

На правах рукописи



ЛУКАШУК АЛЕКСАНДР ГЕННАДЬЕВИЧ

**РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ СТРОИТЕЛЬСТВА
АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ С НИЗКОЙ ИНТЕНСИВНОСТЬЮ
ДВИЖЕНИЯ ИЗ ШЛАКО-ГРУНТОВЫХ КОМПОЗИТОВ**

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

2.1.8. Проектирование и строительство дорог, метрополитенов, аэродромов,
мостов и транспортных тоннелей

Воронеж - 2023

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Воронежский государственный технический университет».

Научный руководитель: кандидат технических наук
Тюков Евгений Борисович

Официальные оппоненты: **Матуа Вахтанг Парменович**
доктор технических наук, профессор, Донской
государственный технический университет
(ДГТУ), кафедра «Автомобильные дороги»,
профессор

Штефан Юрий Витальевич
кандидат технических наук, доцент, Москов-
ский автомобильно-дорожный технический
университет (МАДИ), кафедра «Производство и
ремонт автомобилей и дорожных машин», до-
цент

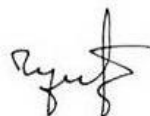
Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное обра-
зовательное учреждение высшего образования
«Тамбовский государственный технический
университет»

Защита состоится 28 февраля 2024 года в 10:00 часов на заседании диссер-
тационного совета 24.2.286.02, созданного на базе Воронежского государствен-
ного технического университета, по адресу: г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д.
84, корпус 2, ауд. 2226а.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Воронежского государ-
ственного технического университета и на сайте <http://cchgeu.ru/>

Автореферат разослан «25» декабря 2023 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Чуйкин С.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Развитие дорожной сети автомобильных дорог ограничивается ростом сети местных дорог с низкой интенсивностью движения и в значительной мере сдерживается непрерывно возрастающей стоимостью кондиционных дорожно-строительных материалов. Трудность с отводом территории под сосредоточенные резервы грунта приводит к очевидному дефициту минеральных грунтов, что повышает стоимость дорожно-строительных работ, которую следует понижать без ущерба надежности и долговечности местных дорог. Существуют различные способы расширения спектра применения местных материалов для формирования оснований дорог. Это использование естественных грунтов и отходов различных производств. Одним из материалов, используемых для строительства, являются отходы металлургического производства. Однако технологические проблемы применения отходов предприятий черной металлургии и слабопрочных местных материалов диктуют необходимость особого подхода к их использованию. Из-за специфических свойств сталеплавильные шлаки до настоящего времени слабо используются в дорожном строительстве. Их хранение в отвалах вызывает острую социально-экологическую проблему на территориях использования. Основными ограничителями при использовании являются содержащиеся в сталеплавильных шлаках двухкальциевый силикат, свободная известь и включения черных металлов, которые способствуют процессам самораспада. Он сопровождается увеличением материала в объеме, проявлениями пучения основания и разрушением целостности щебеночных и песчаных фрагментов шлака. Поэтому преодоление причин, ограничивающих применение сталеплавильных шлаков для устройства земляного полотна, в настоящее время является актуальной научно-технической задачей.

Степень разработанности темы исследования

Использование местных материалов, отходов производства для формирования оснований дорог известно давно. Их укреплением и приданием им определенных свойств работали известные отечественные и зарубежные ученые: Ю.М. Баженов, А.К. Бируля, С.С. Морозов и др. Ими были разработаны технологии использования материалов и нормативные документы по строительству дорожных одежд из них. На основе теоретических и экспериментальных исследований они указали на ограничения использования шлаковых материалов. В то же время решение этих ограничений позволяет использовать сталеплавильные шлаки для устройства земляного полотна и нижних слоев основания дорожных одежд. В этом случае вариации изменения проектной прочности и устойчивости под воздействием погодно-климатических факторов разрешается обосновывать результатами испытаний. В частности, это преодолевается разработкой частных технологических карт применения местных материалов. Так, до настоящего времени не разработаны технологические карты для применения более 5 млн тонн отходов Новолипецкого металлургического комбината. Очевидно, что существующие в настоящее время нормативные документы не предусматривают применение сталеплавильных шлаков в виде шлако-грунтовых смесей и композитов для устройства земляного полотна местных автомобильных дорог IV-V технических категорий. Вовлечение сталеплавильных шлаков в дорожно-строительный про-

цесс в виде шлако-грунтовых смесей и композитов обеспечит сокращение потребности дорожной отрасли в минеральных грунтах. Данная задача может быть решена в результате проведения комплекса научно-исследовательских лабораторных и экспериментальных работ.

Целью работы является разработка технологии применения шлако-грунтовых смесей и композитов на основе мелкозернистых сталеплавильных шлаков и связных грунтов для устройства земляного полотна и нормативного документа по использованию местных материалов и отходов производства при строительстве автомобильных дорог с низкой интенсивностью движения.

Для достижения этой цели были поставлены **следующие задачи**:

- произвести анализ применяемых современных технологий и условий производства дорожно - строительных работ с использованием местных материалов и отходов производства при строительстве автомобильных дорог с низкой интенсивностью движения;
- выполнить математическое моделирование напряженно-деформируемого состояния основания дорожной одежды с целью оценки применимости слабopрочных материалов;
- обосновать методику по определению устойчивости земляного полотна из шлако-грунтовых композитов на подходах к искусственным сооружениям и в местах сосредоточенных работ;
- разработать технологические карты по устройству земляного полотна и основания из шлако-грунтовых композитов на дорогах с малой интенсивностью движения;
- обосновать технологию применения шлако-грунтовых композитов на основе сталеплавильного шлака в земляном полотне и основании дорожной одежды;
- разработать нормативный документ по использованию местных слабopрочных материалов и шлако-грунтовых композитов при строительстве дорог с низкой интенсивностью движения;
- исследовать возможности поддержания эксплуатационных свойств покрытия протектором поверхностной пропитки.

Научная новизна заключается в разработке:

- методики определения устойчивости земляного полотна из шлако-грунтовых композитов на подходах к искусственным сооружениям и в местах сосредоточенных работ;
- регрессионных уравнений прочности шлако-грунтовых композитов в слоях основания дорожной одежды при неблагоприятных погодноклиматических факторах;
- технологии применения шлако-грунтовых композитов на основе мелкозернистых сталеплавильных шлаков при устройстве земляного полотна и нижних слоев основания дорог с малой интенсивностью движения;
- научно-обоснованных вариантов конструкций дорожных одежд для автомобильных дорог с низкой интенсивностью движения с использова-

нием шлако-грунтовых композитов и местных слабопрочных дорожно-строительных материалов.

Практическая значимость работы состоит в разработке:

- технологических карт по устройству земляного полотна и основания из шлако-грунтовых композитов на дорогах с малой интенсивностью движения;
- нормативного документа по применению технологий производства работ и используемых материалов при строительстве, реконструкции капитальном ремонте и ремонте дорог на территории Воронежской области;
- рекомендаций по применению протекторов для восстановления эксплуатационных свойств покрытия.

Достоверность результатов исследований и выводов диссертационной работы обусловлена использованием научно-обоснованных методов математического планирования экстремальных экспериментов, адекватностью результатов теоретических предположений с экспериментальными данными, результатами внедрения, а также применением поверенных приборов и оборудования при лабораторных исследованиях.

