

# ПРИМЕНЕНИЕ ИНЕРТНЫХ ЗАПОЛНИТЕЛЕЙ ИЗ СТАЛЕПЛАВИЛЬНЫХ КОНВЕРТЕРНЫХ ШЛАКОВ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ АСФАЛЬТОБЕТОННЫХ СМЕСЕЙ

В статье представлены промежуточные результаты научно-исследовательской работы, проводимой Государственной компанией «Автодор» совместно с Новолипецким металлургическим комбинатом (группа НЛМК) и с привлечением научно-исследовательских лабораторных центров СИБАДИ, МАДИ, ООО «Доринжсервис» по расширению области применения шлаковой продукции (доменные и сталеплавильные шлаки) в дорожном строительстве. Рассматриваются предпосылки к более широкому применению шлаковой продукции для обеспечения концепции «устойчивого развития» автомобильных дорог, а также результаты опытно-экспериментальной апробации в асфальтобетонах двух видов материалов, изготавливаемых из сталеплавильных конвертерных шлаков черной металлургии – щебня и минерального порошка.

Тема использования металлургических шлаков не нова для Российской Федерации. В то же время, применительно к реализации национальных проектов, объем использования таких материалов несопоставимо мал, если учитывать их потенциальные возможности для обеспечения долговечности автомобильных дорог. Это связано как с объективными, так и с субъективными причинами.

Задачи, поставленные в работе:

- систематизировать отечественный и зарубежный опыт применения шлаковой продукции;
- отработать составы асфальтобетонных смесей с применением шлаковой продукции, характеризующиеся повышенными прочностными и транспортно-эксплуатационными показателями по сравнению с традиционными смесями, с проведением сопоставительных испытаний в различных лабораториях;
- дать рекомендации производителям шлаков по доведению шлаковой продукции до заданных параметров качества, однородности, в том числе с учетом новых стандартов в дорожной отрасли для асфальтобетонов, слоев оснований, укрепления слоев земляного полотна, укрепления откосов;
- оценить экологические аспекты применения шлаковой продукции в дорожном строительстве;

■ подготовить предложения по актуализации нормативной базы в рассматриваемой области.

Необходимо отметить, что Государственная компания «Автодор» реализует комплексный подход в области использования шлаков металлургии, организовав взаимодействие с целым рядом других компаний (например, «Амур Консалтинг»). В частности, осуществляется методическое сопровождение по расширению применения в дорожном строительстве щебня, получаемого в результате переработки медеплавильных шлаков, обладающего в силу технологических и сырьевых особенностей уникальными физико-механическими свойствами. Эти свойства позволяют применять его в асфальтобетонах в верхних слоях покрытия для высоконагруженных участков автомобильных дорог как альтернативу щебню, получаемому из природных материалов. С металлургическим предприятием ПАО «НЛМК» и компанией «БФБ» (резидент Фонда Сколково) реализуется программа комплексного применения конвертерных шлаков черной металлургии.

Факт влияния автомобильных дорог и работ по их устройству на окружающую среду и экологическую обстановку в целом является

безусловным. Обобщая опыт международных исследований [1], на транспортный сектор приходится примерно 15% глобальных выбросов парниковых газов, в то время как на долю производства дорожно-строительных материалов и связанные с ним промышленные процессы приходится 21% глобальных выбросов парниковых газов [2, 3]. Воздействие транспортной инфраструктуры на окружающую среду не ограничивается выбросами парниковых газов. А поскольку большинство дорожно-строительных материалов получают из невозобновляемых природных источников, то при добыче потребного сырья в огромном количестве происходит изменение ландшафта с нанесением вреда окружающей среде. С другой стороны, после исчерпания ресурса прочности объекта, по завершении срока службы конструктивного слоя, вывод объекта из эксплуатации связан с необходимостью утилизации или размещения на полигонах материалов дорожных одежд, непригодных по физико-механическим показателям для дальнейшего использования.

Учитывая изложенное, при разработке «устойчивой» стратегии развития дорожной отрасли в качестве основного приоритета должны быть использованы материалы с наименьшим воздействием на окружающую среду, но обладающие при этом повышенными механическими характеристиками.

В данном контексте приведем примеры минимизации выбросов парниковых газов при устройстве асфальтобетонных слоев дорожных одежд.

Одним из таких методов является снижение температуры произ-

водства асфальтобетонных смесей [4] благодаря использованию специально подобранных видов битумного вяжущего или модификаторов/добавок в традиционное вяжущее [5]. Данные составы не следует путать с теплыми асфальтобетонными смесями, которые до 1999 года применялись в СССР в соответствии с ГОСТ 9128-84 и приготавливались на битумных вяжущих пониженной вязкости и характеризовались пониженными свойствами по отношению к горячим.

Применяемые в настоящее время «теплые асфальтобетоны» (warm mix) предполагают возможность снижения технологических температур приготовления асфальтобетонных смесей без существенного снижения их физико-механических показателей. В нашей стране этот материал нормативно закреплен ПНСТ 358-2019. Однако следует отметить, что в большинстве случаев применение теплых асфальтобетонных смесей сопровождается снижением механических свойств [6, 7]. В России такие технологии производства теплых асфальтобетонных смесей (вспененные битумные вяжущие, добавки и др.) нашли широкое применение для увеличения продолжительности дорожно-строительного сезона.

Другой подход к минимизации выбросов парниковых газов при устройстве асфальтобетонных слоев дорожных одежд, более масштабный по экологическому эффекту, представляют методы по вовлечению побочных продуктов промышленного производства. Речь идет именно об использовании материалов повторного применения при изготовлении горячих асфальтобетонных смесей. Такими материалами для всех конструктивных слоев дорожной одежды при соответствующем методическом и лабораторном сопровождении могут стать металлургические шлаки.

Используемые в этом исследовании материалы, в том числе и ма-

териалы из побочных продуктов сталеплавильного конвертерного производства, являются коммерчески поставляемыми продуктами. При формировании программы исследований использовались накопленный отечественный и зарубежный опыт [8–15]. Потребные материалы, изготовленные из побочных промышленных продуктов, имеют ряд преимуществ перед обычными природными материалами, одним из которых является низкая экономическая и экологическая стоимость. Тем не менее большинство побочных продуктов имеют особые физико-химические характеристики, которые необходимо определить для оценки их пригодности к использованию и, в свою очередь, для выявления критических параметров, которые могут неблагоприятно повлиять на работу конструктивного элемента.

## 1. Материалы, используемые в исследовании

**1.1.** Щебень из конверторных шлаков. Поставляется с производственных площадок металлургического комбината ПАО «НЛМК», расположенных в Липецке. Сталеплавильный шлак является одним из попутных продуктов, образующихся при производстве стали на комбинате. Сталеплавильный шлак образуется на первой стадии процесса, называемой стадией плавки. На этом этапе отмечается достаточно большое образование шлаков – от 110 до 150 кг на каждую тонну стали.

