



## Асфальтобетон с использованием минерального порошка на основе электросталеплавильных шлаков

Т. В. Аниканова<sup>1</sup> ✉, А. С. Погромский<sup>2</sup>, Е. А. Лукаш<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет

Москва, Ярославское шоссе, 26, 129337, Российская Федерация

<sup>2</sup> Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова

Белгород, ул. Костюкова, 46, 308012, Российская Федерация

✉ [anik.tv@yandex.ru](mailto:anik.tv@yandex.ru)



**Аннотация.** Применение электросталеплавильных шлаков в дорожном строительстве позволяет снизить стоимость выпускаемой продукции, а также решает важную экологическую проблему, сокращая площади, занятые отвалами. В лабораторных условиях чаще всего ведется разработка рецептур применения электросталеплавильных шлаков в качестве щебня, песка, минерального порошка для асфальтобетонов без учета влияния сроков хранения в отвалах на свойства шлаковых материалов. В процессе длительного хранения шлаков происходят изменения его фазового состава, поэтому использование минерального порошка на основе шлака электросталеплавильного производства текущего выхода и шлака, хранившегося в отвалах более 5 лет, требует предварительного анализа его свойств. Проведена регистрация ИК-спектров битумов после их взаимодействия с минеральными материалами на основе электросталеплавильных шлаков различного срока хранения в отвалах. Исследованы физико-механические характеристики асфальтобетона при введении в его состав шлакового минерального порошка и представлены рекомендации по использованию электросталеплавильных шлаков в дорожном строительстве с учетом процессов старения, происходящих при хранении шлаков в отвалах. ИК-спектроскопия показала, что время хранения шлака в отвалах не оказывает существенного влияния на диффузию легких фракций битума в поры шлакового минерального материала. При применении шлаков электросталеплавильного производства в качестве минерального порошка для асфальтобетона шлаки текущего выхода и шлаки, хранившиеся в отвалах несколько лет, действуют схожим образом, наиболее эффективным будет применение минерального порошка на основе шлака текущего выхода.

**Ключевые слова:** электросталеплавильный шлак, шлак текущего выхода, хранение в отвалах, минеральный порошок

**Для цитирования:** Аниканова Т. В., Погромский А. С., Лукаш Е. А. Асфальтобетон с использованием минерального порошка на основе электросталеплавильных шлаков. *Архитектура, строительство, транспорт*. 2025;5(4):64–73. <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2025-4-64-73> EDN: BJBOES

## Asphalt concrete using mineral powder based on electric steelmaking slag

Tatiana V. Anikanova<sup>1</sup> ✉, Alexey S. Pogromsky<sup>2</sup>, Evgeny A. Lukash<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Moscow State University of Civil Engineering (National Research University)  
Moscow, 26 Yaroslavskoye Shosse, 129337, Russian Federation

<sup>2</sup> Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov  
Belgorod, 46 Kostyukova St., 308012, Russian Federation

✉ anik.tv@yandex.ru



**Abstract.** The use of electric steelmaking slag in road construction allows decreasing the cost of the produced products, and solves an important environmental problem by reducing the areas occupied by dumps. In laboratory conditions, recipes for using the electric steelmaking slags as crushed stone, sand, and mineral powder for asphalt concrete are most often developed without taking into account the effect of shelf life in dumps on the properties of slag materials. During the long-term storage of slag, its phase composition changes, so the use of mineral powder based on electric steelmaking slag of current output and slag stored in dumps for more than 5 years requires preliminary analysis of its properties. IR spectra of bitumen were recorded after their interaction with mineral materials based on electric steelmaking slags of various shelf life in dumps. The physical and mechanical characteristics of asphalt concrete were examined with the introduction of slag mineral powder into its composition, and recommendations were provided for using electric steelmaking slags in road construction, taking into account the aging processes occurring during the slag storage in dumps. According to IR spectroscopy, the storage time of slag in dumps does not significantly affect the diffusion of bitumen light fractions into the pores of the slag mineral material. When using electric steelmaking slag as a mineral powder for asphalt concrete, current-output slag and slag stored in dumps for several years behave similarly. The most effective approach is to use current-output slag as a mineral powder.

**Keywords:** electric steelmaking slag, current output slag, storage in dumps, mineral powder

**For citation:** Anikanova T. V., Pogromsky A. S., Lukash E. A. Asphalt concrete using mineral powder based on electric steelmaking slag. *Architecture, Construction, Transport*. 2025;5(4):64–73. (In Russ.) <https://doi.org/10.31660/2782-232X-2025-4-64-73>



## 1. Введение / Introduction

Применение шлаков в различных отраслях промышленности и строительства позволяет улучшить экологическую обстановку, снизить стоимость выпускаемой продукции, а также сократить площади, занимаемые отвалами. По данным Росприроднадзора, в Российской Федерации площадь территорий, находящихся под свалками и отвалами, составляет более 4 млн га (информация на 2023 г.)<sup>1</sup>. Ежегодно площадь этих территорий увеличивается примерно на 0.4 млн га, что связано в том числе и с увеличением объемов шлаковых отвалов. Хранение шлаков в отвалах не только занимает плодородные территории, но и приводит к загрязнению почв и водоемов. В настоящее время переработанные шлаки широко используются в строительстве, энергетике, сельском хозяйстве. Особенно большое внимание уделяется применению шлаков в дорожном строительстве, этот вопрос, в частности, отражен в работах [1–7].

