демонстрирует потерю до 25 %.

Еще более значительные изменения отмечаются после проведения 100 циклов попеременного замораживания и оттаивания. Потери прочности для асфальтобетона на СПШ с нанодобавкой УНТ составляют 15 – 17 %, в то время как составы без них снижают свои показатели на 34 – 37 %, а традиционный асфальтобетон теряет уже более 55 % своей прочности. Таким образом, введение наноразмерной добавки УНТ способствует увеличению устойчивости асфальтобетона к климатическим воздействиям и делает его более долговечным по сравнению с бездобавочным традиционным составом.

Одним из ключевых показателей эксплуатационных свойств асфальтобетона является колееобразование. Данный показатель зависит как от вида заполнителя асфальтового бетона, так и от качества его уплотнения при укладке в дорожное покрытие. Сталеплавильные шлаки, благодаря своему химическому составу, обладают повышенной прочностью, что снижает величину колееобразования по сравнению с традиционными каменными материалами.

Для измерения величины колееобразования шлакоасфальтобетона с нанодобавкой УНТ были проведены испытания на специальном стенде, а также на опытных участках дорожного покрытия. Проанализировав полученные в ходе эксперимента кривые сопротивления асфальтового покрытия внешним нагрузкам (см. рис. 5.9а), можно сделать вывод о снижении колееобразования при использовании нанодобавок. Так, при введении 0,05 % УНТ отмечено снижение величины колееобразования в 1,5 - 2 раза после 5000 проходов колеса. Наибольшее различие между составами проявляется после прохода на стенде 10000 колес. Модифицированный нанодобавкой УНТ шлакоасфальтобетон замедляет процесс колееобразования. Данное обстоятельство объясняется более упрочненной структурой по сравнению с традиционными и бездобавочными композитами. Дополнительные испытания также показали значительное улучшение свойств шлакоасфальтобетона с нанодобавками в условиях низких температур по сравнению с традиционными материалами (см. рис. 5.9б).

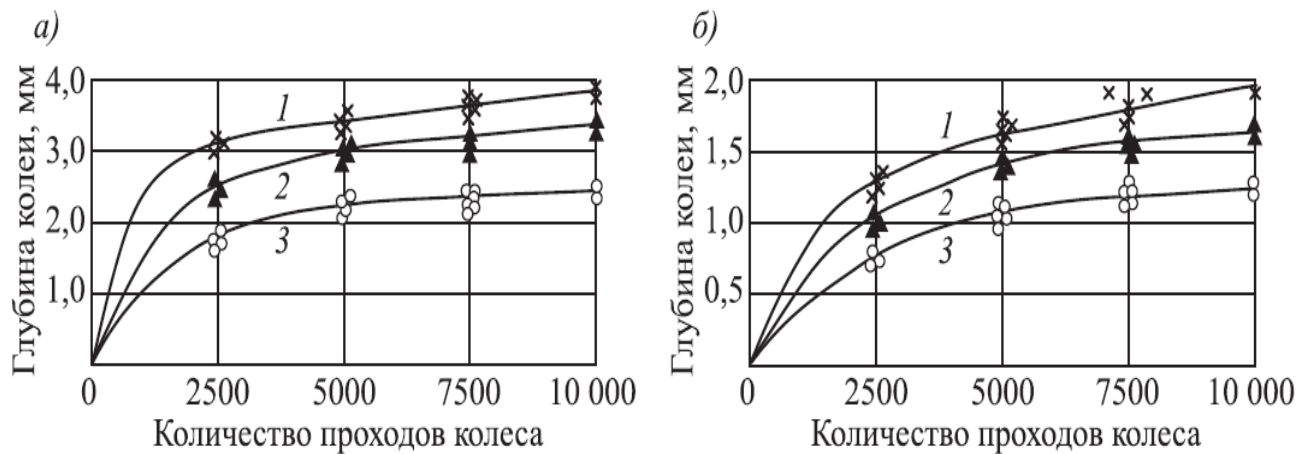


Рисунок 5.9. Кривые зависимости колееобразования шлакоасфальтобетона при положительной (а) и отрицательной (б) температурах [145]:

- 1 – традиционный состав асфальтового бетона;
- 2 – асфальтовый бетон на СПШ;
- 3 – то же, с нанодобавкой УНТ.

Для подтверждения эффективности влияния нанодобавок на составы асфальтового бетона на СПШ были отобраны пробы битумного вяжущего как на начальном этапе приготовления шлакоасфальтобетонной смеси с нанодобавкой, так и сразу после проведения испытаний. После 100 циклов попеременного замораживания-оттаивания образцов и 10000 проходов колеса на стенде выполнено исследование структурно-группового состава битума битумно-шлаковой композиции с использованием метода инфракрасной спектроскопии (см. рис. 5.10).

Анализ результатов ИК – спектроскопии показал, что основные структурные группы битума сохранили свои полосы поглощения, хотя некоторые из них и демонстрировали усиление или ослабление интенсивности. Например, полоса поглощения при 720 см^{-1} , связанная с группой CH_2 , стала менее выраженной. Полосы при 1380 см^{-1} ($-\text{CH}_3$) и 1460 см^{-1} ($\text{C}-\text{H}$), отвечающие за наличие масел и петролейно-эфирных смол в битумном вяжущем, увеличили свою интенсивность. Полосы при 1600 см^{-1} ($\text{C}=\text{C}_{\text{аром}}$) и 1710 см^{-1} ($\text{C}=\text{O}$), отражающие валентные колебания бензольных колец групповых элементов битума, практически остались неизменными.

Полосы поглощения при 2920 и 2850 см^{-1} , относящиеся к валентным асимметричным колебаниям группы CH_2 , усилились, что связано с присутствием

нанодобавки УНТ, влияющей на структуру водородных связей битумного вяжущего. Это явление свидетельствует о перестройке во взаимодействии химических связей при добавлении наноразмерных частиц.

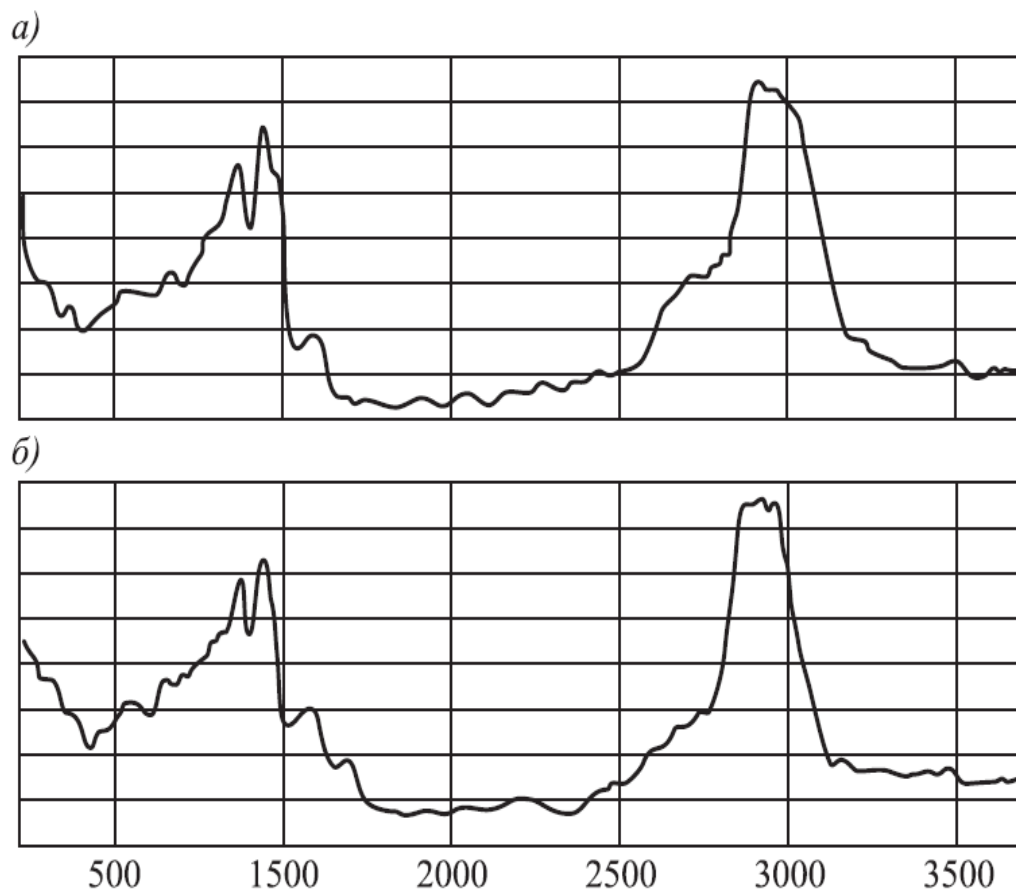


Рисунок 5.10. ИК-спектры поглощения битумных вяжущих, отобранных из асфальтобетонных смесей на СПШ до (а) и после (б) испытаний на морозостойкость [145]

Учитывая, что асфальтены в битуме содержат свободные радикалы, сосредоточенные главным образом в конденсированных ароматических структурах и определяющие способность к ассоциации, данный факт приводит к межмолекулярному взаимодействию, способствующему образованию надмолекулярных структур. В этом случае УНТ являются центрами кристаллизации, что в конечном итоге выражается в усилении всей системы и повышении качества асфальтобетона, а, следовательно, его эксплуатационной надежности и долговечности. Данное положение хорошо сочетается с представленными на рис. 5.11 характеристиками составов асфальтобетонных

смесей, подтверждающих положительное влияние нанодобавок УНТ на свойства асфальтобетона на СПШ.



Рисунок 5.11. Сравнение свойств шлакоасфальтобетона, модифицированного УНТ, с асфальтобетоном на традиционном заполнителе.

Представленные на рис. 5.11 результаты сравнения физико-механических и эксплуатационных характеристик подтверждают преимущества асфальтобетона на СПШ. Однако, такой результат в количественном выражении имеет незначительные отклонения от показателей традиционного асфальтового бетона, оцениваемый в среднем в 10 - 15 %. Существенное увеличение количественных и качественных показателей могут быть получены при использовании нанодобавок, в частности, УНТ, что обеспечивает:

- обеспечение требуемой длительной прочности при сжатии при 20⁰С, 50⁰С, в том числе в водонасыщенном состоянии;

- увеличение морозостойкости на 25 - 35 %;

- снижение величины колееобразования почти в 2 раза.