Методология и методы диссертационного исследования. Теоретической и методологической основой диссертационного исследования послужили современные положения теории и практики развития технологии строительства оснований из шлако-грунтовых материалов, разработки отечественных и зарубежных ученых в области совершенствования использования современных материалов. Теоретические расчеты выполнены с использованием апробированных как существующих, так и вновь представленных математических методов. В работе использовалось численное моделирование с использованием известных математических пакетов и специально написанных подпрограмм. Обработка результатов натурных экспериментов проведена методами математической статистики.

На защиту выносятся:

- результаты моделирования напряженно-деформируемого состояния основания дорожной одежды с целью оценки применимости слабопрочных материалов;
- методика определения устойчивости земляного полотна из шлако-грунтовых композитов на подходах к искусственным сооружениям и в местах сосредоточенных работ;
- регрессионные уравнения прочности шлако-грунтовых композитов в слоях основания дорожной одежды;
- технологические карты по устройству земляного полотна и оснований из шлако-грунтовых композитов на дорогах с малой интенсивностью движения;
- технология применения шлако-грунтовых композитов при устройстве земляного полотна и нижних слоев основания в конструкции дорожных одежд;
- методические рекомендации по применению на территории Воронежской области технологий производства работ и применяемых материа-

лов при строительстве, реконструкции, капитальном ремонте и ремонте автомобильных дорог регионального, межмуниципального и местного значения.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях в Воронежском государственном архитектурно-строительном университете (Воронеж, 2014, 2016, 2017 гг.). Для апробации разработанной автором технологии был построен экспериментальный участок автомобильной дороги «Тамбов – Пенза» – Рассказово – Уварово – Мучкапский – Вольная вершина – граница Воронежской области в Уваровском районе Тамбовской области протяженностью 3,5 км.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 9 научных работ общим объемом 58 страниц. Четыре статьи опубликованы в изданиях, включенных в перечень ВАК РФ ведущих рецензируемых изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертационной работы.

В статьях, опубликованных в рекомендуемых ВАК изданиях, изложены основные результаты диссертации: в работе [1] приведены результаты качественных исследований структуры композитов на основе сталеплавильных конвертерных шлаков; в [2] приведены результаты исследований зависимости физико-механических параметров образцов сталеплавильного шлака от содержания высокомодульного жидкого стекла; в работе [3] приведены сведения о применении протектора «Дорлук» для восстановления первоначальных свойств асфальтобетона. В работе [4] рассмотрены физико-химические методы исследования влияния модификатора «MADOR» на характеристики укрепленного цементом материала. В работе [5] описана технология устройства слоев основания дорожной одежды из шлако-грунтовых композитов.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, общих выводов, списка литературы из 124 наименований и четырех приложений. Общий объем работы составляет 157 страниц машинописного текста, включая 40 рисунков и 38 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выбранной темы диссертационных исследований, определены цель и задачи работы, показаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость диссертации.

В первой главе приведены результаты анализа использования местных материалов в дорожном хозяйстве страны. Изучены их физико-механические свойства, включая характеристики сталеплавильных шлаков в отвалах и возможности их применения. Отмечено, что процесс производства дорожно-строительных работ сопровождается использованием больших объемов традиционного природного минерального сырья в виде песка, щебня, гравия, минерального порошка и др., запасы которых с каждым годом истощаются. Основные технологические и финансовые затраты в дорожной отрасли приходятся на устройство конструкций дорожных одежд.

Технологическими аспектами применения отходов черной металлургии в дорожном хозяйстве занимались В.П. Введенский, В.Г. Ерёмин, М.В. Королёв, А.А. Логвиненко, Вл.П. Подольский, Е.Л. Румянцева, Г.А. Расстегаева,

С.И. Самодуров, А.Я. Тулаев, В.М. Юмашев. Исследования их свойств показали, что технологические процессы использования отвальных сталеплавильных шлаков при создании композиционных дорожно-строительных материалов возможны при объединении шлаков со связными грунтами или введении в состав шлакосодержащих компонентов, обладающих структурообразующими свойствами. Изучена возможность создания шлако-грунтовых смесей и композитов на основе их реологических свойств в процессе устройства земляного полотна для автомобильных дорог с малой интенсивностью движения. При этом выявлено что сталеплавильные шлаки целесообразно использовать после хранения их в течение длительного времени на площадке складирования под воздействием природно-климатических процессов. Вместе с тем результаты исследований образцов шлакокомпозитов различного типа, полученные специалистами Воронежского ГАСУ и Белгородского БГТУ им. Шухова В.Г., выявили существенные различия в показателях водонасыщения, коэффициентов водостойкости, морозостойкости, что свидетельствует об отсутствии единых технологических требований к применению шлаков сталеплавильного производства в составе минеральной части, свойств шлаковых минеральных материалов в зависимости от времени нахождения в отвалах, а также свойств шлако-грунтовых оснований.

С учетом дальнейшего развития дорожно-транспортной сети целесообразно произвести разработку технологии использования отходов черной металлургии с целью расширения номенклатуры дорожно-строительных материалов и разработку составов шлако-грунтовых смесей и композитов на основе связанных сталеплавильных шлаков, а также научно-обоснованных конструкций дорожных одежд с их использованием для автомобильных дорог с низкой интенсивностью движения.

Во второй главе приведено математическое моделирование напряженно-деформированного состояния дорожных оснований с параметрами, характерными для используемых местных материалов, с характеристиками и свойствами сталелитейных шлаков. Технологические процессы устройства земляного полотна существенно влияют на его прочность и устойчивость. Нарушение технологии влечет за собой деформации грунтового массива земляного полотна или местные деформации основания. Одним из элементов дороги, в котором используются большие объемы местных материалов, являются насыпи. Для них характерно использование грунтов и отходов промышленности, мало меняющие прочностные свойства и устойчивость под воздействием погодноклиматических факторов. Грунты, а также отходы промышленного производства с нестабильной прочностью и устойчивостью под воздействием транспортных нагрузок и погодноклиматических факторов допускается применять с ограничениями, обосновывая их применение результатами лабораторных исследований.

В качестве модели использована известная конструкция насыпи, высота которой изменялась в пределах от малой до высокой. На рисунке 1, представлена расчетная схема дорожной насыпи, геометрические параметры которой соответствуют нормативным документам.

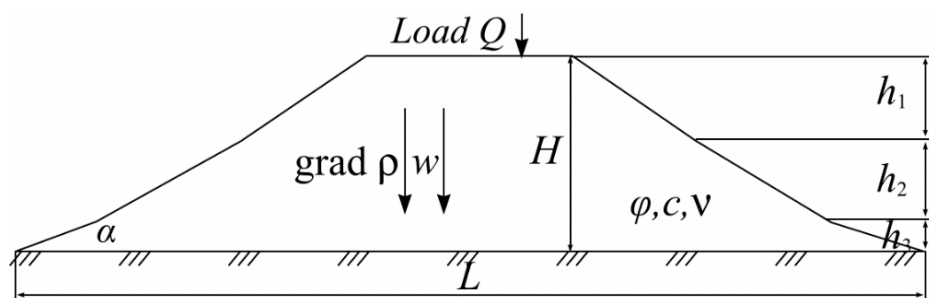


Рис. 1. Расчетная схема дорожной насыпи, используемой при математическом моделировании: H – высота насыпи, h_1 , h_2 , h_3 – высота слоев, $\text{grad } r$ – градиент плотности уложенного материала.

