This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

Research Article
ISSN 2304-6295
Received: September 15, 2025 *Accepted: October 31, 2025* *Published: December 12, 2025*

Composite materials based on ash and slag waste for thermal insulation of roadbeds

Pankov, Pavel Pavlovich[1]
Konovalova, Nataliya Anatolyevna[1*]
Shavanov, Nikolay Dmitrievich[1]
Bespolitov, Dmitry Viktorovich[1]

[1] Zabaikalsky Institute of Railway Transport, Chita, Russian Federation; PavelPankov110990@mail.ru (P.P.P.); zabizht_engineering@mail.ru (K.N.A.); shavanov.nikolay@mail.ru (Sh.N.D.); dimazabizht2018@mail.ru (B.D.V.)
Correspondence:* email zabizht_engineering@mail.ru

Keywords:

Composite materials, Thermal insulation of roadbeds, Cryostructuring, Polymer matrix, Waste disposal, Ash and slag mixtures

Abstract:

The object of research is the ash and slag mixture of the Amazar boiler station (Trans-Baikal Railway), involved in the composition of the composite as an inert filler of the polymer matrix. The aim of this work is to study the methods of utilization of ash and slag mixture in the compositions of composite materials for waterproofing and thermal insulation of the main platform of the railway roadbed. **Method**. To obtain data on the chemical and phase composition, physical and physicochemical properties, microstructural features of the ash and slag mixture and the composite based on it, modern analytical methods were used (X-ray fluorescence and X-ray phase analysis; differential scanning calorimetry and thermogravimetry; infrared spectroscopy; light, stereo- and scanning electron microscopy; computed X-ray microtomography, etc.). The conditions for the synthesis of the composite matrix, sample preparation modes and their performance characteristics are presented. Scanning electron microscopy and computed X-ray microtomography were used to study the pore space properties of a composite material and establish the mechanism of its cryostructuring. **Results**. The ash and slag mixture was found to be non-heaving, with the specific effective activity of natural radionuclides meeting the requirements of GOST 30108-94 (295 Bq/kg), allowing its unrestricted use in the construction industry. Based on its hydraulic activity, the ash and slag mixture is classified as an inert material. Infrared spectroscopy, differential scanning calorimetry, and thermogravimetry revealed the presence of organic compounds (coal, semi-coke, and coke residues) in the ash and slag mixture. Scanning electron microscopy revealed the heterogeneity of the ash and slag mixture's pore space, which may facilitate the production of a composite with optimal thermal insulation properties. The resulting composite material is frost-resistant and waterproof (ti not less than 3600 s), characterized by a compressive strength of 6.20 MPa and a thermal conductivity of 0.17 W/(m•K). Cryogenic treatment of the composite material led to a change in the spatial orientation of its microstructural elements. The maximum volume in the composite material structure (13-39 mm3) is occupied by pores with sizes of 0.028-0.084 mm, which account for up to 41 %. The total porosity of the composite was 17.28 %, which determines its thermophysical properties and allows it to be recommended for the installation of hydro- and thermal-insulating protective layers under railway ballast.

1 Introduction

Повышение надежности, долговечности и безопасности объектов транспортной железнодорожной инфраструктуры, в том числе в субъектах Арктической зоны Российской

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

Федерации, а также их адаптация к климатическим рискам является одной из приоритетных задач Транспортной стратегии Российской Федерации до 2030 года с прогнозом на период до 2035 года. Эффективным способом решения данной задачи является внедрение новых видов композиционных материалов для стабилизации основной площадки земляного полотна железнодорожного пути посредством создания защитного слоя, выполняющего гидроизоляционную и морозозащитную функции.

Указом Президента Российской Федерации «О стратегии национальной безопасности Российской Федерации» № 400 от 02.07.2021 г. введены требования по ликвидации объектов накопленного вреда и повышению уровня утилизации отходов. В связи с этим вовлечение золошлаковых отходов в составы композиционных материалов представляется актуальной задачей, позволяющей решить острые экологические проблемы [1], снизить присутствие токсикантов [2], радиационно опасных компонентов [3] и тяжелых металлов в окружающей среде [4], [5]. Особую важность приобретает разработка способов утилизации золошлаковых отходов котельных ОАО «РЖД» в технологиях железнодорожного строительства, что, в соответствии с национальными целями развития Российской Федерации (Указ Президента Российской Федерации В.В. Путина № 309 от 07.05.2024 г.), может способствовать формированию экономики замкнутого цикла.

Многочисленные исследования свидетельствуют об эффективности утилизации золошлаковых отходов в строительной индустрии [6], [7]. Переработка зольных и шлаковых отходов может сопровождаться получением различной товарной продукции [8]-[10]. Данные отходы востребованы при получении кирпича и керамики [11], [12], рецептуры которых предполагают применение метода механохимической активации исходного минерального сырья [13] и использование добавок различной природы [14]. Золошлаковые отходы вовлекают в составы теплоизоляционных материалов [15], [16]; используют как самостоятельное вяжущее или в качестве активной добавки к вяжущим материалам [17]-[19]. Показана эффективность их использования при получении бетона [20]-[22]; композиционных материалов [23], [24], в том числе на основе кремния [25]; экологически чистых высокопрочных цементных [26] и геополимерных композитов [27] и др. При этом вопрос их утилизации в составах материалов для усиления земляного полотна железнодорожного пути изучен явно недостаточно [28], [29].