Кроме того, доказано, что введение УНТ способствует повышению адгезионных сил в контактной зоне между минеральным шлаковым заполнителем и битумным вяжущим. Дополнительный эффект проявляется в упрочнении битумного вяжущего в шлакоасфальтобетоне с сохранением первоначальных свойств, что подтверждается физико-химическими методами исследований: ИК-спектроскопией, фотоэлектроколориметрией, термомеханикой, микроструктурным анализом. Как уже было упомянуто выше, такой результат достигается за счет проявления активности наноразмерных частиц, являющихся центрами кристаллизации в битумном вяжущем, способствующим упрочнению всей структуры асфальтобетона на сталеплавильных шлаках, см п. 5.1 - 5.2.

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ V

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 сталеплавильных 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 наноразмерными добавками 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 сталеплавильных 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 наноразмерных частиц 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.

6. ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

6.1. Экономическая эффективность применения модифицированной нанодобавкой шлакоасфальтобетонной смеси при строительстве автомобильных дорог

Исследования показали, что использование сталеплавильных шлаков в асфальтобетонных смесях оправдано своей экономической целесообразностью. В рамках реализации в России национальных проектов по ресурсосбережению такое вторичное сырье может привлечь внимание подрядных организаций в сфере строительства дорог, работающих на удаленных объектах, где доступ к традиционным ресурсам ограничен.

Оценка стоимости материалов выполнена по методу сопоставимых рыночных цен. Данный метод заключается в определении цены единицы продукции на основании общедоступной информации о рыночных ценах на продукт и установления их среднего значения.

В целях определения стоимости материалов для приготовления асфальтобетонной смеси на традиционных заполнителях методом сопоставимых рыночных цен было использовано по три источника цен на продукцию, предлагаемых различными поставщиками, см. табл. 6.1.

Таблица 6.1 - Рыночная стоимость материалов для приготовления
асфальтобетонной смеси SP-16Л

№ п/п	Наименование продукции	Кол-во, т	Цена за единицу, руб.			Средняя арифметическая цена единицы товара, руб.	Стоимость материалов на 1 тонну смеси, руб.
			Поставщи к №1	Поставщи к №2	Поставщи к №3		
1	2	4	5	6	7	8	9
1	Щебень фракции 4-8 мм	0,312	1 209,40	1 009,05	1 410,75	1 209,73	377,44

Продолжение таблицы 6.1

1	2	4	5	6	7	8	9
2	Щебень фракции 8-16 мм	0,312	1 209,40	1 009,05	1 410,75	1 209,73	377,44
3	Песок из отсеков дробления	0,320	690,60	420,00	961,20	690,60	220,99
4	Битумное вяжущее марки PG	0,056	44 008,4	40 005,6	48 001,2	44 005,07	2 464,28
ИТОГО:							3 440,15

Индекс изменения сметной стоимости составляет 10,81 согласно письму Минстроя России от 22 декабря 2022 года №69529-ИФ/09 в уровне цен на IV квартал 2022 года для Новосибирской области.

В соответствии с ГЭСН 27-10-002-01 и расчетами средней стоимости на составляющие была составлена калькуляция на приготовление асфальтобетонной смеси марки SP – 16Л на АБЗ производительностью 100 тн в час. Результаты расчетов приведены в табл. 6.2.

Таблица 6.2 - Калькуляция стоимости приготовления асфальтобетонной смеси SP-16Л

1. ТРУДОЗАТРАТЫ					
№	Шифр	Наименование	Расход, маш. -ч	Стоимость ед., руб.	Всего, руб.
1	ГЭСН 27-10-002-11	Затраты труда рабочих-строителей (Разряд 3,5)	21,94	196,8	4 317,79
2	ГЭСН 27-10-002-11	Затраты труда машинистов (справочно, входит в стоимость ЭМ)	11,79	171,85	2 026,11
Оплата труда рабочих (справочно, для начисления накладных и прибыли)			руб.	6 343,90	
ИТОГО ФОТ с индексом 10,81			руб.	68 577,56	
2. ЭКСПЛУАТАЦИЯ МАШИН И МЕХАНИЗМОВ					
№	Шифр	Наименование	Расход, маш. -ч	Стоимость ед., руб.	Всего, руб.
1	91.06.05-011	Погрузчики, грузоподъемность 5 т	4,27	89,99	384,26

Продолжение таблицы 6.2

2	91.08.11-001	Заводы асфальтобетонные с дистанционным управлением	3,76	2 741,78	10 309,09
ИТОГО			руб.	10 693,35	
ИТОГО ЭММ с индексом 10,81			руб.	115 595,11	
3. РАСХОД МАТЕРИАЛОВ					
№	Шифр	Наименование	Расход, тн	Стоимость ед., руб.	Всего, руб.
1	Табл. 5.1	Битумное вяжущее марки PG	5,60	44 005,07	246 428,39
2	Табл. 5.1	Песок из отсевов дробления	32,00	690,60	22 099,20
3	Табл. 5.1	Щебень фракции 4-8 мм	31,20	1 209,73	37 743,58
4	Табл. 5.1	Щебень фракции 8-16 мм	31,20	1 209,73	37 743,58
ИТОГО			руб.	344 014,75	
Накладные расходы 66% ФОТ, руб.				45 261,19	
Прибыль 65% ФОТ, руб.				44 575,41	
ИТОГО за 100 тн продукции, руб.				618 024,02	
ИТОГО за 1 тн, руб.				6 180,24	

Так как при производстве одинакового количества смеси на однотипном оборудовании по типовому технологическому процессу стоимость трудозатрат и эксплуатации машин и механизмов будут равны, в табл. 6.3 приведен только раздел «РАСХОД МАТЕРИАЛОВ», калькуляция и итоговые данные о стоимости.

Таблица 6.3 - Калькуляция стоимости приготовления модифицированной нанодобавкой шлакоасфальтобетонной смеси

3. РАСХОД МАТЕРИАЛОВ					
№	Шифр	Наименование	Расход, тн	Стоимость ед., руб.	Всего, Руб.
1	Табл. 5.1	Битумное вяжущее марки PG, модифицированное нанодобавкой TUBALL³⁷	4,00	67 255,07	269 020,28
2	Табл. 5.1	Песок шлаковый	37,80	349,80 ³⁸	13 222,44
3	Табл. 5.1	Щебень шлаковый фракции 4-8 мм	20,80	349,80	7 275,84
4	Табл. 5.1	Щебень шлаковый фракции 8-16 мм	37,40	349,80	13 082,52
ИТОГО:			руб.	302 601,08	

³⁷ Битумное вяжущее марки PG + 0,05 % TUBALL™ + 5 % талловое масло.

³⁸ Так как шлакоасфальтобетонная смесь содержит в своём составе щебень и песок шлаковые единственного производителя - ООО «Технологии Рециклинга» (г. Новокузнецк, Кемеровская область), в таблице приведена стоимость материалов на основе одного коммерческого предложения.

Продолжение таблицы 6.3

Накладные расходы 66% ФОТ, руб.	45 261,19
Прибыль 65% ФОТ, руб.	44 575,41
ИТОГО за 100 т продукции, руб.	576 610,35
ИТОГО за 1 тн, руб.	5 766,10

Из данных таблиц 6.2 и 6.3 следует, что сметная стоимость приготовления запроектированной по методологии Superpave шлакоасфальтобетонной смеси на АБЗ на 6,7 % ниже соответствующего показателя для асфальтобетонной смеси, приготовленной с применением щебня из горных пород. (см. рис. 6.1).

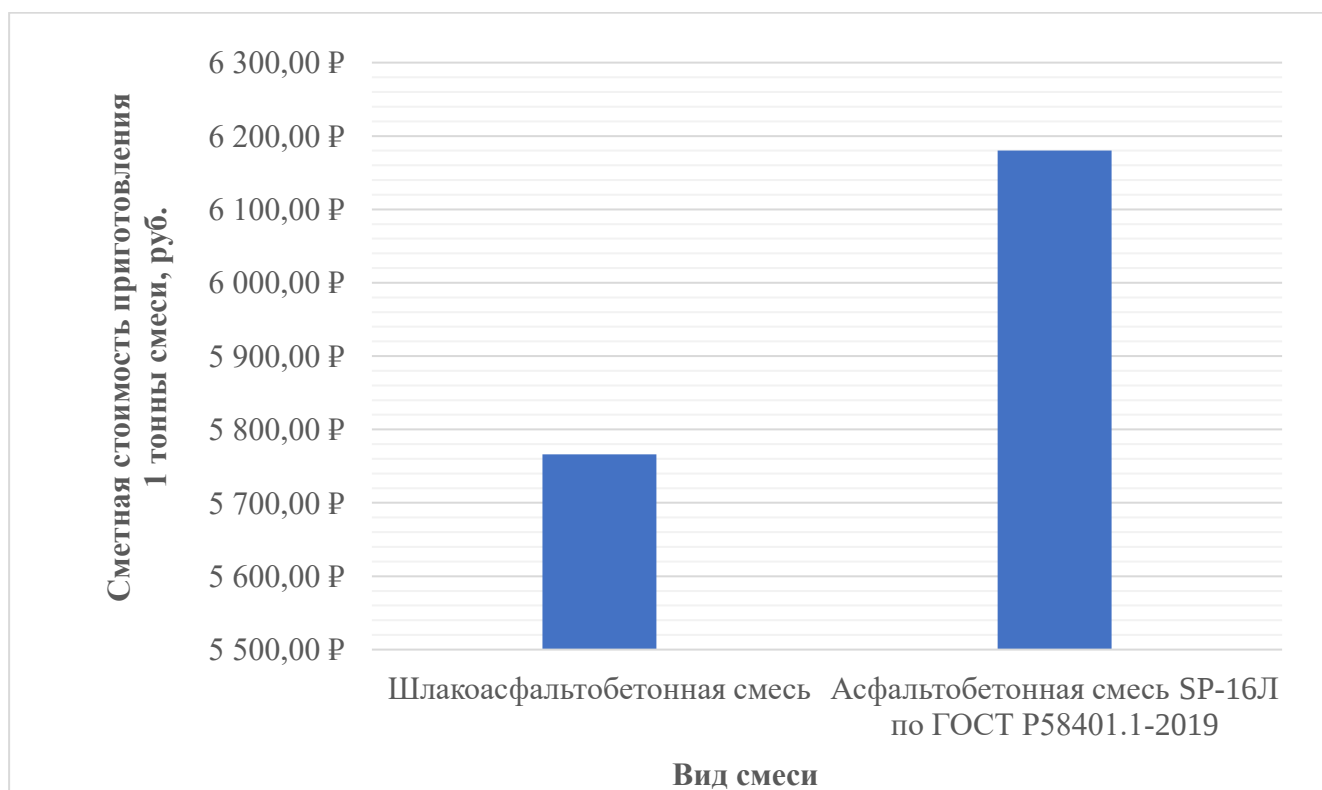


Рисунок 6.1. Сравнение сметной стоимости приготовления асфальтобетонных смесей, запроектированных по методологии Superpave

Аналогичный расчет выполнен для шлакоасфальтобетонной смеси, соответствующей по своим физико-механическим характеристикам мелкозернистой плотной асфальтобетонной смеси тип Б марки II по ГОСТ 9128 - 2013 (см. рис. 6.2). Здесь разница в сметной стоимости³⁹ составляет 16,4 %.