Насыпи из шлако-грунтовых композиций имеют отличительную особенность, связанную с изменением механических свойств композита. Это проявляется в большей осадке материала, большего градиента плотности с по высоте. Решение задачи деформируемого полупространства выполнено методом решения дифференциальных уравнений деформации в частных производных. Отличительной чертой данных уравнений является дополнение их граничными параметрами изменения плотности, удельного объема при сжатии шлако-грунтового композита, изменением коэффициента Пуассона в результате природно-климатического воздействия.

Варьирование величин параметров уравнений, указанных в таблице 1, позволило решить задачу оптимизации свойств используемых материалов для последующей разработки составов и смесей композитов из связанных сталелитейных шлаков. Используя развитую теорию устойчивости насыпей, удалось разработать методику определения устойчивости земляного полотна из шлако-грунтовых композитов на подходах к искусственным сооружениям и в местах сосредоточенных работ.

Таблица 1 - Параметры используемые при моделировании прочностных свойств насыпи

Параметр	Диапазон варьирования
1. Вес нагрузки на дорожное полотно	0 – 200000 [Н]
2. Плотность шлако-грунтового композита	1300 – 2100 [кг/м ³]
3. Градиент плотности композита	0 – 200 [$\Delta\rho$ / м]
4. Влажность шлако-грунтового композита	0 – 95 [%]
5. Предел прочности при сжатии	1 – 30 [МПа]
6. Коэффициент Пуассона	0,25 – 0,45
7. Внутреннее трение материала	22 – 42 [град]
8. Удельное сцепление шлако-грунтового композита	1,5 – 10 [т/м ²]
9. Высота насыпи	1-10 [м]
10. Угол наклона боковых сторон насыпи	3 – 60 [град]
11. Коэффициент пористости	0,5 – 0,8

В основе определения устойчивости лежит зависимость коэффициента запаса устойчивости откоса от геометрических характеристик насыпи. При этом выражение коэффициента запаса устойчивости откоса можно записать в виде:

$$n = \frac{\sum N_i \cdot \text{tg} \varphi_i + \sum c_i \cdot l_i}{\sum T_i} = \frac{\sum Q_i \cdot \cos \alpha_i \cdot \text{tg} \varphi_i + \sum c_i \cdot l_i}{\sum Q_i \sin \alpha_i}, \quad (1)$$

где Q - сила, приложенная в центре тяжести блока, равная собственному весу блока; $N_i \cdot \operatorname{tg} \varphi$ - реакция грунта на поверхности скольжения, которая состоит из силы трения, прямо пропорциональной нормальному давлению; $c_i \cdot l$ - сила сцепления, φ - угол внутреннего трения грунта, град; c - удельное сцепление грунта, т/м²; l - длина отрезка дуги скольжения в пределах данного блока, м; N_i - нормальная составляющая веса блока; α - угол наклона поверхности скольжения блока к горизонту; T - сдвигающая сила.

Анализ полученных данных показал, что на характеристики насыпи в наибольшей степени влияют φ и c . Наиболее опасная поверхность скольжения может проходить через подошву откоса или располагаться глубже подошвы насыпи. На рисунке 2, а показано изменение плотности материала по высоте насыпи, на графике 2, б показаны зависимости изменения градиента плотности по высоте насыпи и влияние влажности на изменение данного параметра.

Объяснение процессов неустойчивости насыпей из слабых материалов, имеющих пористую структуру, впитывающих большое количество влаги, может лежать в плоскости появления сил, связанных в сухом состоянии материала и проявляемых при увлажнении. Для параметров, используемых в моделировании, градиент перестает изменяться при высоте насыпи порядка 5-6 м. Для определения коэффициента устойчивости выделенный при расчете объем, ограниченный кривой скольжения, разделяют вертикальными сечениями на ряд блоков, примерно одинаковых по ширине. Границы блоков назначают в местах перелома линии откоса, в местах пересечения границ различных слоев откоса с поверхностью скольжения и т.п.

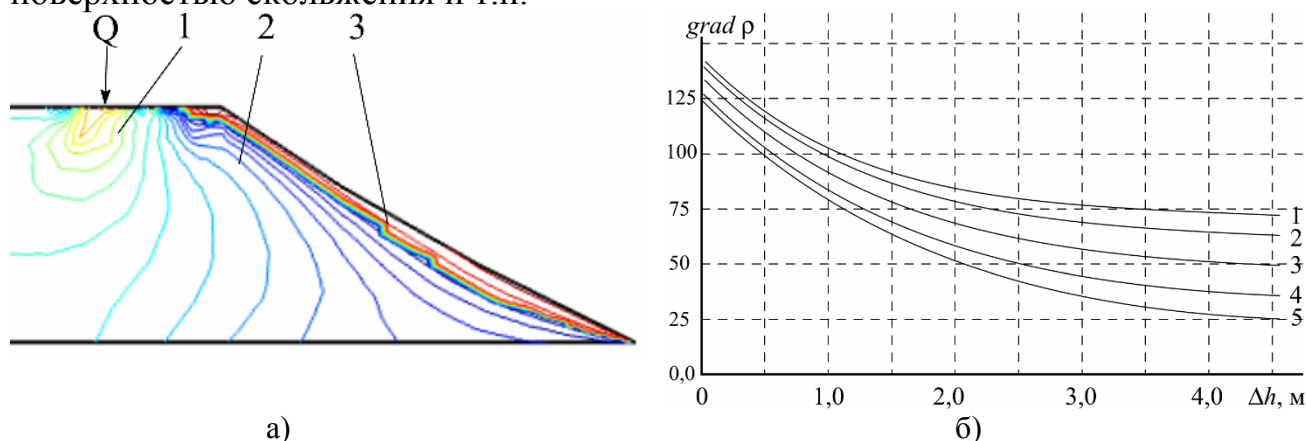


Рис. 2. Изменение угла (а) скольжения материала (2), вызванного воздействием нагрузки Q (1) и возникновением области пластического сдвига (3), градиента плотности (б) по высоте насыпи при различной влажности ее грунта: 1 – сухое состояние, 2 – 20 %, 3 – 50 %, 4 – 80 % и 5 – 95%.

Очевидно, что с увеличением толщины слоя плотность шлако-грунтового композита растет, достигая максимального значения у подошвы в центральной части насыпи, увеличение влажности снижает градиент плотности. Возрастание влажности увеличивает вес верхних слоев материала, что приводит к градиентному росту, и он мало изменяется при высоте 9-11 м. Влажность негативным образом влияет и на другие параметры материала: увеличивает коэффициент Пуассона, снижает внутреннее трение материала, изменяет удельное сцепление

шлако-грунтового композита. На рисунке 3, а показаны величины осадки насыпи, 3, б графики ее изменения в зависимости от коэффициента Пуассона.

В результате моделирования устойчивости дорожного основания в виде высокой насыпи была получена зависимость плотности шлакового композита:

$$\rho = -0,24 \cdot h^2 + 27 \cdot h + 1850, \quad (2)$$

где h – высота насыпи.