Щебень из конверторных шлаков отбирался у предприятия-производителя ПАО «НЛМК» в неизменном виде путем разделения пробы на различные подгруппы в зависимости от фракционного состава (размера частиц) выпускаемой продукции.

**1.2.** Минеральный порошок из шлаков. Поставляется под наименованием «Полиминеральный порошок» комбинатом ПАО «НЛМК» с производственных площадок, расположенных в Липецке.

Полиминеральный порошок в данном исследовании был использован в качестве наполнителя – минерального порошка для асфальтобетонных смесей. В разделе результатов приведен состав полиминерального порошка в неизменном виде и с размером частиц, получаемых в металлургической промышленности.

**1.3.** Битум. Во всех асфальтобетонных смесях, проведенных в данном исследовании, использован битум марки БНД 100/130 по ГОСТ 33133 без добавок и модификаторов, поставляемый АО «Газпромнефть – Омский НПЗ». Характеристики используемого битума приведены в табл. 1.

**1.4.** Щебень и песок (отсев дробления) из природных горных пород. Для изготовления сравниваемых асфальтобетонных смесей использован щебень и песок (отсев дробления) из природных горных

Табл. 1. Технические параметры используемого битума марки БНД 100/130 по ГОСТ 33133

Наименование показателя	Норма по ГОСТ 33133	Фактическое значение
Глубина проникновения иглы при 25°С, 0,1 мм	от 101 до 130	112
Температура размягчения по кольцу и шару, °С	не ниже 45	45,4
Растяжимость при 0°С, см	не менее 4,0	4,7
Температура хрупкости, °С	не выше -20	-23
Температура вспышки, °С	не ниже 230	310
Изменение массы образца после старения, %	не более 0,7	0,3
Изменение температуры размягчения после старения, °С	не более 7	5

пород карьера Тимофеевское месторождение, разрабатываемого ООО «Спецтехпроект». Объемы коммерческой переработки данного карьера ежегодно составляют около 3,15 млн. куб. м. Тимофеевское месторождение сложено андезит-базальтовыми порфиридами (эффузивными горными породами). Порфиристый щебень отличается высокой прочностью (наивысшая прочность по действующей классификации М1400), морозостойкостью (наибольшая устойчивость к циклам замораживания-оттаивания F300) и принадлежит к I классу строительных материалов.

**1.5. Минеральный порошок.** В качестве наполнителей в сравниваемых асфальтобетонных смесях был использован минеральный порошок МП-1. Минеральный порошок МП-1 получают в результате помола минеральных пород, таких как известняк, мрамор, доломиты и другие осадочные породы, состоящие в основном из карбоната кальция. Эти породы обладают меньшим сопротивлением, чем кремнистые заполнители, однако они более совместимы с битумом и создают лучшую адгезию.

## 2. Методология исследования

Методология, применяемая в данном исследовании, состоит из серии сравнительных испытаний отдельных компонентов и асфальтобетонных смесей.

### 2.1. Характеристика используемых материалов

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 изготовления асфальтобетонных смесей, и выявить критические характеристики материалов, которые могут повлиять на прочностные и эксплуата-

ционные параметры получаемых асфальтобетонов.

Химический анализ материалов из побочных промышленных продуктов предполагает элементный анализ, позволяющий выявить органическую часть шлака, а также оценить возможную карбонизацию и гидратацию соединений. По результатам анализа необходимо установить наличие углерода, азота, водорода и серы в образце. Эти элементы должны быть количественно определены, так как они в значительной степени определяют конечные свойства материала.

Поскольку конверторный шлак представляет собой в основном неорганический материал, для идентификации химических элементов, присутствующих в образце, был проведен рентгенофлуоресцентный тест. Следует подчеркнуть, что выявленные химические элементы обладают различными свойствами в зависимости от химического соединения, которое с ними образовалось, поэтому для оценки потенциальных химических соединений, присутствующих в шлаках, был проведен рентгеноструктурный анализ.

Сравнительные испытания асфальтобетонных смесей подразумевают испытания асфальтобетонных смесей заданного типа, с одним и тем же гранулометрическим составом, то есть с одинаковым минеральным каркасом, но приготовленных на различных типах каменных материалов. Такой подход позволяет количественно и качественно выявить влияние происхождения каменных материалов на характеристики получаемых из них асфальтобетонов.

На втором этапе испытаний оценивались основные физические характеристики получаемых асфальтобетонных смесей. Ряд физических параметров, таких как ПМЗ и ПНБ, имеют нормативно закрепленные границы варьирования их допустимых значений, что позволяет подобрать оптимальное содержание битумного вяжущего в составе.

Третий и наиболее трудоемкий этап исследовательских работ направлен на оценку эксплуатационных характеристик асфальтобетона. В качестве основной эксплуатационной характеристики в соответствии с ГОСТ Р 58406.2, СТО АВОДОП 2.6-2013 выступают параметры колееобразования (глубина колеи и угол наклона кривой колеи) по ГОСТ Р 58406.3 и усталостные показатели асфальтобетона по ГОСТ Р 58401.11. Сравнение основных эксплуатационных характеристик при обеспечении требований к физическим характеристикам позволяет объективно оценить преимущества или недостатки использования конверторного шлака в асфальтобетонных слоях.

### 2.2. Оцениваемые показатели асфальтобетонных смесей и асфальтобетонов

После оценки пригодности для использования в асфальтобетонных смесях исследуемых инертных материалов приступили к изготовлению четырех групп асфальтобетонных смесей одного и того же типа, с различным сочетанием компонентов из природных минеральных материалов и сталешлаковых шлаков. Используемые для сравнительных испытаний группы асфальтобетонных смесей приведены в табл. 2.

Сравнительные испытания проведены при подборе асфальтобетонной смеси типа А16Вт по ГОСТ Р 58406.2-2020, которая имеет следующие классификационные признаки:

- **тип А16** – смеси с номинально максимальным размером применяемого минерального заполнителя 16,0 мм;
- **вид В** – смеси для верхнего слоя покрытия;
- **индекс «т»** – смеси для дорог с тяжелыми условиями движения (более 1,8 млн приложений расчетной нормативной нагрузки АК-11,5 за расчетный срок службы конструктивного слоя).