³⁹ При расчете сметной стоимости приготовления шлакоасфальтобетонной смеси был принят прейскурант цен на переработанный сталеплавильный шлак ООО «Технологии рециклинга» (г. Новокузнецк, Кемеровская область). При самостоятельной переработке отвального шлака



Вид смеси

Рисунок 6.2. Сравнение сметной стоимости приготовления асфальтобетонных смесей по ГОСТ 9128-2013

Представленные на рисунках 6.1-6.2 результаты демонстрируют существенный потенциал сталеплавильных шлаков. В современных реалиях отходы металлургических производств могут стать альтернативой традиционным каменным материалам, применяемым для приготовления асфальтобетонных смесей при строительстве улиц и дорог различных категорий. Однако, внедрение такого вторичного сырья в производство дорожно-строительных материалов требует проведения основательной методологической работы с металлургическими предприятиями России, а также дальнейшего практического развития существующей нормативно-технической документации в области дорожного строительства.

стоимость такой смеси может отличаться в меньшую сторону. Расстояния доставки исходных компонентов смеси на строительную площадку к АБЗ при расчетах не превышало 100 км

Опытно-промышленные испытания на территории металлургического комбината ООО «Спецремонт» в г. Новокузнецке также подтверждают возможность широкого применения асфальтобетонных смесей на сталеплавильных шлаках в сфере дорожного хозяйства (см. Приложение № 3).

6.2. Разработка технологии приготовления шлакоасфальтобетонной смеси

Процесс приготовления шлакоасфальтобетонной смеси на АБЗ не имеет существенных отличий от традиционной технологии производства [146].

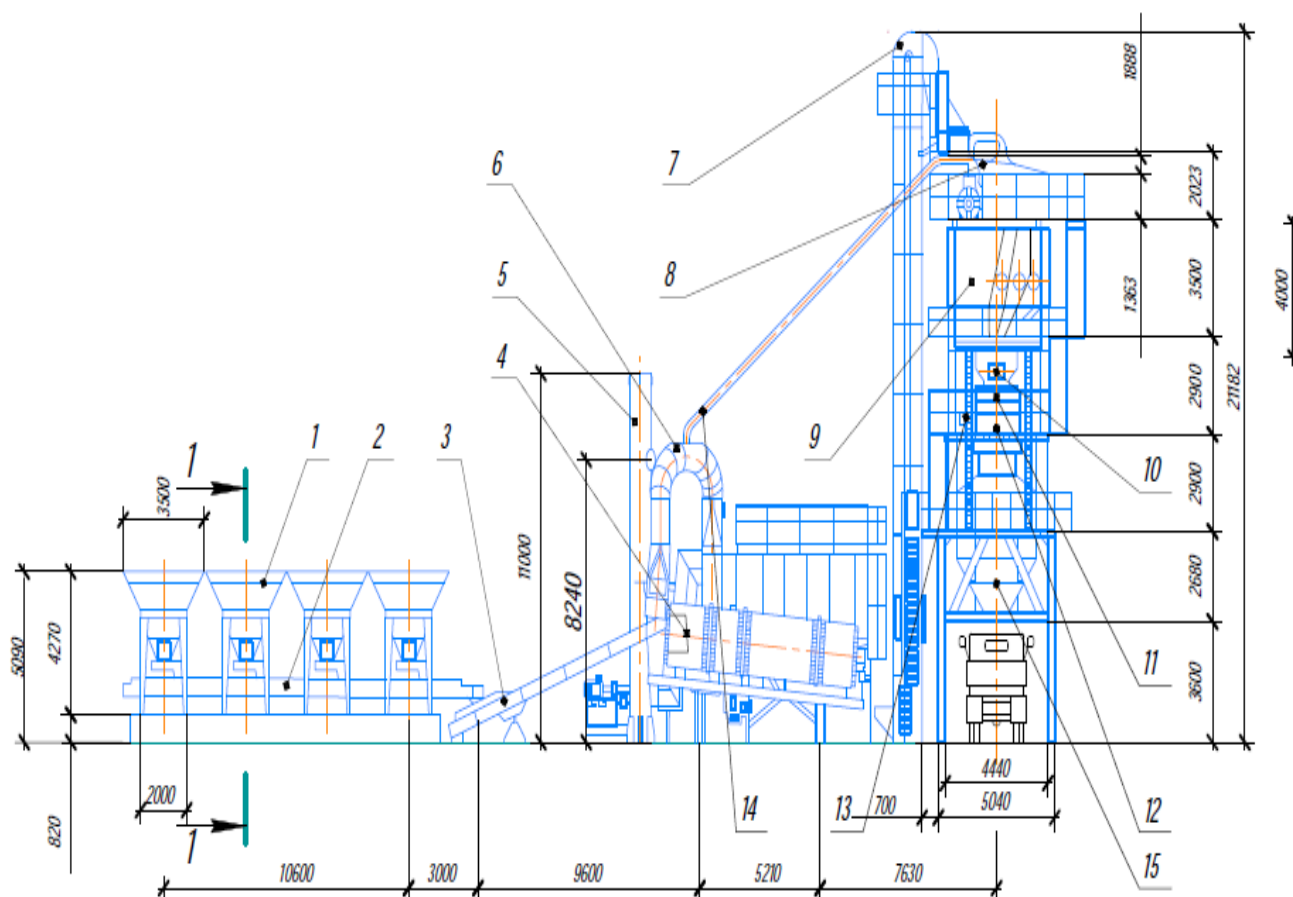
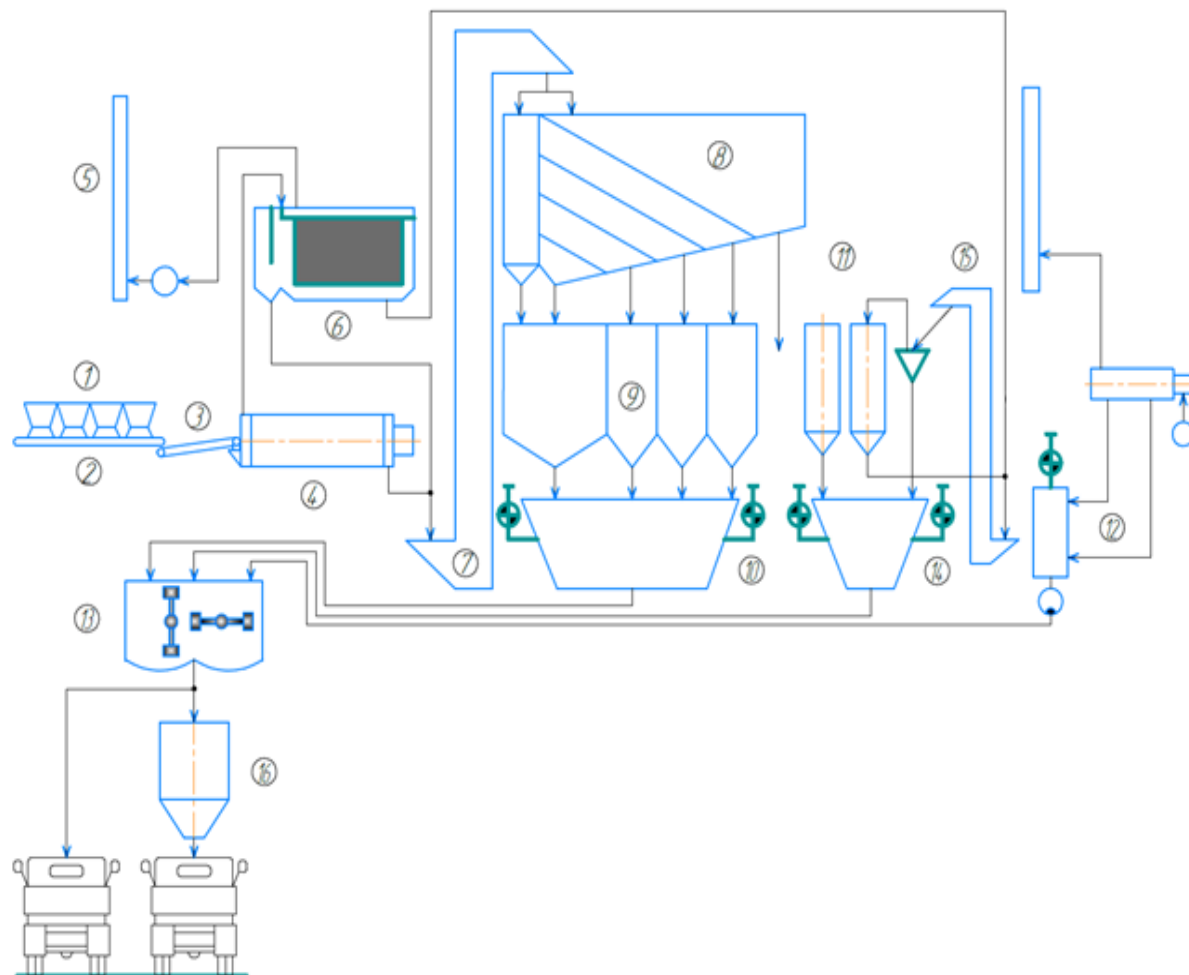


Рисунок 6.4. Технологическая схема приготовления шлакоасфальтобетонной смеси



Позиция	Наименование оборудования
1	Бункер - питатель
2	Ленточный собирающий конвейер
3	Ленточный конвейер для подачи материала в сушильный барабан
4	Сушильный барабан
5	Высос
6	Фильтр ручной
7	Ковшовый элеватор горячего материала
8	Грохот
9	Бункер горячих инертных материалов
10	Дозатор инертного материала
11	Дозатор минерального порошка
12	Дозатор битума
13	Смеситель лопастной
14	Устройство подачи минерального порошка в дозатор
15	Система циркуляции рекуперированной пыли
16	Бункер-накопитель

Рисунок 6.4. Технологическая схема приготовления шлакоасфальтобетонной смеси (продолжение)

Отвалный мартеновский шлак подвергается предварительной сортировке на смесь фракций 8-16 мм и 4-8 мм (шлаковый щебень). Конвертерный шлак (шлаковый песок) применяется в исходном состоянии. Полученная минеральная часть предварительно перемешивается до однородного состава. Далее полученная смесь сушится в сушильном барабане асфальтосмесительной установки до постоянной массы при температуре 160 - 180 °С. После нагрева шлакового щебня и песка в смесителе к нему добавляют шлак печь-ковш (в случае необходимости) и нагретый битум, и перемешивают полученную смесь в течение 45-60 с (в зависимости от объема замеса и влажности заполнителя) при температуре 136 – 151 °С.