Известно [30], [31], что композиционные материалы могут содержать в своем составе наполнители различной природы. Показана эффективность криогенной обработки в процессе формирования структуры композиционных материалов [32], [33], а также установлены особенности формирования макропористых систем вследствие последовательного замораживания и оттаивания [34], [35]. Наиболее значимым является установление механизмов криоструктурирования дисперсий различных наполнителей в концентрированных растворах высокомолекулярных соединений [36]-[38]. В связи с этим актуальным представляется изучение возможности использования золошлаковых отходов в качестве минерального наполнителя композиционного материала и установление механизма формирования его структуры для управления его целевыми свойствами.

Цель работы: изучение способов утилизации золошлаковой смеси котельной станции Амазар (Забайкальская железная дорога) в составах композиционных материалов для гидро- и теплоизоляции основной площадки земляного полотна железнодорожного пути.

Поставленная цель достигалась решением следующих задач:

1. Изучение химического и фазового состава, физических и физико-химических свойств, микроструктурных особенностей золошлаковой смеси для оценки ее применимости при получении композиционного материала.
2. Разработка состава композиционного материала, содержащего золошлаковую смесь, и установление его эксплуатационных характеристик.
3. Изучение механизма криоструктурирования разработанного композиционного материала.

2 Materials and Methods

Композиционный материал является гибридной системой, состоящей из полимерной матрицы и дисперсного наполнителя – золошлаковой смеси. Матрица синтезирована на основе высокомолекулярных соединений с добавкой полиэлектролита в водной среде при температуре 140 °С в течение 120 минут. Массовое соотношение высокомолекулярных веществ – 1:3,

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

концентрация активного компонента – 90 г/л. Синтез осуществляли на электромагнитной мешалке IKA C-MAG HS 10 (IKA-Werke GmbH & Co. KG, Германия) с синхронным нагревом и частотой вращения перемешивающего элемента 500 об/мин.

Образцы получали путем соединения дисперсного наполнителя и матрицы. Полученную смесь перемешивали, помещали в формы и уплотняли на вибрационной площадке в течение 2 минут с частотой 2800 кол./мин и амплитудой 0.15 мм. После этого проводили криогенную обработку образцов, которая заключалась в чередовании циклов замораживания при температуре минус 18±2 °С в течение 6 часов и размораживания при температуре 22±2 °С в течение 3 часов. Образцы извлекали из форм и высушивали на воздухе в течение 30 суток. Эксплуатационные характеристики устанавливали после трех циклов замораживания/оттаивания. Теплопроводность композиционных материалов определяли зондовым методом с помощью измерителя теплопроводности материалов МИТ-1 (ООО НПП «Интерприбор», г. Челябинск, Россия). Прочность при сжатии устанавливали с помощью гидравлического пресса ГИМС-VIII-1000-Р-1-4 SUBRAMAX (ООО НПЦ «СУБРА», г. Нефтекамск, Россия), показатель водонепроницаемости – методом воздухопроницаемости.

Физические свойства золошлаковой смеси изучали в соответствии с требованиями нормативных документов. Удельную эффективную активность естественных радионуклидов ($А_{эфф}$) золошлаковой смеси определяли на спектрометрах МКГБ-01 и МКСП-01 РАДЭК (ООО «НТЦ «РАДЭК», г. Санкт-Петербург, Россия) в соответствии с межгосударственным стандартом ГОСТ 30108-94 [39]. Степень пучинистости золошлаковой смеси изучали с помощью прибора УПГ-МГ4 (ООО «СКБ Стройприбор», г. Челябинск, Россия) в соответствии с межгосударственным стандартом ГОСТ 28622-2012 [40].

Химический состав золошлаковой смеси устанавливали методом рентгенофлуоресцентного анализа с помощью сканирующего рентгенофлуоресцентного спектрометра S4 Pioneer, Bruker AXS, Германия (4.5 кВт; 60 кВ; Ni/C многослойный монохроматор).

Фазовый состав золошлаковой смеси изучали методом порошковой дифракции на рентгеновском дифрактометре *Rigaku MiniFlex II,* Rigaku Corporation, Япония (CuKα; 30 кВ; 15 мА; монохроматор на дифрагированном пучке; экспозиция 1 с; шаг 0.02 °; база данных ICDD). Количественный анализ фаз проводили с помощью рентгеновского дифрактометра *Bruker D2 Phaser*, Германия (30 кВ; 10 мА; детектор LYNXEYE; разрешение детектора 75 мкм; программное обеспечение TOPAS). Рентгенофазовый анализ композиционного материала проводили на рентгеновском дифрактометре D8 ADVANCE Bruker, Германия (CuKα; 40 кВ; 40 мА; Ni-фильтр; экспозиция 1 с; шаг 0.02 °).

Термические особенности золошлаковой смеси устанавливали методом дифференциальной сканирующей калориметрии и термогравиметрии (ДСК и ТГ) на синхронном термоанализаторе Netzsch STA 449F3 Jupiter, Германия (атмосфера воздух; разрешение ТГ – 0.1 мкг, ДСК < 1 мкВт; нагрев до 1000 °С).

Инфракрасные спектры золошлаковой смеси регистрировали посредством инфракрасного Фурье спектрометра *IRAffinity-1S* с приставкой *HATR-10 Shimadzu*, Япония (однолучевая оптическая система; термостабилизированный детектор DLATGS; угол падения 45°, число отражений 10; область 4000-400 $см^{-1}$; программное обеспечение LabSolutions IR).