Асфальтобетонную смесь А16Вт по ГОСТ Р 58406.2-2020 по ее физическим особенностям можно

Табл. 2. Компонентный состав минеральных частей асфальтобетонных смесей сравниваемых групп

Наименование группы	ППП смесь на природных горных породах	СШЩ смесь на сталеплавильном шлаковом щебне	ПМП смесь на полиминеральном порошке	ППП смесь на промышленных побочных продуктах
Крупный заполнитель	порфириновый щебень	щебень из сталеплавильного конверторного шлака	порфириновый щебень	щебень из сталеплавильного конверторного шлака
Мелкий заполнитель	отсев дробления порфиритового щебня	отсев дробления порфиритового щебня	отсев дробления порфиритового щебня	отсев дробления порфиритового щебня
Наполнитель (мин. порошок)	МП-1	МП-1	полиминеральный порошок из конверторного шлака	полиминеральный порошок из конверторного шлака
Добавки	не применены	не применены	не применены	не применены

охарактеризовать как «многощебенистую мелкозернистую плотную горячую асфальтобетонную смесь непрерывного гранулометрического состава», предназначенную для верхнего слоя покрытия в условиях интенсивного транспортного потока.

При подборе зерновых составов асфальтобетонных смесей были учтены требования ГОСТ Р 58406.2-2020 к максимальному и минимальному проходу через контрольные сита (22,4 мм, 16,0 мм, 11,2 мм, 4,0 мм, 2,0 мм, 0,125 мм и 0,063 мм), представленные на рис. 1. При этом для всех сравниваемых групп асфальтобетонных смесей кривые гранулометрического состава были подобными, то есть смеси с однотипным минеральным каркасом (рис. 1), что позволило объективно сравнивать их физические и механические свойства. В противном случае существенные различия в минеральном каркасе привели бы к наличию в методологии сравнения переменного фактора, затрудняющего объективную количественную оценку характеристик асфальтобетонных смесей.

Для каждой группы асфальтобетонной смеси выполнялось проектирование ее состава по ГОСТ Р 58406.10-2020, готовились образцы с различным содержанием битума и определялись их физические характеристики.

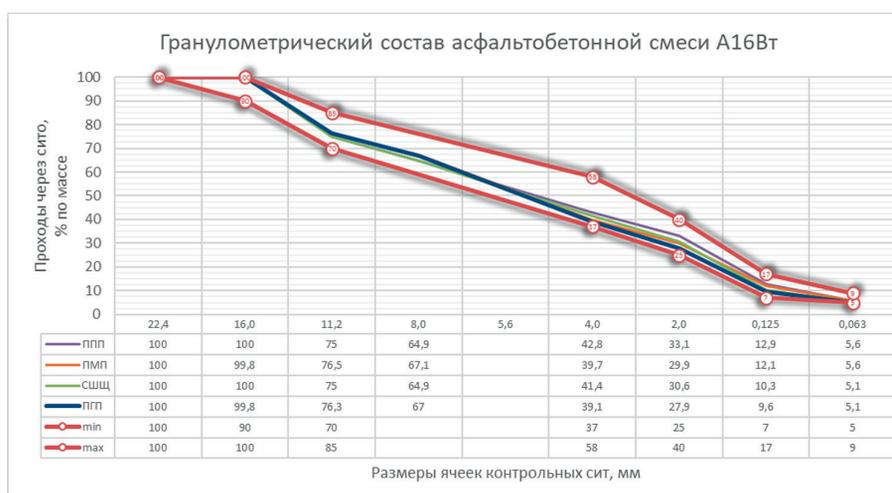


Рис. 1. Гранулометрический состав асфальтобетонных смесей типа А16Вт

Проектирование состава асфальтобетонной смеси предполагает исследование характеристик смеси при отклонении массы битума на 0,5–1% в большую и меньшую стороны от рекомендуемого (первоначального) содержания битума, которое устанавливается в зависимости от объемной плотности минерального заполнителя, входящего в состав смеси.

Асфальтобетонные образцы всех групп готовили по одной и той же методике изготовления в соответствии с ГОСТ Р 58406.9-2020. Для этого щебень, песок и вяжущее, были предварительно разогреты в сушильном шкафу в отдельных емкостях и перемешаны совместно с холодным минеральным порошком в автоматическом планетарном смесителе в течение (10±1) мин. Уплотнение полученной смеси проведено при температу-

ре (150±5)°С на уплотнителе Маршалла при 75 ударах на каждой стороне образца. Для подготовленных образцов определяли основные и дополнительные показатели асфальтобетонных смесей и асфальтобетонов (рис. 2).

2.3. Определение оптимальных сочетаний материалов и сравнение полученных результатов. В соответствии с ГОСТ Р 58406.10 после подбора зернового состава асфальтобетонной смеси, определяется оптимальное содержания вяжущего, базирующееся на достижении всеми основными физическими показателями асфальтобетонной смеси установленных требований по ГОСТ Р 58406.2.

После того как были получены основные физические показатели смесей, производится сравнение физико-механических и эксплуа-

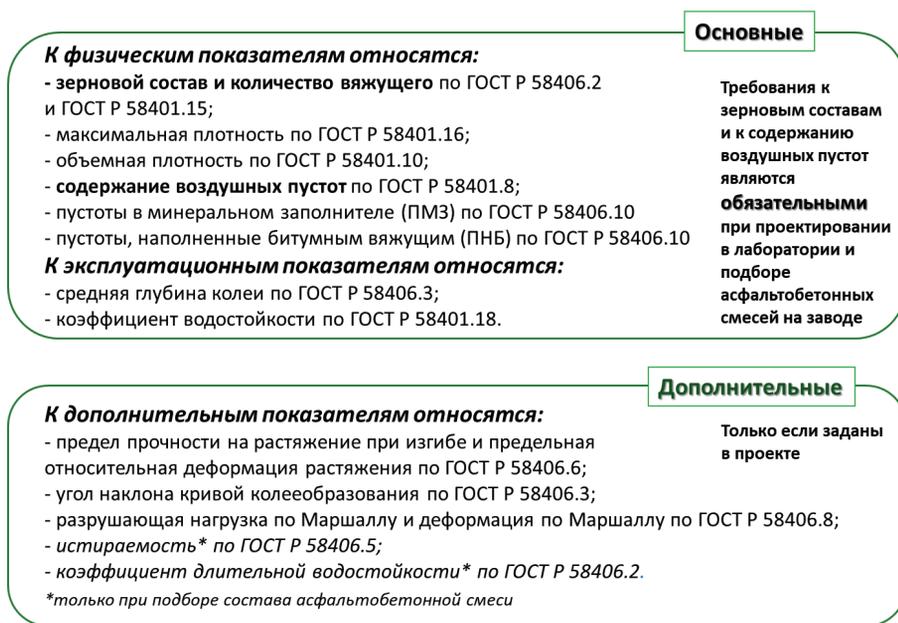


Рис. 2. Определяемые показатели асфальтобетонных смесей и асфальтобетонов

тационных показателей запроектованных асфальтобетонов. В качестве основного прочностного показателя используется устойчивость (разрушающая нагрузка и деформация) по Маршаллу. Это связано с тем, что наличие пластической деформации является критическим параметром асфальтобетонов, содержащих повышенное количество битума, и не позволит конструктивному слою обеспечить срок службы.