Приготовление битумного вяжущего марки PG, модифицированного нанодобавкой TUBALL™, осуществляется в установке контейнерного типа «ДАВИАЛ».

Технологическая схема представлена на рис. 6.5.

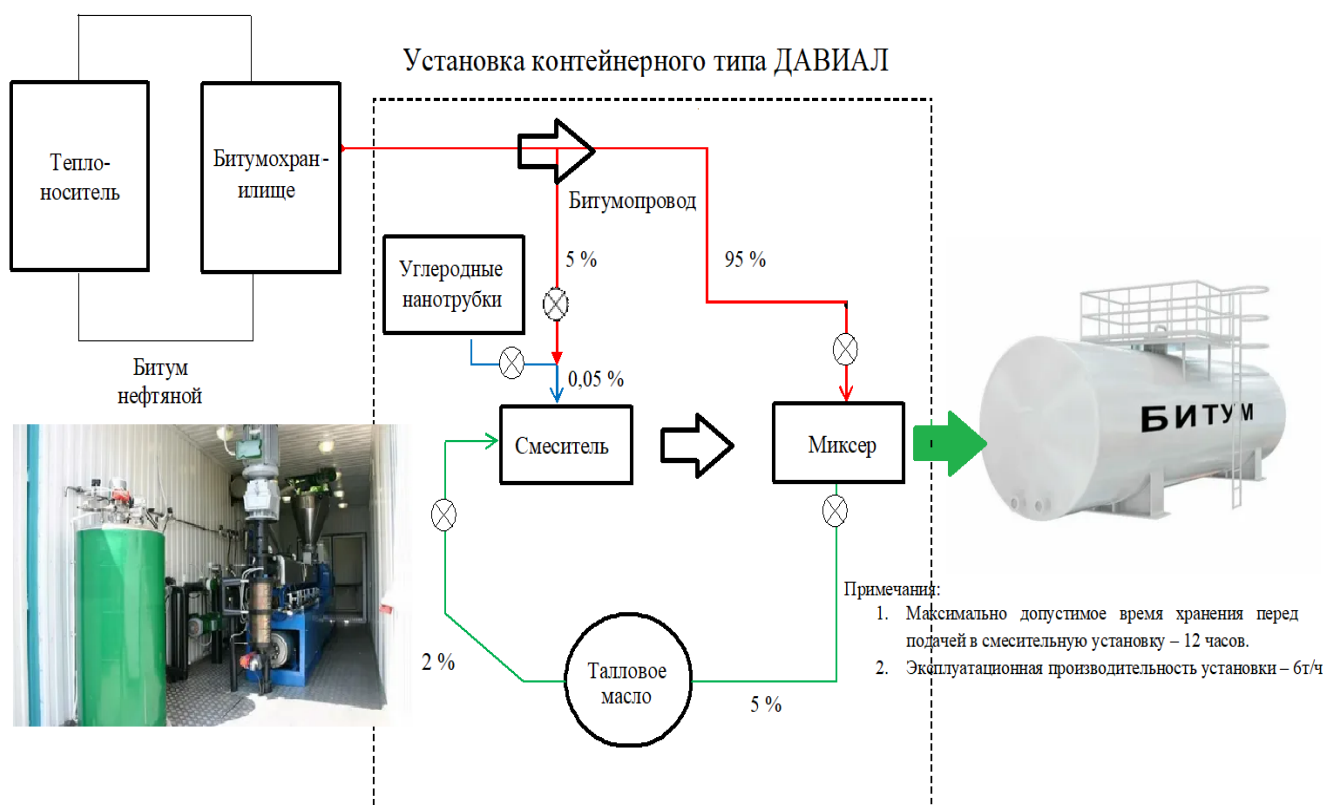


Рисунок 6.5. Технологическая схема приготовления модифицированного нанодобавкой TUBALL™ битумного вяжущего на АБЗ

Технологический процесс приготовления модифицированного нанодобавками вяжущего в установке типа «ДАВИАЛ» включает:

1. Предварительный нагрев, дозирование и подача обезвоженного вяжущего марки PG в миксер (линия Б_м) и смеситель (линия Б_с).
2. Нагрев, дозирование и подача таллового масла 5 - 7 % (от массы битума).
3. Дозирование и подача наноразмерной добавки TUBALL™ 0,05 % (от массы битума).
4. Предварительное перемешивание компонентов модифицированного вяжущего в смесителе;
5. Окончательное перемешивание компонентов в миксере с получением конечного продукта требуемой концентрации.

Обезвоженный битум марки PG нагревается до рабочей температуры, дозируется и подается по битумопроводам на 2 линии дозирования вяжущего:

1. Линия подачи вяжущего в смеситель (Б_с) – 5 %;
2. Линия подачи вяжущего в миксер (Б_м) – 95 %.

В смесительном отделении осуществляется перемешивание наноразмерной добавки TUBALL™ и таллового масла с нагретым до рабочей температуры битумом марки PG. Концентрация исходных компонентов регулируется системой автоматического управления. Последующее смешение битумного концентрата с основным потоком вяжущего до получения требуемого состава осуществляется в миксерном отделении.

Процесс осуществляется поточно, непрерывно, в чистом режиме ин-лайн. Модифицированное нанодобавкой TUBALL™ вяжущее по обогреваемым трубопроводам подается в расходную емкость, оттуда (при приготовлении шлакоасфальтобетонной смеси) - в смеситель АСУ в соответствии с утвержденным составом.

На рис. 6.6 показан технологический процесс строительства покрытия из модифицированной нанодобавкой TUBALL™ шлакоасфальтобетонной смеси на территории металлургического комбината в г. Новокузнецке.



Рисунок 6.6. Устройство покрытия из модифицированной нанодобавкой TUBALL™ шлакоасфальтобетонной смеси на территории металлургического комбината в г. Новокузнецке

ВЫВОДЫ ПО ГЛАВЕ VI

1. Экономический эффект от применения в качестве заполнителей в составе асфальтобетонной смеси сталеплавильных шлаков, модифицированной нанодобавкой TUBALL™, заключается в снижении себестоимости их приготовления на 6,7 % в случае применения переработанных шлаковых материалов. При самостоятельной переработке отходов металлургического производства на АБЗ данный показатель может быть гораздо выше.

2. Выполненная опытно-промышленная апробация модифицированной нанодобавкой TUBALL™ асфальтобетонной смеси на основе сталеплавильных шлаков подтверждает возможность применения разработанной технологии к действующему промышленному оборудованию современных асфальтосмесительных установок.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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 сталеплавильных 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 сталеплавильных 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 два 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 асфальтовяжущем веществе на основе сталеплавильных шлаков (печь-ковш) 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 $K_{\text{вод}}$ и $R_{20(\text{вод})}$ 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 PG 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шишакина, О.А. Обзор направлений утилизации техногенных отходов в производстве строительных материалов / О.А. Шишакина, А.А. Паламарчук // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. – 2019. – № 4. – С. 198-203.

2. Постановление Правительства РФ от 20 декабря 2017 г. № 1596 «Об утверждении государственной программы Российской Федерации «Развитие транспортной системы» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://gov.garant.ru/document?id=71743998&byPara=1>.

3. Распоряжение Правительства РФ от 10.05.2016 г. № 868-р (ред. от 23.11.2016) «О Стратегии развития промышленности строительных материалов на период до 2020 года и дальнейшую перспективу до 2030 года» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=LAW&n=207726&fld=134&dst=100000001,0&rnd=0.6416133018700032#004431338537947638>.

4. 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.

5. 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.

6. Постановление Правительства РФ от 30.05.2017 г. № 658 «О нормативах финансовых затрат и Правилах расчета размера бюджетных ассигнований федерального бюджета на капитальный ремонт, ремонт и содержание автомобильных дорог федерального значения» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=LAW&n=217616&fld=134&dst=1000000001,0&rnd=0.2248529971566835#028302418945119756>.

7. Решение Комиссии Таможенного союза от 18.10.2011 г. № 827 (ред. от 12.10.2015) «О принятии технического регламента Таможенного союза «Безопасность автомобильных дорог» (вместе с «ТР ТС 014/2011. Технический регламент Таможенного союза. Безопасность автомобильных дорог») [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_120834.

8. 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.

9. Волынкина, Е.П. Вторичные ресурсы, образующиеся в металлургической промышленности / Е.П. Волынкина // Энциклопедия технологий. – С. 742–800.

10. Волынкина, Е.П. Анализ состояния и проблем переработки техногенных отходов в России / Е.П. Волынкина // Вестник Сибирского государственного индустриального университета. – 2017. – № 2 (20). – С. 43-49.

11. Пименов, А.Т. Технологические аспекты переработки и утилизации сталеплавильных шлаков при производстве строительных материалов / А.Т. Пименов, Л.А. Барахтенова, В.С. Прибылов // Материалы международного симпозиума «Современные ресурсосберегающие материалы и технологии: перспективы и применение». - 2020. – С. 105-109.

12. 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 Application status of steel slag asphalt mixture. Journal of Traffic and Transportation Engineering. 2020. Vo71l.20. No.2. Pp.15-33 (in Chinese).

13. Тулаев, А.Я. Дорожные одежды с использованием шлаков / А.Я. Тулаев, М.В. Королев, В.М. Юмашев. - М.: Транспорт, 1986. – 221 с.

14. 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.

15. Рыбьев, И.А. Асфальтовые бетоны / И.А. Рыбьев. – М.: Высшая школа, 1969. – 399 с.

