

УТИЛИЗАЦИЯ ПАРОВОЗНЫХ ШЛАКОВ В СОСТАВАХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ УСИЛЕНИЯ ЗЕМЛЯНОГО ПОЛОТНА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ПУТИ

Н. Д. Шаванов, П. П. Панков, Д. В. Бесполитов,
Н. А. Коновалова, С. А. Евсюков, Н. Д. Авсеенко,
А. А. Фаткулин, В. П. Лушпей

*ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей
сообщения», Иркутск, Россия;*

*Забайкальский институт железнодорожного транспорта –
филиал ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет
путей сообщения», Чита, Россия;*

*ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет»,
Владивосток, Россия*

Ключевые слова: золошлаковые отходы; композиционные материалы; криоструктурирование; органо-неорганические материалы; паровозные шлаки; стабилизирующая добавка; структурообразование; усиление земляного полотна; утилизация отходов.

Аннотация: Обоснована возможность получения композиционных материалов с улучшенными функциональными свойствами для усиления земляного полотна, содержащих паровозный шлак, стабилизированный добавкой на основе гелеобразующего полимера. Показан механизм структурообразования полученных органо-неорганических материалов, состоящих из

Шаванов Николай Дмитриевич – аспирант, ассистент кафедры «Техносферная безопасность», e-mail: shavanov.nikolay@mail.ru, ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения», Иркутск, Россия; Панков Павел Павлович – кандидат технических наук, старший научный сотрудник Научно-исследовательского проектно-технологического бюро «ЗаБИЖТ-Инжиниринг»; Бесполитов Дмитрий Викторович – кандидат технических наук, младший научный сотрудник Научно-исследовательского проектно-технологического бюро «ЗаБИЖТ-Инжиниринг»; Коновалова Наталья Анатольевна – доктор технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник Научно-исследовательского проектно-технологического бюро «ЗаБИЖТ-Инжиниринг»; Евсюков Сергей Андреевич – студент; Авсеенко Надежда Дмитриевна – доктор медицинских наук, профессор кафедры «Техносферная безопасность», Забайкальский институт железнодорожного транспорта – филиал ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения», Чита, Россия; Фаткулин Анвир Амрулович – доктор технических наук, профессор, директор Дальневосточного регионального учебно-методического центра (ДВ РУМЦ); Лушпей Валерий Петрович – доктор технических наук, профессор, профессор департамента мониторинга и освоения георесурсов, ФГАОУ ВО «Дальневосточный федеральный университет», Владивосток, Россия.

макромолекул высокомолекулярных веществ и неорганических включений, подвергшихся криогенной обработке. Структура образца отличается разнородностью порового пространства, для которого характерно наличие мелкопористых и крупнопористых областей, что определяет его теплофизические свойства. Выявлено, что показатель прочности при сжатии образцов, подвергшихся трем циклам криогенной обработки и последующему высушиванию на воздухе, составил 3,5 МПа, теплопроводность – 0,17 Вт/(м·К). Установлено, что полученный композиционный материал является водонепроницаемым и морозостойким, что позволяет рекомендовать его для усиления земляного полотна в сложных климатических и инженерно-геологических условиях.

Введение

Приоритетной задачей Стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 г., направленной на повышение надежности объектов железнодорожной инфраструктуры, является разработка способов усиления основной площадки земляного полотна для обеспечения стабильности геометрии рельсовой колеи. Эффективный способ повышения устойчивости и несущей способности земляного полотна – устройство защитных слоев с высокими эксплуатационными характеристиками [1, 2]. При этом значительное количество проектных решений сводится к увеличению слоев непучинистых грунтов, введению химических веществ или цементно-песчаных растворов, применению геотекстильных материалов (нетканного геотекстиля, геоячеек, георешеток, геосеток) [3, 4]. К недостаткам подобных проектных решений можно отнести значительную материалоемкость и трудоемкость, слабую структурную прочность и химическую стойкость используемых материалов. В этой связи разработка эффективных составов композиционных материалов, улучшающих физико-механические свойства и морозостойкость защитных слоев, представляется актуальной задачей. Вовлечение в их составы крупнотоннажных отходов производства, являющихся нетрадиционным минеральным сырьем в производстве строительных материалов [5, 6], позволит также решить ряд острых экологических проблем.