Размер частиц золошлаковой смеси устанавливали с помощью светового микроскопа ZEISS Axio Scope.A1, Германия. Микроструктурные особенности частиц золошлаковой смеси и композиционного материала изучали на сканирующем электронном микроскопе Tescan Lyra 3 XMH + EDS AZtec X-Max 80 Standart (углерод; толщина покрытия 10 нм, плотность – 2.25 $г/см^3$; BEI/BSE; SEI/SE). Визуальную оценку порового пространства композита проводили с помощью стереоскопического микроскопа Saike Digital SK2100HDMI-T2. Особенности формирования порового пространства композиционного материала изучали на рентгеновском микротомографе Bruker microCT Sky-Scan 1272 (фильтр Al 0.25 мм; I = 180 мкА; U = 60 кВ; вращение / шаг 0-180 / 0.2 °; программное обеспечение Bruker microCT DataViewer 1.5.3.4 (64-bit); CTvox 3.3.0 r1403 (64-bit); CT Analyser version 1.16.9.0 + (64-bit)).

3 Results and Discussion

Золошлаковая смесь образована при сжигании углей разреза Уртуйский (Забайкальский край). Показатель удельной эффективной активности естественных радионуклидов составил 295

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

Бк/кг, что соответствует требованиям ГОСТ 30108-94 и позволяет применять золошлаковую смесь при получении строительных материалов без ограничений.

Основные физические свойства: влажность – 0.59 %; истинная плотность – 1582 кг/м^3; удельная поверхность – 225 м^2/кг; полный остаток зольной фракции – 21 %; стойкость железистому и силикатному распаду – 8 и 38 %, соответственно. Золошлаковая смесь является непучинистой.

Химический состав золошлаковой смеси, ω, %: 58.28 SiO_2; 16.10 Al_2O_3; 7.23 Fe_2O_3; 5.56 K_2O; 5.18 CaO; 1.10 $CaO_{св}$; 1.02 MgO; 0.63 Na_2O; 0.46 TiO_2; 0.31 SO_3; 0.11 P_2O_5; 3.32 – потери при прокаливании. Гидросиликатный модуль составил 0.17, силикатный модуль – 2.49, коэффициент качества – 0.38. Следовательно, по гидравлической активности золошлаковая смесь относится к инертным материалам.

Фазовый состав золошлаковой смеси (Рис. 1): кварц SiO_2 (4.25; 3.34; 1.37 Å), анортит $Na.25Ca.71(Al_2Si_2O_8)$ (3.20; 2.94; 2.50 Å), микроклин $KAlSi_3O_8$ (3.22; 2.16; 1.80 Å), хлорит $(Mg, Al)_6(Si, Al)_4O_{10}(OH)_8$ (7.02; 3.53; 1.53 Å), мусковит $KAl_2[OH]_2(AlSi_3O_{10})$ (10.00; 2.56; 1.50 Å). Полуколичественный фазовый состав, ω, мас. %: кварц – 40; микроклин – 24; анортит – 19; хлорит – 12; мусковит – 5.

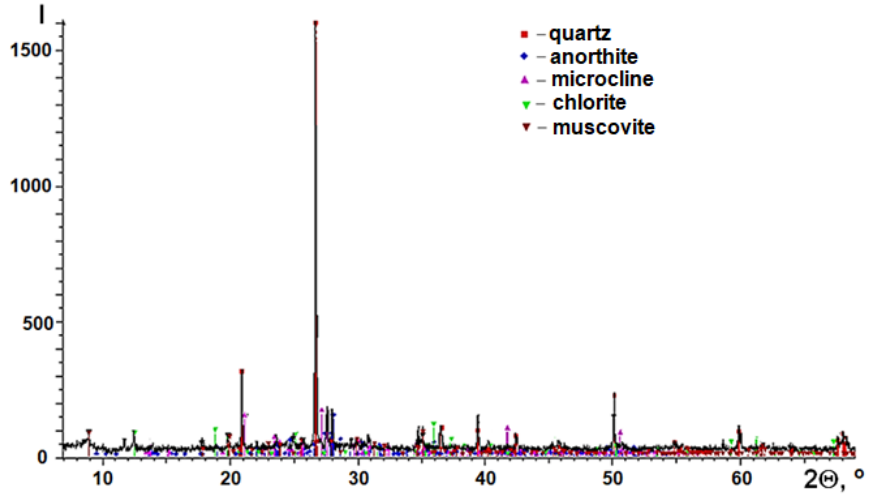


Рис. 1 – Дифрактограмма золошлаковой смеси
Fig. 1 - Diffraction pattern of ash and slag mixture
Image by the author of the article

Методом дифференциальной сканирующей калориметрии и термогравиметрии установлено (Рис. 2), что начальный этап нагревания золошлаковой смеси характеризуется присутствием ступени потери веса, вызванной удалением адсорбированной воды. На термограмме выявлена максимальная скорость потери веса при 90 °С с последующим снижением при 350 °С и потерей веса 0.9 %. Выгорание углеводородных фрагментов также сопровождается потерей веса на ТГ-кривой. Экзотермический эффект при 464 °С с потерей веса 1.2 % вызван окислением углерода. Эндотермический эффект регистрируется при 138 и 573 °С. Низкотемпературный эндотермический эффект при 138 °С свидетельствует о присутствии в незначительного количества глинистых минералов, эндотермический эффект при 573 °С обусловлен полиморфным превращением кварца (α↔β). Общая потеря массы при 897 °С составила 5 %.