16. Горельшев, Н.В. Асфальтобетон и другие битумоминеральные материалы / Н.В. Горельшев. – М.: Можайск-Терра, 1995. – 176 с.

17. Гезенцвей Л.Б. Асфальтовый бетон. М.: Стройиздат, 1964. 444 с.

18. Котлярский, Э.В. Структурно-механические свойства асфальтобетонных смесей и асфальтобетона / Э.В. Котлярский // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2008. - № 4. С. 5-8.

19. Алтухов, Ф.В. Совершенствование составов ресурсосберегающих асфальтобетонных смесей для дорожного строительства / Ф.В. Алтухов // Современные проблемы в строительстве: постановка задач и пути их решения: сборник научных статей Международной научно-практической конференции, Курск, 22 мая 2019 года / Юго-Западный государственный университет. – Курск: Юго-Западный государственный университет, 2019. – С. 275-278.

20. Котлярский, Э.В. Долговечность дорожных асфальтобетонных покрытий и факторы, способствующие разрушению структуры асфальтобетона в процессе эксплуатации/ Э.В. Котлярский, О.А. Воейко. - М.: Техполиграфцентр, 2007. - С. 11-60.

21. Королёв, И.В. О битумной плёнке на минеральных зёрнах асфальтобетона / И.В. Королёв // Автомобильные дороги. - 1981. - № 7. - С. 23 - 24.

22. Урьев, Н.Б. Высококонцентрированные дисперсные системы / Н.Б. Урьев. – М.: Химия, 1980. – 320 с.

23. Котлярский, Э.В. Повышение долговечности покрытий автомобильных дорог за счет оптимизации структуры асфальтобетонов: дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.05 / Котлярский Эдуард Владимирович. – Белгород, 2012. – 613 с.

24. Лукашевич, В.Н. Исследование процессов структурообразования асфальтобетонных смесей, приготовленных с использованием двухстадийной

технологии / В.Н. Лукашевич // Известия вузов. Строительство. - 2000. - № 3. - С. 25 - 31.

25. Ладыгин, Б.И. Прочность и долговечность асфальтобетона / Б.И. Ладыгин, И.К. Яцевиц, С.Л. Вдовиченко. - Минск: Наука и техника, 1972. С. 89-93.

26. Золотарев, В.А. О вкладе составляющих асфальтобетона в его прочность / В.А. Золотарев // Повышение эффективности использования материалов при строительстве асфальтобетонных и черных покрытий. - М.: СоюзДорНИИ, 1989. – С. 78-84.

27. Горелышев, Н.В. Новые принципы стандартизации асфальтобетона / Н.В. Горелышев, Н.В. Быстров // Методы и средства повышения надежности материалов и сооружений на автодорогах с учетом транспортных воздействий: сб. тр. - М.: МАДИ (ГТУ), 1996. - С. 155-156.

28. Колбановская, А.С. Дорожные битумы / А.С. Колбановская, В.В. Михайлов. - М.: Транспорт, 1973. 261 с.

29. Руденская, И.М. Органические вяжущие для дорожного строительства / И.М. Руденская, А.В. Руденский. - М.: Транспорт, 1984. – 229 с.

30. Кучма, М.И. Поверхностно-активные вещества в дорожном строительстве / М.И. Кучма. - М.: Транспорт, 1980. - 191 с.

31. Галдина, В.Д. Особенности формирования структуры асфальтобетонов на пористых заполнителях / В.Д. Галдина, М.С. Черногоородова // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации: Сборник материалов III Международной научно-практической конференции, Омск, 29–30 ноября 2018 года. – Омск: Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ), 2019. – С. 356-360.

32. Беспалов, В.Л. Об использовании техногенного сырья в составе модифицированных асфальтобетонов повышенной долговечности / В.Л. Беспалов, П.С. Пашковский, А.Ю. Читаладзе [и др.] // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2018. – № 1 (129). – С. 32-40.

33. Прозорова, Л.А. Разработка составов и прогнозирование долговечности щебеночно-мастичного асфальтобетона на шлаковых заполнителях: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Прозорова Людмила Аркадиевна. – Липецк, 2011. – 140 с.

34. Лазарева, Т.Л. Повышение эффективности взаимодействия битума с каменными материалами в составе асфальтобетона / Т.Л. Лазарева, Л.С. Цупикова // Дальний Восток. Автомобильные дороги и безопасность движения: Международный сборник научных трудов. – Хабаровск: Тихоокеанский государственный университет. - 2017. – С. 352-358.

35. Лукашевич, В.Н. Исследование влияния технологии приготовления асфальтобетонных смесей на процессы старения асфальтового вяжущего при использовании волокнистых сорбентов в качестве дисперсной арматуры / В.Н. Лукашевич, И.Н. Ефанов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2012. – № 2 (35). – С. 191-196.

36. Галдина, В.Д. Физико-механические и деформативные свойства асфальтобетонов на основе модифицированных пористых заполнителей / В.Д. Галдина. – Развитие дорожно-транспортного комплекса и строительной инфраструктуры на основе рационального природопользования: материалы VII Всероссийской научно-практической конференции (с международным участием). – Омск, 2012. – С. 400-405.

37. Гридчин, А.М. Особенности взаимодействия битума с минеральными материалами из кислых пород / А.М. Гридчин, В.В. Ядыкина // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. - 2008. - № 40. - С. 13-16.

38. Подрез, Г.А. Эффективные асфальтобетоны на основе эффузивных горных пород: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Подрез Галина Алексеевна. – Улан-Удэ, 2011. – 21 с.

39. Данильян, Е.А. Физико-химическое обоснование температур перемешивания и уплотнения асфальтобетонных смесей: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Данильян Елена Алексеевна. – Белгород, 2000. – 22 с.

40. Котлярский, Э.В. Научно-методические основы оценки структурно-механических свойств композиционных материалов на основе органических вяжущих / Э.В. Котлярский // Строительные материалы. – 2011. – № 10. – С. 36-41.
41. Королев, И.В. Принципы направленного структурообразования асфальтобетона // Управление структурообразованием, структурой и свойствами дорожных бетонов: тез. докл. Всесоюз. конф. - Харьков: Изд-во ХАДИ, 1983. - С. 8 - 9.
42. Ивкин, А.С. Закономерности взаимодействия битума с минеральными материалами при температурах производства асфальтобетонных смесей: дис. ... канд. техн. наук: 05.17.07 / Ивкин Алексей Сергеевич. – Санкт-Петербург, 2019. - 112 с.
43. Емельянычева, Е.А. Способы улучшения адгезионных свойств дорожных битумов к минеральным материалам / Е.А. Емельянычева, А.И. Абдуллин // Вестник Казанского технологического университета. – 2013. — № 3 (16). – С. 198-204.
44. Самодуров, С.И. Шлаковые асфальтобетонные покрытия и снижение потерь от дорожно-транспортных происшествий / С.И. Самодуров, Ю. Шапиро // Применение местных материалов и отходов промышленности в дорожном строительстве. - 1980. – С. 47-53.
45. Ковалев, Н.С. Влияние возраста образцов, натурального замораживания в лабораторных условиях на структурно-механические свойства асфальтобетона из шлаковых материалов / Н.С. Ковалев // Применение местных материалов и отходов промышленности в дорожном строительстве. - 1980. – С. 53–65.
46. Чудаев, О.С. Использование промышленных отходов в лесном дорожном строительстве / О.С. Чудаев, Н.И. Казначеева, М.А. Быковски [и др.] // Sciences of Europe. – 2017. – № 12-1 (12). – С. 52-59.
47. Коганзон, М.С. Повышение сроков службы дорожных одежд / Сборник докладов международной конференции «Промышленность стройматериалов и стройиндустрия, энерго- и ресурсоснабжение в условиях рыночных отношений». – Белгород, 1997. - С. 316–317.

48. Ковалев, Н.С. Конструктивные слои дорожных одежд из шлаковых материалов, обработанных органическими вяжущими веществами: монография / Н.С. Ковалев. – Москва; Вологда: Инфра-Инженерия, 2020. – 272 с.
49. Гезенцвей, Л.Б. Применение мартеновского шлака в дорожном асфальтовом бетоне: дис. ... канд. техн. наук: Гезенцвей Лев Борисович. – М., 1956. – 175 с.
50. Ковалев, Н.С. Исследование морозостойкости и трещиностойкости асфальтобетонного покрытия из шлаковых материалов: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.14 / Ковалев Николай Сергеевич. – М., 1979. – 16 с.
51. Самодуров, С.И. Дорожный шлаковый асфальтовый бетон: дис. ... д-ра техн. наук: 05.23.05 / Самодуров Семен Иванович. - Воронеж, 1982. – 386 с.
52. Досалиев, К.С. Шлак как исходный местный материал в дорожном строительстве / К.С. Досалиев, А.Б. Токсан, А.Е. Асылбек // Лесная инженерия, материаловедение и дизайн: материалы 86-й научно-технической конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов (с международным участием), Минск, 31 января – 12 февраля 2022 года. – Минск: Белорусский государственный технологический университет, 2022. – С. 159-163.
53. Hunt, L, Boyle, G.E. Steel slag in hot mix asphalt concrete [R]. Salem: Oregon Department of Transportation, 2000.
54. Ahmedzade, P., Sengoz, B. Evaluation of steel slag coarse aggregate in hot mix asphalt concrete. Journal of Hazardous Materials.2009. No.165(1–3). Pp. 300-305.
55. Sofilić, Tahir, Mladenović, Ana and Sofilić, Una Defining of EAF steel slag application possibilities in asphalt mixture production. Journal of Environmental Engineering and Landscape Management. 2011. Vol.19 No.2. Pp.148-157.
56. Расстегаева, Г.А. Исследование процессов структурообразования смеси из гранулированного доменного шлака и вязкого битума при строительстве покрытий автомобильных дорог: автореф. дис. ... канд. техн. наук: Расстегаева Галина Андреевна. – Ленинград, 1970. – 24 с.

