

Исследование эффективности использования шлаков черной металлургии в слоях основания дорожной одежды

Сергей Анатольевич Чернов¹, Евгений Валерьевич Леконцев²,
Виктория Сергеевна Шрейнер¹, Александр Владимирович Фукс³,
Алексей Игоревич Пискунов⁴

¹ Донской государственный технический университет (ДГТУ); г. Ростов-на-Дону, Россия;

² Центр инновационных компетенций ООО «Доринжсервис»; г. Азов, Россия;

³ Общество с ограниченной ответственностью «БФБ» (ООО «БФБ»); г. Москва, Россия;

⁴ Публичное акционерное общество «Новолипецкий металлургический комбинат» (ПАО «НЛМК»); г. Липецк, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Представлены результаты исследования характеристик металлургических шлаков, рассмотрена возможность их применения в органоминеральных смесях для слоев основания дорожной одежды с учетом технологических особенностей их приготовления и показателей эксплуатационных свойств. Тема исследования является актуальной как для отдельных регионов, так и для страны в целом. Количество отходов металлургического производства ежегодно увеличивается и исчисляется сотнями миллионов тонн. Главным направлением снижения отходов производства является их утилизация. Еще большую актуальность данная проблема приобретает на фоне постоянно снижающихся запасов природных материалов, увеличение потребности которых обусловлено высокими темпами развития материального производства и ускорением научно-технического прогресса. Таким образом, применение шлаковых материалов в дорожном строительстве не только способствует утилизации отходов, но и позволит решить ряд экологических и экономических задач. Целью исследования является комплексное изучение влияния шлаков черной металлургии на показатели физико-механических и эксплуатационных свойств органоминеральных смесей слоев основания дорожной одежды и обоснование их эффективного применения в дорожном строительстве. Для реализации поставленной цели необходимо выполнить следующие задачи: 1) определить химический анализ исследуемых шлаков и изучить механизм взаимодействия шлаковых материалов с вяжущими; 2) оценить степень влияния шлаковых материалов на физико-механические и эксплуатационные свойства органоминеральных смесей; 3) разработать методику определения накопления остаточных деформаций в органоминеральных смесях и установить закономерности их изменения во времени; 4) определить модуль жесткости и количество циклов до отказа в исследуемых органоминеральных смесях в зависимости от природы происхождения материала. Сталеплавильные шлаки черной металлургии могут способствовать получению органоминеральных смесей, обладающих повышенными физико-механическими и эксплуатационными показателями свойств, за счет повышенного содержания кальциевых соединений, микропористой сложной кристаллической структуры и активных процессов гидратации, что может оказать благоприятное влияние на долговечность конструктивного слоя дорожной одежды при их применении.

Материалы и методы. Все материалы, используемые в рамках данного исследования, подвергались испытаниям по определению их физико-механических параметров, а материалы, представляющие собой побочные промышленные продукты, дополнительно подвергались химическому анализу. Такой подход позволил оценить соответствие инертных материалов требованиям, предъявляемым в Российской Федерации к исходным материалам для применения их в составе органоминеральных смесей, и выявить критические характеристики материалов, которые могут повлиять на показатели прочностных и эксплуатационных свойств. Применение отходов металлургической промышленности имеет ряд преимуществ перед обычными природными материалами, среди которых низкая экономическая и экологическая стоимость. В качестве отходов металлургической промышленности использовались конверторные и доменные шлаки различной granulometрии. Для оценки химического состава сталеплавильных шлаков был проведен рентгенофлуоресцентный тест. Определение содержания серы производилось на элементном анализаторе путем сжигания навески образца при температуре 1350 °С. Определение содержания углерода производилось на анализаторе общего органического углерода путем сжигания навески образца при температуре 950 °С. Анализ прочих компонентов проводился на атомно-эмиссионном спектрометре с индуктивно-связанной плазмой после разложения образца пробы смесью неорганических кислот. Для подбора составов органоминеральных смесей на комплексном вяжущем были выполнены исследования по изучению характера взаимодействия органического вяжущего со шлаками. Для оценки эффективности применения исследуемых шлаковых материалов были подобраны оптимальные составы органоминеральных смесей в соответствии с ГОСТ 30491–2012, из которых были изготовлены и испытаны образцы цилиндрической формы для показателей физико-механических свойств, а также образцы-плиты и образцы-балочки для показателей эксплуатационных свойств. При проведении экспериментальных исследований применялось универсальное устройство для испытания на сжатие и изгиб Unifate 70-TO108E и пресс испытательный. Оценка степени устойчивости образцов из органоминеральных смесей к накоплению остаточных деформаций осуществлялась на приборе динамических испытаний (патент № RU 152287 U1) в соответствии с разработанной для этих целей методикой испытаний. Для оценки показателей эксплуатационных свойств по модулю жесткости и количеству циклов до отказа и водостойкости выполнена адаптация методологии испытаний, применяемой для оценки качества свойств асфальтобетонов, с учетом технологических условий, характерных для органоминеральных смесей. Для этих целей использовался прибор CRT-RC-H2, имитирующий работу катка, и прибор CRT-SA4PT-BB,

представляющий собой серво-пневматическую систему, подающую на образец-балочку синусоидальную нагрузку с постоянной деформацией и частотой.

Результаты исследования. Проанализирован химический и элементный состав шлаковых материалов, на основании которого определены основные направления возможности применения отходов металлургической промышленности в дорожной отрасли. Изучен механизм взаимодействия шлакового щебня и песка с вяжущими. Установлено, что применение сталеплавильных шлаков позволяет повысить показатели прочностных и эксплуатационных свойств органоминеральных смесей. Разработаны условия испытаний и апробирована методика оценки водостойкости образцов из органоминеральной смеси по пределу прочности при непрямом растяжении, модулю жесткости и количеству циклов до отказа. Предложен метод оценки устойчивости органоминеральных смесей к накоплению остаточных деформаций на приборе динамических испытаний и установлена зависимость изменения показателя во времени. По результатам экспериментальных исследований подтверждена целесообразность, экономическая и экологическая эффективность применения отходов металлургической промышленности в слоях основания конструкции дорожной одежды.

Выводы. Выполнен химический анализ сталеплавильных шлаков, отмечены их положительные стороны и изучен механизм их взаимодействия с вяжущими. Сталеплавильные шлаки черной металлургии позволили получить органоминеральные смеси с повышенными показателями физико-механических и эксплуатационных свойств относительно аналогичных смесей из природных минеральных материалов. Впервые в рамках экспериментальных исследований получены фактические значения эксплуатационных свойств по показателям «остаточные деформации», «модуль жесткости» и «количество циклов до отказа» в органоминеральных смесях из природных и шлаковых материалов, что может быть использовано при принятии проектных решений. Применение органоминеральных смесей из шлаковых материалов в слоях основания на 30–35 % замедляет процессы накопления остаточных деформаций относительно аналогичных смесей из природных минеральных материалов, что позволяет продлить срок службы конструктивного слоя дорожной одежды.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: шлаки, отходы металлургии, остаточные деформации, органоминеральные смеси, модуль жесткости, предел прочности при непрямом растяжении, водостойкость, длительная водостойкость

Благодарности. Авторы выражают благодарность коллегам и анонимным рецензентам за время, затраченное на рассмотрение статьи.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Чернов С.А., Леконцев Е.В., Шрейнер В.С., Фукс А.В., Пискунов А.И. Исследование эффективности использования шлаков черной металлургии в слоях основания дорожной одежды // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 12. С. 1937–1950. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.12.1937-1950

Автор, ответственный за переписку: Сергей Анатольевич Чернов, sergey_a_chernov@mail.ru.