Наиболее широкое распространение получили доменные шлаки, так как отличаются наиболее стабильными свойствами. Они используются в дорожном строительстве в качестве песка, щебня, минерального порошка [8–10]. В отличие от доменных шлаков, шлаки сталеплавильного производства применяются реже. Это связано с их нестабильными физико-механическими характеристиками,

<sup>1</sup> К 2050 году нелегальные свалки могут занять 1 % площади России. URL: <https://nia.eco/2023/11/10/72705/?ysclid=mhyjmoahte280538603> (дата обращения: 12.08.2025).

которые изменяются в процессе хранения шлаков в отвалах и зависят от многих показателей: скорости охлаждения шлака, его химического состава, структуры, наличия в нем различных добавок, времени выдерживания до полного или частичного силикатного распада ортосиликатов кальция. При охлаждении  $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  переходит из  $\beta$ -формы в  $\gamma$ -форму, что сопровождается резким увеличением объема и, следовательно, повышением дисперсности шлаковых частиц. Кроме этого, различия минералогического состава шлаков свежего слива и отвальных шлаков обуславливаются наличием процессов карбонизации свободного  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  с образованием мелкодисперсного  $\text{CaCO}_3$ .

В настоящее время использование электросталеплавильных шлаков в слоях оснований дорожных одежд как в чистом виде, так и в составе шлакоизвесткового вяжущего достаточно активно изучается [11, 12]. Исследования [13–19] указывают на большой разброс показателей физико-механических свойств асфальтобетонов, содержащих в своем составе сталеплавильные шлаки, что связано с применением в асфальтобетонных смесях шлаков различного минералогического состава. Следует отметить, что работы, посвященные применению шлаков электросталеплавильного производства в качестве минерального порошка, чаще всего связаны с исследованием конкретного отхода [20–23] и не дают полного представления об изменении свойств в процессе хранения в отвалах.

Цель данной работы заключалась в исследовании свойств асфальтобетона с использованием шлакового минерального порошка с учетом изменения его свойств со временем выдержки в отвалах, а также особенностей его взаимодействия с битумом.

Объектом исследования работы был электросталеплавильный шлак, который является технологическим продуктом сталеплавильного производства Оскольского электрометаллургического комбината (Белгородская область). Этот шлак самопроизвольно измельчается во время хранения в процессе карбонизации в отвалах. Для исследования были отобраны пробы шлака текущего выхода и хранившиеся в отвалах 5, 10 и 18 лет.

Исследование взаимодействия битума с минеральными материалами на основе электросталеплавильных шлаков позволит оценить возможность их использования в дорожном строительстве. Применение шлаков электросталеплавильного производства текущего выхода и хранившихся в отвалах несколько лет в качестве минерального порошка для асфальтобетона приведет к снижению стоимости асфальтобетона, а также к улучшению экологической обстановки в регионах, имеющих отвалы шлака.

## 2. Материалы и методы / Materials and methods

Свойства битума и свойства минерального порошка на основе шлаков электросталеплавильного производства определялись в соответствии с требованиями государственных стандартов Российской Федерации. Фактические значения показателей и требования ГОСТ 33133-2014<sup>2</sup> и ГОСТ 52129-2003<sup>3</sup> приведены в таблицах 1 и 2.

Из данных таблицы 2 видно, что минеральный порошок на основе электросталеплавильного шлака текущего выхода, а также на основе шлака, хранившегося в отвалах 5, 10 и 18 лет, соответствует

<sup>2</sup> ГОСТ 33133-2014. Межгосударственный стандарт. Дороги автомобильные общего пользования. Битумы нефтяные дорожные вязкие. Технические требования = Automobile roads of general use. Viscous road petroleum bitumens. Technical requirements. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200121335?ysclid=mhyolzo868457384626> (дата обращения: 15.08.2025).

<sup>3</sup> ГОСТ 52129-2003. Государственный стандарт РФ. Порошок минеральный для асфальтобетонных и органоминеральных смесей. Технические условия = Mineral powders for asphaltic concrete and organomineral mixtures. Specifications. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200034281?ysclid=mhyp0aydb6508554237> (дата обращения: 15.08.2025).