В качестве минерального сырья для получения подобных композиционных материалов может быть использован паровозный шлак, накопленный на берегу озера Байкал в районе железнодорожной станции Слюдянка Восточно-Сибирской железной дороги. Паровозный шлак образуется при эксплуатации ретропоезда, который курсирует в теплое время года по однопутной неэлектрифицированной Кругобайкальской железной дороге и является объектом притяжения туристов [7, 8]. При этом движение на паровозной тяге предполагает очистку зольника каждые 100 км, что способствует формированию отвалов паровозных шлаков. Проявление эрозионных процессов на отвалах паровозных шлаков приводит к значительной техногенной нагрузке в центральной экологической зоне Байкальского региона, ухудшению санитарного состояния территорий, деградации почв,

изменению геохимии ландшафтов. Разработка способов крупнотоннажного прямого использования паровозных шлаков в составах композиционных материалов, применяемых при строительстве, реконструкции и ремонте объектов железнодорожной инфраструктуры, представляется актуальной задачей, соответствующей государственной политике в области обеспечения экологической безопасности Российской Федерации.

Проведенный патентный поиск в области получения композиционных материалов с улучшенными эксплуатационными характеристиками, позволил выявить, что многие технические решения направлены на повышение физико-механических свойств материала за счет изменения коллоидно-химических свойств посредством введения стабилизирующих добавок различной природы (А. с. СССР №№ 530932; 655775; 694597; 812869). Введение в составы композитов пластифицирующих добавок способствует повышению пластичности смеси, понижению водоцементного отношения, увеличению плотности и прочности материалов (А. с. СССР №№ 481661; 608871; 914699). Увеличение морозостойкости и долговечности материалов для устройства оснований дорожных одежд обеспечивается введением в их состав веществ, заполняющих воздушные поры и уменьшающих водонасыщение грунтов (А. с. СССР №№ 655775; 914699). Использование гидрофобизирующих добавок, снижающих водопоглощение, вызывает повышение водоустойчивости композитов (А. с. СССР №№ 655774; 863745). Применение веществ, способствующих образованию прочных пространственных структур, приводит к улучшению эксплуатационных характеристик строительных материалов (А. с. СССР №№ 834320; 876842), а образование гидрофобных органоминеральных структур вызывает повышение показателей морозостойкости и водостойкости (А. с. СССР №№ 658219; 876842).

Авторами работ [9, 10] показана эффективность использования стабилизирующих добавок полимерной природы, позволяющих обеспечить омоноличивание мелкораздробленных частиц. Большой научный и прикладной интерес вызывают системы, состоящие из гелеобразующего полимера, удерживаемого им растворителя и дисперсных наполнителей [11 – 16]. В связи с этим актуальным является разработка составов композиционных материалов для усиления земляного полотна, содержащих золошлаковые отходы, стабилизированные добавкой на основе гелеобразующего полимера.

Цель работы – разработка способов утилизации паровозного шлака станции Слюдянка в составе композиционных материалов для усиления земляного полотна железнодорожного пути.

Материалы и методы

Алюмосиликатный состав исходного минерального сырья изучали методом атомно-эмиссионной спектроскопии с индуктивно связанной плазмой (АЭС-ИСП) с помощью спектрометра эмиссионного Optima 5300DV (Perkin Elmer) по схеме ICP95A.

Термические особенности шлака изучены посредством методов дифференциальной сканирующей калориметрии (ДСК) и термогравиметрии (ТГ) на синхронном термоанализаторе STA 449F1 NETZSCH (диапазон

температур 30...1000 °С, атмосфера аргона, шаг 20 °С/мин, программа NETZSCH Proteus Analysis, v 5.2.1).

Фазовый состав шлака изучали методом порошковой дифракции на рентгеновском дифрактометре D8 Advance BRUKER AXS (40 кВ, 40 мА, CuK α , Ni-фильтр, шаг сканирования 0,02°, экспозиция 1 с, программа EVA Difffracplus, PDF-2).

Удельная поверхность шлака изучена на приборе Товарова с постоянной 29,91; влажность по ГОСТ 8735–88; плотность – ГОСТ 9758–2012; стойкость к железистому и силикатному распаду – ГОСТ 9758–2012. Показатель удельной эффективной активности естественных радионуклидов установлен в соответствии с требованиями ГОСТ 30108–94 на спектрометре-радиометре гамма- и бета-излучений РАДЭК МКГБ-01 и гамма-спектрометре РАДЭК МКСП-01.

Прочность при сжатии определяли на образцах-кубах, выдержанных в течение 60 суток на воздухе при температуре (20 $\pm$ 2) °С. Предел прочности при сжатии определяли при скорости движения плиты гидравлического пресса (3,0 $\pm$ 0,3) мм/мин.

Водонепроницаемость образцов изучали методом воздухопроницаемости. Данный метод основан на наличии экспериментально установленной статистической зависимости между воздухопроницаемостью поверхностных слоев композиционного материала и его водонепроницаемостью, определенной по методу «мокрое пятно». Параметром, характеризующим воздухопроницаемость, является значение времени, за которое давление в камере устройства снижается на определенную величину.