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

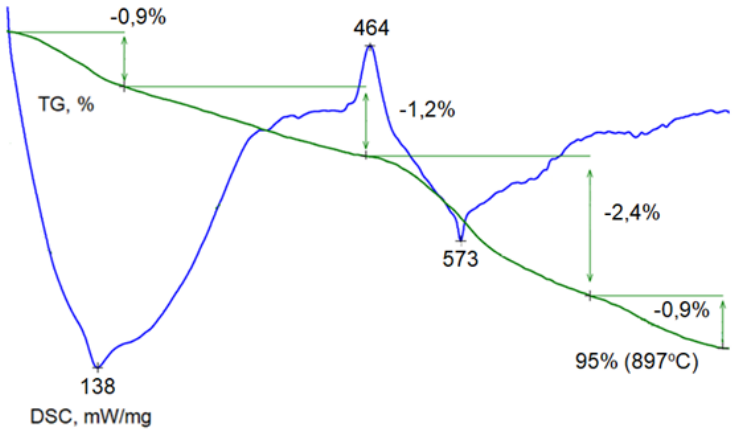


Рис. 2 – Термограмма золошлаковой смеси
Fig. 2 - Thermogram of ash and slag mixture
Image by the author of the article

Присутствие в золошлаковой смеси органических соединений (угля, полукоксовых и коксовых остатков) подтверждается методом инфракрасной спектроскопии (Рис. 3). Регистрируются интенсивные полосы поглощения в области 2953-2853 $см^{-1}$, обусловленные симметричными валентными колебаниями метильных и метиленовых групп $C\text{-}H_x$ углеводородных фрагментов. Полосы поглощения с максимумами при 1082, 797-723, 461 $см^{-1}$ характеризуют кристаллическую фазу α-кварца. Полосы поглощения с максимумами при 797-723 $см^{-1}$ соответствуют симметричным валентным колебаниям группы Si-O-Si; 1082 – асимметричным валентным колебаниям группы Si-O-Si(Al); 461– деформационным колебаниям группы Si-O-Si. Полосы поглощения с максимумами при 1456 и 1379 обусловлены деформационными колебаниями связи C-H.

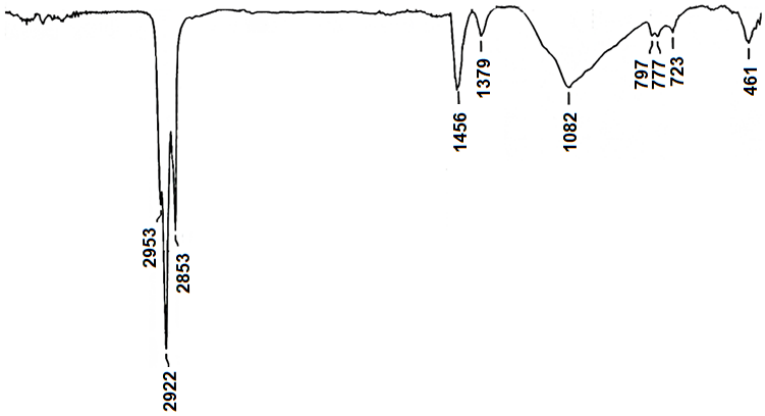


Рис. 3 – Инфракрасный спектр золошлаковой смеси
Fig. 3 – Infrared spectrum of ash and slag mixture
Image by the author of the article

Особенности микроструктуры золошлаковой смеси изучены методом сканирующей электронной микроскопии (Рис. 4). Для частиц золошлаковой смеси характерна неоднородная полидисперсная структура, содержащая непроплавленные фрагменты. Размер частиц, имеющих форму многогранников и сфероидов с закрепленными в расплаве мелкими фракциями, составляет в среднем 2.05-320.29 мкм. Отчетливо видна ярко выраженная система макро- и микропор, которая может способствовать формированию структуры композиционного материала с оптимальными теплоизоляционными характеристиками.

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

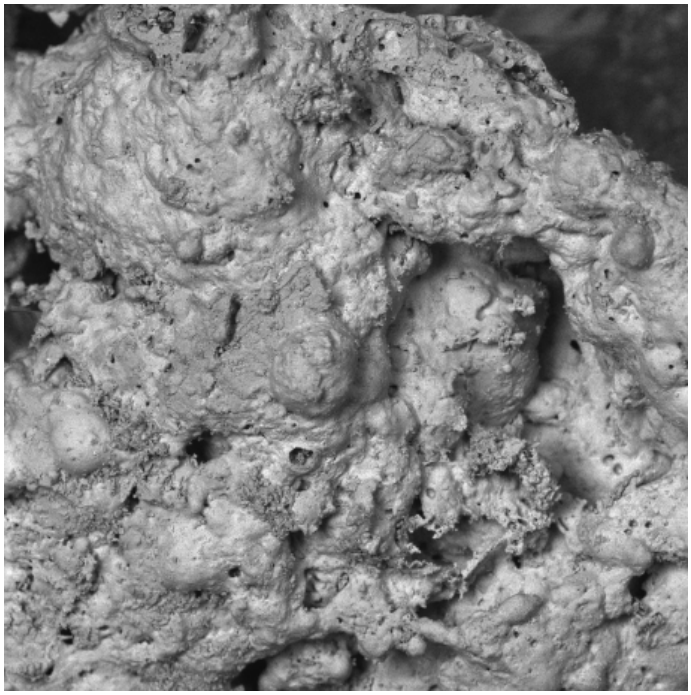


Рис. 4 – Микрофотография СЭМ золошлаковой смеси (масштабная линия – 100 мкм)
Fig. 4 – SEM micrograph of ash and slag mixture (scale line – 100 μm)
Image by the author of the article