Таблица 1. Свойства битума  
Table 1. Bitumen properties

Наименование показателя	Требования ГОСТ 33133-2014	Фактические значения
Глубина проникания иглы при 25 °С, 0.1 мм	71–100	78
Растяжимость при 25 °С, не менее	62	67
Растяжимость при 0 °С, не менее	3.7	5
Температура размягчения по кольцу и шару, °С, не ниже	47	49
Температура хрупкости, °С, не выше	–18	–21
Изменение температуры размягчения после старения, °С, не более	7	3
Индекс пенетрации	от –1.0 до +1.0	–0.4

Таблица 2. Свойства минеральных порошков на основе электросталеплавильных шлаков различного срока хранения в отвалах  
Table 2. Properties of mineral powders based on electric steelmaking slag with various storage durations in dumps

Наименование показателя	Требования ГОСТ 52129-2003	Минеральный порошок на основе электросталеплавильного шлака			
		текущего выхода	5 лет хранения	10 лет хранения	18 лет хранения
Зерновой состав, % по массе: мельче 1.25 мм мельче 0.315 мм мельче 0.071 мм	не менее 95 от 80 до 95 не менее 60	98.15 90.32 79.87	97.41 88.98 76.90	97.21 88.59 77.17	97.20 88.87 77.20
Пористость, %, не более	40	38.45	36.20	36.20	36.20
Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	не нормируется	2 010	2 010	2 010	2 010
Истинная плотность, кг/м <sup>3</sup>	не нормируется	2 800	2 800	2 800	2 800
Показатель битумоемкости, г, не более	80	75.45	70.19	70.15	70.10
Влажность, % по массе, не более	2.5	0.60	0.40	0.40	0.40

требованиям ГОСТ 52129-2003. Величины средней и истинной плотностей материала не изменились с течением времени и составили 2 010 и 2 800 кг/м<sup>3</sup> соответственно. После 5 лет хранения в отвалах показатель пористости для минерального порошка на основе шлака не изменился – 36.20 %. Такая же закономерность наблюдается и с показателем влажности. У минерального порошка на основе шлака после 5, 10 и 18 лет хранения в отвалах влажность снизилась на 33 % (до 0.40 % по массе). Показатель битумоемкости снижался постепенно: с 75.45 г у минерального порошка на основе шлака текущего выхода до 70.10 г у минерального порошка на основе шлака после 18 лет в отвале.

Изучение и регистрация ИК-спектра проводились с помощью прибора Specord 75 IR (производитель – Carl Zeiss, Германия) в области 4 000–400 см<sup>–1</sup>. Все органические соединения, как и все углеводороды, характеризуются полосами поглощения в области частот 2926–2957 см<sup>–1</sup>, которые обусловлены валентными колебаниями связей С–Н в метиленовой группе (CH<sub>2</sub>), о наличии ароматических соединений свидетельствует присутствие двойных связей С=С в области 1 600 см<sup>–1</sup>. О содержании нафтеновых углеводородов можно судить по характерному «трезубцу» с частотами в районе 725 – 810 – 880 см<sup>–1</sup>.

Для исключения влияния погрешности толщины нанесенной пленки на спектрограммы выбиралась эталонная полоса, относительно которой велась расшифровка и производилась количественная оценка спектра.

Физико-механические характеристики асфальтобетона, содержащего в составе шлаковый минеральный порошок, определялись в соответствии с требованиями стандартов Российской Федерации.

### 3. Результаты и обсуждение / Results and discussions

На рис. 1 приведены ИК-спектры битумов, выделенных из раствора с бензолом после взаимодействия последнего с различными минеральными материалами на основе электросталеплавильных шлаков различного срока хранения в отвале.

Сравнительный анализ ИК-спектров битума показал (рис. 1), что вне зависимости от сроков хранения шлака в отвале избирательной диффузии легких фракций битума в поры шлакового минерального материала не происходит, о чем свидетельствует отсутствие усиления полосы спектра при  $720\text{ см}^{-1}$ .

По всей видимости, размер и характер расположения пор в шлаковых частицах позволяют говорить о диффузии молекул смол, асфальтенов и, возможно, парафинов в свободные микрополости отдельными сегментами, когда скачкообразные переходы сегментов в новые равновесные положения постепенно приводят к смещению центра тяжести всей молекулы и внедрению компонентов битума в поры материала.

С. И. Самодуров указывает, что, хотя возможность формирования адгезионной связи за счет диффузии целых надмолекулярных образований маловероятна, для битумных пленок на шлаковой подложке характерны вторичные структуры различной степени упорядоченности. Такие пространственные структурные сетки возникают на завершающих этапах формирования адгезионных контактов в системе *битум – шлаковые материалы* [24].

ИК-спектроскопия показала, что время хранения шлака в отвалах не оказывает существенного влияния на диффузию легких фракций битума в поры шлакового минерального материала. При применении шлаков электросталеплавильного производства в качестве минерального порошка для асфальтобетона шлаки текущего выхода и хранившиеся в отвалах несколько лет должны действовать схожим образом.

В таблице 3 приведены физико-механические характеристики плотного асфальтобетона типа А марки I при введении в его состав шлакового минерального порошка, изготовленного из шлака текущего выхода и шлака, хранившегося в отвалах 5 и 18 лет.