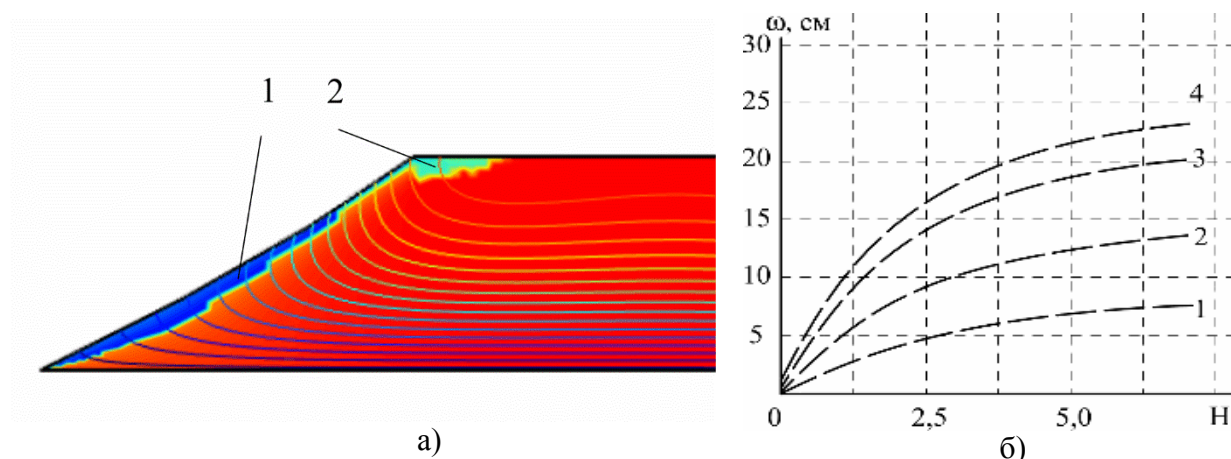


Рис. 3. Изменение величины осадки (а) и графики ее изменения (б) от величины коэффициента Пуассона: 1 – 0,27, 2 – 0,35, 3 – 0,37, 4 – 0,39.

Возникающая осадка насыпи при приложении нагрузки значительная (2) и в первую очередь вызвана переуплотнением частиц материала. На насыпи наблюдаются область пластического сдвига (1), (по Mohr-Colomb Plastic). Этот процесс еще более существенен при увеличении коэффициента Пуассона, в большей степени связанный с прочностью и влажностью материала конструкции.

При оценке физико-химического состояния конвертерного сталеплавильного шлака был определен его фазовый состав. Для этого проводили рентгенофазовый анализ на порошковом рентгеновском дифрактометре «ARLX'TRA». Для проведения исследований мелкозернистый шлак дополнительно перетирался в агатовой ступке до полного прохода пробы через сито 0,63 мм.

По данным рентгенофазового анализа (таблица 2) в состав кристаллической фазы преимущественно входят карбонат кальция CaCO_3 , алюмоферриты кальция и ортосиликат кальция $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ предположительно в устойчивой низкотемпературной γ -форме, которая не обладает гидравлическими свойствами.

Таблица 2 - Минералогический состав кристаллической составляющей шлака

Содержание компонентов, %					
CaCO_3	MgCO_3	Ca_2SiO_4 ($2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$)	$\text{Ca}_2\text{Fe}_7\text{O}_{11}$	$\text{Ca}(\text{Al},\text{Fe})_{12}\text{O}_{19}$	Al_2O_3
54,56	2,47	9,62	16,87	9,15	7,33

В пересчете на оксиды CaO , MgO , FeO , SiO_2 , Al_2O_3 исследуемый шлак имеет основную природу. Из представленных данных следует, что кристалли-

ческая составляющая отвального конвертерного шлака имеет, скорее всего, невысокую гидравлическую активность.

Для создания прочных и устойчивых конструктивных элементов дороги на основе сталеплавильного шлака следует вводить различные вяжущие добавки, способные его структурировать.

При исследовании физико-механических свойств сталеплавильных шлаков, укрепленных высокомодульным жидким стеклом, для математического описания влияния факторов применен метод математического планирования экстремальных экспериментов. Исследовалось изменение предела прочности при сжатии в зависимости от возраста испытания и содержания высокомодульного жидкого стекла (из расчета 15 %: вода + жидкое натриевое стекло) при хранении во влажных условиях методом планирования экстремальных экспериментов.

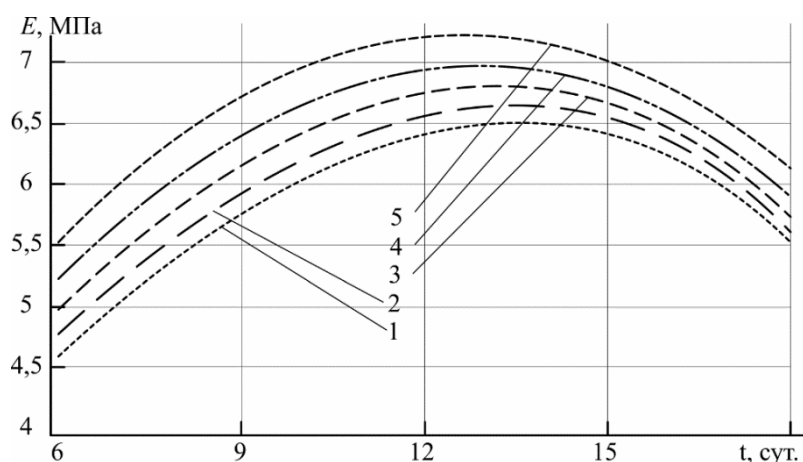


Рис. 4. Изменение предела прочности при сжатии образцов шлакоминеральной смеси в зависимости от содержания высокомодульного стекла и продолжительности испытания при хранении во влажных условиях.

Максимум предела прочности при сжатии наблюдается, как и в первом случае, в возрасте образцов 12,6 суток независимо от содержания в смеси высокомодульного жидкого стекла при варьировании продолжительности испытаний от 4 до 20 суток. Набор прочности во времени будет происходить за счет реакций взаимодействия шлакового материала с высокомодульным натриевым жидким стеклом в количестве от 5,5 до 7,5 %. В результате расчета получена зависимость, связывающая влияние содержания высокомодульного жидкого стекла и возраста испытания на предел прочности при сжатии:

$$R_{сжс} = 6,66 + 0,46 x_1 + 0,31 x_2 + 0,09 x_{12} - 1,44 x_{22}, \quad (3)$$

содержание высокомодульного жидкого стекла x_1 – было принято равным 5,5 %, 6,5 % и 7,5 %; x_2 - возраст испытания, был принят равным – 6, 12 и 18 сут.

Исследования физико-механических свойств сталеплавильного шлака и результатов его взаимодействия с различными вяжущими позволили высказать предположения и привести аргументы в пользу возможности применения его в основаниях и покрытиях автомобильных дорог. После изучения результатов испытаний более двадцати составов установлены зависимости прочностных ха-

рактических полученных композитов на основе сталеплавильных шлаков от количественных и качественных характеристик, входящих в них компонентов.

В третьей главе описаны технологии применения шлако-грунтовых композитов на основе мелкозернистых сталеплавильных шлаков при устройстве земляного полотна; приведены технологические карты и основные положения нормативного документа.

Результаты проведенных лабораторных исследований свидетельствуют о возможности применения сталеплавильных шлаков в различных пропорциях со связными грунтами. При разработке технологических карт на строительство дорог с малой интенсивностью движения необходимо учитывать устойчивость насыпи земляного полотна на подходах к искусственным сооружениям и в местах сосредоточенных работ. Исследования по определению физико-механических свойств, активности в процессах химического взаимодействия со стабилизирующими добавками подтверждают возможность укрепления грунтов сталеплавильным шлаком и использование его в качестве дорожно-строительного материала. Установлено, что композиты на основе сталеплавильного шлака являются медленно твердеющим материалом, повышающим прочностные показатели с течением времени. Устройство земляного полотна и прочных и коррозионно-устойчивых дорожных конструкций на основе этих шлаков может обеспечить продолжительную их эксплуатацию и круглогодичную связь малых населенных пунктов с дорогами общего пользования.