Таким образом, проведенные исследования химического и минералогического состава, физических, физико-химических свойств и микроструктурных особенностей золошлаковой смеси позволили установить целесообразность ее использования в качестве инертного пористого наполнителя матрицы композиционного материала.

Выявлено, что композиционный материал является морозостойким и водонепроницаемым. Показатель прочности при сжатии высушенного на воздухе образца составил 6.20 МПа, теплопроводность – 0.17 Вт/(м·К), водонепроницаемость (t_i) – не менее 3600 с.

Изучение механизма криоструктурирования композита проводили методами порошковой дифракции, стереомикроскопии, сканирующей электронной микроскопии и компьютерной рентгеновской микротомографии. Фазовый состав композиционного материала (Рис. 5): кварц SiO_2 (4.27; 3.35; 1.82 Å); муллит $3Al_2O_32SiO_2$ (5.40; 3.39; 2.54 Å); анортит $CaAl_2Si_2O_8$ (3.21; 2.52; 1.84 Å); кристобалит SiO_2 (4.14; 2.49; 1.45 Å); кальцит $CaCO_3$ (3.04; 2.10; 1.86). Полуколичественный фазовый состав, ω, мас. %: кварц – 31; муллит – 31; анортит – 24; кристобалит – 9; кальцит – 5.

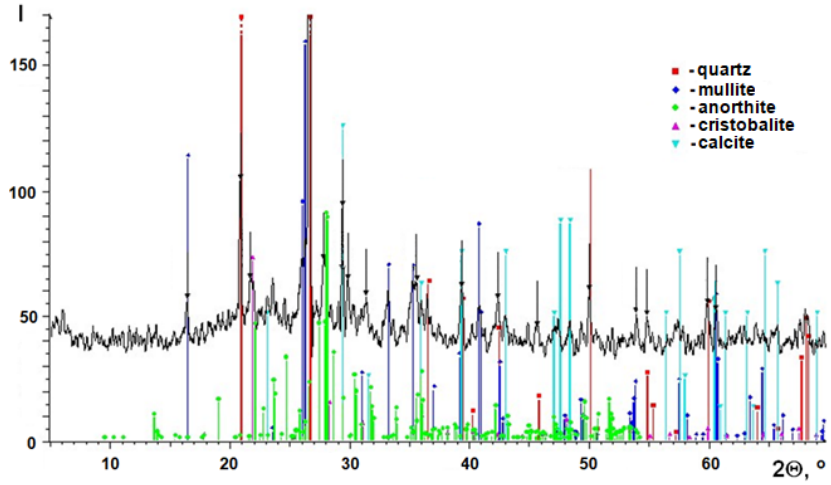


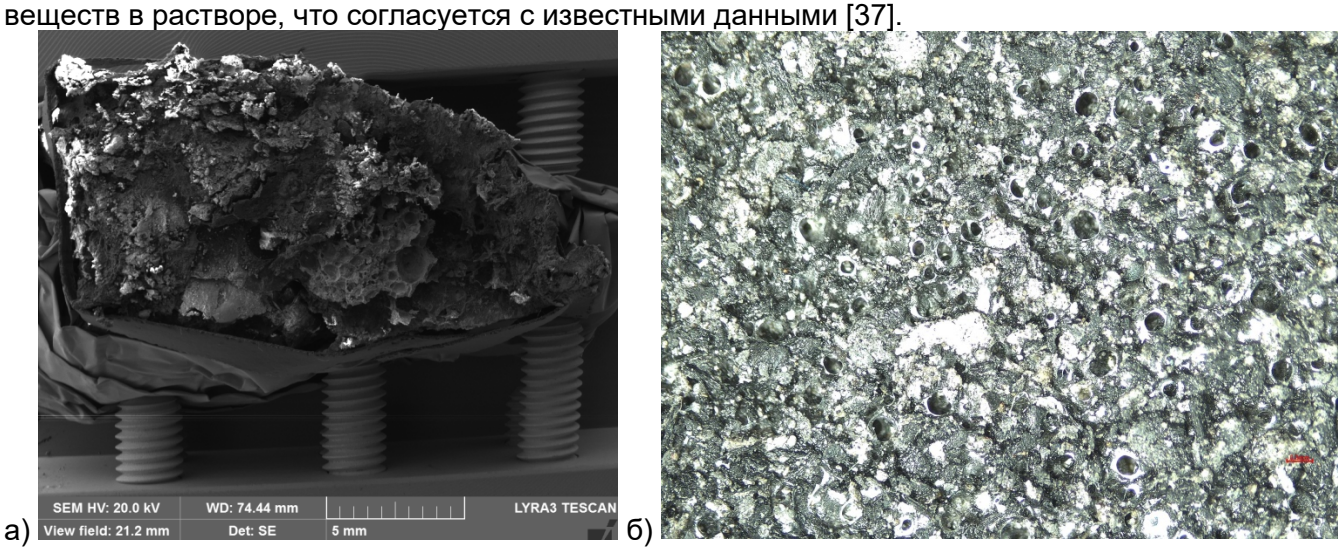
Рис. 5 – Дифрактограмма композиционного материала
Fig. 5 – Diffraction pattern of a composite material
Image by the author of the article