С целью оценки долговечности асфальтобетонов было проведено испытание по оценке основного эксплуатационного показателя – средней глубины колеи и угла наклона кривой колееобразования по ГОСТ Р 58406.3 с учетом рекомендаций и повышенных требований по СТО АВТОДОР 2.6-2013, а именно при температуре  $(60 \pm 1)^\circ\text{C}$  после 15 000 циклов нагрузки (30 000 проходов колеса). Для этих целей использовались приготовленные на вальцовом уплотнителе в лабораторных условиях образцы-плиты по ГОСТ Р 58406.4. Это испытание отражает деформацию конструктивного слоя при непрерывном и циклическом прохождении стандартизированного колеса при определенных условиях окружающей среды. Таким образом, результаты оценки позволяют объективно оценить поведение различных асфальтобетонных смесей

при непрерывном прохождении транспортных средств.

### 3. Результаты испытаний и их интерпретация

3.1. Оценка химического состава сталеплавильных шлаков. Для оценки химического состава сталеплавильных шлаков был привлечен научно-образовательный центр коллективного пользования высокотехнологичным оборудованием «Лаборатория моделирования экологической обстановки» ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет».

#### Уровень радиоактивности сталеплавильных шлаков

Измерение удельной активности радионуклидов проводилось в соответствии с методикой измерения удельной активности природных радионуклидов, цезия-137, стронция-90 в пробах окружающей среды и продукции предприятий.

Удельная активность природных радионуклидов составила:  $\text{Ra}^{226} = 7 \pm 1$  Бк/кг;  $\text{Th}^{232} = 4,0 \pm 0,6$  Бк/кг;  $\text{K} < 30$  Бк/кг. Значение удельной эффективной активности составило  $14 \pm 2$  Бк/кг. Таким образом, анализируемый материал согласно ГОСТ 30108-94 «Материалы и изделия строительные. Определение удельной эффективной активности естественных радио-

нуклидов» относится к I классу материала и может использоваться во всех видах строительства.

#### Определение химического состава

Определение содержания серы производилось на элементном анализаторе путем сжигания навески образца при температуре  $1350^\circ\text{C}$ . Определение содержания углерода производилось на анализаторе общего органического углерода путем сжигания навески образца при температуре  $950^\circ\text{C}$ .

Анализ прочих компонентов проводился на атомно-эмиссионном спектрометре с индуктивно-связанной плазмой после разложения образца пробы смесью неорганических кислот. Результаты анализов представлены в табл. 3.

Элементный анализ показал отсутствие вредных и загрязняющих элементов, таких как азот и сера, и поэтому была подтверждена их пригодность для использования в асфальтобетонных смесях. В свою очередь, содержание углерода и кальция в конверторном шлаке, по-видимому, с большой вероятностью соответствует карбонизации и гидратации различных химических соединений, что само по себе не является отрицательным фактором.

Учитывая преимущественно неорганический состав, определение фазового и минерального составов проб проводилось на рентгеновском порошковом дифрактометре. Результаты дифрактометрического анализа показали, что образцы представлены в основном портландитом ( $\text{CaO} \cdot \text{H}_2\text{O}$ ), магнетитом ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), бруситом ( $\text{Mg}(\text{OH})_2$ ), кальцитом ( $\text{CaCO}_3$ ), 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 ( $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ ), периклазом ( $\text{MgO}$ ), силикатом кальция ( $\text{Ca}_2\text{SiO}_4$ ).

Химический состав исследуемого материала определялся методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно-связанной плазмой и представлен в оксидной форме в табл. 4.

Табл. 3. Результаты атомно-эмиссионной спектроскопии исследуемого образца сталеплавильного щебня

Фракция, мм	менее 0,063	от 0,063 до 0,250	от 0,250 до 0,500	от 4 до 10	более 10
C, %	1,54	1,31	1,00	0,77	0,69
S, %	0,14	0,12	0,10	0,07	0,09
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. 4. Химический состав исследуемого образца сталеплавильного щебня

\*Примечание: железо в образце представлено в форме магнетита по данным рентгенофазового анализа

Фракция, мм	менее 0,063	от 0,063 до 0,250	от 0,250 до 0,500	от 4 до 20
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> *, %	17,8	22,8	29	23,5
CaO, %	42	41,2	39,3	44,7
MgO, %	8,1	6,3	4,9	4,5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	2,1	2,3	2,5	3,1
SiO <sub>2</sub> , %	12,4	12,39	12,9	12,0

Наличие выявленных химических элементов логично, так как данный вид шлаков поступает из ковшовой

печи при производстве стали. На стадии рафинирования стали добавляют известь или доломит для

удаления примесей через образование этого шлака; следовательно, шлак имеет химический состав добавляемых элементов. С другой стороны, наличие железа в образце очевидно, так как шлак образуется в процессе производства стали. Остальные химические элементы находятся в низкой пропорции и не могут определять характеристики конечного материала.

Следует отметить, что элементный состав отражается в виде оксидов, однако это не означает, что эти оксиды действительно существуют в образце.

По результатам петрографического исследования в ФГБУ «ВСЕГЕИ» установлена принадлежность изученного техногенного материала (сталеплавильного конверторного шлака) к кристаллическим изверженным породам типа долеритов и габбро-долеритов.

### 3.2. Оценка физико-механических характеристик крупного заполнителя

После детального определения химического состава щебня из сталеплавильных шлаков были проведены различные физико-механические испытания для

Табл. 5. Требования к показателям щебня для асфальтобетонных смесей для верхнего слоя покрытия и их фактические значения

Наименование показателя	Требуемое значение показателя для типа смеси			Фактическое значение	
	АВт	АВн	АВл	порфиритовый щебень	щебень из сталеплавильного шлака
Дробимость, марка: – щебень из изверженных и метамор. пород; – щебень шлаковый	не ниже М1000	не ниже М800	не ниже М600	М1400	М1200
Морозостойкость, марка	не ниже F50			F300	F200
Сопротивление дроблению и износу, марка	от И1 до И2	от И1 до И3	от И1 до И4	И1	И2
Средневзвешенное содержание зерен пластинчатой (лещадной) и игловатой формы, %	до 15	до 20	до 25	11,4	4,9
Содержание пылевидных и глинистых частиц, % от массы	не более 1,0			0,4	0,2