Research of efficiency of ferrous metallurgy slag use in pavement base layers

Sergey A. Chernov¹, Evgeny V. Lekontsev², Victoria S. Schreine¹, Alexander V. Fuchs³, Alexey I. Piskunov⁴

¹ Don State Technical University (DSTU); Rostov-on-Don, Russian Federation;

² Center for Innovative Competences Dorinzhservice LLC; Azov, Russian Federation;

³ Limited Liability Company “BFB” (LLC “BFB”); Moscow, Russian Federation;

⁴ Public Joint Stock Company “Novolipetsk Iron and Steel Works” (NLMK PJSC); Lipetsk, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The results of research of metallurgical slags characteristics are presented, the possibility of their application in organomineral mixtures for pavement base layers is considered, taking into account technological features of their preparation and indicators of operational properties. The research topic is relevant both for individual regions and for the country as a whole. The amount of waste from metallurgical production increases annually and is estimated in hundreds of millions of tons. The main direction of reducing production waste is their disposal. This problem is becoming even more urgent against the background of constantly decreasing reserves of natural materials, the increase in demand for which is due to the high rates of development of material production and the acceleration of scientific and technological progress. Thus, the use of slag materials in road construction will not only contribute to waste disposal, but will also solve a number of environmental and economic problems. The aim of the research is a comprehensive study of the influence of ferrous metallurgy slags on the physical, mechanical and operational properties of organomineral mixtures of pavement base layers and substantiation of their effective application in road construction. To achieve this goal, it is necessary to perform the following tasks: 1) to determine the chemical analysis of the studied slags and to study the mechanism of interaction of slag materials with binders; 2) to assess the degree of influence of slag materials on the physical, mechanical and operational properties of organomineral mixtures; 3) to develop a methodology for determining the accumulation of residual deformations in organomineral mixtures and to establish patterns of their change over time; 4) to determine the modulus of stiffness and the number of cycles to failure in the studied organomineral mixtures, depending on the nature of the origin of the material. Steelmaking slags of ferrous metallurgy can contribute to the production of organomineral mixtures with increased physical, mechanical and operational properties due to the increased content of calcium compounds, microporous additions of the crystal structure and active hydration processes, which can have a beneficial effect on the durability of the structural layer of the pavement when used.

Materials and methods. All materials used in this study were subjected to tests to determine their physical and mechanical parameters, and materials representing industrial by-products were additionally subjected to chemical analysis. This approach

made it possible to assess the compliance of inert materials with the requirements imposed in the Russian Federation for starting materials for their use in organomineral mixtures, and to identify critical characteristics of materials that can affect the strength and performance properties. The use of waste from the metallurgical industry has a number of advantages over conventional natural materials, including low economic and environmental costs. Converter and blast furnace slags of various granulometry were used as waste products of the metallurgical industry. An X-ray fluorescence test was performed to assess the chemical composition of steelmaking slags. The sulfur content was determined on an elemental analyzer by burning a specimen at a temperature of 1350 °C. Carbon content was determined on a total organic carbon analyzer by burning a specimen at a temperature of 950 °C. The analysis of other components was carried out on an atomic emission spectrometer with inductively coupled plasma after decomposition of the specimen with a mixture of inorganic acids. To select the compositions of organomineral mixtures based on a complex binder, studies were carried out to study the nature of the interaction of an organic binder with slags. To assess the effectiveness of the use of the studied slag materials, optimal compositions of organomineral mixtures were selected in accordance with GOST 30491–2012, from which cylindrical specimens were made and tested for indicators of physical and mechanical properties, as well as plate specimens and beam specimens for performance properties. During the experimental studies, a universal device for compression and bending testing, Unifame 70-TO108E, and a test press were used. The degree of stability of specimens from organomineral mixtures to the accumulation of residual deformations was assessed using a dynamic testing device (patent No. RU 152287 U1), in accordance with the test procedure developed for this purpose. To assess the performance parameters in terms of modulus of rigidity and the number of cycles to failure and water resistance, the test methodology used to assess the quality of asphalt concrete properties was adapted, taking into account the technological conditions characteristic of organomineral mixtures. For these purposes, the CRT-RC-H2 device was used, simulating the operation of a roller, and the CRT-SA4PT-BB device, which is a servo-pneumatic system that supplies a sinusoidal load with constant deformation and frequency to the specimen beam.

Research results. The chemical and elemental composition of slag materials is analyzed, on the basis of which the main directions of the possibility of using metallurgical industry waste in the road industry are determined. The mechanism of interaction of slag gravel and sand with binders was studied. It was established that the use of steelmaking slags makes it possible to increase the strength and performance properties of organomineral mixtures. Test conditions were developed and a method for evaluating the water resistance of specimens from an organomineral mixture according to the tensile strength under indirect tension and resistance to the accumulation of residual deformations was tested. A method for assessing the stability of organomineral mixtures to the accumulation of residual deformations on a dynamic test device is proposed and the dependence of the change in the indicator over time is established. According to the results of experimental studies, the expediency, economic and environmental efficiency of using waste from the metallurgical industry in the layers of the base of the pavement structure was confirmed.

Conclusions. A chemical analysis of steelmaking slags was performed, their positive sides were noted and the mechanism of their interaction with binders was studied. Steelmaking slags of ferrous metallurgy made it possible to obtain organomineral mixtures with increased physical, mechanical and operational properties relative to similar mixtures of natural mineral materials. For the first time, within the framework of experimental studies, the actual values of operational properties were obtained in terms of “residual deformations”, “modulus of rigidity” and “number of cycles to failure” in organomineral mixtures of natural and slag materials, which can be used in making design decisions. The use of organomineral mixtures of slag materials in the base layers slows down the accumulation of residual deformations by 30–35 % relative to similar mixtures of natural mineral materials, which makes it possible to extend the service life of the structural layer of the pavement.

KEYWORDS: slags, metallurgical waste, residual deformations, organomineral mixtures, stiffness modulus, indirect tensile strength, water resistance, long-term water resistance

Acknowledgements. The authors would like to thank the editorial board and the anonymous reviewers for their time in reviewing the paper.

FOR CITATION: Chernov S.A., Lekontsev E.V., Schreine V.S., Fuchs A.V., Piskunov A.I. Research of efficiency of ferrous metallurgy slag use in pavement base layers. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(12):1937-1950. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.12.1937-1950 (rus.).

Corresponding author: Sergey A. Chernov, sergey_a_chernov@mail.ru.

ВВЕДЕНИЕ

Повышение безопасности, комфорта и срока службы конструктивных элементов дорожной одежды является важной и актуальной задачей дорожной отрасли. Ежегодно на строительство и ремонт автомобильных дорог расходуется до 30 млн тонн природных дорожно-строительных материалов. Поскольку большинство дорожно-строительных материалов получают из невозобновляемых природных источников, то в процессе их добычи происходит не только изменение ландшафта, но и глобальные выбросы парниковых газов. Альтернативой минеральным материалам по качеству и стоимости может служить применение отходов промышленности, в том числе шлаков черной металлургии. Существующий отечественный [1–3] и зарубежный опыт [4–6] использования шлаковой продукции в строитель-

стве подчеркивают актуальность и значимость проводимых исследований в настоящее время. Однако следует обратить внимание на тот факт, что для расширения области применения шлаковой продукции необходимо, чтобы исходный материал обладал требуемым набором свойств [7–10] и соответствовал нормативно-технической документации. В рамках исследования аналитически и экспериментально осуществлена качественная и количественная оценка эффективности влияния шлаковых материалов на основные показатели физико-механических и эксплуатационных свойств подобранных составов органоминеральных смесей.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В качестве исходных материалов применялись конверторные и доменные шлаки черной металлур-

гии различной гранулометрии (щебни шлаковые фр. 5–10 мм, фр. 10–20 мм и фр. 20–40 мм, песок шлаковый).

Конверторный шлак образуется на первой стадии процесса получения стали, называемой стадией плавки.

Доменный шлак — неметаллический продукт, состоящий в основном из силикатов и алюминатов кальция, который получается вместе со сталью в доменной печи в виде расплава и затем охлаждается. При быстром охлаждении водой, паром или воздухом образуется гранулированный шлак, при медленном — комовой. Высокую гидравлическую активность доменный шлак приобретает при очень быстром охлаждении или грануляции водой. Медленно охлаждаемый шлак успевает до некоторой степени закристаллизоваться, и гидравлические свойства его снижаются. Однако при повышении температуры и давления активность шлака настолько возрастает, что его иногда следует применять с замедлителями сроков схватывания.

Для идентификации химических элементов в шлаковых материалах был проведен рентгенофлуоресцентный тест, а для оценки потенциальных химических соединений, присутствующих в шлаках, был выполнен рентгеноструктурный анализ.

Определение содержания серы производилось на элементном анализаторе путем сжигания навески образца при температуре 1350 °С, а содержания углерода на анализаторе общего органического углерода путем сжигания навески образца при температуре 950 °С.

Анализ прочих компонентов проводился на атомно-эмиссионном спектрометре с индуктивно-связанной плазмой после разложения образца пробы смесью неорганических кислот.

Определение фазового и минерального составов проб шлакового материала проводилось на рентгеновском порошковом дифрактометре.