Определение теплопроводности проводили с помощью измерителя теплопроводности материалов МИТ-1 зондовым методом, основанным на измерении изменения температуры зонда за определенное время при его нагреве постоянной мощностью (диаметр зонда 6,0 мм). Зонд помещали внутрь образца с обеспечением их максимального теплового контакта. Для этого в образце сверлили отверстие диаметром (6,0 + 0,1) мм, глубиной 100 мм.

Дозировки паровозного шлака и стабилизирующей добавки в образцах композитов определяли экспериментальным путем. Количество вносимого шлака лимитировалось потерей текучести гетерофазной системы. Для изучения показателя прочности при сжатии и водонепроницаемости изготовлены образцы-кубы размером ребра 150 мм. Изучение теплопроводности проводили на образцах-цилиндрах диаметром (100 $\pm$ 5) мм.

Паровозный шлак перемешивали со стабилизирующей добавкой с последующим уплотнением на виброплощадке в течение (3,0 $\pm$ 0,1) мин при частоте (2900 + 100) колебаний/мин и амплитуде (0,40 + 0,05) мм. Сырьевую смесь в формах замораживали в морозильной камере при температуре минус (22 $\pm$ 2) °С в течение 8 ч. Размораживание образцов проводили при температуре (20 $\pm$ 2) °С в течение 2 ч. Образцы подвергали трем циклам замораживания / оттаивания, после чего образцы извлекали из форм и высушивали на воздухе на протяжении 60 суток.

Микроструктуру паровозного шлака и образцов композиционных материалов после криогенной обработки и последующего высушивания исследовали на двухлучевом сканирующем электронном микроскопе Tescan Lyra 3 XMN + EDS AZtec X-Max 80 Standart, напыление углерод, толщи-

на / плотность покрытия ~ 10 нм/2,25 г/см³. Электронные изображения получены с помощью детектора отраженных электронов BEI/BSE. Электронные изображения с топографической характеристикой поверхности образца накапливались с помощью детектора вторичных электронов SEI/SE.

Формирование структуры композиционного материала изучали методом компьютерной рентгеновской микротомографии на рентгеновском микротомографе SkyScan 1272 (Bruker microCT, Бельгия) со следующими параметрами съемки образцов: фильтр Al 0,25 мм (напряжение рентгеновского источника 60 кВ, текущий ток 180 мкА), вращение образца 0...180° с шагом 0,2°, размер пиксела изображения 14 или 15 мкм, формат изображения 1224 × 820 пикселей (экспозиция 326 мс). Реконструкция изображений проводилась в программе NRecon 1.7.1.0 (Bruker microCT), диапазон значений – от 700 до 7000 в единицах Хаунсфилда (HU). Двухмерные и трехмерные изображения образцов подготовлены с помощью программ DataViewer 1.5.3.4 (64-bit) и CTvox 3.3.0 r1403 (64-bit) (Bruker microCT) соответственно. Расчет значений общей пористости образцов проведен согласно методикам Bruker microCT в программе CT Analyser version 1.16.9.0 + (64-bit).

Результаты и обсуждение

Алюмосиликатный состав шлака ω , масс. %: 0,02 MnO; 0,05 P₂O₅; 0,27 Na₂O; 0,30 CaO_{св}; 0,40 SO₃; 0,41 TiO₂; 1,04 K₂O; 1,73 MgO; 2,29 CaO; 3,55 Fe₂O₃; 9,00 C; 20,50 Al₂O₃; 50,50 SiO₂; 10,00 – потери при прокаливании. Показатель удельной поверхности частиц – 240 м²/кг; влажность – 0,68 %; средняя плотность – 1360 кг/м³; полный остаток зольной фракции – 22 %; стойкость к железистому и силикатному распаду – 7,67 и 40,00 % соответственно. Шлак по гидравлическим свойствам является инертным, содержание CaO_{св} – 0,3 масс. %. Удельная эффективная активность естественных радионуклидов (²²⁶Ra, ²³²Th, ⁴⁰K) в образце шлака составила (242 ± 25) Бк/кг, что позволяет их использовать в строительной индустрии без ограничений.

Данные рентгенофазового анализа свидетельствуют, что шлак содержит кордиерит Fe₂Al₃(AlSi₅O₁₈) (3 %), анортит CaAl₂Si₂O₈ (16 %), кварц SiO₂ (22 %), кристобалит SiO₂ (24 %), муллит 3Al₂O₃·2SiO₂ (35 %) (рис. 1, а).

На термограмме (рис. 1, б) паровозного шлака отмечен экзотермический эффект при 665 °С с потерей веса около 16 %, что связано с процессом остаточного окисления органических веществ. Диссоциация карбонатов сопровождается проявлением слабого эндотермического эффекта с максимумом при 657 °С. Методом сканирующей электронной микроскопии установлено, что паровозный шлак состоит из полидисперсных фракций крупных частиц неправильной формы с размерами более 1 мм, обладающих системой макро- и микропор (рис. 2).