Физико-механические характеристики асфальтобетона при введении в его состав шлакового минерального порошка разного срока хранения соответствуют требованиям ГОСТ. Средняя плотность асфальтобетона при введении в его состав шлакового минерального порошка практически не изменяется, отклонения от контрольного образца составляют не более 1.3 % ( $2\,420\text{ кг/м}^3$  у образцов, изготовленных с минеральным порошком на основе электросталеплавильного шлака 18 лет хранения в отвалах). Наибольшее влияние минеральный порошок на основе электросталеплавильного шлака оказал на предел прочности при сжатии при температуре  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , снижение этого показателя в зависимости от шлака достигало от 41 до 44 %, а предел прочно-

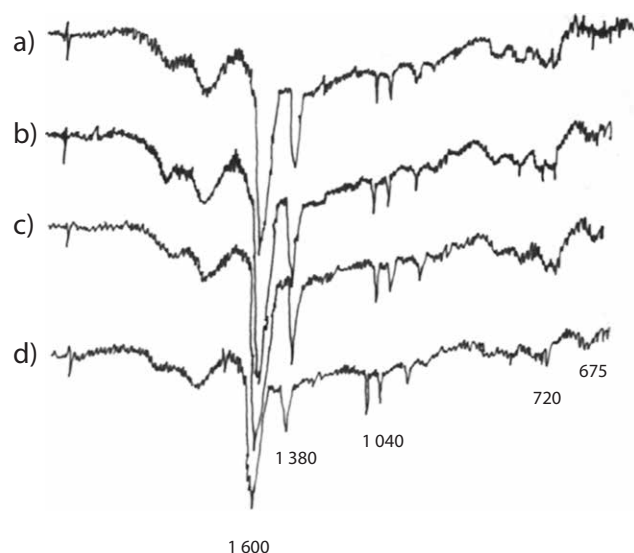


Рис. 1. ИК-спектры битума, снятого с поверхности:  
а) исходного битума; б) гранита; в) шлака свежего слива; д) шлака, хранившегося в отвале 18 лет (данные сняты авторами с помощью прибора Specord 75 IR)

Fig. 1. IR spectra of bitumen from the surface: a) initial bitumen; b) granite; c) current-output slag; d) slag stored in the dump for 18 years (data acquired by the authors using the Specord 75 IR)



Таблица 3. Физико-механические характеристики асфальтобетона при введении в его состав шлакового минерального порошка  
Table 3. Physical and mechanical characteristics of asphalt concrete when slag mineral powder is introduced into its composition

Наименование показателя	Требования ГОСТ 9128-2013 <sup>4</sup>	Известняковый неактивированный минеральный порошок (контрольный образец)	Минеральный порошок на основе электросталеплавильного шлака		
			текущего выхода	5 лет хранения	18 лет хранения
Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	не нормируется	2 390	2 410	2 380	2 420
Предел прочности при сжатии, МПа, при температуре 20 °С	не менее 2.5	5.4	3.0	3.2	3.1
Предел прочности при сжатии, МПа, при температуре 50 °С	не менее 1.1	1.9	2.1	2.0	2.0
Водостойкость	не менее 0.85	0.92	0.90	0.90	0.86
Водостойкость при длительном водонасыщении	не менее 0.85	0.89	0.92	0.91	0.89

сти при сжатии при температуре 50 °С, наоборот, увеличивался до 2.1 МПа (рост 10 %). Возможно, это связано с повышением активности материала при увеличении температуры. Наибольший рост прочности наблюдался при использовании минерального порошка на основе электросталеплавильного шлака текущего выхода.

Показатели водостойкости и водостойкости при длительном водонасыщении<sup>5, 6</sup> при использовании в асфальтобетоне минерального порошка на основе электросталеплавильного шлака ведут себя по-разному. Водостойкость при использовании шлаков снизилась до 0.86 (на 6.5 % по сравнению с контрольным образцом). Водостойкость при длительном водонасыщении или не изменилась (при сравнении контрольного образца и образца с использованием электросталеплавильного шлака 18 лет хранения), или увеличилась до 0.92 и 0.91 у образцов с использованием электросталеплавильного шлака текущего выхода и шлака, хранившегося в отвалах 5 лет соответственно. Возможно, увеличение водостойкости при длительном водонасыщении связано с активностью минерального порошка на основе шлака и, как следствие, повышением его прочности при длительном водонасыщении.

#### 4. Заключение / Conclusions

ИК-спектроскопия образцов битума после взаимодействия с поверхностью различных минеральных материалов показала, что существенных изменений группового химического состава битума

<sup>4</sup> ГОСТ 9128-2013. Межгосударственный стандарт. Смеси асфальтобетонные, полимерасфальтобетонные, асфальтобетон, полимерасфальтобетон для автомобильных дорог и аэродромов. Технические условия = asphaltic concrete and polymer asphaltic concrete mixtures, asphaltic concrete and polymer asphaltic concrete for roads and aerodromes. Specifications. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200108509?ysclid=mi8huk5thl85917963> (дата обращения: 15.08.2025).