Применяемые сырьевые материалы: щебни осадочной горной породы фр. 5–10 мм, фр. 10–20 мм и фр. 20–40 мм, песок из отсевов дробления щебня, портландцемент марки ЦЕМ I 42,5Н, минеральный порошок марки МП-1 (неактив.), эмульсия битумная дорожная катионная медленнораспадающаяся марки ЭБДК-М. В соответствии с требованиями ГОСТ 30491–2012¹, табл. 1, для проектируемых составов органоминеральных смесей предъявлены следующие требования: максимальная крупность зерен щебня — 40 мм; содержание щебня — не более 70 % по массе; содержание зерен мельче 0,63 мм — не менее 12 % по массе; содержание зерен мельче 0,071 мм — не нормируется; марка по дробимости (прочности) — не менее 800. В качестве органического вяжущего

использовалась эмульсия битумная дорожная катионная медленнораспадающаяся марки ЭБДК-М по ГОСТ Р 58952.1–2020². Процентное содержание битумной эмульсии во всех исследуемых смесях составляло 3, 4 и 5 %. В качестве неорганического вяжущего использовался портландцемент ЦЕМ I 42,5Н по ГОСТ 31108–2020³. Процентное содержание портландцемента во всех исследуемых смесях составляло 2 и 4 %.

Подбор состава осуществлялся в соответствии с ГОСТ 12801–98⁴.

Условие твердения образцов — нормальное.

Исследования проводились для следующих смесей:

- органоминеральная смесь из природных минеральных материалов плотной горной породы, укрепленная органическим вяжущим с добавлением портландцемента;
- органоминеральная смесь из конверторных шлаков, укрепленных органическим вяжущим с добавлением портландцемента;
- органоминеральная смесь из доменных шлаков, укрепленных органическим вяжущим с добавлением портландцемента.

Образцы испытывались на соответствие требованиям по следующим *физико-механическим показателям*: предел прочности на сжатие при температуре 20 и 50 °С в возрасте 14 суток; водонасыщение; набухание; водостойкость и водостойкость при длительном водонасыщении.

В качестве *показателей эксплуатационных свойств* определялись предел прочности при непрямом растяжении, коэффициент водостойкости по методу TSR, устойчивость к накоплению остаточных деформаций на приборе динамических испытаний, модуль жесткости и количество циклов до отказа.

Для определения предела прочности при непрямом растяжении и коэффициента водостойкости были изготовлены для каждой смеси по 6 образцов, которые в дальнейшем были разделены на две группы. Образцы первой группы выдерживали на воздухе при температуре (22 ± 3) °С в течение (24 ± 3) ч, а затем помещали в герметичный полиэтиленовый пакет. Образцы второй группы водонасыщали в вакуумной установке с давлением (2000 ± 100) Па в течение (5 ± 1) мин. После доведения давления до атмосферного образцы в воде не выдерживали. Насыщенные водой образцы помещали в полиэтиленовые пакеты, каждый отдельно, и добавляли (10 ± 1) мл воды. Образцы в плотно закрытых полиэтиленовых пакетах помещали в морозильную камеру при температу-

² ГОСТ Р 58952.1–2020. Дороги автомобильные общего пользования. Эмульсии битумные дорожные. Технические требования.

³ ГОСТ 31108–2020. Цементы общественные. Технические условия.

⁴ ГОСТ 12801–98. Материалы на основе органических вяжущих для дорожного и аэродромного строительства.

¹ ГОСТ 30491–2012. Смесей органоминеральные и грунты, укрепленные органическими вяжущими, для дорожного и аэродромного строительства. Технические условия.

ре минус (18 ± 3) °С на срок не менее 16 ч. По прошествии указанного времени вынимали образцы из морозильной камеры и в полиэтиленовых пакетах помещали в водяной термостат при температуре (60 ± 1) °С на (24 ± 1) ч. Далее образцы из первой группы в герметичных пакетах и из второй группы без пакетов помещали в воду с температурой (25 ± 1) °С на (120 ± 10) мин. Уровень воды над поверхностью образцов составлял 25 мм. После термостатирования измеряли толщину каждого образца t и определяли максимальную нагрузку при сжатии P с использованием пресса и нагрузочных пластин. Нагрузку прикладывали вертикально по диаметральной оси образца. Для каждого испытуемого образца вычисляли предел прочности при непрямом растяжении S , кПа, по формуле:

$$S = \frac{2000P}{\pi tD},$$

где P — максимальная нагрузка, Н; t — толщина образца, мм; D — диаметр образца, мм.

За результат определения предела прочности при непрямом растяжении принимали среднеарифметическое значение трех определений образцов первой группы.

Коэффициент водостойкости TSR вычисляли как отношение среднеарифметических значений пределов прочности при непрямом растяжении между второй и первой группой образцов по формуле:

$$TSR = (S_2)/(S_1),$$

где S_2 — среднеарифметическое значение предела прочности при непрямом растяжении образцов из второй группы, кПа; S_1 — среднеарифметическое значение предела прочности при непрямом растяжении образцов из первой группы, кПа.

Модуль жесткости и количество циклов до отказа определяли на образцах-балочках, сформованных из исследуемых органоминеральных смесей. Для подготовки к проведению испытаний были

сформованы образцы-плиты на приборе CRT-RC-H2 (рис. 1), при этом органоминеральная смесь и форма не нагревались. Принцип работы прибора основан на имитации работы катка: сектор цилиндра с контролируемым усилием прокатывается по поверхности образца в форме. Окончание работы происходит по достижении заданного количества циклов или степени уплотнения. В общей сложности было сформовано 36 образцов-плит для всех исследуемых органоминеральных смесей. Образцы-плиты выдерживались в камерах нормального твердения до требуемого возраста проведения испытаний.

Из образца-плиты с помощью распиловочной установки отпиливали по три образца-балочки следующих размеров: длина (380 ± 6) мм; высота (50 ± 6) мм; ширина (63 ± 6) мм. Штангенциркулем измеряли высоту и ширину образца с точностью до 0,1 мм в трех точках, равноудаленных друг от друга по длине испытуемого образца. Определяли среднее значение трех измерений каждого габарита и фиксировали его с точностью до 0,1 мм. Непосредственно перед испытанием образцы-балочки термостатировались в климатической камере при заданной температуре испытаний не менее 3 часов. Затем образец-балочку устанавливали в прибор для определения усталостного трещинообразования CRT-SA4PT-BB (рис. 2), который представляет собой серво-пневматическую систему, подающую на образец синусоидальную нагрузку с постоянной деформацией и частотой. После начала испытания на образец подавалась циклическая нагрузка с постоянной частотой и деформацией. После выбора соответствующих параметров тестирования включали установку, устанавливали необходимую периодичность записи результатов и начинали испытание. Испытания завершали, как только модуль жесткости образца снижался на 50 %. Для всех испытаний были заданы следующие условия: температура испытания + 10 °С; частота приложения нагрузки 5 Гц; деформация 75 мкм/м.



Рис. 1. Прибор CRT-RC-H2

Fig. 1. CRT-RC-H2 device





Рис. 2. Прибор CRT-SA4PT-BB

Fig. 2. CRT-RC-H2 device

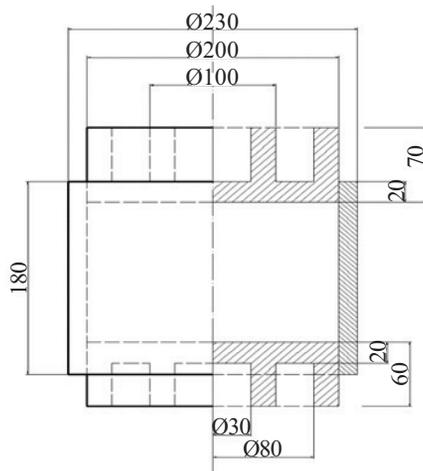


Рис. 3. Форма для изготовления образцов-цилиндров высотой 100 мм

Fig. 3. A mold for the manufacture of cylinder specimens with a height of 100 mm

Испытания проводились для органоминеральных смесей оптимального состава, выдержанных в камере нормального твердения 7, 14, 28, 42 и 56 суток.

Определение накопления остаточных деформаций осуществлялось на приборе динамических испытаний. Для изготовления цилиндрических образцов использовалась стальная форма с диаметром 200 мм и двумя вкладышами (верхний и нижний) (рис. 3).