Присутствие натриевого жидкого стекла в композиционном шлакоминеральном материале приводит к образованию структур с фазовыми контактами на основе объединения частиц и формирования первичных химических связей. В подобных структурах можно прогнозировать высокую пластичность, которая зависит от их пористости, дисперсности и условий объединения кристаллов. Увеличение содержания высокомолекулярного жидкого стекла и возраста образцов приводит к повышению прочностных характеристик.

Стабилизированные высокомолекулярным жидким стеклом сталеплавильные шлаки рекомендуется автором данной работы к использованию в строительстве автомобильных дорог после хранения шлака не менее года на открытых площадках под воздействием природно-климатических факторов для завершения самораспада и перехода в устойчивое состояние. Набор прочности шлакоминерального композита происходит за счет реакции взаимодействия шлакового материала с жидким натриевым стеклом.

Для изучения влияния комплексной кремнийсодержащей добавки в виде жидкого стекла на структуру композиционных материалов на основе отвалных сталеплавильных шлаков были выполнены снимки поверхности, образовавшейся при формировании образцов, а также сколов, возникших под воздействием нагрузки в процессе испытания образцов на прочность, рисунок 5.

Физико-механические свойства местных материалов могут быть улучшены различными способами с учетом их экономической целесообразности:

- введением скелетных грунтовых добавок, которые улучшают физико-механические показатели всех грунтов, кроме песчаных и лёссовых;
- добавкой песчаной фракции сталеплавильных шлаков в грунт;

- обработкой органическими вяжущими материалами супесчаных, пылеватых, суглинистых и глинистых грунтов, а также на дорогах с оптимальными грунтовыми и грунтощебеночными смесями;
- стабилизацией грунтов с использованием минеральных вяжущих материалов;

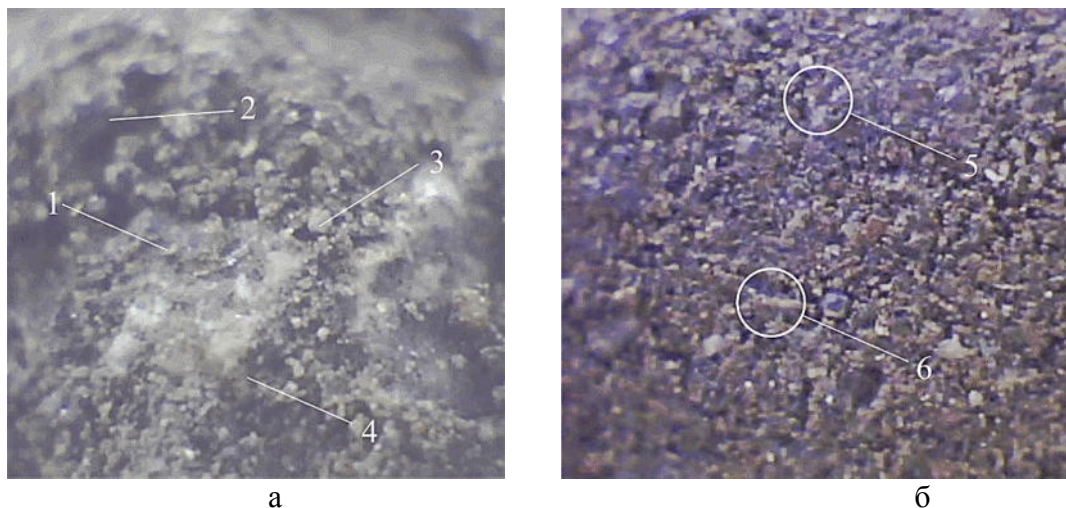


Рис.5. Снимки поверхности образца основного состава в возрасте 28 суток: шлак, жидкое стекло, вода.

- применением жидкого стекла для стабилизации песчаных и просадочных грунтов;
- использованием в грунтовых композитах.

На поверхности сколов (а) образцов композитов, содержащих шлак (2) и жидкое стекло (1) в качестве модифицирующей добавки, просматривается наличие гелеобразных включений (4), обволакивающих зерна шлака и связывающих их между собой. Гелеобразные включения формируются при выдержке образцов в течение 28 суток (5, 6). При сколе формируется развитая сетка трещин по шлаковой компоненте (3).

Экономическая целесообразность применения подобных материалов в общем случае определяется двумя принципиальными условиями:

- каждый нижележащий слой дорожной конструкции должен иметь модуль упругости меньше показателя вышележащего слоя;
- продолжительность эксплуатации нижележащего слоя должна превышать аналогичный показатель вышележащего слоя, т.к. в случае утраты работоспособности нижним слоем приходится нести затраты на ремонт одновременно нижележащего и вышележащего слоев дорожной конструкции.

С учетом этих условий при лабораторных исследованиях были подобраны рецепты композитов, включающие местные связные грунты и сталеплавильные шлаки рядового состава.

Грунт, используемый для лабораторных исследований, был отобран на территории Семилукского района Воронежской области, относится к суглинку тяжелому пылеватому. В качестве активатора твердения были использованы – портландцемент марки 400 и низкомодульное жидкое стекло. Определения зна-

чений предела прочности при сжатии проводились в возрасте образцов 7 и 28 суток. Результаты исследований представлены в таблице 3.

Таблица 3 - Влияние возраста на прочность образцов

Состав смеси	Возраст Образцов, сут	Предел прочности из трех образцов при сжатии, МПа	Результат испытания на морозостойкость
Отсев шлака – 48 %	7	3,20	
Грунт – 48 %	28	4,72	не выдержали 12 циклов
Цемент – 4 %			
Вода – 11 %			
Отсев шлака – 50 %	7	2,23	
Грунт – 50 %	28	2,78	не выдержали 12 циклов
Низкомодульное жидкое стекло – 4 %			
Вода – 11%			
Отсев шлака – 50 %	7	1,78	
Грунт – 50 %	28	2,32	не выдержали 7 циклов
Вода – 10 %			

Анализ полученных результатов свидетельствует о том, что наилучшие показатели предела прочности при сжатии и скорость набора прочности имеют образцы из смеси с использованием в качестве активатора твердения – цемент.

При испытании на морозостойкость образцы с содержанием низкомодульного жидкого стекла выдержали 12 циклов замораживания – оттаивания без видимых деформаций в отличие от образцов из смесей с добавлением цемента и без активных добавок (рис. 6).

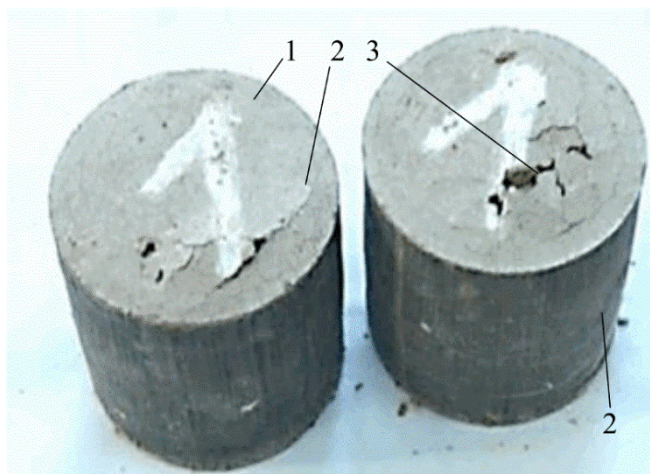


Рис. 6. Образцы из сталеплавильного шлака 48 %, из суглинистого грунта 48 %, 4 % цемента и 13 % воды после 12 циклов МРЗ (1). На поверхности визуальнo наблюдаются деформации распада (3) и формирования трещин (2).