Образцы композиционного материала получали из паровозного шлака, модифицированного стабилизирующей гелеобразующей полимерной добавкой в соотношении 2 : 1. Стабилизирующая добавка представляет

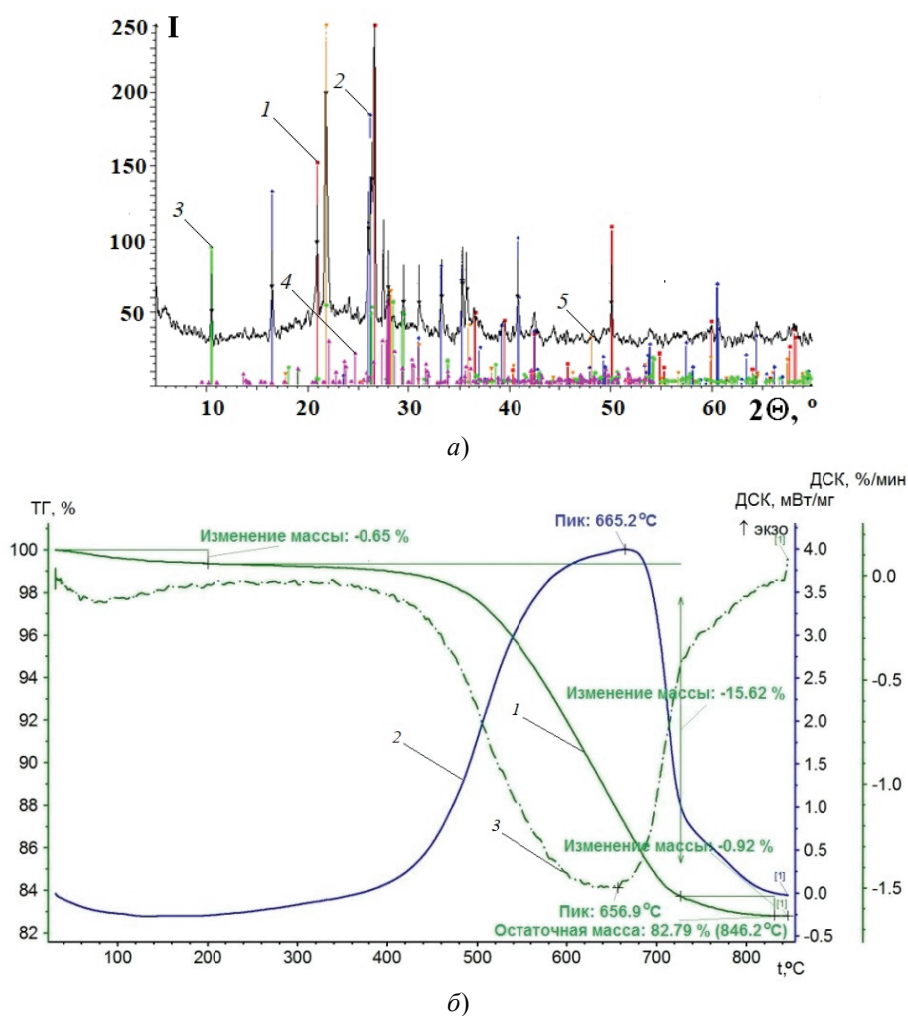


Рис. 1. Дифрактограмма (а) и термограмма (б) шлака:
а – кварц 1, муллит 2, кордиерит 3, анортит 4, кристобалит 5;
б – ТГ 1, ДСК 2, ДТГ 3

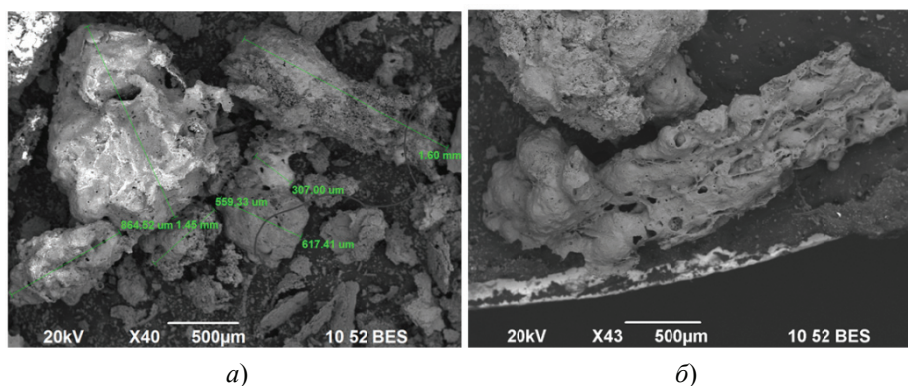


Рис. 2. Микрофотографии СЭМ образца паровозного шлака,
содержащего крупные частицы (а)
и частицы с выраженной системой макро- и микропор (б)