Смесь перемешивали и засыпали в форму в 3 приема, равномерно распределяя и штыкуя каждый слой 25 раз металлическим стержнем диаметром 12–18 мм. После укладки всей смеси производили ее уплотнение в один прием методом прессования под давлением 20 МПа. Время выдержки образцов под расчетной нагрузкой составляло 3 мин. После снятия нагрузки образец извлекался из формы вместе с нижним вкладышем (для предотвращения разрушения готового образца). Контроль высоты лабораторных образцов производился в четырех точках, принадлежащих вза-

имно перпендикулярным сечениям, проходящим через центр образца. Четыре измерения не отличались друг от друга более чем на 2 мм. Значение толщины образца вычисляли как среднее арифметическое четырех измерений. Затем образец помещался в камеру нормального твердения набора для набора прочности. Образцы на приборе ПДИ испытывали в промежуточном возрасте (1 и 7 суток) и в возрасте 14, 28, 42 и 56 суток. Перед испытанием образец помещали в стальную форму бокового обжатия (рис. 4), промежутки между стенками формы и образца заполняли гипсовым раствором. К испытанию приступали только после полного застывания гипса.

От обжимающей формы отделяли нижнее съемное основание и помещали форму с образцом непосредственно в прибор динамических испытаний (рис. 5).

Для передачи динамической нагрузки на образец использовался металлический штамп диаметром 100 мм, который размещался по центру образца. Для проверки соосности расположения штампа и толкателя подъемный стол с установленным об-

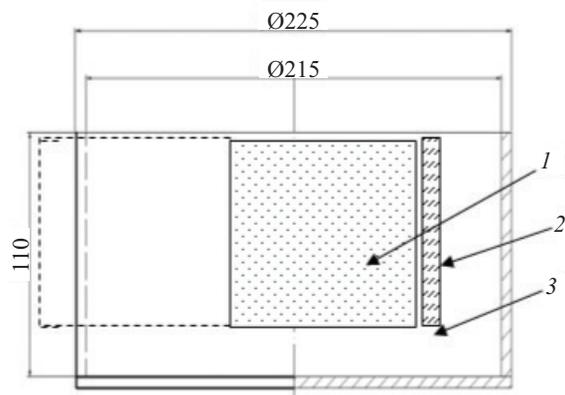


Рис. 4. Форма для испытания образцов высотой до 150 мм: 1 — образец; 2 — гипс; 3 — съемное основание

Fig. 4. A mold for testing specimens up to 150 mm high: 1 — specimen; 2 — plaster; 3 — removable base



Рис. 5. Общий вид прибора динамических испытаний
Fig. 5. General view of the dynamic test device

разцом поднимался вращением энкодера до соприкосновения верха шарнира с толкателем. При верном расположении образца и штампа металлический шар штампа должен попасть в углубление толкателя.

Испытания проводились в автоматическом режиме с использованием разработанной программы PDI. Предварительно в программу были внесены следующие исходные данные: частота приложений нагрузки — 15 Гц; максимальная нагрузка — 320 кг (0,4 МПа); температура испытания — без нагрева; количество приложений нагрузки — 400 000. По достижении заданного количества приложений нагруз-

ки прибор отключался в автоматическом режиме. По результатам экспериментальных исследований строился график зависимостей деформаций, мм, от количества приложений нагрузки (времени).

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Химический анализ материалов из побочных промышленных продуктов предполагает элементный анализ, позволяющий выявить органическую часть шлака, а также оценить возможную карбонизацию и гидратацию соединений.

Результаты атомно-эмиссионной спектроскопии исследуемого шлака представлены в табл. 1.

Химический состав исследуемого материала определялся методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой и представлен в оксидной форме в табл. 2.

Результаты дифрактометрического анализа показали, что образцы представлены в основном портландитом ($\text{CaO} \cdot \text{H}_2\text{O}$), магнетитом (Fe_3O_4), бруситом ($\text{Mg}(\text{OH})_2$), кальцитом (CaCO_3), сперритом ($2\text{Ca}_2\text{SiO}_4 \cdot \text{CaCO}_3$), алюминатом кальция ($5\text{CaO} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3$), шпинелью (MgAl_2O_4), периклазом (MgO), силикатом кальция (Ca_2SiO_4).

По результатам петрографического исследования сталеплавильный конверторный шлак можно отнести к кристаллическим изверженным породам типа долеритов и габбро-долеритов.

Шлаковые материалы с высоким содержанием двух и трехвалентных катионов Ca^{+2} , Mg^{+2} , Fe^{+2} , Fe^{+3} образуют сравнительно прочные и плотные системы.

Хуже взаимодействуют с битумом зерна щебня, песка и частицы порошка с высоким потенциалом отрицательного заряда и значительным количеством адсорбционных центров в виде ионов O^{-2} (кварцит, гранит и т.д.). При контакте с органическим вяжущим такие материалы вызывают явление отрицательной

Табл. 1. Результаты атомно-эмиссионной спектроскопии исследуемого образца сталеплавильного щебня

Table 1. Results of atomic emission spectrometry of the studied specimen of steelmaking crushed stone

Химический элемент A chemical element	Фракция, мм Fraction, mm				
	Менее 0,063 Less than 0.063	От 0,063 до 0,250 From 0.063 to 0.250	От 0,250 до 0,500 From 0.250 to 0.500	От 4,0 до 10,0 From 4.0 to 10.0	Более 10,0 More than 10.0
C, %	1,54	1,31	1,00	0,77	0,69
S, %	0,14	0,12	0,10	0,07	0,06
Fe, %	12,88	16,50	21,00	18,88	18,50
Ca, %	30,00	29,40	28,10	32,10	32,60
Mg, %	4,88	3,80	2,94	2,29	3,04
Mn, %	0,95	1,01	0,98	1,39	1,84
Cr, %	0,09	0,11	0,10	0,13	0,14
Zn, %	0,07	0,08	0,08	0,06	0,17
Al, %	1,11	1,22	1,30	1,41	2,03
Si, %	5,78	5,78	6,04	5,14	7,14
Ti, %	0,13	0,15	0,19	0,21	0,26
V, %	0,08	0,09	0,08	0,10	0,11

Табл. 2. Химический состав исследуемого образца сталеплавильного шлака

Table 2. Chemical composition of the steelmaking slag specimen under study

Фракция, мм Fraction, mm	Менее 0,063 Less than 0.063	От 0,063 до 0,250 From 0.063 to 0.250	От 0,250 до 0,500 From 0.250 to 0.500	От 4,0 до 10,0 From 4.0 to 10.0
Fe ₃ O ₄ , %	17,8	22,8	29	23,5
CaO, %	42,0	41,2	39,3	44,7
MgO, %	8,1	6,3	4,9	4,5
Al ₂ O ₃ , %	2,1	2,3	2,5	3,1
SiO ₂ , %	12,4	12,39	12,9	12,0

адсорбции. При объединении минеральных материалов с вяжущим наряду с сорбционными процессами происходит его фильтрация внутрь зерен минерального материала.

У металлургических шлаков (относительно гидрофобных материалов) этот процесс протекает интенсивно и зависит главным образом от характера пористости. Для песчаников и гранитов (более гидрофильных материалов) этот процесс менее выражен и обуславливается микропористостью за счет капиллярной фильтрации. Наличие микропор на поверхности зерен приводит к избирательной диффузии компонентов органического вяжущего. Масла проникают по капиллярам в зерна на большую глубину. Смолы из-за меньшей подвижности и большей активности проникают на меньшую глубину.

В целом взаимодействие органического вяжущего с кристаллическими шлаками различного сложения протекает интенсивно, так как на их границе реализуются физические, механические, химические, электростатические и диффузионные процессы. А поэтому адгезионные связи на границе «вяжущее – шлаковый материал» прочные и устойчивые к воздействию окружающей среды.

Повышенное содержание кальциевых соединений (табл. 2) обуславливает лучшее сцепление шлаков с органическим вяжущим в сравнении с кислыми породами. Исследования для изучения характера взаимодействия битума со шлаками, проводимые ранее [5], установили, что относительно плотные с микропористым сложением кристаллической структуры шлаки сорбируют органическое вяжущее со значительным изменением его химического группового состава. От центра к периферии зерна размещаются масла, а затем смолы. Асфальтены, почти не проникая вглубь, постепенно переходят к объемному битуму.

Экспериментальные исследования по оценке степени воздействия шлаковых материалов на свойства органоминеральных смесей для слоев основания дорожных одежд позволили выявить их положительное влияние [11–13] не только на прочностные показатели физико-механических свойств, но и на эксплуатационные показатели качества, непосредственно оказывающие влияние на продолжительность их срока службы.