Табл. 6. Требования к показателям минерального порошка и их фактические значения

Наименование показателя	Норма для марки минерального порошка			Фактическое значение	
	МП-1	МП-2	МП-3	МП-1	ПМП
<b>1. Основные требования к минеральному порошку</b>					
1.1 Зерновой состав, % по массе, не менее:					
– мельче 2 мм;	100	100	100	100	99,9
– мельче 0,125 мм;	85	85	75	91,3	71,5
– мельче 0,063 мм	70	70	60	76,5	44,0
1.2 Пористость, %, не более	30	35	40	22,6	31,2
1.3 Битумоемкость, г, не более	50	65	80	34,3	47,2
<b>2. Требования, дополнительно применяемые к минеральному порошку</b>					
2.1 Влажность, % по массе, не более	0,5	1,0	2,5	0,1	2,1
2.2 Водостойкость образцов из смеси минерального порошка с битумом, не менее	не нормир.	не нормир.	0,7	1,3	0,74
2.3 Набухание образцов из смеси минерального порошка с битумом, %, не более	1,8	2,5	3,0	0,45	1,87

оценки пригодности этих материалов в качестве крупного заполнителя в асфальтобетонных смесях в соответствии с ГОСТ Р 58406.2. Результаты испытаний и их сопоставление с порфиритовым щебнем (из природной горной породы) приведены в табл. 5. Физико-механические характеристики исследуемых материалов свидетельствуют о возможности их применения для изготовления асфальтобетонных смесей для верхнего слоя покрытия по ГОСТ Р 58406.2

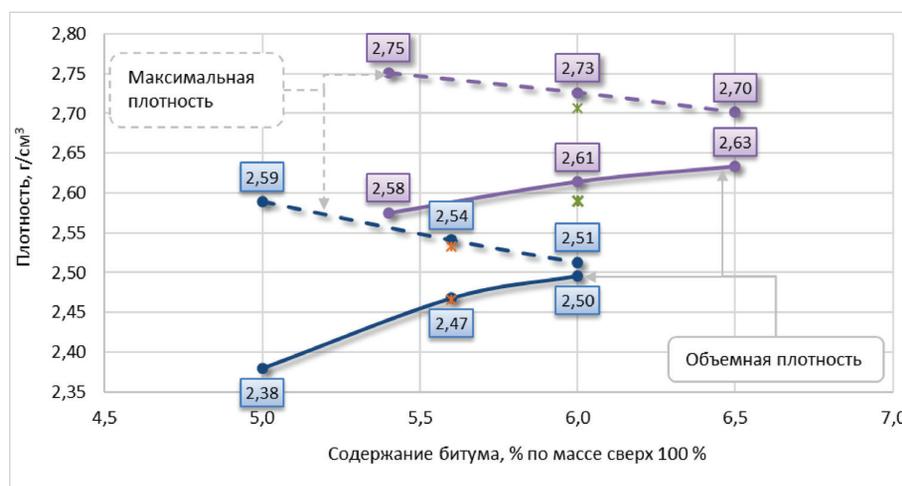
### 3.3. Оценка физико-механических минерального порошка

После определения химического состава сталеплавильных шлаков были проведены различные физико-механические испытания для оценки пригодности этих материалов в качестве наполнителя по ГОСТ 32761-2014 в асфальтобетонных смесях в соответствии с ГОСТ Р 58406.2. Результаты испытаний и их сопоставление с МП-1 (из природной горной породы) приведены в табл. 6.

По результатам испытаний было зафиксировано не достаточное

содержание частиц мельче 0,063 мм в полиминеральном порошке. Применение полиминерального порошка в неизменном виде приводит к чрезмерно большому его содержанию в асфальтобетонной смеси, так как требованиями к гранулометрическому составу горячих смесей предписывается определенное содержание частиц мельче 0,063 мм. Поэтому для его применения необходима дополнительная технологическая

обработка по корректировке гранулометрического состава. Такая обработка возможно путем или предварительного просеивания через сита с размером 0,125 мм и 0,063 мм, или введением в состав минерального порошка корректирующей добавки. В качестве добавки может выступать или коммерчески доступный минеральный порошок, или пыль, улавливаемая фильтрами асфальтобетонных заводов. Пропорции,



• - для смесей ППП; • - для смесей СШЩ; ж - для смесей ПМП; ж - для смесей ППП; (шифр группы смесей см. в табл. 2)

Рис. 3. Значение максимальной и объемной плотности сравниваемых смесей в зависимости от содержания битума

в которых необходимо введение корректирующих добавок, определяются не только гранулометрическими составами смешиваемых компонентов, но и требованиями по процентному содержанию частиц мельче 0,063 мм, которые, в свою очередь, устанавливаются конкретным типом асфальтобетонной смеси.

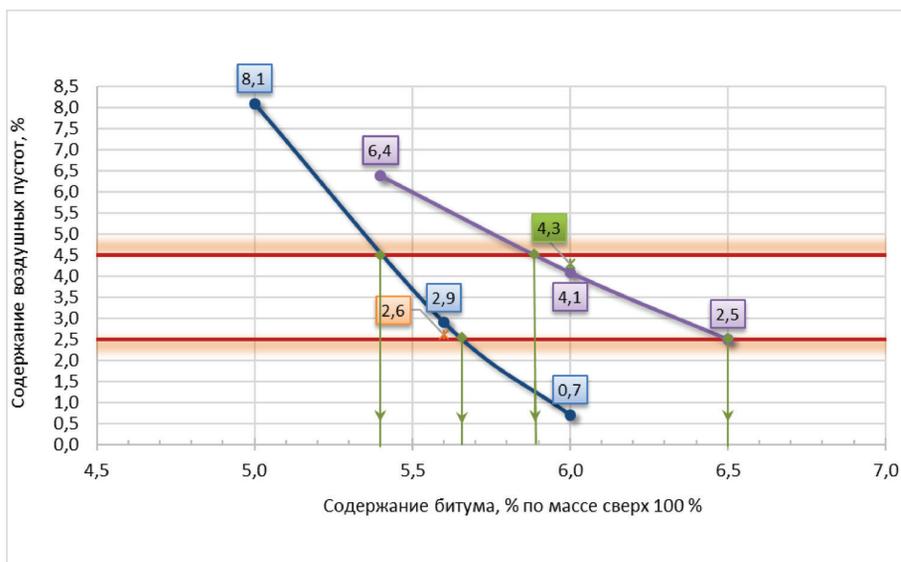
Для целей исследования был принят второй подход, а именно введение в полиминеральный порошок корректирующей добавки из коммерчески поставляемого минерального порошка МП-1, который в производственных условиях может быть заменен на отходы асфальтобетонного завода. При совместном использовании МП и ПМП пористость и набухание соответствуют требованиям нормативно-технической документации.