собой прозрачную вязкую жидкость; плотность, определенная пикнометрическим методом, составляет $1,22 \text{ г/см}^3$; $\text{pH} = 8$. Условия синтеза: водная среда, температура реакционной среды 60°C ; массовое соотношение высокомолекулярных веществ – $4 : 6$; концентрация в растворе активного компонента – 100 г/л . Установлено, что показатель прочности при сжатии композиционного материала после криогенной обработки и высушивания на воздухе составил $3,5 \text{ МПа}$, теплопроводность – $0,17 \text{ Вт/(м·К)}$. Выявлено, что композит является водонепроницаемым и морозостойким, что позволяет рекомендовать его для усиления земляного полотна в сложных климатических и инженерно-геологических условиях.

Механизм структурообразования образцов изучен методами сканирующей электронной микроскопии и компьютерной рентгеновской микротомографии. Установлено, что криогенная обработка способствует формированию микроструктуры гетерофазной морфологии с системой макро- и микропор (рис. 3).

Криогенная обработка приводит к кристаллизации растворителя и концентрированию полимерной составляющей в незамерзшей жидкой фазе, что способствует усилению межмолекулярных взаимодействий «полимер – полимер» и формированию устойчивых узлов пространственной сетки. Кристаллизация растворителя может проходить в пространстве макропор уже сформированной полимерной структуры, что вызывает физическое расширение макропор и увеличение числа межмолекулярных контактов полимера в их стенках, тем самым повышая жесткость материала и его упрочнение. После криогенной обработки и высушивания микроструктура образца принимает вид единой плотной массы, состоящей из частиц шлака и полимерной составляющей (см. рис. 3).

Методом компьютерной рентгеновской микротомографии изучены структурно-морфологические признаки и особенности пустотного пространства образцов после криогенной обработки, в том числе с последующим высушиванием. Композиционный материал, изученный после трех циклов замораживания / оттаивания, характеризуется сложной структурой пустотного пространства в объеме минерально-полимерной сетки, пористость образца составила $19,11 \%$ (рис. 4, а).

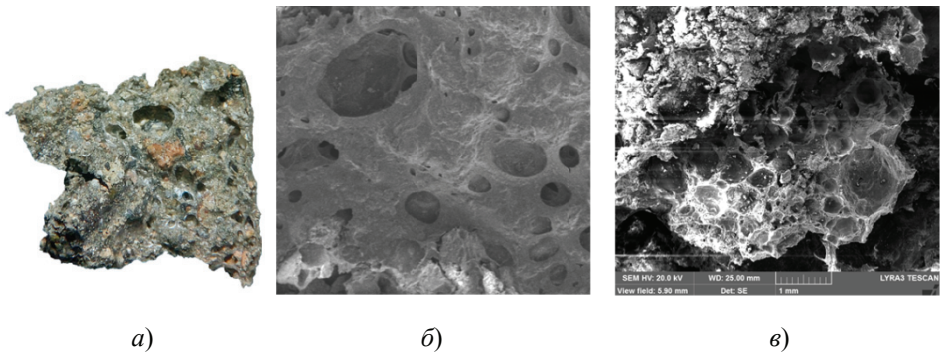


Рис. 3. Микрофотографии СЭМ композиционного материала после криогенной обработки и последующего высушивания:
а – общий вид; б, в – системы макро- и микропор соответственно

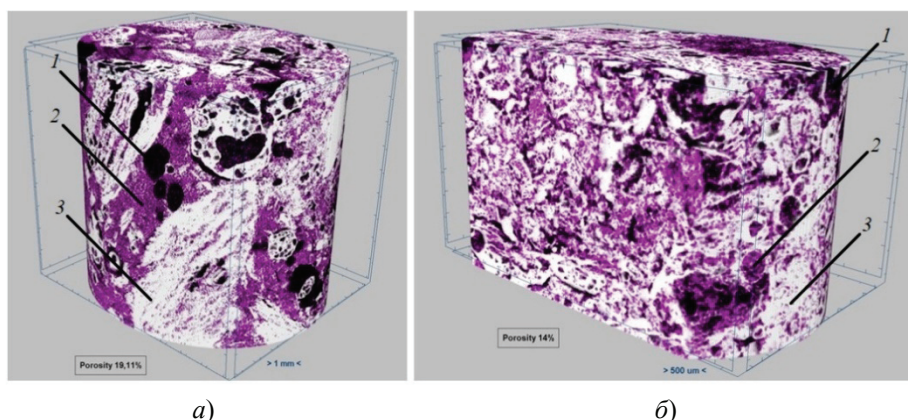


Рис. 4. Микротомографическое объемное изображение распределения воздушных пор 1, стабилизирующей добавки 2 и шлака 3 после криогенной обработки (а), криогенной обработки и высушивания (б)