57. Расстегаева, Г.А. Асфальтобетон с применением отходов шлаковатного и литейного производства: Строительные материалы / Г.А. Расстегаева. - 1993. - № 1. - С. 11-12.
58. Колесник, Д.А. Оценка устойчивости асфальтобетонов к воздействию влаги и попеременному замораживанию-оттаиванию / Д.А. Колесник, С.А. Мантопкин // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. - 2017. - № 79. - С. 128-132.
59. Золотарев, В.А. Долговечность асфальтобетона при совместном действии нагрузок и агрессивных сред / В.А. Золотарев // Дорожная техника. – 2011. - № 30. - С. 30-39.
60. Меренцова, Г.С. Факторы, влияющие на долговечность асфальтобетонов и эксплуатационную надежность асфальтобетонных покрытий / Г.С. Меренцова, Ю.А. Горюнова // Ползуновский альманах. – 2017. - № 4 (2). – С. 124-127.
61. Духовный, Г.С. Повышение трещиностойкости асфальтобетонных покрытий/ Г.С. Духовный, А.В. Сачкова // Мир транспорта. – 2013. - № 01. – С. 60 - 63.
62. Колесник, Д.А. Пути повышения долговечности асфальтобетонных покрытий / Д.А. Колесник, Д.В. Пахаренко // Дорожная техника. – 2012. – С. 10-14.
63. Кравченко, С.Е. Низкотемпературные напряжения как критерий влияния компонентов асфальтобетонной смеси на трещиностойкость асфальтобетонных покрытий / С.Е. Кравченко, Д.Л. Сериков // Автомобильные дороги и мосты. – Минск: БелдорНИИ, 2010. – № 2. – С. 70 - 77.
64. Борисенко, В.А. Методы испытания асфальтобетона. Морозостойкость и усталостная долговечность / В.А. Борисенко, Д.А. Колесник // Дорожная держава. – 2014. – № 52. – С. 80-84.
65. Ефремов, С.В. Влияние структурообразующих составляющих на долговечность асфальтобетонов в агрессивных средах как фактор безопасности автодорог / С.В. Ефремов // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. – 2013. – № 61-62. – С. 239-242.

66. Ребиндер, П.А. Научные основы технологии производства строительных материалов / П.А. Ребиндер, Н.В. Михайлов // Вестник АН СССР. – 1961. – № 10. – С. 70-77.
67. Руденский, А.В. О закономерностях усталостного разрушения дорожных одежд / А.В. Руденский, Б.Г. Радовский, С.В. Коновалов // Труды Гипродорнии. – 1973. – Вып. 7. – С. 47.
68. Тыртышов, Ю.П. К вопросу о долговечности асфальтовых покрытий / Ю.П. Тыртышов, С.В. Скориков // Вестник Северо-Кавказского государственного технического университета. – 2007. – № 3. – С. 38-42.
69. Стороженко, М.С. Совершенствование технологии уплотнения асфальтобетонных покрытий с целью повышения прочности и долговечности / М.С. Стороженко // Вестник Харьковского национального автомобильно-дорожного университета. – 2008. – № 40. – С. 99-101.
70. Леднев, А.В. Анализ факторов, влияющих на износостойкость асфальтобетона / А.В. Леднев // Инженерный вестник Дона. – 2018. – № 1 (48). – С. 129.
71. Цупиков, С.Г. Справочник дорожного мастера. Строительство, эксплуатация и ремонт автомобильных дорог / С.Г. Цупиков. – Москва: Инфра-Инженерия, 2007. – 928 с.
72. Кириллов, А.М. Интерпретация свойств асфальтобетона в дорожном покрытии / А.М. Кириллов, М.А. Завьялов // Строительные материалы. – 2015. – № 4. – С. 87-92.
73. Борисенко, Ю.Г. Анализ и пути оптимизации методов определения долговечности дорожных асфальтобетонов / Ю.Г. Борисенко, Т.С. Савченко // Научный журнал. Инженерные системы и сооружения. – 2014. – № 4-3(17). – С. 66-71.
74. Шестаков, Н.И. Асфальтобетон с использованием углеродных наномодификаторов / Н.И. Шестаков, Л.А. Урханова, С.Л. Буянтуев, А.П. Семенов, Н.Н. Смирнягина // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2015. – № 6. – С. 21-24.

75. Домье, Е.Л. Метод «СПАС» как «концептуальная революция в асфальтобетонных покрытиях» / Е.Л. Домье // Дороги. Инновации в строительстве. – 2018. - № 68. - С. 14-16.

76. Крупин, Н.В. Обзор современных мировых тенденций развития асфальтобетонов / Н.В. Крупин // Дороги России. – 2020. - № 1 (115). - С. 7-13.

77. Колесник, Д.А. Опыт внедрения системы Supergrave на дорогах России / Д.А. Колесник, Д.В. Пахаренко // Дорожная держава. – 2019. – № 88. – С. 70-75.

78. Кирюхин, Г.Н. Плюсы и минусы системы проектирования асфальтобетона «Суперпейв» / Г.Н. Кирюхин, Р.Б. Джуманов // Мир Дорог. - 2014. - № 74. - С. 51-54.

79. Клековкина, М.П. Современная методология проектирования составов асфальтобетонов / М.П. Клековкина, Е.С. Волкова // Инновации и долговечность объектов транспортной инфраструктуры (материалы, конструкции, технологии): Материалы научно-практической конференции, Санкт-Петербург, 14 ноября 2018 года / Под редакцией М.П. Клековкиной. – Санкт-Петербург: Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет, 2019. – С. 29-34.

80. Сергушев, А.И. Анализ проектирования асфальтобетонных смесей по методике Supergrave / А.И. Сергушев, О.Н. Ильина // Техника и технология транспорта. – 2021. – № 4 (23).

81. Носов, С.В. Альтернатива системе Supergrave при формировании региональных дорожных НИИ / С.В. Носов // Научный журнал строительства и архитектуры. – 2020. – № 4 (60). – С. 87-96.

82. Марьев, В.А. Использование вторичных материальных ресурсов при строительстве и ремонте автомобильных дорог – важный резерв ресурсосбережения/ В.А. Марьев, А.В. Руденский // Дороги и мосты. - 2017. - № 37/1. - С.11-24.

83. Васильовская, Г.В. Применение отходов промышленности в качестве минерального порошка в асфальтобетоне/ Г.В. Васильовская, Д.Р. Назиров // Вестник ИрГТУ. - 2010. - № 10 (81). - С. 153-157.

84. Пугин, К.Г. Использование отходов металлургии в асфальтобетонах / К.Г. Пугин // Строительные материалы. - 2011. - № 10. - С. 26-27.
85. Еремин, А.В. Эксплуатационно-прочностные свойства шлаковых асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.11 / Еремин Андрей Владимирович. - Воронеж, 2000. - 201 с.
86. Ильин, С.В. Применение инертных заполнителей из сталеплавильных конвертерных шлаков при изготовлении асфальтобетонных смесей / С.В. Ильин, Г.М. Левашов, А.Г. Рощупкин, И.Ю. Сарычев, А.В. Фукс // Мир дорог. – 2021. - № 137. – С. 105-115.
87. Краюшкина, К. Влияние свойств асфальтобетонных покрытий со шлаковыми материалами на транспортно-эксплуатационные показатели автомобильных дорог: дис. ... д-ра. техн. наук: К. Краюшкина. - Вильнюс, 2013. – 182 с.
88. Подольский, В.П. Опыт использования электросталеплавильных шлаков в составе минеральной части асфальтобетонов / В.П. Подольский, Г.С. Духовный, А.С. Погромский // Научный вестник Воронежского ГАСУ. Строительство и архитектура. - 2004. - № 2. - С.136-138.
89. Бондарев, Б.А. Асфальтобетоны на шлаковых заполнителях: монография / Б.А. Бондарев, Ю.В. Штефан, М.А. Гончарова, Г.Е. Штефан. – Липецк: Изд-во ЛГТУ, 2005. – 174 с.
90. Резванцев, В.И. Шлаковые асфальтобетонные покрытия: эксплуатационно-прочностные свойства / В.И. Резванцев, А.В. Еремин - Воронеж. Изд-во ВГУ, 2002. -160 с.
91. Артемова, А.В. Активированный минеральный порошок на основе металлургических шлаков и его роль в асфальтобетоне / А.В. Артемова // Леса России и хозяйство в них. - 2009. - С. 85-91.
92. Копылов, В.Е. Минеральное сырье Республики Саха (Якутия) для производства асфальтобетонов / В.Е. Копылов, О.Н. Буренина // Наукоедение. – 2016. - № 1 (8). – С. 177-181.

93. Шаповалов, Н.А. Рациональные пути использования сталеплавильных шлаков / Н.А. Шаповалов, Л.Х. Загороднюк, И.В. Тикунова, А.Ю. Шекина // Фундаментальные исследования. - 2013. - № 1. - С. 439-443.
94. Белецкая, В.А. Перспективы использования электросталеплавильных шлаков ОЭМК / В.А. Белецкая, Е.Л. Румянцева // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. - 2011. - № 3. - С.140-144.
95. Панковец, А.И. Утилизация электросталеплавильных шлаков / А.И. Панковец, С.В. Мироевский // Литье и металлургия. - 2013. - № 1 (69). - С. 26-27.
96. Лесовик, В.С. Композиционные вяжущие с использованием высокомагнезиальных отходов Ковдорского месторождения / В.С. Лесовик, М.С. Шейченко, Н.И. Алфимова // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. - 2011. - № 1. - С. 10 – 14.
97. Лесовик, В.С. Гранулированные шлаки в производстве композиционных вяжущих / В.С. Лесовик, М.С. Агеева А.В. Иванов // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2011. - № 3. - С. 29–32.
98. Духовный, Г.С. Вяжущие и бетоны на основе электросталеплавильных шлаков / Г.С. Духовный, А.А. Лонгвиненко // Автомобильные дороги. - 2008. - № 12. С. 126-128.
99. О состоянии и об охране окружающей среды Российской Федерации в 2015 году / Государственный доклад. М.: Минприроды России, НИА-Природа, 2016. - 639 с.
100. Вульферт, Х. Высокореакционные компоненты цемента из сталеплавильных шлаков для улучшения экологии и экономики / Х. Вульферт, М. Кейснер, Х. Людвиг, Б. Адамчик, А. Шифферс // Черные металлы. - 2014. - № 5 (989). - С. 50-56.
101. Shi Caijun. Characteristics and cementitious properties of ladle slag fines from steel production / Caijun Shi // Cem. and Concr. Res. 2002. Vol. 32. No.3. Pp. 459-462.

102. Rondi, L (Rondi, Luca) Concrete with EAF steel slag as aggregate: A comprehensive technical and environmental characterisation/ Bregoli, G (Bregoli, Guido); Sorlini, S (Sorlini, Sabrina); Cominoli, L (Cominoli, Luca); Collivignarelli, C (Collivignarelli, Carlo); Plizzari, G (Plizzari, Giovanni). // Composites part b-engineering. 2016. No. 90. Pp. 195-202.