Pankov, P.; Konovalova, N.; Shavanov, N.; Bespolitov, D.
Composite materials based on ash and slag waste for thermal insulation of roadbeds;
2025; Construction of Unique Buildings and Structures; 120 Article No 12002. doi: 10.4123/CUBS.120.2

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

Данные рентгенофазового анализа свидетельствуют о возможном переходе α-кварца (SiO_2) в кристобалит (SiO_2). Исчезновение фаз, соответствующих исходному сырью, а также появление новых фаз в композиционном материале, вероятно, связано лишь с разнородным составом золошлаковой смеси и не доказывает протекание химических реакций. При этом повышенное содержание муллита и анортита (31 и 24 мас. %) в составе композиционного материала может обусловливать его теплофизические и прочностные характеристики [40].

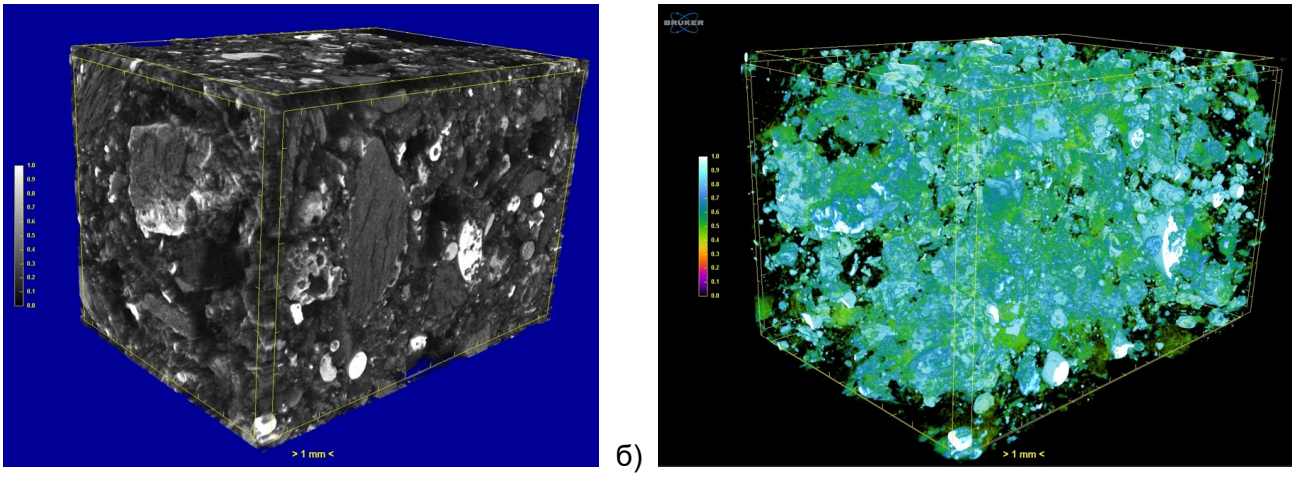
Выявлено, что последовательное замораживание, выдерживание в замороженном состоянии и оттаивание приводит к образованию пористой структуры матрицы композиционного материала (Рис. 6). Ориентация микроструктурных элементов, вероятно, связана с направленным ростом льда в результате кристаллизации воды и концентрирования высокомолекулярных веществ в растворе, что согласуется с известными данными [37].



а) б)

Рис. 6 – Микрофотография СЭМ (а) и стереоскопическое изображение (б) порового пространства композиционного материала
Fig. 6 – SEM micrograph (a) and stereoscopic image (б) of the pore space of the composite material
Image by the author of the article

Вследствие оттаивания композита в структуре матрицы на основе высокомолекулярных соединений формируются поры различного размера (Рис. 7). Повторение циклов криогенной обработки способствуют образованию поликристаллов льда в макропорах, что оказывает влияние на трансформацию порового пространства в целом за счет роста межмолекулярных взаимодействий полимерной составляющей в стенках уже имеющихся пор. Установлено, что криогенная обработка вызывает изменение объема пор и их пространственной геометрии (Рис. 8).



а) б)

Рис. 7 – Микротомографические изображения композиционного материала после криогенной обработки: а – поровое пространство (черный цвет – поры, белый цвет – твердые включения); б – распределение твердых включений в объеме
Fig. 7 – Microtomographic images of a composite material after cryogenic treatment: a – pore space (black – pores, white – solid inclusions); б – distribution of solid inclusions in the volume

Pankov, P.; Konovalova, N.; Shavanov, N.; Bespolitov, D.
Composite materials based on ash and slag waste for thermal insulation of roadbeds;
2025; Construction of Unique Buildings and Structures; 120 Article No 12002. doi: 10.4123/CUBS.120.2