Заключение

Закономерности и характер изменения пористости образца после криогенной обработки и высушивания играют важную роль в формировании свойств композиционного материала. Высушивание образца в течение 60 суток приводит к разнородности порового пространства, для которого характерно наличие как мелкопористых, так и крупнопористых областей (см. рис. 4, б). Пористость образца после высушивания составила 14 %. Таким образом, высушивание композита в течение 60 суток способствует уменьшению его пористости в 1,5 раза, при этом сохранение порового пространства при высушивании определяет оптимальное значение показателя теплопроводности композита без потери его прочности.

Работа выполнена в рамках гранта ОАО «РЖД» для молодых ученых на проведение научных исследований, направленных на создание новой техники и технологий для применения на железнодорожном транспорте «Разработка полимерных композиционных материалов для теплоизоляции и усиления земляного полотна железнодорожного пути на слабом основании» (договор № 5103671 от 26.12.2022 г.).

Список литературы

1. Валиев, Н. А. Защита от деградации многолетнемерзлых грунтов на снеготаносимых участках / Н. А. Валиев, Д. А. Ковенькин // Путь и путевое хозяйство. – 2021. – № 11. – С. 23 – 26.
2. Ашпиз, Е. С. Предотвращение деградации многолетнемерзлых грунтов в основании насыпей железных дорог / Е. С. Ашпиз, Л. Н. Хрусталева // Криосфера Земли. – 2020. – Т. 24, № 5. – С. 45 – 50. doi: 10.21782/KZ1560-7496-2020-5(45-50)
3. Котова, И. А. Техничко-экономическое сравнение технологических вариантов устройства подбалластных защитных слоев с использованием объемной георешетки / И. А. Котова, А. В. Чижов, О. Г. Юдин // Вестник Сибирского государственного университета путей сообщения. – 2017. – № 1(40). – С. 36 – 45.

4. Indraratna, B. Deformation and Degradation Mechanics of Recycled Ballast Stabilised with Geosynthetics / B. Indraratna, W. Salim // *Soils and Foundations*. – 2003. – Vol. 43, No 4. – P. 35 – 46. doi: 10.3208/sandf.43.4_35
5. Advances in Ground Improvement Using Waste Materials for Transportation Infrastructure / B. Indraratna, Y. Qi, M. Tawk, A. Heitor, Ch. Rujikiatkamjorn, K. S. Navaratnarajah // *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Ground Improvement*. – 2022. – Vol. 175, no. 1. – P. 3 – 22. doi: 10.1680/jgrim.20.00007
6. Орешкин, Д. В. Экологические проблемы комплексного освоения недр при масштабной утилизации техногенных минеральных ресурсов и отходов в производстве строительных материалов / Д. В. Орешкин // *Строительные материалы*. – 2017. – № 8. – С. 55 – 63. doi: 10.31659/0585-430X-2017-751-8-55-63
7. Бибеева, А. Ю. Анализ структуры туристского потока в Слюдянский район Иркутской области / А. Ю. Бибеева // *Успехи современного естествознания*. – 2020. – № 7. – С. 61 – 69. doi: 10.17513/use.37433
8. Фелелов, И. В. Видовой состав и количество птиц на участке Кругобайкальской железной дороги Ангасольская-Баклань в июне 2008 и 2014 гг. / И. В. Фелелов // *Байкальский зоологический журнал*. – 2015. – № 1(16). – С. 110 – 112.
9. Structural Formation of Soil Concretes Based on Loam and Fly Ash, Modified with a Stabilizing Polymer Additive / N. Konovalova, P. Pankov, V. Petukhov, R. Fediuk, M. Amran, N. Vatin // *Materials*. – 2022. – Vol. 15, No. 14. – P. 4893. doi: 10.3390/ma15144893
10. Road Soil Concrete Based on Stone Grinder Waste and Wood Waste Modified with Environmentally Safe Stabilizing Additive / N. Konovalova, P. Pankov, D. Bespolitov, V. Petukhov, I. Panarin, E. Fomina, V. Lushpey, A. Fatkulin, A. Othman // *Case Studies in Construction Materials*. – 2023. – Vol. 19, No. 12. – P. e02318. doi: 10.1016/j.cscm.2023.e02318
11. Study of Cryostructurization of Polymer Systems. IX. Poly(vinyl alcohol) Cryogels Filled with Particles of Cross-Linked Dextran Gel / V. I. Lozinsky, A. I. Zubov, V. K. Kulakova, E. F. Titova, S. V. Rogozhin // *Journal of Applied Polymer Science*. – 1992. – Vol. 44, No. 8. – P. 1423 – 1435. doi: 10.1002/app.1992.070440813
12. Study of Cryostructuration of Polymer Systems. 24. Poly(vinyl alcohol) Cryogels Filled with Particles of Strong Anion-Exchanger: Properties of the Composite Materials and Potential Application / E. N. Savina, A. Hanora, F. M. Plieva, I. Y. Galaev, B. Mattiasson, V. I. Lozinsky // *Journal of Applied Polymer Science*. – 2005. – Vol. 95, No. 3. – P. 529 – 238. doi: 10.1002/app.21227
13. Strength Properties of Ice-Soil Composites Created by Method of Cryotropic Gel Formation / N. K. Vasiliev, A. A. Ivanov, V. V. Sokurov, I. N. Shatalina, K. N. Vasilyev // *Cold Regions Science and Technology*. – 2012. – Vol. 70. – P. 94 – 97. doi: 10.1016/j.coldregions.2011.09.003
14. Millon, L. E. Compression Properties of Polyvinyl Alcohol-Bacterial Cellulose Nanocomposite / L. E. Millon, C. J. Oates, W. Wan // *Journal of Biomedical Materials Research*. – 2009. – Vol. 90, No. 2. – P. 922 – 929. doi: 10.1002/jbm.b.31364
15. Fabrication and Characterization of Metal Organic Frameworks / Polyvinyl Alcohol Cryogel and their Application in Extraction of Non-Steroidal Anti-Inflammatory Drugs in Water Samples / Y. Wang, Y. Zhang, J. Cui, S. Li, M. Yuan, T. Wang, Q. Hu, X. Hou // *Analytica Chimica Acta*. – 2018. – Vol. 1022. – P. 45 – 52. doi: 10.1016/j.aca.2018.03.056
16. Thermal Characterization by DSC and TGA Analyses of PVA Hydrogels with Organic and Sodium MMT / F. Reguieg, L. Ricci, N. Bouyacoub, M. Belbachir, M. Bertoldo // *Polymer Bulletin*. – 2020. – Vol. 77, No. 1. – P. 929 – 948. doi: 10.1007/s00289-019-02782-3