<sup>5</sup> ГОСТ 12801-98. Межгосударственный стандарт. Материалы на основе органических вяжущих для дорожного строительства. Методы испытаний = Materials on the basis of organic binders for road and airfield construction. Test Methods. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200003974> (дата обращения: 18.09.2025).

<sup>6</sup> ГОСТ Р 58401.18-2019. Национальный стандарт РФ. Дороги автомобильные общего пользования. Смеси асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон. Метод определения водостойкости и адгезионных свойств = Automobile roads of general use. Asphalt mixtures and asphalt concrete for road pavement. Method for determination of water resistance and adhesion properties. URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200165767> (дата обращения: 18.09.2025).

ма после взаимодействия с поверхностью электросталеплавильного шлака как текущего выхода, так и отвального не происходит. Некоторое уменьшение характеристических пиков нефтяных ( $875$ ,  $675\text{ см}^{-1}$ ), ароматических ( $1\ 600\text{ см}^{-1}$ ) соединений и кислотных групп ( $1\ 720\text{ см}^{-1}$ ) (рис. 1) объясняется активным хемосорбционным взаимодействием поверхности шлака с битумом, обусловленным наличием высокоразвитой поверхности, и имеющих основную природу компонентов.

Особенности взаимодействия битума с пористыми материалами, к которым относятся и минеральные материалы, полученные на основе электросталеплавильных шлаков, объясняются, с одной стороны, характером поверхности и структурой адсорбента (размером и расположением пор), а с другой – особенностями битума (активностью и групповым составом). Повышенная пористость шлаковых минеральных материалов не оказывает отрицательного влияния на свойства битума, а следовательно, и на свойства асфальтобетонных смесей на их основе, что объясняется отсутствием процессов избирательной диффузии компонентов битума внутрь частиц минерального материала и интенсификации старения органического вяжущего за счет обеднения адсорбционных слоев на поверхности минеральных частиц смолами и маслами и увеличения концентрации асфальтенов.

При использовании шлаков электросталеплавильного производства в качестве минерального порошка для асфальтобетона шлаки текущего выхода и хранившиеся в отвалах несколько лет действуют схожим образом, так как вне зависимости от сроков хранения шлака в отвале избирательной диффузии легких фракций битума в поры шлакового минерального материала не происходит. Применение шлакового минерального порошка в составе асфальтобетонов в целом не оказывает отрицательного влияния на их физико-механические свойства, все характеристики асфальтобетона соответствуют требованиям ГОСТ. При использовании минерального порошка на основе электросталеплавильного шлака водостойкость при длительном водонасыщении увеличивается. Возможно, это связано с наличием у минерального порошка на основе шлака минералов, которые при длительном водонасыщении гидратируют, что приводит к увеличению прочности образцов. Количество таких минералов снижается в процессе хранения шлаков в отвалах, поэтому при использовании шлака текущего выхода в качестве минерального порошка физико-механические показатели асфальтобетона были выше, чем при использовании шлака, хранившегося в отвалах 5 и 18 лет.

Рекомендуется применение минерального порошка на основе шлака текущего выхода, так как наблюдается повышение некоторых показателей по сравнению с контрольным образцом: увеличивается предел прочности при сжатии при температуре  $50\text{ }^{\circ}\text{C}$  и водостойкость при длительном водонасыщении.



**Вклад авторов.** Авторы внесли равный вклад в подготовку публикации.  
**Author contributions.** All authors contributed equally to preparing the publication.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.  
**Conflict of interest.** The authors declare no relevant conflict of interest.

#### Список литературы

1. Buravchuk N. I., Guryanova O. V., Jani M. A., Putri E. P. New Materials for Road Construction. In: *Parinov I., Chang, Sh., Long, B. (eds.) Advanced Materials. Springer Proceedings in Materials. Vol. 6. Springer, Cham; 2020. P. 293–307. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-45120-2\\_25](https://doi.org/10.1007/978-3-030-45120-2_25)*
2. Буравчук Н. И., Гурьянова О. В. Исследование активности минеральных добавок из техногенного сырья. *Экология и промышленность России*. 2021;25(10):26–31. URL: <https://elibrary.ru/iughmn>
3. Buravchuk N. I., Guryanova O. V., Jani M. A., Putri E. P. The influence of the activity of the mineral additives on physic-mechanical properties of concrete compositions. In: *Springer Proceedings in Physics. Advanced Materials:*