### 3.4. Результаты подбора асфальтобетонных смесей

После определения физических свойств и химического состава используемых материалов, а также оценки их пригодности для изготовления асфальтобетонной смеси были выполнены подборы для каждой группы смесей, представленных в табл. 1. В первую очередь были проведены испытания по оценке основных физических показателей асфальтобетонных смесей.

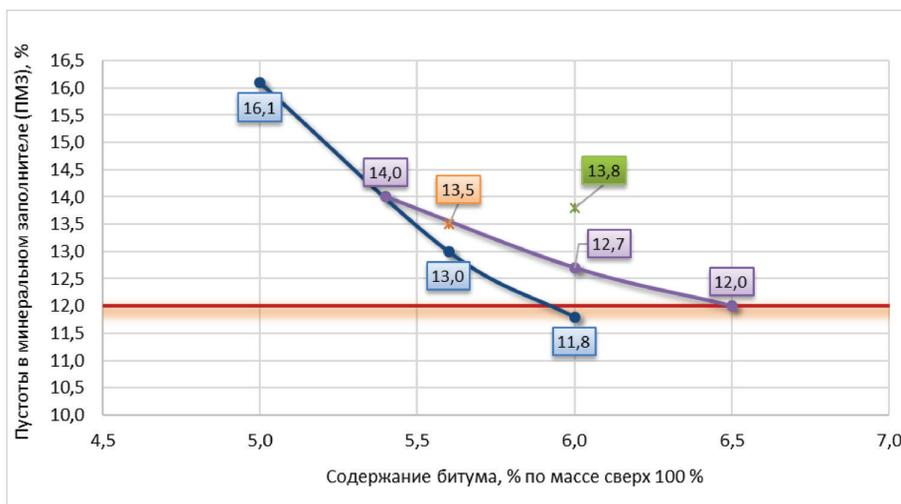
Объемная плотность всех сравниваемых асфальтобетонных смесей увеличивается с повышением содержания битума в смеси. Асфальтобетонные смеси, в которых был использован крупный заполнитель в виде щебня из природных горных пород (смеси ПГП и ПМП), имеют более низкую объемную плотность, чем смеси, в состав которых входит щебень из сталеплавильных шлаков (смеси СШЩ и ППП), – так, при равных процентных содержаниях битума объемные плотности смесей отличаются на 5%. Введение полиминерального порошка не влияет на объемную плотность асфальтобетонной смеси.

В свою очередь, максимальная плотность является еще одним



• - для смесей ПГП; • - для смесей СШЩ; ✕ - для смесей ПМП; ✕ - для смесей ППП; (шифр группы смесей см. в табл. 2)

Рис. 4. Содержание воздушных пустот в зависимости от содержания битума

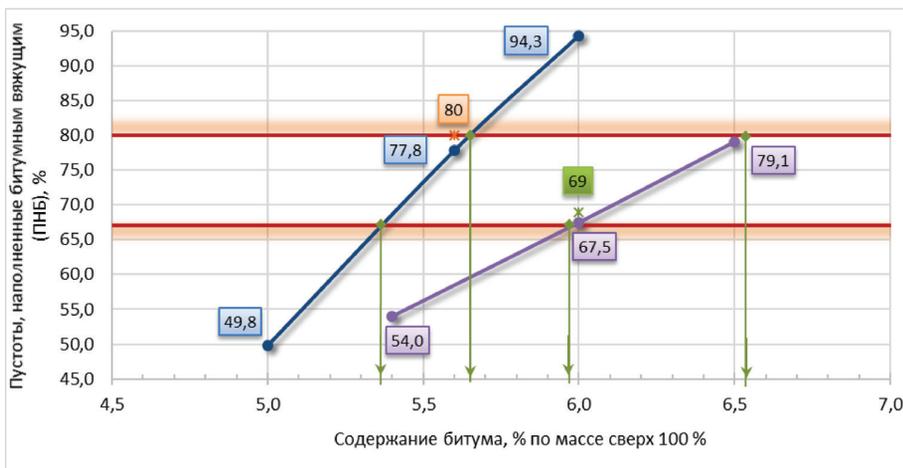


• - для смесей ПГП; • - для смесей СШЩ; ✕ - для смесей ПМП; ✕ - для смесей ППП; (шифр группы смесей см. в табл. 2)

Рис. 5. Содержание пустот в минеральном заполнителе в зависимости от содержания битума

существенным физическим свойством смеси и используется при оценке регламентируемого показателя «содержание воздушных пустот». Максимальная плотность – это плотность смеси без учета пустот. Использование щебня из сталеплавильного шлака (смеси СШЩ и ППП) приводит к увеличению максимальной плотности на 8,5%. Можно отметить, что увеличение процентного содержания битума приводит к ожидаемому уменьшению максимальной плотности для всех групп смесей, поскольку битум обладает более низкой плотностью.

Следует отметить, что содержание воздушных пустот в асфальтобетоне является одним из основных физических свойств и имеет наибольшее влияние на качество и долговечность получаемого асфальтобетона, поскольку именно этот параметр обуславливает устойчивость асфальтобетона к воздействию воды (водопроницаемость, водостойкость и морозостойкость), а также обеспечение эксплуатационных характеристик слоя (в том числе шероховатость при трении шины с дорожным покрытием и даже поглощение транспортного шума покрытием). В результате исследований установлено влияние



• - для смесей ПГП; • - для смесей СШЩ; \* - для смесей ПМП; \* - для смесей ППП; (цифры группы смесей см. в табл. 2)

Рис. 6. Содержание пустот, наполненных битумом, в зависимости от содержания битума

на содержание воздушных пустот не только процентного содержания битума, но и природы происхождения заполнителей, образующих минеральный каркас (рис. 4).

В соответствии с ГОСТ Р 58406.2 приемлемое содержание воздушных пустот для асфальтобетонных смесей верхнего слоя покрытия находится в диапазоне от 2,5% до 4,5%. Отсюда можно установить требуемое содержание битума в смеси:

- от 5,40% до 5,65% – для смесей на порфиритовом щебне (смеси ПГП и ПМП);
- от 5,90% до 6,50% – для смесей на сталеплавильном щебне (смеси СШЩ и ППП).