Таким образом, можно сделать вывод о том, что введение в смеси низкомодульного жидкого стекла позволяет замедлить процесс распада шлака.

Предел прочности при сжатии образцов с низкомодульным жидким стеклом в возрасте 28 суток выше на 0,46 МПа, чем у образцов без низкомодульного жидкого стекла.

Для уменьшения влияния степени распада шлака на прочностные показатели и на морозостойкость грунтошлаковых смесей следует увеличить удельную поверхность шлаковой составляющей, что достигается путем помола в шаровой мельнице до удельной поверхности не менее $150 \text{ м}^2/\text{кг}$ (полный остаток на сите 0,071 мм не менее 20 % по массе).

Использование отвальных сталеплавильных шлаков при создании композиционных дорожно-строительных материалов возможно при введении в состав шлакосодержащих композиций компонентов, обладающих структурообразующими свойствами. При проведении исследований в дорожной лаборатории Воронежского государственного технического университета в качестве таких добавок были использованы минеральный кремнийсодержащий реагент (жидкое стекло), портландцемент, известь.

Присутствие жидкого стекла в композиционном шлакоминеральном композите приводит к образованию конденсационно-кристаллических структур, т.е. структур с фазовыми контактами, в результате срастания частиц и образования первичных химических связей. Такие конденсационно-кристаллические связи в структуре могут обладать высокой пластичностью, определяемой их пористостью, дисперсностью и условиями срастания кристаллов.

Увеличение содержания высокомодульного жидкого стекла и возраста образцов приводит к повышению прочностных характеристик. Набор прочности во времени происходит за счет реакций взаимодействия сталеплавильного шлакового материала с высокомодульным жидким натриевым стеклом.

Результаты определения физико-механических свойств мелкозернистого сталеплавильного шлака и связных грунтов и приготовленных из них шлакогрунтовых композитов при различном соотношении компонентов были использованы при разработке методики определения устойчивости высоких насыпей из этих композитов. Повышение качества грунтовых дорог, земляного полотна и оснований дорожной одежды значительно улучшает их механическую прочность, вязкость, морозостойкость, водостойкость, беспыльность и другие эксплуатационные свойства. Применение композитов из шлако-грунтов, а также местных грунтов, укрепленных различными вяжущими в земляном полотне и основании дорожной одежды, повышает их несущую способность, что замедляет процесс накопления пластических деформаций и образования колеи на покрытии автомобильных дорог.

Существующая практика дорожного строительства позволяет считать, что укрепление слабопрочных местных материалов и грунтов с использованием различных вяжущих является наиболее доступным, экономически целесообразным и относительно простым способом, обеспечивающим требуемую долговечность, морозостойкость, водостойкость и высокое качество земляного полотна и основания дорожной одежды.

В настоящее время на территории Воронежской области завершается строительство участка железной дороги в обход Украины протяженностью 138 км от ст. Журавка до ст. Миллерово. Для эффективного решения этой задачи потребуется строительство объездных и подъездных дорог IV - V категорий. Кроме того, для соединения малых сельских поселений в Воронежской области

требуется построить 944 км местных дорог и подъездов. Аналогичные задачи по созданию местной дорожно-транспортной инфраструктуры стоят и перед дорожниками всего Черноземного региона. Поэтому необходимость использования местных малопрочных каменных материалов, укрепленных грунтов и сталеплавильных шлаков не вызывает сомнения.

В четвертой главе описаны технологические процессы по устройству земляного полотна и нижних слоев основания на дорогах местного значения с применением шлакоминеральных композитов. После выполнения подготовительных работ по восстановлению и разбивке трассы дороги, сноса строений и лесных насаждений, а также переноса коммуникаций с полосы постоянного отвода снимается почвенно-растительный слой грунта. Во время производства подготовительных работ осуществляются инженерные мероприятия по обеспечению поверхностного водоотвода.

После снятия почвенно-растительного слоя грунта на толщину, предусмотренную проектом, поверхность разравнивается и доуплотняется катками до значений $K_u = 0,95 \div 0,98$. На подготовленную таким образом поверхность доставляется в равных объемах грунт и сталеплавильный шлак, которые распределяются слоем толщиной до 30 см. Ресайклер за один проход перемешивает грунт со шлаком. При перемещении ресайклера с вращающимся фрезерно-смесительным барабаном в его смесительную камеру подается необходимое для обеспечения оптимальной влажности количество воды из автоцистерны (рис. 7).

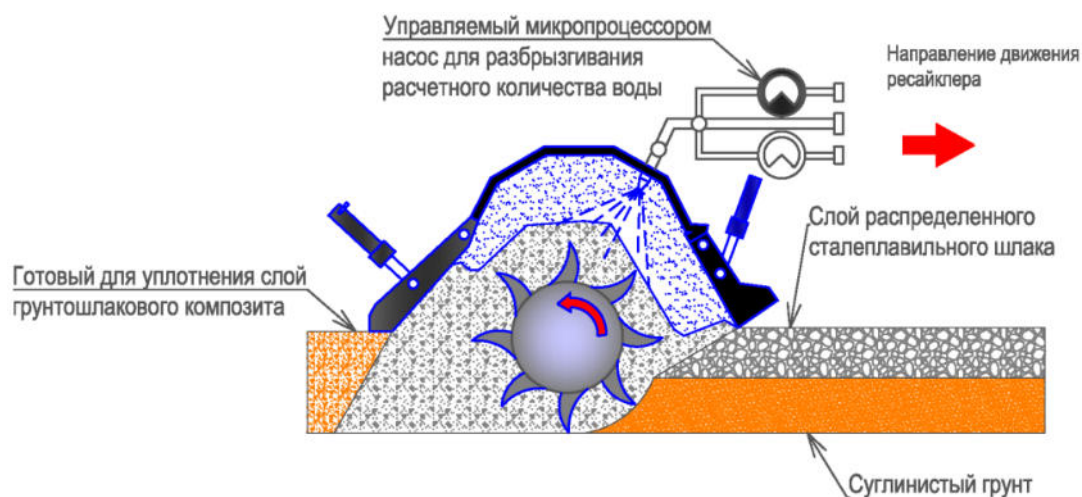


Рис. 7. Схема устройства слоя основания из шлако-грунтового композита ресайклером. Слой полученного однородного грунтошлакового композита после ресайклера уплотняется тяжелым виброкатком с перекрытием каждого предыдущего прохода на треть ширины вальца катка. По условиям безопасности не допускается приближение рабочих органов уплотняющих машин к бровке земляного полотна ближе 0,3 метра.

Для обеспечения нормативного уплотнения шлако-грунтового композита в районе бровок укладка его ресайклером может быть на 0,3 – 0,5 метра с обеих сторон шире проектного очертания. После окончания возведения насыпи при производстве планировочных работ излишний материал срезается и используется для присыпки обочин или устройства насыпи на следующих участках.

Каждый укладываемый слой грунтошлакового композита должен иметь поперечный уклон 30 % в обе стороны от оси дороги. В результате уплотнения слоя его поверхность должна быть ровной, без образования колеи, линз, карманов, в которых могла бы оставаться вода после выпадения осадков.