- Proceedings of the International Conference on "Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications", PHENMA 2018.* 2019;224:147–159. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-19894-7\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-030-19894-7_13)
4. Lyapin A. A., Parinov I. A., Buravchuk N. I., Cherpakov A. V., Shilyaeva O. V., Guryanova O. V. Composition and properties of the burnt rocks of nine dumps and ash-slag waste. In: *Improving road pavement characteristics. Applications of industrial waste and finite element modelling. Series: Innovation and Discovery in Russian Science and Engineering.* Springer, Cham; 2020. P. 41–75. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-59230-1>
  5. Чумаченко Н. Г., Тюрников В. В., Сейкин А. И., Баннова С. Е. Возможности использования горелых пород в строительстве. *Экология и промышленность России.* 2015;19(11):41–46. <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2015-11-41-46>
  6. Balaguero A., Carvajal G. I., Arias Y. P., Alberti J., Fullana-i-Palmer P. Technical feasibility and life cycle assessment of an industrial waste as stabilizing product for unpaved roads, and influence of packaging. *Science of the Total Environment.* 2019;651(1):1272–1282. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.306>
  7. Khalifa S. Al-Jabri, Abdullah H. Al-Saidy, Ramzi Taha. Effect of copper slag as a fine aggregate on the properties of cement mortars and concrete. *Construction and Building Materials.* 2011;25(2):933–938. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.090>
  8. Зиновеев Д. В., Дюбанов В. Г. Современное состояние и пути переработки доменных шлаков: краткий обзор. *Проблемы черной металлургии и материаловедения.* 2021;2:41–48. URL: <https://elibrary.ru/gotmiv>
  9. Кадыров А. С., Кунаев В. А. Перспективные методы повышения физико-механических характеристик доменного шлака для дорожного строительства. *Труды университета.* 2016;(4):54–58.
  10. Буланкин Д. А. Обзор международной практики использования различных компонентов стабилизации грунта при строительстве дорожных оснований и грунтовых (промысловых) дорог. *Техника и технологии строительства.* 2024;(1):21–27. URL: <https://elibrary.ru/pwmznt>
  11. Ильин С. В., Левашов Г. М., Рощупкин А. Г., Сарычев И. Ю., Фукс А. В. Применение инертных заполнителей из сталеплавильных конвертерных шлаков при изготовлении асфальтобетонных смесей. *Мир дорог.* 2021;(137):105–115. URL: <https://elibrary.ru/wzbbqh>
  12. Духовный Г. С., Попков О. В., Логвиненко А. А., Бодяков А. Н., Мешкова К. В. Дорожные одежды с использованием шлаков. *Мир дорог.* 2019;(118):64–65. URL: <https://elibrary.ru/ddivtb>
  13. Иванков С. И., Шубов Л. Я., Троицкий А. В., Доронкина И. В., Скобелев К. Д. Рациональные запатентованные технологии переработки и утилизации твердых промышленных отходов. Обзор. Часть 1. *Научные и технические аспекты охраны окружающей среды.* 2021;(5):2–100. <https://doi.org/10.36535/0869-1002-2021-05-1>
  14. Oluwasola E. A., Hainin M. R., Aziz M. M. A. Evaluation of asphalt mixtures incorporating electric arc furnace steel slag and copper mine tailings for road construction. *Transportation Geotechnics.* 2015;2:47–55. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2014.09.004>
  15. Maghool F., Arulrajah A., Du Y.-J., Horpibulsuk S., Chinkulkijniwat A. Environmental impacts of utilizing waste steel slag aggregates as recycled road construction materials. *Clean Technologies and Environmental Policy.* 2017;19:949–958. <https://doi.org/10.1007/s10098-016-1289-6>
  16. Агамов Р. Э., Гончарова М. А., Мраев А. В. Сталеплавильные шлаки как эффективное сырье в дорожном строительстве. *Строительные материалы.* 2023;(1-2):56–62. <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-810-1-2-56-60>
  17. Zhang Xiaolei, Chen Jiaxin, Jiang JingJing, Ji Li, R. D. Tyagi, Rao Y. Surampalli. The potential utilization of slag generated from iron- and steelmaking industries: a review. *Environmental Geochemistry and Health.* 2020;42:1321–1334. <https://doi.org/10.1007/s10653-019-00419-y>
  18. Kambole C., Paige-Green P., Kupolati W. K., Ndambuki J. M., Adeboje A. O. Basic oxygen furnace slag for road pavements: A review of material characteristics and performance for effective utilisation in southern Africa. *Construction and Building Materials.* 2017;148:618–631. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.036>
  19. Погромский А. С., Аниканова Т. В. Влияние длительного хранения электросталеплавильных шлаков в отвалах на их свойства. *Строительные материалы и изделия.* 2018;1(1):32–39. URL: <https://elibrary.ru/xufbud>
  20. Гуляк Д. В., Смирнова Д. В. Использование отходов горного производства для совершенствования составов асфальтополимербетона. *Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры.* 2018;(1):25–31. URL: <https://elibrary.ru/xsdaok>
  21. Тюрюханов К. Ю., Пугин К. Г. Влияние поверхности частиц отработанной формовочной смеси на процессы структурообразования асфальтобетона. *Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость.* 2019;9(3):566–577. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2019-3-566-577>



22. Ядыкина В. В., Гридчин А. М., Кузнецова Е. В., Лебедев М. С. Повышение эффективности минерального порошка из техногенного сырья за счет его гидрофобизации. *Строительные материалы и изделия*. 2020;3(4):24–30. <https://doi.org/10.34031/2618-7183-2020-3-4-24-30>
23. Артемова А. В. Активированный минеральный порошок на основе металлургических шлаков и его роль в асфальтобетоне. *Леса России и хозяйство в них*. 2009;(1):85–91. URL: <https://elibrary.ru/ruisvz>
24. Самодуров С. И. *Асфальтовый бетон с применением шлаковых материалов*. Воронеж: Изд-во Воронеж. ун-та, 1984. 108 с.