103. Быкова, А.А. Опыт применения шлаковых и других искусственных материалов в дорожном строительстве / А.А. Быкова, Я.А. Быкова // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. - 2004. - № 2. - С. 128-132.

104. Oluwasola EA Comparative evaluation of dense-graded and gap-graded asphalt mix incorporating electric arc furnace steel slag and copper mine tailings/ EA (Oluwasola, Ebenezer Akin) /Hainin, MR (Hainin, Mohd Rosli); Aziz, MMA (Aziz, Md. Maniruzzaman A.) // Journal of cleaner production. 2016. No. 122. Pp. 315-325.

105. Autelitano F (Autelitano, Federico) Electric arc furnace slags in cement-treated materials for road construction: Mechanical and durability properties/ Giuliani, F (Giuliani, Felice)//Construction and building materials. 2016. No.113. Pp. 280-289.

106. Шаповалов, Н.А., /Hainin, MR (Hainin, Mohd Rosli); Aziz, MMA (Aziz, Md. Maniruzzaman A.). /Hainin, MR (Hainin, Mohd Rosli); Aziz, MMA (Aziz, Md. Maniruzzaman A.)// Шлаки металлургического производства - эффективное сырье для получения сухих строительных смесей //Фундаментальные исследования. - 2013. - № 1. - С. 167-172.

107. Кочнева, А.А. Изучение свойств вяжущего на основе электросталеплавильных шлаков / А.А. Кочнева, М.С. Новоселова, В.М. Уфимцев // Инновации в материаловедении и металлургии. - 2012. - С. 56-58.

108. Гаркави, М.С. Оптимизация составов смешанных вяжущих с использованием отвальных электросталеплавильных шлаков / М.С. Гаркави, И.С. Хрипачева // Строительные материалы. - 2010. - № 2. - С. 56.

109. Артамонова, А.В. Вяжущие вещества на основе шлаков электросталеплавильного производства / А.В. Артамонова // Строительные материалы - 2011. - № 5. - С.11-13.

110. Ferreira VJ (Ferreira, Victor J.) Evaluation of the steel slag incorporation as coarse aggregate for road construction: technical requirements and environmental impact assessment/Vilaplana, ASD (Saez-De-Guinoa Vilaplana, Aitana); Garcia-Armingol, T (Garcia-Armingol, Tatiana); Aranda-Uson, A (Aranda-Uson, Alfonso); Lausin-Gonzalez, C (Lausin-Gonzalez, Cristina); Lopez-Sabiron, AM (Lopez-Sabiron, Ana M.); Ferreira, G (Ferreira, German). // Journal of cleaner production. 2016. No. 130. Pp. 175-186.

111. Magdi M. E. Zumrawi, Faiza O. A. Khalil Experimental Study of Steel Slag Used As Aggregate in Asphalt Mixture. International Journal of Civil, Environmental, Structural, Construction and Architectural Engineering. 2015. Vol.9. No.6. Pp. 683-688.

112. Патент RU 2697468 C1 Асфальтобетон / К.Ю. Тюрюханов, К.Г. Путин, Л.С. Щепетева и др. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Пермский национальный исследовательский политехнический университет» (RU). Заявл. 01.10.2019. Опубл. 14.08.2019. Бюл. №12. – 2 с.

113. 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.

114. 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.

115. 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.

116. Пименов, А.Т. Строительные смеси различного назначения на основе сталеплавильных 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.

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

118. Пименов, А.Т. Влияние сталеплавильных 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.

119. ОДМ 218.3.087-2017 Отраслевой дорожный методический документ. Рекомендации по применению асфальтобетонных смесей на основе металлургических шлаковых материалов для условий Центрального федерального округа [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=STR&n=21437#029521133759084517>.

120. Прибылов, В.С. Дорожно-эксплуатационное районирование территории Западной Сибири по маркам битумного вяжущего PG X-Y для целей дорожного строительства / В.С. Прибылов, Т.В. Семенова, С.А. Макарова // Качество. Технологии. Инновации: Материалы IV Международной научно-практической конференции, Новосибирск, 27–29 апреля 2021 года. – Новосибирск: Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет (Сибстрин), 2021. – С. 356-362.

121. Патент RU 2787268 C1 Асфальтобетонная смесь, содержащая заполнитель из отходов металлургического производства и битумное вяжущее марки PG / А.Т. Пименов, В.С. Прибылов, В.В. Мурко, Д.В. Саркисян. Федеральное

государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный архитектурно-строительный университет» (RU). Заявл. 03.12.2021. Оpubл. 09.01.2023. Бюл. № 1. – 2 с.

122. 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.

123. Шестаков, Н.И. Модифицированный асфальтобетон с углеродными нанодобавками: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Шестаков Николай Иванович. – Улан-Удэ, 2015. – 24 с.

124. Москвитин, Н.И. Склеивание полимеров / Н.И. Москвитин. - Изд-во «Лесная промышленность», 1968. - 304 с.

125. Пчельников, А.В. Роль нанодобавок в формировании прочного контактного слоя защитных покрытий / А.В. Пчельников и др. // Строительные материалы. - 2022. - № 7. - С. 24–30.

126. Дерягин, Б.В. Адгезия твердых тел: монография / Б.В. Дерягин, Н.А. Кротова, В.П. Смилга. - М.: Наука, 1973. - 280 с.

127. Каргин, В.А. Роль структурных явлений в формировании свойств полимеров / В.А. Каргин // Прогресс полимерной химии. - М.: Наука, 1969. – С. 7 - 31.

128. Пичугин, А.П. Термомеханические исследования защитно-пропиточных композиций с наноразмерными и специальными добавками / А.П. Пичугин, В.Ф. Хританков, А.В. Пчельников, О.Е. Смирнова // Инженерно-строительный вестник Прикаспия. - 2020. - № 3. - С. 53-58.

129. Усов, Б.А. Свойства и модификация битумных вяжущих / Б.А. Усов, Т.Н. Горбунова // Системные технологии. - 2017. - № 22. - С. 72-88.

130. Беляев, К.В. Модификация битума техническим углеродом / К.В. Беляев, И.Л. Чулкова // Вестник СиБАДИ – 2019. - № 4 (16) – С. 477-484.

131. Пичугин, А.П. Влияние наноразмерных добавок на адгезионную прочность защитных полимерных покрытий / А.П. Пичугин, В.Ф. Хританков, В.В. Банул, А.Ю. Кудряшов // Строительные материалы. - 2018. - № 1-2. - С. 39-44.
132. Артамонова, О.В. Синтез наномодифицирующих добавок для технологии строительных композитов: монография / О.В. Артамонова. – Воронеж: Воронежский ГАСУ, 2016. – 100 с.
133. Чернышов, Е.М. Наномодифицирование систем твердения в структуре строительных композитов: монография // Е.М. Чернышов, О.В. Артамонова, Г.С. Славчева. – Воронеж: Научная книга, 2016. – 132 с.
134. Пичугин, А.П. Изучение адгезионных свойств полимерсодержащих композиций к металлическим конструкциям методами фотоэлектроколориметрии / А.П. Пичугин, А.В. Пчельников, В.Ф. Хританков, О.Е. Смирнова // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2022. – № 7 (763). – С.39-48.
135. 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.
136. Книгина, Г.И. Об использовании метода фотоэлектроколориметрии для изучения адгезии полимера к минеральному наполнителю / Г.И. Книгина, В.Н. Корнеева, Ф.Ф. Петрова // Известия вузов. –1968. - № 3.– С.164-168.
137. Пичугин, А.П. Фотоэлектроколориметрическое изучение взаимодействия наполнителей с полимером / А.П. Пичугин, В.П. Князева // Вопросы гидромелиорации сельскохозяйственных земель в условиях Дальнего Востока: сб. научн. тр. Благовещенск: БСХИ-ПСХИ. - 1973. - С.75 - 82.
138. Лукашевич, В.Н. Исследование влияния технологии приготовления асфальтобетонных смесей на процессы старения асфальтового вяжущего при использовании волокнистых сорбентов в качестве дисперсной арматуры / В.Н. Лукашевич, И.Н. Ефанов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2012. – № 2 (35). – С. 191-196.

139. Пичугин, А.П. Оценка эффективности использования нанодобавок в защитных покрытиях / А.П. Пичугин, А.В. Пчельников, В.Ф. Хританков, А.К. Туляганов // Строительные материалы. - 2023. - № 3. - С.20–26.
140. Баженов, Ю.М. Нанотехнологии и наномодифицирование в строительном материаловедении. Зарубежный и отечественный опыт / Ю.М. Баженов, Е.В. Королев // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. - 2007. - № 2. - С. 17-22.
141. Иноземцев, С.С. Эксплуатационные свойства наномодифицированных щебеночно-мастичных асфальтобетонов / С.С. Иноземцев, Е.В. Королев // Вестник МГСУ. - 2015. - № 3. - С. 29-39.
142. Котлярский, Э.В. Морозостойкость асфальтобетона // Строительные материалы. - 2011. - № 5. - С. 81-83.
143. Руденский, А.В. Повышение долговечности асфальтобетонов введением активного комплексного модификатора / А.В. Руденский, О.Н. Никонова, М.Г. Казиев // Строительные материалы. - 2011. - № 10. - С. 10 - 11.
144. Корочкин, А.В. Износ жестких дорожных одежд с асфальтобетонным покрытием // Строительные материалы. - 2012. - № 3. - С. 66-67.
145. 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.
146. 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.

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение № 1. Акт отбора образцов (проб) сталеплавильного шлака


 НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
 (СИБСТРИН)
 Кафедра строительных материалов, стандартизации и сертификации

Акт
отбора образцов (проб)

от «22» сентября 2020г. № 1

1. Наименование материала (конструкции): Шлак маховый 0-80
(шлак металлургический)

НТД (ГОСТ, ТУ и др.): ИСТ 3344-83

Назначение: Проведение в составе АБ-анализа
до введения в эксплуатацию

Цель отбора: контроль качества на предмет соответствия требованиям НТД, научная работа

Производитель работ: ООО "Томасовский Рудничный"

2. Место (адрес) отбора образцов (проб): Буден. Коммунальное предприятие
г. Новокузнецк, ул. Фрунзе, д. 24

3. Маркировка (номер, присвоенный образцу на месте отбора), дата отбора: №1, 22.09.2020

4. Размер, объем выборки: 120 см

5. Число отобранных образцов: 1

6. Используемое оборудование (наим., тип и пр.) при отборе образцов: лопата,
шпатель.