References

1. Valiev N.A., Kovenkin D.A. [Protection against degradation of permafrost soils in snow-covered areas], *Put' i putevye hozyajstvo* [Path and track facilities], 2021, no. 11, pp. 23-26. (In Russ., abstract in Eng.)
2. Ashpiz E.S., Xrustalev L.N. [Preventing the degradation of permafrost soils at the base of railway embankments], *Kriosfera Zemli* [Earth's cryosphere], 2020, vol. 24, issue 5, pp. 45-50. doi: 10.21782/KZ1560-7496-2020-5(45-50) (In Russ., abstract in Eng.)
3. Kotova I.A., Chizhov A.V., Yudin O.G. [Technical and economic comparison of technological options for constructing sub-ballast protective layers using a three-dimensional geogrid], *Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshheniya* [Bulletin of the Siberian State Transport University], 2017, no. 1(40), pp. 36-45. (In Russ., abstract in Eng.)
4. Indraratna B., Salim W. Deformation and Degradation Mechanics of Recycled Ballast Stabilised with Geosynthetics, *Soils and Foundations*, 2003, vol. 43, no 4, pp. 35-46. doi: 10.3208/sandf.43.4_35
5. Indraratna B., Qi Y., Tawk M., Heitor A., Rujikiatkamjorn Ch., Navaratnarajah S.K.. Advances in Ground Improvement Using Waste Materials for Transportation Infrastructure, *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Ground Improvement*, 2022, vol. 175, no. 1, pp. 3-22. doi: 10.1680/jgrim.20.00007
6. Oreshkin D.V. [Environmental problems of integrated subsoil development with large-scale utilization of technogenic mineral resources and waste in the production of building materials], *Stroitel'nye materialy* [Construction Materials], 2017, no. 8, pp. 55-63. doi: 10.31659/0585-430X-2017-751-8-55-63 (In Russ., abstract in Eng.)
7. Bibaeva A.Yu. [Analysis of the structure of tourist flow to the Slyudyansky district of the Irkutsk region], *Uspexi sovremennogo estestvoznaniya* [Advances of modern natural science], 2020, no. 7, pp. 61-69. doi: 10.17513/use.37433 (In Russ., abstract in Eng.)
8. Fefelov I.V. [Species composition and number of birds on the Angasolskaya-Baklan section of the Circum-Baikal railway in June 2008 and 2014], *Bajkal'skij zoologicheskij zhurnal* [Baikal Zoological Journal], 2015, no. 1(16), pp. 110-112. (In Russ., abstract in Eng.)
9. Konovalova N., Pankov P., Petukhov V., Fediuk R., Amran M., Vatin N. Structural Formation of Soil Concretes Based on Loam and Fly Ash, Modified with a Stabilizing Polymer Additive, *Materials*, 2022, vol. 15, no. 14, pp. 4893. doi: 10.3390/ma15144893
10. Konovalova N., Pankov P., Bespolitov D., Petukhov V., Panarin I., Fomina E., Lushpey V., Fatkulin, Othman A. Road soil concrete based on stone grinder waste and wood waste modified with environmentally safe stabilizing additive, *Case Studies in Construction Materials*, 2023, vol. 19, no 12, pp. e02318. doi: 10.1016/j.cscm.2023.e02318
11. Lozinsky V.I., Zubov A.I., Kulakova V.K., Titova E.F., Rogozhin S.V. Study of cryostructurization of polymer systems. IX. Poly(vinyl alcohol) cryogels filled with particles of cross-linked dextran gel, *Journal of Applied Polymer Science*, 1992, vol. 44, no. 8, pp. 1423-1435. doi: 10.1002/app.1992.070440813
12. Savina E.N., Hanora A., Plieva F.M., Galaev I.Y., Mattiasson B., Lozinsky V.I. Study of cryostructuration of polymer systems. 24. Poly(vinyl alcohol) cryogels filled with particles of strong anion-exchanger: Properties of the composite materials and potential application, *Journal of Applied Polymer Science*, 2005, vol. 95, no. 3, pp. 529-238. doi: 10.1002/app.21227
13. Vasiliev N.K., Ivanov A.A., Sokurov V.V., Shatalina I.N., Vasilyev K.N. Strength properties of ice-soil composites created by method of cryotropic gel