#### References

1. Buravchuk N. I., Guryanova O. V., Jani M. A., Putri E. P. New Materials for Road Construction. In: *Parinov I., Chang, Sh., Long, B. (eds.) Advanced Materials. Springer Proceedings in Materials*. Vol. 6. Springer, Cham; 2020. P. 293–307. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-45120-2\\_25](https://doi.org/10.1007/978-3-030-45120-2_25)
2. Buravchuk N. I., Guryanova O. V. Research of activity of mineral additives from technogenic raw materials. *Ecology and Industry of Russia*. 2021;25(10):26–31. (In Russ.) <https://elibrary.ru/iughmn>
3. Buravchuk N. I., Guryanova O. V., Jani M. A., Putri E. P. The influence of the activity of the mineral additives on physic-mechanical properties of concrete compositions. In: *Springer Proceedings in Physics. Advanced Materials: Proceedings of the International Conference on "Physics and Mechanics of New Materials and Their Applications", PHENMA 2018*. 2019;224:147–159. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-19894-7\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-030-19894-7_13)
4. Lyapin A. A., Parinov I. A., Buravchuk N. I., Cherpakov A. V., Shilyaeva O. V., Guryanova O. V. Composition and properties of the burnt rocks of nine dumps and ash-slag waste. In: *Improving road pavement characteristics. Applications of industrial waste and finite element modelling. Series: Innovation and Discovery in Russian Science and Engineering*. Springer, Cham; 2020. P. 41–75. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-59230-1>
5. Chumachenko N. G., Tyurnikov V. V., Seikin A. I., Bannova S. E. Usage of combustion metamorphic rocks in the building industry. *Ecology and industry of Russia*. 2015;19(11):41–46. (In Russ.) <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2015-11-41-46>
6. Balaguero A., Carvajal G. I., Arias Y. P., Alberti J., Fullana-i-Palmer P. Technical feasibility and life cycle assessment of an industrial waste as stabilizing product for unpaved roads, and influence of packaging. *Science of the Total Environment*. 2019;651(1):1272–1282. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.306>
7. Khalifa S. Al-Jabri, Abdullah H. Al-Saidy, Ramzi Taha. Effect of copper slag as a fine aggregate on the properties of cement mortars and concrete. *Construction and Building Materials*. 2011;25(2):933–938. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.090>
8. Zinoveev D. V., Dyubanov V. G. State of the art and prospect for recycling of blast furnace slag – a short review. *Problemy chernoj metallurgii i materialovedeniya [Issues in Ferrous Metallurgy and Materials Science]*. 2021;2:41–48. URL: <https://elibrary.ru/gotmiv>
9. Kadyrov A. S., Kunaev B. A. Promising methods for improving the physico-mechanical characteristics of blast furnace slag for road construction. *Trudy universiteta [Proceedings of the University]*. 2016;(4):54–58. (In Russ.)
10. Bulankin D. A. A review of the international practice for the use of different soil stabilization components in the construction of road bases and oil field (unpaved) roads. *Tekhnika i tekhnologii stroitel'stva [Engineering and Construction Technologies]*. 2024;(1):21–27. (In Russ.) URL: <https://elibrary.ru/pwmznt>
11. Ilyin S. V., Levashov G. M., Roshchupkin A. G., Sarychev I. Yu., Fuchs A. V. The use of inert aggregates from steelmaking converter slags in the manufacture of asphalt concrete mixtures. *Mir dorog [The world of roads]*. 2021;(137):105–115. (In Russ.) URL: <https://elibrary.ru/wzbbqh>
12. Duhovnyj G. S., Popkov O. V., Logvinenko A. A., Bodyakov A. N., Meshkova K. V. Road pavements using slags. *Mir dorog [The world of roads]*. 2019;(118):64–65. (In Russ.) URL: <https://elibrary.ru/ddivtb>
13. Ivankov S. I., Shubov L. Ya., Troickij A. V., Doronkina I. V., Skobelev K. D. Rational patented technologies for the processing and disposal of solid industrial waste. Review. Part 1. *Nauchnye i tekhnicheskie aspekty ohrany okruzhayushchej sredy [Scientific and technical aspects of environmental protection]*. 2021;(5):2–100. (In Russ.) <https://doi.org/10.36535/0869-1002-2021-05-1>
14. Oluwasola E. A., Hainin M. R., Aziz M. M. A. Evaluation of asphalt mixtures incorporating electric arc furnace steel slag and copper mine tailings for road construction. *Transportation Geotechnics*. 2015;2:47–55. <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2014.09.004>
15. Maghool F., Arulrajah A., Du Y.-J., Horpibulsuk S., Chinkulkijniwat A. Environmental impacts of utilizing waste steel slag aggregates as recycled road construction materials. *Clean Technologies and Environmental Policy*. 2017;19:949–958. <https://doi.org/10.1007/s10098-016-1289-6>