Переувлажнение шлако-грунтового композита вызывает снижение физико-механических свойств возводимого земляного полотна, что способствует ускорению деформации покрытия под воздействием динамической нагрузки от транспортного потока.

Излишек свободной воды, попавшей в шлако-грунтовой композит, превращается в разрушающую силу в процессе приложения колесной нагрузки.

В связи с тем что вода является несжимаемой составной частью объема, она превращает нагрузку в давление на шлако-грунтовой композит. Можно высказать предположение, что излишняя вода приводит к снижению коэффициента внутреннего трения частиц грунта и он становится более подвижным и деформативным с образованием разрывов сплошности под внешней нагрузкой. Это приводит к образованию трещин, которые увеличиваются, объединяясь, сливаются в более крупные снизу вверх и в конечном итоге проявляют себя на поверхности покрытия проезжей части дороги. Таким образом, в конструктивных слоях могут возникать лакуны, которые провоцируют образование выбоин на покрытии.

При отрицательной температуре в массиве шлако-грунтового композита свободная вода, проникшая через трещины и проломы в коре дорожной одежды через обочины и откосы земляного полотна, замерзает и вследствие этого расширяется. За счет расширения замерзшей воды формируется гидравлическое давление безо всякой нагрузки извне, поэтому при неоднократном переходе температуры через 0° С наблюдается морозное пучение. В результате лабораторных исследований установлено, что в сталеплавильных шлаках происходит три вида распада: силикатный, железистый и известковый, поэтому обеспечить прочность и устойчивость земляного полотна из шлако-грунтового композита в короткие сроки практически невозможно. Возведенное из него земляное полотно на протяжении года подвергается воздействию природно-климатических факторов, а внутри шлако-грунтового массива непрерывно протекают процессы распада шлака и морозное пучение грунтов. Через год выявившиеся деформации и разрушения устраняются разравниванием и подсыпкой, в случае необходимости, дополнительного материала и земляное полотно доуплотняется тяжелыми вибро- или осциллирующими катками. Это не противоречит п. 1.15, п. 3.4 «Руководства по сооружению земляного полотна автомобильных дорог», одобренного Минтрансстроем.

После этого укладывается дренажирующая прослойка и вся конструкция дорожной одежды с асфальтобетонным покрытием. Конструктивная и расчетная схемы дорожной конструкции с использованием шлакогрунтового композита приведены на рис. 8.

При этом рекомендуемый модуль упругости на поверхности земляного полотна не должен быть менее 45 МПа.

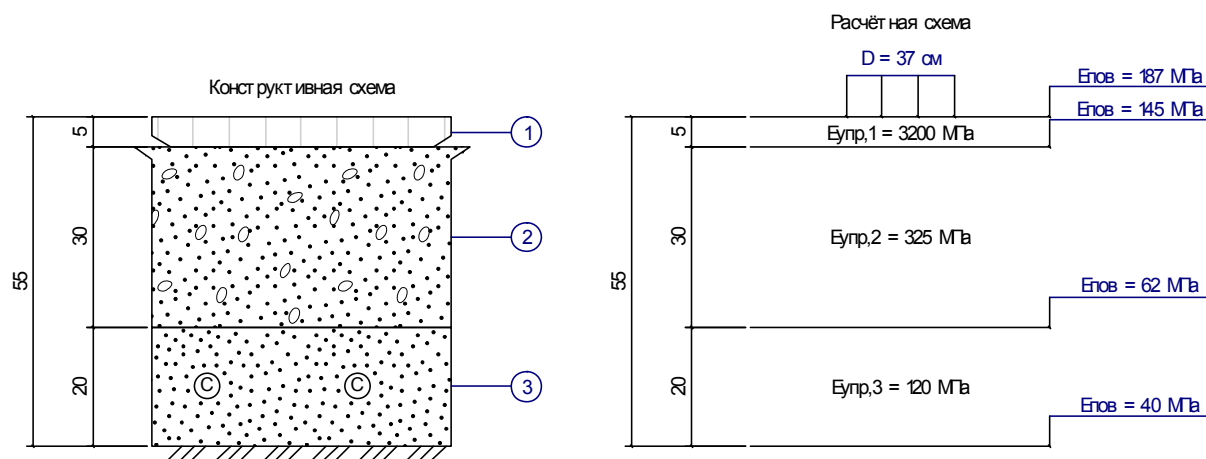


Рис. 8. Конструктивная и расчетная схемы дорожной конструкции с использованием шлакогрунтового композита

Разработана технологическая карта на устройство насыпи земляного полотна автомобильных дорог высотой до 1,5 метра по технологии холодного ресайклинга из шлако-грунтового композита с разработкой грунта в карьере и сталеплавильного шлака в штабеле экскаваторами ЭО-4225 при транспортировке автосамосвалами и укладке ресайклером.

На основании результатов выполненных исследований разработана технологическая карта для использования при разработке проектов производства работ и организации труда при строительстве, а также реконструкции и капитальном ремонте автомобильных дорог с низкой интенсивностью движения. Укрепление добавками цемента шлако-грунтового композита на основе глинистых грунтов и сталеплавильных шлаков можно применять в IV дорожно-климатической зоне с любым типом местности по условиям увлажнения. Общая толщина стабилизированного материала может составлять до 30 см.

В качестве ведущего механизма принят комплект машин фирмы «Wirtgen», состоящий из ресайклинга WR-2500 в комплекте со смесительной установкой WM 400 для стабилизации грунта с рабочей скоростью 5 м/мин, сменной длиной захватки 600 м или 4000 м² основания.

До начала работы ресайклера должны быть подобраны оптимальные составы шлако-грунтового композита и цемента определены его физико-механические свойства, в соответствии с требованиями ГОСТ 23558-94 «Смеси щебеночно-гравийно-песчаные и грунты, обработанные неорганическими вяжущими материалами для дорожного и аэродромного строительства. Технические условия».

Доставка цемента предусмотрена автоцементовозом ТЦ-12 с цистерной вместимостью 16 м³ и скоростью передвижения 40 км/ч. Доставка воды осуществляется универсальной машиной КО 806-06 с объемом бака для воды 8 м³. Загрузка цемента и воды может производиться во время работы комплекта. Основным рабочим органом ресайклера служит фрезерный барабан диаметром 860 мм. Специальные краевые сегменты с резцами обеспечивают чистые стенки отфрезерованной полосы.

При проходах ресайклера смежные полосы перекрывают от 10 до 20 см. Ресайклер стабилизирует грунт в одном направлении с рабочей скоростью 5 м/мин. Скорость обратного (холостого) хода составляет 18-25 м/мин. За ре-

сайклером с интервалом 4 - 5 м по регенерируемой полосе (между колес ресайклера) с такой же скоростью движется вибрационный каток BW 161 AC для прикатки разрыхленной смеси и предотвращения интенсивного влагоиспарения.

Длина участка регенерируемого основания, с учетом сроков начала схватывания цемента, обычно составляет 120 - 150 м. При ширине основания 7 м ресайклер совершает три проходы. Длина сменной захватки принята длиной 600 м. Уплотнение основания осуществляется звеном, состоящим из трех механизмов: каток BW 161 AC, пневмокоток VP 200, вибрационный каток BW 216.