Экспериментально установлено, что при содержании 2 % портландцемента в органоминеральных сме-

сях показатели «предел прочности на сжатии при температуре 20 °С» (рис. 6) и «предел прочности на сжатии при температуре 50 °С» (рис. 7) в смесях из шлаковых материалов выше на 20–30 %, чем в смесях из природных минеральных материалов плотной горной породы [14, 15].

При 4 % портландцемента наибольшей прочностью на сжатие при температуре 20 и 50 °С (рис. 6, 7) обладают смеси из конверторных шлаков, что обусловлено их плотной структурой, в отличие от смесей из доменных шлаков, что во многом связано с повышенным набуханием данных смесей из-за пористой структуры доменных шлаков [16].

Анализ результатов испытаний образцов из органоминеральных смесей по показателям «водостойкость» и «водостойкость при длительном водонасыщении» показал, что водостойкость органоминеральных смесей из конверторных шлаков [17] практически не изменяется от процентного содержания портландцемента и является лучшей относительно всех исследуемых смесей.

Показатель «предел прочности при непрямом растяжении» с увеличением процентного содержания битумной эмульсии и портландцемента возрастает.

Анализ результатов испытаний (рис. 8) позволил сделать вывод, что в образцах из шлаковых материалов [18] при равных условиях испытаний наблюдается увеличение фактических значений показателя «предел прочности при непрямом растяжении» относительно результатов испытаний образцов из органоминеральной смеси из природных минеральных материалов.

Таким образом, требуемые результаты могут быть достигнуты при меньшем содержании цемента в смеси за счет активности самих шлаков и их химического состава [19, 20].

Показатель «водостойкости TSR» (рис. 9) в смесях из шлаковых материалов выше, чем у смесей из природных минеральных материалов, что во многом связано с высоким содержанием кальциевых соединений (табл. 2) в шлаковых материалах и за счет этого — лучшим сцеплением вяжущего с поверхностью шлаковых частиц.

Результаты испытаний органоминеральных смесей, укрепленных 4 % битумной эмульсии с добавлением 4 % портландцемента, по показателям эксплуатационных свойств «модуль жесткости» и «коли-

Табл. 3. Модуль жесткости образцов-балочек из органоминеральных смесей, укрепленных 4 % битумной эмульсии с добавлением 4 % портландцемента

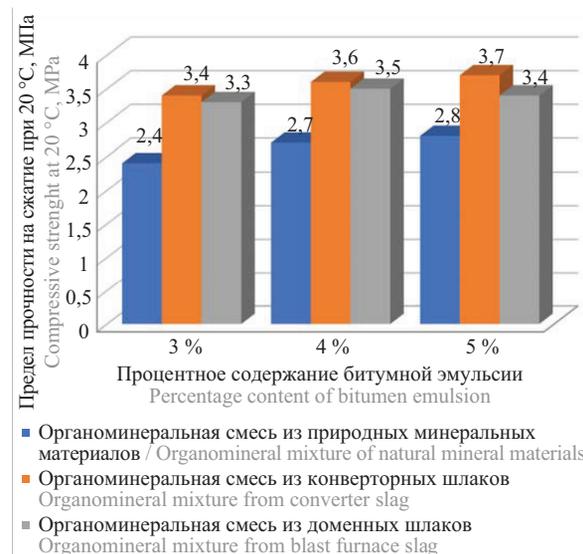
Table 3. Stiffness modulus of beam specimens made of organomineral mixtures reinforced with 4 % bituminous emulsion with 4 % Portland cement added

Наименование смеси Name of mixture	Модуль жесткости, МПа Modulus of rigidity, MPa				
	Возраст испытанных образцов, в сутках Age of tested specimens, in days				
	7	14	28	42	56
Органоминеральная смесь из природных минеральных материалов Organomineral mixture of natural mineral materials	7600	8800	9300	9400	9450
Органоминеральная смесь из конверторных шлаков Organomineral mixture from converter slag	8200	9400	10 200	10 500	10 750
Органоминеральная смесь из доменных шлаков Organomineral mixture from blast furnace slag	7950	9150	9850	10 150	10 300

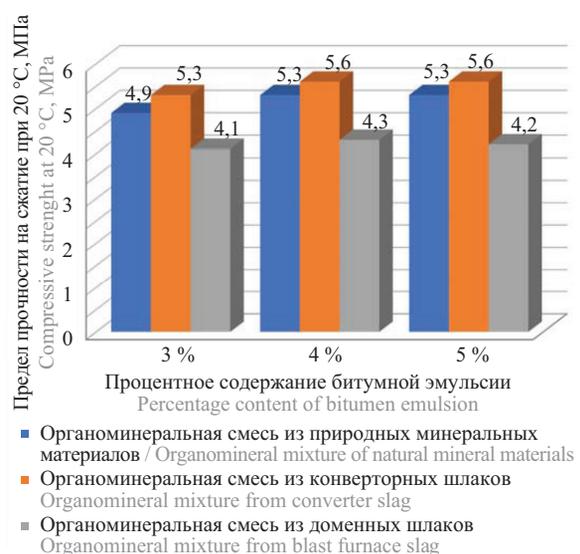
Табл. 4. Количество циклов до отказа образцов-балочек из органоминеральных смесей, укрепленных 4 % битумной эмульсии с добавлением 4 % портландцемента

Table 4. Number of cycles to failure of beam specimens made of organomineral mixtures reinforced with 4 % bituminous emulsion with 4 % Portland cement added

Наименование смеси Name of mixture	Количество циклов до отказа Number of cycles to failure				
	Возраст испытанных образцов, в сутках Age of tested specimens, in days				
	7	14	28	42	56
Органоминеральная смесь из природных минеральных материалов Organomineral mixture of natural mineral materials	93 300	92 200	91 200	90 150	88 750
Органоминеральная смесь из конверторных шлаков Organomineral mixture from converter slag	86 200	88 500	89 100	90 400	91 200
Органоминеральная смесь из доменных шлаков Organomineral mixture from blast furnace slag	83 400	86 100	88 200	89 850	91 100



a



b

Рис. 6. Предел прочности на сжатие при температуре 20 °С в зависимости от процентного содержания битумной эмульсии: *a* — при 2 % портландцемента; *b* — при 4 % портландцемента

Fig. 6. Compressive strength at a temperature of 20 °C depending on the percentage of bitumen emulsion content: *a* — at 2 % Portland cement; *b* — at 4 % Portland cement

чество циклов до отказа» представлены в табл. 3, 4. Органоминеральные смеси из шлаковых материалов обладают большим модулем жесткости, который возрастает в зависимости от времени выдерживания образцов-балочек в камере нормального твердения [21, 22], что обусловлено процессами гидратации и омоноличивания, протекающими в шлаковых материалах со временем.

Важным показателем качества является устойчивость к накоплению остаточных деформаций.

Как известно, слои основания устраиваются достаточно большой толщины, а их качество оказывает непосредственное влияние на долговечность конструктивных вышележащих слоев из асфальтобетона.

Результаты на накопление остаточных деформаций представлены на рис. 10.

Установлено, что к 28-м суткам времени набора прочности органоминеральных смесей, укрепленных комплексным вяжущим, происходит резкое уменьше-

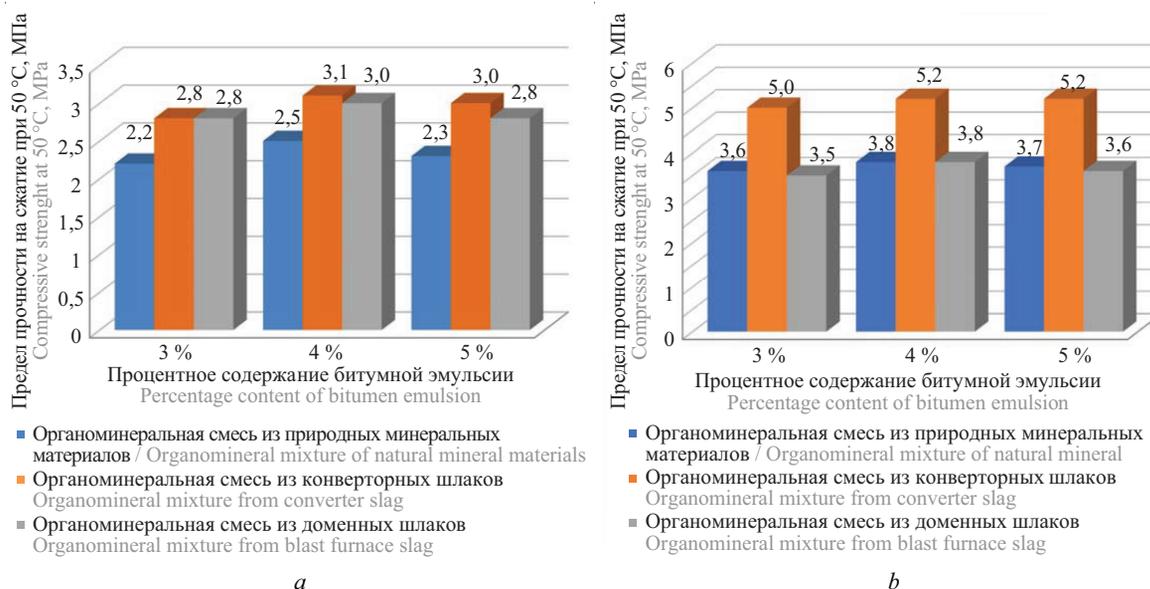


Рис. 7. Предел прочности на сжатие при температуре 50 °С в зависимости от процентного содержания битумной эмульсии: а — при 2 % портландцемента; б — при 4 % портландцемента