16. Agamov R. E., Goncharova M. A., Mraev A. V. Steelmaking slags as an effective raw material in road construction. *Construction materials*. 2023;(1-2):56–62. (In Russ.) <https://doi.org/10.31659/0585-430X-2023-810-1-2-56-60>
17. Zhang Xiaolei, Chen Jiaxin, Jiang JingJing, Ji Li, R. D. Tyagi, Rao Y. Surampalli. The potential utilization of slag generated from iron- and steelmaking industries: a review. *Environmental Geochemistry and Health*. 2020;42:1321–1334. <https://doi.org/10.1007/s10653-019-00419-y>
18. Kambole C., Paige-Green P., Kupolati W. K., Ndambuki J. M., Adeboje A. O. Basic oxygen furnace slag for road pavements: A review of material characteristics and performance for effective utilisation in southern Africa. *Construction and Building Materials*. 2017;148:618–631. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.05.036>
19. Pogromsky A. S., Anikanova T. V. The effect of long-term storage of electric steel smelting slags in dumps on their properties. *Construction Materials and Products*. 2018;1(1):32–39. (In Russ.) URL: <https://elibrary.ru/xufbud>
20. Gulyak D., Smirnova D. Investigation of the use of mineral waste waste for improvement of asfaltopolymerbeton compositions. *Proceeding of the Donbas National Academy of Civil Engineering and Architecture*. 2018;(1):25–31. (In Russ.) URL: <https://elibrary.ru/xsdaok>
21. Tyuryukhanov K. Yu., Pugin K. G. Impact of the surface of particles of moulding sand on the structural formation of asphalt concrete. *Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate*. 2019;9(3):566–577. (In Russ.) <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2019-3-566-577>
22. Yadykina V. V., Gridchin A. M., Kuznetsova E. V., Lebedev M. S. Increasing the efficiency of mineral powder from technogenic raw materials due to its hydrophobization. *Construction Materials and Products*. 2020;3(4):24–30. (In Russ.) <https://doi.org/10.34031/2618-7183-2020-3-4-24-30>
23. Artemova A. V. The activated mineral powder on the basis of metallurgical slags and its role in asphalt concrete. *Forests of Russia and Economy in Them*. 2009;(1):85–91. (In Russ.) URL: <https://elibrary.ru/ruisvz>
24. Samodurov S. I. *Asphalt concrete with slag additives*. Voronezh: VSU Publishing House, 1984. 108 p. (In Russ.)



#### Информация об авторах

**Аниканова Татьяна Викторовна**, канд. техн. наук, доцент кафедры архитектурно-строительного проектирования и физики среды, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Российская Федерация, [anik.tv@yandex.ru](mailto:anik.tv@yandex.ru)

**Погромский Алексей Сергеевич**, старший преподаватель кафедры автомобильных и железных дорог им. А. М. Гридчина, Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, Белгород, Российская Федерация, [pogrom7@yandex.ru](mailto:pogrom7@yandex.ru)

**Лукаш Евгений Алексеевич**, канд. техн. наук, доцент кафедры автомобильных и железных дорог им. А. М. Гридчина, Белгородский государственный технологический университет им. В. Г. Шухова, Белгород, Российская Федерация, [svh8@yandex.ru](mailto:svh8@yandex.ru)

#### Information about the authors

**Tatiana V. Anikanova**, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor in the Department of Architectural and Construction Design and Physics of the Environment, Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russian Federation, [anik.tv@yandex.ru](mailto:anik.tv@yandex.ru)

**Alexey S. Pogromsky**, Senior Lecturer in the Department of Automobile and Railway Engineering named after A. M. Gridchin, Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov, Belgorod, Russian Federation, [pogrom7@yandex.ru](mailto:pogrom7@yandex.ru)

**Evgeny A. Lukash**, Cand. Sci. (Engineering), Associate Professor in the Department of Automobile and Railway Engineering named after A. M. Gridchin, Belgorod State Technological University named after V. G. Shukhov, Belgorod, Russian Federation, [svh8@yandex.ru](mailto:svh8@yandex.ru)

Получена 29 сентября 2025 г., одобрена 17 ноября 2025 г., принята к публикации 30 ноября 2025 г.  
Received 29 September 2025, Approved 17 November 2025, Accepted for publication 30 November 2025