7. Условия отбора и хранения образцов (температура воздуха, климатические условия и пр.): 7° - 12°С, ясно

8. Общие сведения при отборе образцов:

Номер образца	Назначение материала	Толщина слоя, см		Сопоставление с инвентаризационным слоем	Примечание
		по проекту	фактическая		
1	Шлак маховый				

Представители:

ООО "Томасовский Рудничный" директор А.В. Тролов (Ф.И.О.)

ИГАСУ (Сибстрин), мастер В.В. Мурин (Ф.И.О.)

ИГАСУ (Сибстрин), мастер В.В. Саркисов (Ф.И.О.)

(Ф.И.О.)

Приложение № 2. Патент на изобретение



РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ

(19) **RU** (11) **2 787 268**⁽¹³⁾ **C1**

(51) МПК
C08L 95/00 (2006.01)
C04B 26/26 (2006.01)
C04B 18/14 (2006.01)
E01C 7/18 (2006.01)

ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
 ПО ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОЙ СОБСТВЕННОСТИ

(12) **ФОРМУЛА ИЗОБРЕТЕНИЯ К ПАТЕНТУ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

(52) СПК

C08L 95/00 (2022.08); *C04B 26/26* (2022.08); *C04B 18/14* (2022.08); *E01C 7/18* (2022.08)

(21)(22) Заявка: 2021135756, 03.12.2021

(24) Дата начала отсчета срока действия патента:
 03.12.2021

Дата регистрации:
 09.01.2023

Приоритет(ы):

(22) Дата подачи заявки: 03.12.2021

(45) Опубликовано: 09.01.2023 Бюл. № 1

Адрес для переписки:
 630008, г. Новосибирск, ул. Ленинградская, 113,
 НГАСУ (Сибстрин), отдел ПЛР

(72) Автор(ы):

Пименов Александр Трофимович (RU),
 Прибылов Вячеслав Сергеевич (RU),
 Мурко Вячеслав Валерьевич (RU),
 Саркисян Диана Васильевна (RU)

(73) Патентообладатель(и):

Федеральное государственное бюджетное
 образовательное учреждение высшего
 образования Новосибирский
 государственный
 архитектурно-строительный университет
 (Сибстрин) (RU)

(56) Список документов, цитированных в отчете
 о поиске: RU 2534861 C1, 10.12.2014. RU
 2591938 C1, 20.07.2016. RU 2232142 C2,
 10.07.2004. RU 2318765 C1, 10.03.2008. RU
 2214979 C1, 27.10.2003. US 9481794 B2, 01.11.2016.

(54) Асфальтобетонная смесь, содержащая заполнитель из отходов металлургического производства и битумное вяжущее марки PG

(57) Формула изобретения

Асфальтобетонная смесь, включающая битумное вяжущее марки не ниже PG 52-40 и в качестве заполнителя 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;

- битумное вяжущее марки не ниже PG 52-40 - 3,9-4,5 сверх 100 мас. % от минеральной части.

Приложение № 3. Акт внедрения результатов исследования



УТВЕРЖДАЮ
 Генеральный директор ООО «Спецремонт»
 _____ С.В. Дружинин
 « 31 » _____ МАЯ 2023 г.

АКТ внедрения результатов научно-исследовательских, опытно- конструкторских и технологических работ

Мы, нижеподписавшиеся, в составе комиссии – председателя Демихова Виталия Алексеевича, механика ООО «Спецремонт» и членов: Пичугина Анатолия Петровича, доктора технических наук, профессора кафедры строительных материалов, стандартизации и сертификации ФГБОУ ВО НГАСУ (Сибстрин), Прибылова Вячеслава Сергеевича, аспиранта кафедры строительных материалов, стандартизации и сертификации ФГБОУ ВО НГАСУ (Сибстрин), составили настоящий акт о том, что в 2022-2023 гг. в результате проведения научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ в ООО «Спецремонт» на территории производственно-технологической базы обособленного подразделения по адресу: г. Новокузнецк, ул. Рудокопровая, 28 корпус 6, при устройстве покрытия площадью 168 м² была апробирована асфальтобетонная смесь, содержащая заполнитель из отходов сталеплавильного производства и наноразмерную добавку углеродных нанотрубок TUBALL.

Состав асфальтобетонной смеси разработан в рамках кандидатской диссертационной работы аспиранта Прибылова В.С. на тему «Асфальтобетон на основе сталеплавильных шлаков с нанодобавками» (табл. 1):

Таблица 1 – Состав шлакоасфальтобетонной смеси

№ п/п	Наименование материала	Состав смеси, % (битум сверх 100 %)	Состав смеси, % (битум в 100 %)	Дозировка на замес 1000 кг, кг
1	2	3	4	5
1	Щебень шлаковый фр. 8-16 мм (мартеновский шлак)	38,900	37,332	373,32
2	Щебень шлаковый фр. 4-8 мм (мартеновский шлак)	21,700	20,825	208,25
3	Песок шлаковый фр. 0-4 мм (конвертерный шлак)	39,400	37,812	378,12
4	Битум марки PG 58-40	3,988	3,827	38,27
5	Талловое масло (5 % от массы битума)	0,210	0,202	2,02
6	Углеродные нанотрубки TUBALL™ (0,05 % от массы битума)	0,002	0,002	0,02
ИТОГО:		104,200 %	100,000 %	1000,00

Приготовление модифицированной нанодобавкой шлакоасфальтобетонной смеси осуществлялось на асфальтосмесительной установке периодического действия AMMANN. Модификация вяжущего выполнялась в установке контейнерного типа ДАВИАЛ. Равномерность распределения добавки контролировалась под руководством Прибылова В.С. методами операционного контроля.

Устройство участка размером 14×12 м, общей площадью 168 м² и толщиной покрытия 0,05 м осуществлялось на территории промзоны бывшего металлургического комбината по адресу ул. Рудокопровая, 28 корпус 6.

По состоянию на апрель 2023 г. на поверхности уложенного покрытия дефекты отсутствуют. Содержание воздушных пустот в кернах из уплотненного слоя через год эксплуатации соответствует требованиям ГОСТ Р 58401.5-2019 (табл. 2):

Таблица 2 – Оценка качества покрытия

Содержание воздушных пустот, %	
на момент укладки (2022 г.)	апрель 2023 г.
4,2	4,1
4,5	4,4

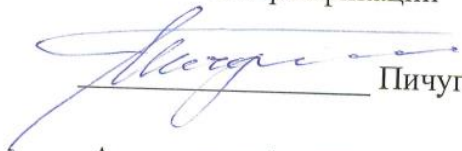
Результаты промышленной апробации показывают, что модифицированная нанодобавкой углеродных нанотрубок TUBALL шлакоасфальтобетонная смесь и шлакоасфальтобетон обладают улучшенными эксплуатационными характеристиками, достаточными для восприятия повторяющихся динамических нагрузок от транспортных средств и температурных колебаний окружающей среды. Методология объемно-функционального проектирования, реализованная в предлагаемом составе шлакоасфальтобетонной смеси, обеспечивает соответствие ее физико-механических свойств требованиям ГОСТ Р 58401.1-2019.

Благодаря высокой адгезии сталеплавильного шлака к модифицированному нанодобавкой TUBALL вяжущему, полученный шлакоасфальтобетон при должной его эксплуатации в покрытии имеет тенденции к росту межремонтных сроков.

Учитывая сравнительно невысокую себестоимость приготовления шлакоасфальтобетонной смеси на производственно-технологической базе ООО «Спецремонт», предлагаемые к внедрению результаты НИОКР имеют большую практическую ценность, и могут быть рекомендованы для широкого применения.

**Представители
ФГБОУ ВО НГАСУ (Сибстрин):**

Д-р техн. наук,
профессор кафедры строительных
материалов, стандартизации
и сертификации

 Пичугин А.П.

Аспирант кафедры строительных
материалов, стандартизации
и сертификации

 Прибылов В.С.

**Представители
ООО «Спецремонт»:**

Механик предприятия

 Демихов В.А.



ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ

"СПЕЦРЕМОНТ"

633009, Новосибирская область, г. Бердск, ул. Рогачева, дом 4А, этаж 1

ИНН 5445017625 КПП 544501001 ОГРН 1135483005217

Обособленное подразделение:

654066, Кемеровская область-Кузбасс, г. Новокузнецк, ул. Тольятти
(Центральный р-н), дом 16, кв.2

КПП обособленного подразделения: 421745001

тел/факс: 8(3843) 777-216

e-mail: spezremont@list.ru



Reg. № РОСС RU,
ИФ63.К00009

УТВЕРЖДАЮ

Генеральный директор ООО «Спецремонт»

С.В. Дружинин

« 31 » мая 2023 г.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ РЕГЛАМЕНТ

приготовления асфальтобетонной смеси на основе
сталеплавыльных шлаков с наноразмерной добавкой
углеродных нанотрубок TUBALL

Разработал

Аспирант кафедры строительных
материалов, стандартизации
и сертификации ФГБОУ ВО НГАСУ
(Сибстрин),
Прибылов В.С.

Новокузнецк, 2023 г.

Приложение № 4. Справка о внедрении результатов



МИНОБРНАУКИ РОССИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

**НОВОСИБИРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ
УНИВЕРСИТЕТ (СИБСТРИН)**

ОКПО 02068976 ОГРН 1025401905484
ИНН/КПП 5405115866/540501001
Ленинградская ул., д. 113, Новосибирск 630008
Тел. (383) 266-41-25, факс (383) 266-40-83
E-mail: rector@sibstrin.ru

№ _____

На № _____ от _____



УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор
НГАСУ (Сибстрин)

канд. техн. наук, доцент

А.С. Евдокименко

_____ 20 24 г.

СПРАВКА

**о внедрении результатов диссертационной работы
Прибылова Вячеслава Сергеевича**

Теоретические положения, результаты экспериментальных исследований и промышленной апробации, полученные при выполнении диссертационной работы В.С. Прибылова «Асфальтобетон на основе сталеплавильных шлаков с нанодобавками» используются в учебном процессе при подготовке бакалавров направления 08.03.01 – Строительство, профиль «Автомобильные дороги» и при подготовке магистров 08.04.01 – Строительство, профиль «Автомобильные дороги», что отражено в рабочих программах дисциплин «Дорожное материаловедение и технология дорожно-строительных материалов», «Строительство и эксплуатация автомобильных дорог».

Директор института
цифровых и инженерных технологий,
д-р техн. наук, профессор



Л.В. Ильина