Fig. 7. Compressive strength at a temperature of 50 °C depending on the percentage of bitumen emulsion content: a — at 2 % Portland cement; b — at 4 % Portland cement

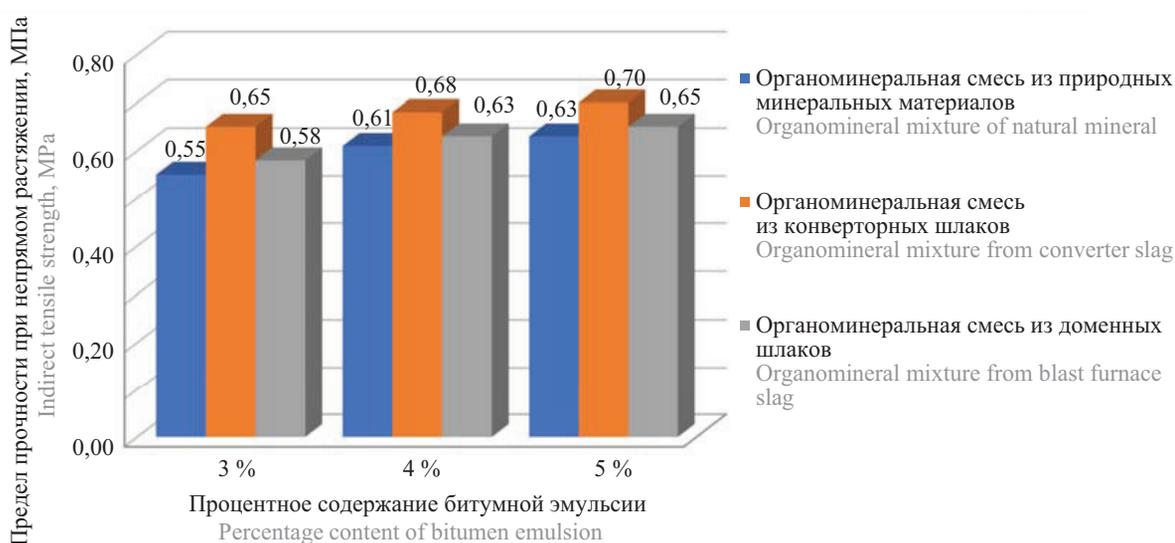


Рис. 8. Предел прочности при непрямом растяжении в зависимости от процентного содержания битумной эмульсии при 4 % портландцемента

Fig. 8. Indirect tensile strength as a function of percentage of bitumen emulsion at 4 % Portland cement

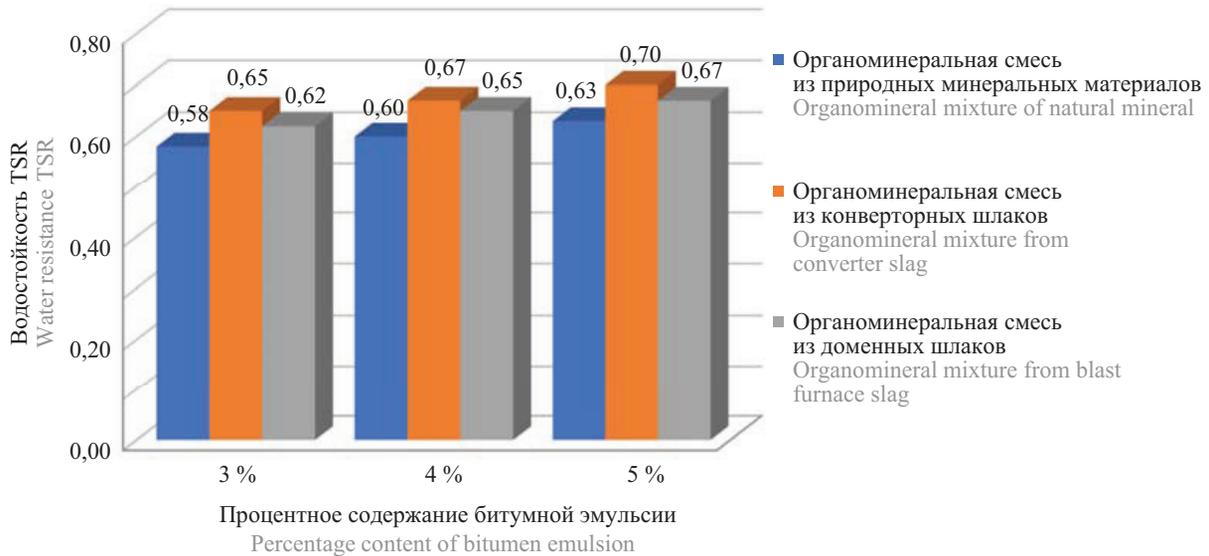


Рис. 9. Показатель «водостойкости TSR» в зависимости от процентного содержания битумной эмульсии при 4 % портландцемента

Fig. 9. Water resistance TSR as a function of percentage of bitumen emulsion at 4 % Portland cement

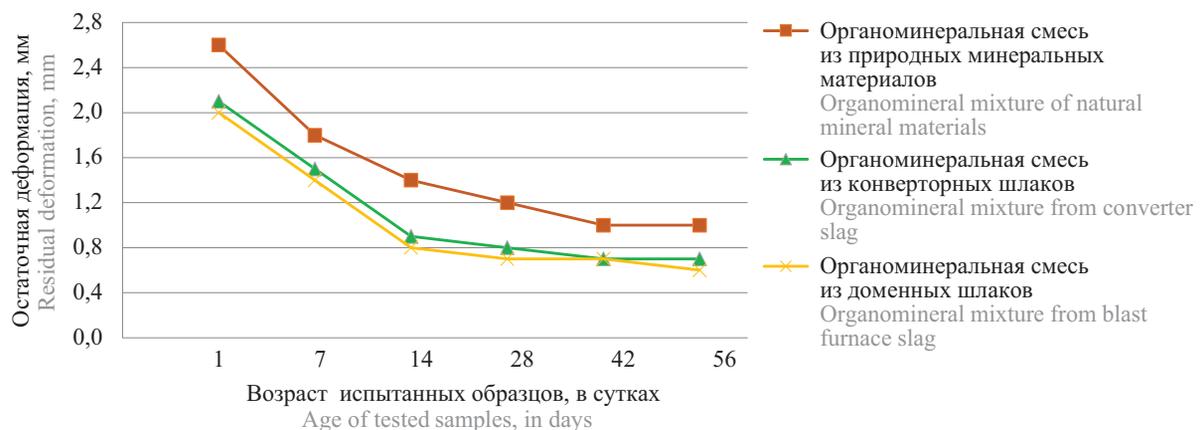


Рис. 10. Накопление остаточных деформаций в образцах из органоминеральных смесей, укрепленных 4 % битумной эмульсии с добавлением 4 % портландцемента

Fig. 10. Accumulation of residual deformations in specimens made of organomineral mixtures reinforced with 4 % bituminous emulsion and 4 % Portland cement added

ние накопления остаточных деформаций во всех исследуемых смесях.

Устойчивость к накоплению остаточных деформаций в органоминеральных смесях из шлаковых материалов на 30–35 % выше, чем в смесях из природных минеральных материалов плотной горной породы. При испытании образцов на 42 и 56-е сутки выдерживания в камере нормального твердения продолжается незначительное уменьшение накопления остаточных деформаций для органоминеральных смесей из шлаковых материалов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Химический анализ сталеплавильных шлаков, анализ их физических и физико-механических

свойств, а также изучение механизма их взаимодействия с вяжущими позволили получить органоминеральные смеси оптимального гранулометрического состава с высокими физико-механическими и эксплуатационными показателями качества.