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

Image by the author of the article
Image by the author of the article

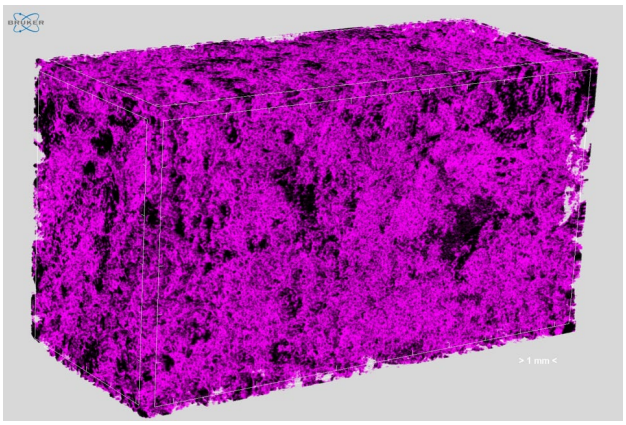
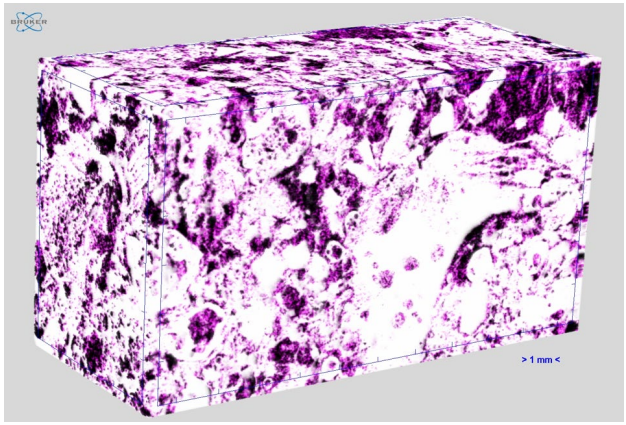
а)  б) 

Рис. 8 – Объемные микротомографические изображения композиционного материала: а – распределение воздушных пор (черный цвет) в полимерной матрице (фиолетовый цвет); б – распределение пор (черный цвет), матрицы (фиолетовый цвет) и наполнителя (белый цвет)
Fig. 8 – Volumetric microtomographic images of a composite material: a – distribution of air pores (black) in a polymer matrix (purple); б – distribution of pores (black), matrix (purple) and filler (white)
Image by the author of the article

Анализ порового пространства свидетельствует, что максимальный объем композиционного материала занимают поры со средними размерами 0.028; 0.056 и 0.084 мм (31.76; 38.75 и 13.48 мм^3). Доля данных пор составляет 33.42; 40.77 и 14.18 %, соответственно. Объемная доля пор со средними размерами 0.112-0.308 мм составила 11.63 %. Общая пористость композиционного материала составила 17.28 %, что может свидетельствовать об эффективности его использования в качестве теплоизоляционного материала.

4 Conclusions

1) Установлена принципиальная возможность использования золошлаковой смеси котельной станции Амазар (Забайкальская железная дорога) в составе композиционного материала для устройства подбалластного защитного слоя железнодорожного пути. Выявлено, что золошлаковая смесь является непучинистой, по показателю удельной эффективной активности естественных радионуклидов соответствует требованиям ГОСТ 30108-94, относится к минеральному сырью I класса (Аэфф = 295 Бк/кг) и может использоваться для получения строительных материалов без ограничений. Оценка химического состава позволила установить, что золошлаковая смесь по гидравлической активности относится к инертным материалам. Данные инфракрасной спектроскопии и дифференциальной сканирующей калориметрии и термогравиметрии свидетельствуют о присутствии в составе золошлаковой смеси органических веществ (несгоревших остатков). Методом сканирующей электронной микроскопии выявлена разнородность порового пространства золошлаковой смеси, что может способствовать получению композиционного материала с оптимальными теплоизоляционными характеристиками.
2) Выявлено, что композиционный материал является морозостойким и водонепроницаемым (t_i не менее 3600 с), характеризуется прочностью при сжатии 6.20 МПа, теплопроводностью – 0.17 Вт/(м·К), следовательно, он может применяться для устройства гидро- и теплоизоляционных защитных слоев под балластом железнодорожного пути.
3) Методами сканирующей электронной микроскопии и компьютерной рентгеновской микротомографии выявлена трансформация порового пространства композиционного материала после трех циклов криоструктурирования. Замораживание, выдерживание в замороженном состоянии и оттаивание способствовало изменению пространственной ориентации микроструктурных элементов. Выявлено, что максимальный объем в структуре композиционного материала занимают поры размерами 0.028-0.084 мм (13-39 мм^3), доля

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

которых составляет до 41 %. Общая пористость композита составила 17.28 %, что определяет теплофизические свойства.

5 Fundings

Работа выполнена в рамках Государственного задания № PLVN-2025-0005 «Разработка способов утилизации крупнотоннажных отходов производства в составах композиционных материалов для усиления земляного полотна».

6 Conflict of Interests

The authors declare no conflict of interest.