Табл. 7. Основные физические и эксплуатационные показатели исследуемых асфальтобетонов

Наименование группы	ПГП смесь на природных горных породах	СШЩ смесь на сталеплавиль- ном шлаковом щебне	ПМП смесь на полиминераль- ном порошке	ППП смесь на промышленных побочных продуктах
<b>Основные физические показатели</b>				
Содержание битума БНД 100/130, % (сверх 100 %)	5,6	6,0	5,6	6,0
Объемная плотность, г/см <sup>3</sup>	2,468	2,614	2,466	2,590
Максимальная плотность, г/см <sup>3</sup>	2,541	2,726	2,533	2,706
Содержание воздушных пустот, % (от 2,5 до 4,5)	2,9	4,1	2,6	4,3
Пустоты в минеральном заполнителе (ПМЗ), % (не менее 12,0)	13,0	12,7	13,5	13,8
Пустоты, наполненные битумным вяжущим (ПНБ), % (от 67 до 80)	77,8	67,5	80,0	69,0
<b>Основные эксплуатационные показатели</b>				
Средняя глубина колеи, мм – после 20 000 циклов (не более 4,0)*	2,3	2,0	2,4	2,7
– после 30 000 циклов	3,8	3,4	3,8	4,2
Коэффициент водостойкости (не менее 0,85)	0,92	0,89	0,91	0,86
<b>Дополнительные эксплуатационные показатели</b>				
Угол наклона кривой колееобразования, мм/1000 циклов (не более 0,15)	0,15	0,14	0,15	0,15
Разрушающая нагрузка по Маршаллу, Н (не менее 8010)	9 158	9 988	9 021	10 476
Деформация по Маршаллу, мм (от 2,0 до 3,5)	3,3	3,4	3,5	2,2

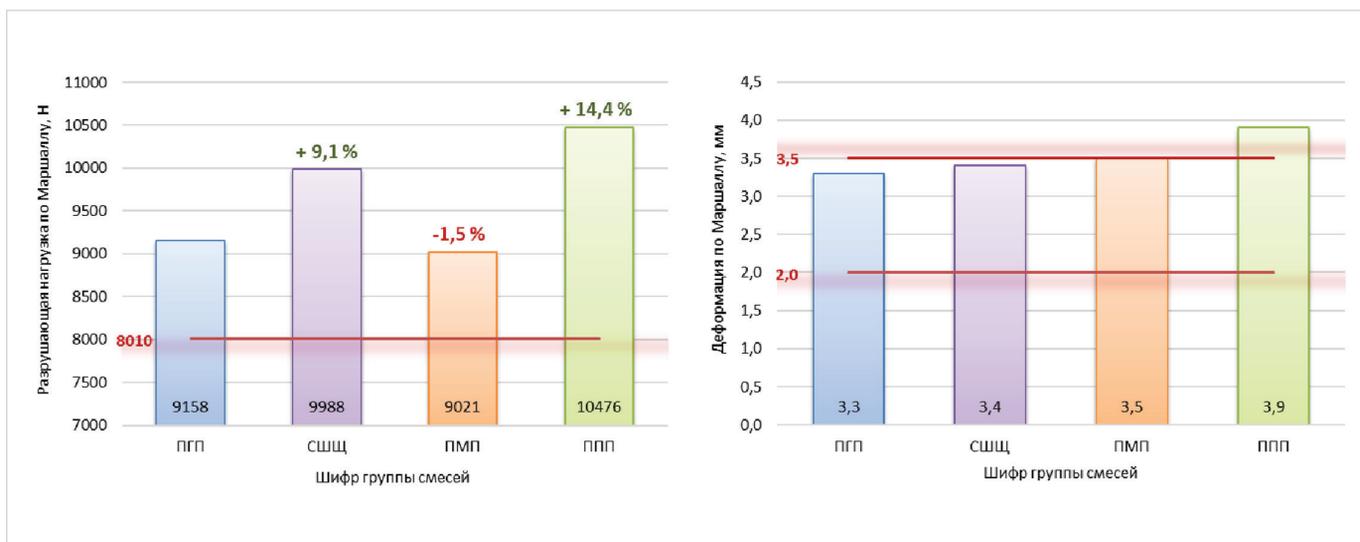


Рис. 7. Результаты оценки стабильности по Маршаллу

Для возможности расширения битума при положительных температурах важно обеспечить наличие свободного пространства, которое контролируется через параметры пустот в минеральном заполнителе (ПМЗ не менее 12%, рис. 5) и пустот, наполненных битумом (ПНБ от 67% до 80%, рис. 6).

Анализируя рис. 5–6, можно установить, что процентное содержание битума, определенное через обеспечение воздушных пустот, позволяет обеспечить параметры ПМЗ и ПНБ на допустимом уровне.

### 3.5. Определение оптимальных сочетаний материалов и оценка эксплуатационных характеристик

По результатам определения основных физических свойств асфальтобетонных смесей был установлен оптимальный процент битума, обеспечивающий достижение требуемых показателей. Оптимальное содержание битума на 0,5% выше в асфальтобетонных смесях, в составе которых использован сталеплавильный шлаковый щебень, по сравнению с природным материалом. При этом данные составы (прежде всего, смесь СШЩ) характеризуются повышенным содержанием воздушных пустот и несколько меньшим объемом пустот, наполненных битумом. Объясняется это, по-видимому, повышенной адсорбционной активностью шлакового щебня.

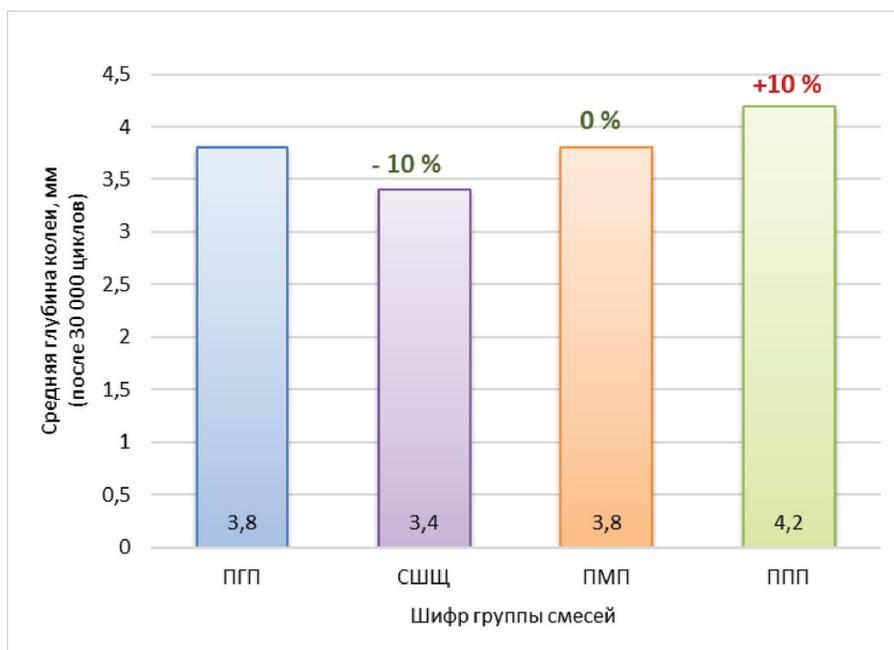


Рис. 8. Результаты испытаний по оценке колеобразования

В дальнейшем были определены основные эксплуатационные показатели асфальтобетона, определяющие его долговечность (табл. 7).