Установлено, что по своим свойствам шлаковые материалы не уступают природным материалам и могут быть использованы в качестве альтернативного материала в дорожном строительстве.

Предложенные методы испытаний органоминеральных смесей по показателям эксплуатационных свойств позволили выявить преимущества шлаковых материалов относительно природных минеральных материалов.

Впервые получены значения остаточных деформаций, модуля жесткости и количества циклов до отказа в органоминеральных смесях из природных и шлаковых материалов, что может быть использовано в дальнейшем при разработке нормативно-технической документации и при принятии проектных решений.

Применение органоминеральных смесей из шлаковых материалов в слоях основания на 30–35 % замедляет процессы накопления остаточных деформаций относительно аналогичных смесей из природных минеральных материалов, что позволяет продлить срок службы конструктивного слоя дорожной одежды.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. *Abdullah H.H., Shahin M.A., Walske M.L., Karrech A.* Cyclic behaviour of clay stabilised with fly-ash based geopolymer incorporating ground granulated slag // *Transportation Geotechnics*. 2021. No. 26. P. 100430. DOI: 10.1016/j.trgeo.2020.100430
2. *Шестаков Н.И., Кориунов А.В., Путилин С.В.* Перспективы применения шлака медеплавильного производства в дорожном строительстве // *Строительство и реконструкция*. 2021. № 6. С. 90–97. DOI: 10.33979/2073-7416-2021-98-6-90-97. EDN HSHJQP.
3. *Пименов А.Т., Прибылов В.С.* Применение шлаковых заполнителей в составе асфальтобетона для повышения долговечности дорожных покрытий // *Вестник СибАДИ*. 2019. № 16 (6). С. 766–769. DOI: 10.26518/2071-7296-2019-6-766-779. EDN UDBGMM.
4. *Motevalizadeh S.M., Sedghi R., Rooholamini H.* Fracture properties of asphalt mixtures containing electric arc furnace slag at low and intermediate temperatures // *Construction and Building Materials*. 2020. No. 240. Article 117965. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117965
5. *Keymanesh M.R., Ziari H., Zalnezhad H., Zalnezhad M.* Mix design and performance evaluation of microsurfacing containing electric arc furnace (EAF) steel slag filler // *Construction and Building Materials*. 2020. Article 121336. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121336
6. *Orešković M., Santos J., Mladenović G., Rajaković-Ognjanović V.* The feasibility of using copper slag in asphalt mixtures for base and surface layers based on laboratory results // *Construction and Building Materials*. 2023. P. 384. Article 131285. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131285
7. *Raposeiras A.C., Movilla-Quesada D., Bilbao-Novoa R., Cifuentes C., Ferrer-Norambuena G., Castro-Fresno D.* The use of copper slags as an aggregate replacement in asphalt mixes with RAP: physical–chemical and mechanical behavioural analysis // *Construction and Building Materials*. 2018. No. 190. Pp. 427–438. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.09.120
8. *Yang J., Liu L., Zhang G., Ding Q., Sun X.* The Preparation of Ground Blast Furnace Slag-Steel Slag Pavement Concrete Using Different Activators and Its Performance Investigation // *Buildings*. 2023. No. 13 (7). P. 1590. DOI: 10.3390/buildings13071590
9. *Cahyani R.A.T., Rusdianto Y.* An Overview of Behaviour of Concrete with Granulated Blast Furnace Slag as Partial Cement Replacement // *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*. 2021. No. 933 (1). P. 012006. DOI: 10.1088/1755-1315/933/1/012006
10. *Ahmad J., Kontoleon K.J., Majidi A., Naqash M.T., Deifalla A.F., Ben Kahla N. et al.* A Comprehensive Review on the Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBS) in Concrete Production // *Sustainability*. 2022. No. 14. P. 8783. DOI: 10.3390/su14148783
11. *Popescu D., Burlacu A.* Considerations on the benefits of using recyclable materials for road construction // *Romanian Journal of Transport Infrastructure*. 2017. No. 6. Pp. 43–53. DOI: 10.1515/rjti-2017-0053
12. *Icula L.M., Corbu O., Iliescu M., Dumitras D.G.* Using the blast furnace slag as alternative source in mixtures for the road concrete for a more sustainable and a cleaner environment // *Romanian Journal of Transport Infrastructure*. 2020. No. 50. Pp. 545–555.
13. *Ling Y., Wang K., Li W., Shi G., Lu P.* Effect of slag on the mechanical properties and bond strength of fly ash — Based engineered geopolymer composites // *Composites Part B: Engineering*. 2019. No. 164. Pp. 747–757. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.01.092
14. *Thakur Nisha, Saklecha P.P.* Comparison of properties of steel slag and natural aggregate for road construction. 2019. URL: <https://ssrn.com/abstract=3376488> DOI: 10.2139/ssrn.3376488
15. *Li Chuangmin, Liu Qiangdong, Ding Xikun, Liu Lubiao, Li Minggu, Li Huihui et al.* Large-size macadam mixture stabilized with industrial solid waste fly ash and slag powder: A new mixture to improve the performance of pavement base material. URL: <https://ssrn.com/abstract=4697933> DOI: 10.2139/ssrn.4697933
16. *Черникова И.И., Кострикина Т.В., Тюмнева К.В., Ермолаева Т.Н.* Применение стандартных образцов доменных, сталеплавильных, конверторных шлаков и сварочных плавящихся флюсов при разработке методики анализа шлакообразующих смесей методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой // *Стандартные образцы*. 2017. № 3–4. С. 29–40. DOI: 10.20915/2077-1177-2017-13-3-4-29-40. EDN USNGNX.
17. *Zalnezhad M., Hesami E.* Effect of steel slag aggregate and bitumen emulsion types on the performance of microsurfacing mixture // *Journal of Traffic and Transportation Engineering*. 2020. No. 7. Pp. 215–226. DOI: 10.1016/j.jtte.2018.12.005
18. *Смирнов Д.С., Мавлиев Л.Ф., Хузиахметова К.Р., Мотыйгуллин И.Р.* Влияние минеральной добавки на основе молотого доменного шлака на свойства

бетонов и бетонных смесей // Известия КГАСУ. 2022. № 4 (62). С. 61–69. DOI: 10.52409/20731523_2022_4_61

19. Behiry A.E.A.E.M. Evaluation of steel slag and crushed limestone mixtures as subbase material in flexible pavement // Ain Shams Engineering Journal. 2013. Vol. 4. No. 1. Pp. 43–53. DOI: 10.1016/j.asej.2012.07.006

20. Papayianni I., Anastasiou E. Effect of granulometry on cementitious properties of ladle furnace slag // Cement and Concrete Composites. 2012. No. 34. Pp. 400–407. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2011.11.015

21. Li J., Cao S., Yilmaz E. Characterization of macro mechanical properties and microstructures of cement-based composites prepared from fly ash, gypsum and steel slag // Minerals. 2022. No. 12. P. 6. DOI: 10.3390/min12010006

22. Yüksel I., Bilir T., Ozkan Ö. Durability of concrete incorporating non-ground blast furnace slag and bottom ash as fine aggregate // Building & Environment. 2007. No. 42 (7). Pp. 2651–2659. DOI: 10.1016/j.buildenv.2006.07.003

Поступила в редакцию 4 марта 2024 г.

Принята в доработанном виде 3 октября 2024 г.