formation, *Cold Regions Science and Technology*, 2012, vol. 70, pp. 94-97. doi: 10.1016/j.coldregions.2011.09.003

14. Millon L.E., Oates C.J., Wan W. Compression properties of polyvinyl alcohol-bacterial cellulose nanocomposite, *Journal of Biomedical Materials Research*, 2009, vol. 90, no. 2, pp. 922-929. doi: 10.1002/jbm.b.31364

15. Wang Y., Zhang Y., Cui J., Li S., Yuan M., Wang T., Hu Q., Hou X. Fabrication and Characterization of Metal Organic Frameworks / Polyvinyl Alcohol Cryogel and their Application in Extraction of Non-Steroidal Anti-Inflammatory Drugs in Water Samples, *Analytica Chimica Acta*, 2018, vol. 1022, pp. 45-52. doi: 10.1016/j.aca.2018.03.056

16. Reguieg F., Ricci L., Bouyacoub N., Belbachir M., Bertoldo M. Thermal characterization by DSC and TGA analyses of PVA hydrogels with organic and sodium MMT, *Polymer Bulletin*, 2020, vol. 77, no. 1, pp. 929-948. doi: 10.1007/s00289-019-02782-3

Recycling of Steam Slag in Composite Materials to Strengthen Railway Subgrades

**N. D. Shavanov, P. P. Pankov, D. V. Bespolitov,
N. A. Konovalova, S. A. Evsyukov, N. D. Avseenko,
A. A. Fatkulin, V. P. Lushpey**

*Irkutsk State Transport University, Irkutsk, Russia;
Transbaikal Institute of Railway Transport – Branch of Irkutsk State
Transport University, Chita, Russia;
Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia*

Keywords: ash and slag waste; composite materials; cryostructuring; organic-inorganic materials; locomotive slag; stabilizing additive; structuring; strengthening the subgrade; recycling.

Abstract: The paper substantiates the possibility of obtaining composite materials with improved functional properties for strengthening the subgrade, containing locomotive slag stabilized by an additive based on a gel-forming polymer. The mechanism of structure formation of the resulting organic-inorganic materials, consisting of macromolecules of high-molecular substances and inorganic inclusions subjected to cryogenic treatment, is shown. The structure of the sample is distinguished by the heterogeneity of the pore space, which is characterized by the presence of fine-porous and large-porous regions, which determines its thermophysical properties. It was revealed that the compressive strength of samples subjected to three cycles of cryogenic treatment and subsequent air drying was 3.5 MPa, thermal conductivity – 0.17 W/(m·K). It has been established that the resulting composite material is waterproof and frost-resistant, which makes it possible to recommend it for strengthening the subgrade in difficult climatic and engineering-geological conditions.

© Н. Д. Шаванов, П. П. Панков, Д. В. Бесполитов, Н. А. Коновалова,
С. А. Евсюков, Н. Д. Авсеенко, А. А. Фаткулин, В. П. Лушпей, 2024