Оценка стабильности по Маршаллу позволяет установить, является ли достаточным процент содержания битума в смеси. Так, при избытке битума проявляются чрезмерные пластические деформации, а при его недостаточном количестве асфальтобетон демонстрирует низкое сопротивление разрушению.

Результаты оценки стабильности по Маршаллу (рис. 7) свидетельствуют о том, что асфальтобетон-

ные смеси на сталеплавильных шлаках (смеси СШЩ и ППП) обладают большей устойчивостью к пластическим деформациям, что подтверждает целесообразность использования данного материала в качестве крупного заполнителя для асфальтобетонных покрытий автомобильных дорог с высокой интенсивностью движения.

При этом повышение прочности асфальтобетона на 9% не сопровождается значительным изменением жесткости, так как деформации по Маршаллу находятся в том же интервале значений. С другой стороны,

совместное использование сталеплавильного щебня и полиминерального порошка (смесь ППП) не может быть рекомендовано, поскольку в этом случае асфальтобетон обладает самой большой деформативностью из сравниваемых смесей и превышает установленные национальными стандартами требования.

С целью подтверждения долговечности исследуемых асфальтобетонных смесей было проведено испытание на колееобразование. Это испытание измеряет деформацию, возникающую в образце при непрерывном прохождении стандартизированного нагруженного колеса в течение нескольких десятков тысяч циклов при повышенной температуре. Результаты этого испытания приведены на рис. 8.

По результатам испытаний по оценке колееобразования установлено, что использование сталеплавильного щебня в качестве минерального заполнителя снижает на 10% темп колееобразования. Таким образом, эксплуатационными характеристиками асфальтобетонов подтверждается гипотеза о возможности получения более жестких, прочных и долговечных асфальтобетонов.

### Заключение

Установлена возможность и оценен технический эффект от применения продукции из сталеплавильных шлаков в рамках новых систем проектирования асфальтобетонных смесей.

Применение сталеплавильного конвертерного шлака в качестве крупного заполнителя и наполнителя (минерального порошка) позволяет получать асфальтобетонные смеси, которые характеризуются повышенной устойчивостью к накоплению пластических деформаций, а значит, более долговечны. Поэтому этот вид асфальтобетонной смеси может быть использован в качестве верхнего слоя покрытия или в качестве слоя износа на автомобильных дорогах с высокой интенсивностью движения.

Результаты данного исследования демонстрируют наличие потенциала у побочных продуктов промышленности. Однако все применяемые побочные продукты или отходы необходимо должным образом предварительно подготовить к применению, а по результатам опытно-экспериментальных работ определить их место и роль в компонентном составе асфаль-

тобетонной смеси. Такой подход дает возможность реализовать на их основе создание новых устойчивых конструктивных материалов с повышенными характеристиками.

Наряду с технической целесообразностью, важно подчеркнуть и экологическую целесообразность использования побочных продуктов. С одной стороны, уменьшаются объемы накопления отходов на полигонах и отвалах; с другой стороны, это позволяет избежать добычи нового природного сырья; и, наконец, обеспечивается «новая жизнь» для уже полученных побочных продуктов.

**С.В. Ильин**, канд. техн. наук,  
Государственная компания

«Автодор»,

**Г.М. Левашов**, канд. техн. наук,  
директор ООО «Дорожный  
исследовательский центр

СИБАДИ»,

**А.Г. Рощупкин**, директор  
Дирекции по продажам  
попутной продукции

ПАО «НЛМК»,

**И.Ю. Сарычев**, канд. техн. наук,  
доцент, директор ЦКП МАДИ

**А.В. Фукс**,

канд. экон. наук, заместитель  
генерального директора  
ООО «БФБ»

### Литература

1. Plati, C. Sustainability factors in pavement materials, design, and preservation strategies: A literature review. *Constr. Build. Mater.* 2019, 211, 539–555.
2. EPA, “United States Environmental Protection Agency, Global Greenhouse Gas Emissions by Economic Sector,” 2015. [Online]. Available: <https://www.epa.gov/ghgemissions/global-greenhouse-gas-emissions-data>.
3. IPCC, “Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change,” Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2014.
4. Simone, A.; Vignali, V.; Lantieri, C. A New “Frugal” Approach to Road Maintenance: 100% Recycling of a Deteriorated Flexible Pavement. In *Proceedings of the 7th International Conference on Maintenance and Rehabilitation of Pavements and Technological Control, MAIREPAV 2012*, Auckland, New Zealand, 28–30 August 2012.
5. Kalyan, G.; Ramesh, A.; Ramayya, V.V. Performance evaluation of warm mix asphalt mixture with partial inclusion of reclaimed asphalt pavement materials. *Mater. Today Proc.* 2020.
6. Jain, S.; Singh, B. Cold mix asphalt: An overview. *J. Clean. Prod.* 2021, 280, 124378.
7. ПНСТ 358-2019 Дороги автомобильные общего пользования. Смесей асфальтобетонные дорожные и асфальтобетон теплые. Технические условия.
8. Дорожные одежды с использованием шлаков / [И.В. Королев и др.]; Под ред. А.Я. Тулаева. М.: Транспорт, 1986.
9. Самодуров С.И. Асфальтовый бетон с применением шлаковых материалов. Воронеж: Изд-во Воронеж. гос. ун-та, 1984.
10. Sorlini, S.; Sanzeni, A.; Rondi, L. Reuse of steel slag in bituminous paving mixtures. *J. Hazard. Mater.* 2012, 84–91.
11. Pasetto, M.; Baliello, A.; Giacomello, G.; Pasquini, E. Sustainable solutions for road pavements: A multi-scale characterization of warm mix asphalts containing steel slags. *J. Clean. Prod.* 2017, 166, 835–843.
12. Motevalizadeh, S.M.; Sedghi, R.; Rooholamini, H. Fracture properties of asphalt mixtures containing electric arc furnace slag at low and intermediate temperatures. *Constr. Build. Mater.* 2020, 240, 117965.
13. Keymanesh, M.R.; Ziari, H.; Zalnezhad, H.; Zalnezhad, M. Mix design and performance evaluation of microsurfacing containing electric arc furnace (EAF) steel slag filler. *Constr. Build. Mater.* 2020, 121336.
14. Manso, J.M.; Ortega-López, V.; Polanco, J.A.; Setién, J. The use of ladle furnace slag in soil stabilization. *Constr. Build. Mater.* 2013, 40, 126–134.
15. FHWA-RD-97-148 User Guidelines for Waste and Byproduct Materials in Pavement Construction, Federal Highway Administration.