Одобрена для публикации 15 октября 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: **Сергей Анатольевич Чернов** — кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры автомобильных дорог; **Донской государственный технический университет (ДГТУ);** 34400, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1; РИНЦ ID: 649095, Scopus: 57204526095, ResearcherID: ADF-9841-2022, ORCID: 0009-0007-5532-2604; sergey_a_chernov@mail.ru;

Евгений Валерьевич Леконцев — кандидат технических наук, руководитель Центра инновационных компетенций; **Центр инновационных компетенций ООО «Доринжсервис»;** 346780, г. Азов, ул. Южная, д. 7; РИНЦ ID: 781914, ORCID: 0009-0006-4245-6286; cikdis@mail.ru;

Виктория Сергеевна Шрейнер — ассистент кафедры автомобильных дорог; **Донской государственный технический университет (ДГТУ);** 34400, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1; РИНЦ ID: 1234101; hanna0504@mail.ru;

Александр Владимирович Фукс — кандидат экономических наук, заместитель генерального директора; **Общество с ограниченной ответственностью «БФБ» (ООО «БФБ»);** 121205, г. Москва, б-р Большой (Инновационного Центра Сколково), д. 42, стр. 1, эт. 0, пом. 327 РАБ 2; comerc@dornerud.ru;

Алексей Игоревич Пискунов — начальник отдела развития продаж и технической поддержки; **Публичное акционерное общество «Новолипецкий металлургический комбинат» (ПАО «НЛМК»);** 398040, г. Липецк, пл. Металлургов, д. 2; piskunov_ai@nlmk.com.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Abdullah H.H., Shahin M.A., Walske M.L., Karrech A. Cyclic behaviour of clay stabilised with fly-ash based geopolymer incorporating ground granulated slag. *Transportation Geotechnics*. 2021; 26:100430. DOI: 10.1016/j.trgeo.2020.100430

2. Shestakov N.I., Korshunov A.V., Putilin S.V. Prospects for the application of copper melting slag in road construction. *Building and Reconstruction*. 2021; (6):90-97. DOI: 10.33979/2073-7416-2021-98-6-90-97. EDN HSHJQP. (rus.).

3. Pimenov A.T., Pribylov V.S. The use of slag aggregates in asphalt concrete to increase the durability of road surfaces. *Bulletin of SibADI*. 2019; 16(6):766-769. DOI: 10.26518/2071-7296-2019-6-766-779. EDN UDBGMM. (rus.).

4. Motevalizadeh S.M., Sedghi R., Rooholamini H. Fracture properties of asphalt mixtures containing electric arc furnace slag at low and intermediate temperatures. *Construction and Building Materials*. 2020; 240:117965. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117965

5. Keymanesh M.R., Ziari H., Zalnezhad H., Zalnezhad M. Mix design and performance evaluation of microsurfacing containing electric arc furnace (EAF) steel slag filler. *Construction and Building Materials*. 2020; 121336. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.121336

6. Orešković M., Santos J., Mladenović G., Rajaković Ognjanović V. The feasibility of using copper slag in asphalt mixtures for base and surface layers based on laboratory results. *Construction and Building Materials*. 2023; 384:131285. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2023.131285

7. Raposeiras A.C., Movilla-Quesada D., Bilbao-Novoa R., Cifuentes C., Ferrer-Norambuena G., Castro-Fresno D. The use of copper slags as an aggregate replacement in asphalt mixes with RAP. physical-chemical and mechanical behavioural analysis. *Construction and Building Materials*. 2018; 190:427-438. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.09.120

8. Yang J., Liu L., Zhang G., Ding Q., Sun X. The Preparation of ground blast furnace slag-steel slag pavement concrete using different activators and its per-

formance investigation. *Buildings*. 2023; 13(7):1590. DOI: 10.3390/buildings13071590

9. Cahyani R.A.T., Rusdianto Y. An overview of behaviour of concrete with granulated blast furnace slag as partial cement replacement. *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*. 2021; 933(1):012006. DOI: 10.1088/1755-1315/933/1/012006

10. Ahmad J., Kontoleon K.J., Majdi A., Naqash M.T., Deifalla A.F., Ben Kahla N. et al. A Comprehensive Review on the Ground Granulated Blast Furnace Slag (GGBS) in concrete production. *Sustainability*. 2022; 14:8783. DOI: 10.3390/su14148783

11. Popescu D., Burlacu A. Considerations on the benefits of using recyclable materials for road construction. *Romanian Journal of Transport Infrastructure*. 2017; 6:43-53. DOI: 10.1515/rjti-2017-0053

12. Icula L.M., Corbu O., Iliescu M., Dumitraş D.G. Using the blast furnace slag as alternative source in mixtures for the road concrete for a more sustainable and a cleaner environment. *Romanian Journal of Transport Infrastructure*. 2020; 50:545-555.

13. Ling Y., Wang K., Li W., Shi G., Lu P. Effect of slag on the mechanical properties and bond strength of fly ash — Based engineered geopolymer composites. *Composites Part B: Engineering*. 2019; 164:747-757. DOI: 10.1016/j.compositesb.2019.01.092

14. Thakur Nisha, Saklecha P.P. *Comparison of Properties of Steel Slag and Natural Aggregate for Road Construction*. 2019. URL: <https://ssrn.com/abstract=3376488> DOI: 10.2139/ssrn.3376488

15. Li Chuangmin, Liu Qiangdong, Ding Xikun, Liu Lubiao, Li Minggu, Li Huihui et al. *Large-Size macadam mixture stabilized with industrial solid waste fly ash and slag powder: A new mixture to improve the performance of pavement base material*. URL: <https://ssrn.com/abstract=4697933> DOI: 10.2139/ssrn.4697933

16. Chernikova I.I., Kostrikina T.V., Tyumneva K.V., Ermolaeva T.N. Using reference materials of blast furnace slag, steelmaking slag, converter slag and fused fluxes when developing a procedure for analysis of slag-forming mixtures using inductively coupled plasma atomic emission spectrometry. *Reference Materials*. 2017; 3-4:29-40. DOI: 10.20915/2077-1177-2017-13-3-4-29-40. EDN USNGNX. (rus.)

17. Zalnezhad M., Hesami E. Effect of steel slag aggregate and bitumen emulsion types on the performance of microsurfacing mixture. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*. 2020; 7:215-226. DOI: 10.1016/j.jtte.2018.12.005

18. Smirnov D.S., Mavliev L.F., Khuziakhmetova K.R., Motygullin I.R. Effect of mineral additive based on ground blast furnace slag on the properties of concrete and concrete mixtures. *News KSUAE*. 2022; 4(62):61-69. DOI: 10.52409/20731523_2022_4_61

19. Behiry A.E.A.E.M. Evaluation of steel slag and crushed limestone mixtures as subbase material in flexible pavement. *Ain Shams Engineering Journal*. 2013; 4(1):43-53. DOI: 10.1016/j.asej.2012.07.006

20. Papayianni I., Anastasiou E. Effect of granulometry on cementitious properties of ladle furnace slag. *Cement and Concrete Composites*. 2012; 34:400-407. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2011.11.015

21. Li J., Cao S., Yilmaz E. Characterization of Macro Mechanical Properties and Microstructures of Cement-Based Composites Prepared from Fly Ash, Gypsum and Steel Slag. *Mineral*. 2022; 12:6. DOI: 10.3390/min12010006

22. Yüksel I., Bilir T., Ozkan Ö. 2007. Durability of Concrete Incorporating Non-Ground Blast Furnace Slag and Bottom Ash as Fine Aggregate. *Building & Environment*. 2007; 42(7):2651-2659. DOI: 10.1016/j.buildenv.2006.07.003

Received March 4, 2024.

Adopted in revised form on October 3, 2024.

Approved for publication on October 15, 2024.

B I O N O T E S : **Sergey A. Chernov** — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Highways; **Don State Technical University (DSTU)**; 1 Gagarin sq., Rostov-on-Don, 34400, Russian Federation; RSCI ID: 649095, Scopus: 57204526095, ResearcherID: ADF-9841-2022, ORCID: 0009-0007-5532-2604; sergey_a_chernov@mail.ru;

Evgeny V. Lekontsev — Candidate of Technical Sciences, Head of the Center for Innovative Competencies; **Center for Innovative Competences Dorinzhservice LLC**; 7 Yuzhnaya str., Azov, 346780, Russian Federation; RSCI ID: 781914, ORCID: 0009-0006-4245-6286; cikdis@mail.ru;

Victoria S. Schreiner — Assistant of the Department of Highways; **Don State Technical University (DSTU)**; 1 Gagarin sq., Rostov-on-Don, 34400, Russian Federation; RSCI ID: 1234101; hanna0504@mail.ru;

Alexander V. Fuchs — Candidate of Economic Sciences, Deputy General Director; **Limited Liability Company “BFB” (LLC “BFB”)**; 42 Bolshoy Boulevard (Skolkovo Innovation Center), 1 floor, 0 room, 327 ROOM 2, Moscow, 121205, Russian Federation; comerc@dornerud.ru;

Alexey I. Piskunov — Head of Sales Development and Technical Support Department; **Public Joint Stock Company “Novolipetsk Iron and Steel Works” (NLMK PJSC)**; 2 Metallurgov sq., 2 Lipetsk, 398040, Russian Federation; piskunov_ai@nlmk.com.

Contribution of the authors: all authors made an equivalent contribution to the publication.

The authors declare no conflicting interests.