По завершении уплотнения стабилизированного слоя основания по его поверхности запрещается открывать движение минимально на 24 часа, оптимально на 36 часов. Затем производится розлив битумной эмульсии автогудронатором ДС-36Б из расчета 0,6 - 0,9 л/м², после чего устраивается выравнивающий слой (или слой усиления) толщиной 5 см.

Если укладка асфальтобетона невозможна, то нанесенная битумная эмульсия является средством ухода за укрепленным шлако-грунтовым композитом. При этом обеспечивается технологический перерыв продолжительностью 7-10 сут. для набора прочности не менее 70 % от проектной, после чего можно укладывать слой асфальтобетона.

ОБЩИЕ ВЫВООДЫ

1. Анализ теоретических и практических результатов исследований различных отечественных и зарубежных учёных показал, что использование стеллительных шлаков ограничено пролонгированным распадом материала, но, если использовать технологические решения по стабилизации шлако-грунтовых композитов, их можно использовать на подходах к искусственным сооружениям и в местах сосредоточенных работ, добиваясь устойчивости земляного полотна.

2. Разработана методика по определению устойчивости земляного полотна из шлако-грунтовых композитов, отличающаяся от известных учетом изменения плотности материала и коэффициента Пуассона материала земляного полотна и позволяющая оценить устойчивость насыпи различной высоты, заложения откосов и применяемого шлако-грунтового материала.

3. На основе математического моделирования с последующим экспериментальным определением физико-механических свойств моделируемых составов получены регрессионные уравнения прочности шлако-грунтовых композитов в слоях основания дорожной одежды. Использование данных уравнений позволяет прогнозировать прочностные характеристики возводимых сооружений.

4. Разработаны технологические карты по устройству земляного полотна и основания из различных составов шлако-грунтовых композитов на дорогах с малой интенсивностью движения. Применение карт для различных условий является наиболее доступным, экономически целесообразным и относительно простым способом, обеспечивающим требуемую долговечность, морозостойкость, водостойкость и высокое качество земляного полотна и основания дорожной одежды.

5. Разработаны конструкции одежд для дорог с низкой интенсивностью движения, отличающиеся возможностью применения местных материалов и отхо-

дов промышленности и позволяющие применить их в практике дорожного строительства в широком диапазоне нагрузок и интенсивности транспортного потока.

6. Разработаны рекомендации по технологии возведения земляного полотна автомобильных дорог низких категорий из шлако-грунтовых композитов (за год до предполагаемого устройства дорожной одежды и покрытия), отличающиеся применением холодного ресайклера, что позволяет избежать в дальнейшем деформаций и разрушений, связанных с распадом шлака.

7. Оценена эффективность санации дефектных участков покрытия, образовавшихся под действием неблагоприятных климатических условий. Установлено, что протекторы поверхностной пропитки существенно улучшают процесс изоляции пор и трещин шлако-грунтового композита от проникания воды. Это позволяет уменьшить показатели водонасыщения на 20 % и увеличить показатель водостойкости на 8 %.

8. Разработан нормативный документ по применению технологий производства работ и используемых материалов при строительстве, реконструкции, капитальном ремонте и ремонте автомобильных дорог, отличающийся от существующих возможностью использовать шлако-грунтовые композиты на основе сталеплавильного шлака наравне с местными слабопрочными материалами при строительстве дорог с низкой интенсивностью движения, что позволяет уменьшить финансовые затраты и расширить номенклатуру применяемых дорожно-строительных материалов.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

Статьи в изданиях, рекомендуемых ВАК

1. Лукашук А.Г. Результаты качественных исследований структуры композитов на основе сталеплавильных конвертерных шлаков НЛМК / В.П. Подольский, О.В. Слепцова, О.Б. Кукина, А.Г. Лукашук // Научный вестник Воронежского государственного архитектурно-строительного университета. Строительство и архитектура. – 2015. – № 3 (39). – С. 46-53.

2. Лукашук А.Г. Результаты исследований зависимости физико-механических параметров образцов сталеплавильного шлака от содержания высокомолекулярного жидкого стекла / В.П. Подольский, А.Г. Лукашук // Дороги и мосты. – 2016. № 34. – С. 23-38.

3. Лукашук А.Г. Влияние пропитки «Дорлук» на физико-механические характеристики асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог / А. И. Траутвайн, А. Е. Акимов, В. Б. Черногиль, А. Г. Лукашук // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. Белгород. – 2017. №11. – С. 11-17.

4. Лукашук А.Г. Физико-химические методы исследования влияния модификатора «MADOR» на характеристики укрепленного цементом материала / Ф.В. Матвиенко, О.Б. Кукина, А.С. Строкин, А.Г. Лукашук // Научный журнал строительства и архитектуры. – 2023. № 2 (70). – С 94-101.

Публикации в зарубежных научных изданиях

5. Slag – Soil Composites Application for Service Performance Enhancement of the Roads with Low Traffic Density / Vladislav P. Podolsky, Alexandr G.

Lukashuk, Evgeny B. Tykov // Indexed Journal International Journal of Applied Engineering Research (ISAER). – Volume 11. – Number 8 (2016). – pp 5817 – 5821.

6. Vladislav P. Podolsky, Evgeny B. Tykov, Dmitry I. Chernousov, Alexandr G. Lukashuk / Research of Shungit Mineral Powder Effect on Stone-Mastic Asphalt Concrete Deformation Stability in Operating Conditions // Indexed Journal International Journal of Applied Engineering Research (ISAER). – Volume 11. – Number 24 (2016). – pp. 11623-11630.

7. Podolsky Vladislav Petrovich, Lukashuk Alexandr Gennadievich, Tyukov Evgeny Borisovich and Chernousov Dmitry Ivanovich / The Enhancement of Asphalt Concrete Surface Rigidity Based on Application of Shungite-Bitumen Binder, Modified Asphalt Jose Luis Rivera-Armenta and Beatriz Adriana Salazar-Cruz. – IntechOpen, DOI:10.5772/intechopen.76877.–URL:<https://www.intechopen.com/books/modified-asphalt/the-enhancement-of-asphalt-concrete-surface-rigidity-based-on-application-of-shungite-bitumen-binder>.

Публикации в других научных изданиях

8. Лукашук Александр Геннадьевич. Научно-практические результаты использования асфальтового шунгито-битумного вяжущего в дорожном строительстве / В.П. Подольский, А.Г. Лукашук, Д.И. Черноусов // Научный журнал. Инженерные системы и сооружения. 2014. Т. 3. № 4 (17). С. 86-95.

9. Методические рекомендации по применению на территории Воронежской области технологий производства работ и применяемых материалов при строительстве, реконструкции, капитальном ремонте и ремонте автомобильных дорог регионального, межмуниципального и местного значения. Отчет о научно-исследовательской работе по государственному контракту № 7–П (№ 14/16 – Экодор) от 30.06.2016 г. Номер государственной регистрации №А-16-116072610088-6.

ЛУКАШУК АЛЕКСАНДР ГЕННАДЬЕВИЧ

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ СТРОИТЕЛЬСТВА АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ С НИЗКОЙ ИНТЕНСИВНОСТЬЮ ДВИЖЕНИЯ ИЗ ШЛАКО- ГРУНТОВЫХ КОМПОЗИТОВ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Подписано в печать 20.12.2023 г. Формат 60×84 1/16. Усл. печ. л. 1,0. Бумага писчая. Тираж 100 экз. Заказ №
Отпечатано: отдел оперативной полиграфии Издательства учебной литературы и учебно-методических пособий
Воронежского государственного технического университета
394006 г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84