References

1. Trivedi K., Marvaniya K., Dobariya P. et al. (2024) Assessment and characterization of solid and hazardous waste from inorganic chemical industry: potential for energy recovery and environmental sustainability. *Journal of Environmental Management*. **367**, 122036. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.122036
2. Chen Y., Fan Y., Huang Y. et al. (2024) A comprehensive review of toxicity of coal fly ash and its leachate in the ecosystem. *Ecotoxicology and Environmental Safety*. **269**, 115905. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.115905
3. Kallio A., Virtanen S., Leikoski N. et al. (2023) Radioactivity of residues from waste incineration facilities in Finland. *Journal of Radiological Protection*. **43(2)**, 021502. https://doi.org/10.1088/1361-6498/acc596
4. He D., Hu H., Jiao F. et al. (2023) Thermal separation of heavy metals from municipal solid waste incineration fly ash: A review. *Chemical Engineering Journal*. **467**, 143344. https://doi.org/10.1016/j.cej.2023.143344
5. Putilova I.V., Zroychikov N.A., Saparov M.I. (2025) International Experience in the Field of Handling Ash and Slag from Thermal Power Plants. *Thermal Engineering*. **72(7)**, 590-599. https://doi.org/10.1134/S0040601525700259
6. Abdrakhimov V.Z. (2024) Iron Oxides and Their Composition in Ceramic Brick Based on Power Plant Waste: Data from Mössbauer Spectroscopy. *Coke and Chemistry*. **66(12)**, 630-637. https://doi.org/10.3103/S1068364X23600227
7. Li C., Zhou Yi., Tian Y. et al. (2019) Preparation and characterization of mullite whisker reinforced ceramics made from coal fly ash. *Ceramics International*. **45(5)**, 5613-5616. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2018.12.021
8. Delitsyn L.M., Kulumbegov R.V., Popel' O.S. et al. (2025) Processing of Ash and Slag Waste from Coal-Fired Thermal Power Plants and Extraction of Commercial Products from the Waste. *Thermal Engineering*. **72(3)**, 203-220. https://doi.org/10.1134/S0040601524700836
9. Auyesbek S., Sarsenbayev B., Lesovik V. et al. (2025) Studies on the Production of a Ground Silicate Composite Based on a Mineral Slag Binder with the Disposal of Industrial Waste. *Journal of Composites Science*. **9(5)**, 225. https://doi.org/10.3390/jcs9050225
10. Zhang H., Li Y., Wei D. et al. (2025) Mechanistic Insights into Full Solid-Waste Activators for Enhancing the Performance of Blast Furnace Slag-Fly Ash Cementitious Composites. *Materials*. **18(14)**, 3275. https://doi.org/10.20944/preprints202505.1936.v1
11. Abdrakhimov V.Z. (2013) Use of aluminum-containing waste in production of ceramic materials for various purposes. *Refractories and Industrial Ceramics*. **54(1)**, 7. https://doi.org/10.1007/s11148-013-9540-8
12. Menshov P.V., Khlupin Y.V., Nalesnic O.I. et al. (2014) Ash and slag waste as a secondary raw material. *Procedia Chemistry*. **10**, 184-191. https://doi.org/10.1016/j.proche.2014.10.032
13. Luo Y., Wu Y.-H., Ma S.-H. et al. (2019) An eco-friendly and cleaner process for preparing architectural ceramics from coal fly ash: Pre-activation of coal fly ash by a mechanochemical method. *Journal of Cleaner Production*. **214**, 419-428. https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2018.12.292

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

14. Shakir A.A., Naganathan S., Mustapha K.N. (2013) Properties of bricks made using fly ash, quarry dust and billet scale. *Construction and Building Materials*. **41**, 131-138. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.11.077
15. Cengizler H., Koç M., Şan O. (2021) Production of ceramic glass foam of low thermal conductivity by a simple method entirely from fly ash. *Ceramics International*. **47(20)**, 28460-28470. https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2021.06.265
16. Nithyanandam A., Deivarajan T. (2021) Development of fly ash cenosphere-based composite for thermal insulation application. *International Journal of Applied Ceramic Technology*. **18(5)**, 1825-1831. https://doi.org/10.1111/ijac.13767
17. Papadakis V.G. (2000) Effect of fly ash on Portland cement systems: Part 1. Low-calcium fly ash. *Cement and Concrete Research*. **29(11)**, 1727-1736. https://doi.org/10.1016/S0008-8846(99)00153-2
18. Sharonova O.M., Yumashev V.V., Solovyov L.A. et al. (2019) The fine high-calcium fly ash as the basis of composite cementing material. *Magazine of Civil Engineering*. **91(7)**, 60-72. https://doi.org/10.18720/MCE.91.6
19. Kim S.-J., Yang K.-H., Moon G.-D. (2015) Hydration characteristics of low-heat cement substituted by fly ash and limestone powder. *Materials*. 8(9), 5847-5861. https://doi.org/10.3390/ma8095277
20. Dandautiya R., Singh A.P. (2019) Utilization potential of fly ash and copper tailings in concrete as partial replacement of cement along with life cycle assessment. *Waste Management*. **99**, 90-101. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2019.08.036
21. Prošek Z., Nežerka V., Hlůžek R. et al. (2019) Role of lime, fly ash and slag in cement pastes containing recycled concrete fine. *Construction and Building Materials*. **201(9)**, 702-714. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.227
22. Satpathy H.P., Patel S.K., Nayak A.N. (2019) Development of sustainable lightweight concrete using fly ash cenosphere and sintered fly ash aggregate. *Construction and Building Materials*. **202(2)**, 636-655. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.01.034
23. Ling Y., Wang K., Li W. et al. (2019) Effect of slag on the mechanical properties and bond strength of fly ash – based engineered geopolymer composites. *Composites Part B: Engineering*. **164**, 747-757. https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.01.092
24. Chintalapudi K., Pannem R.M.R. (2021) Enhanced Strength, Microstructure, and Thermal properties of Portland Pozzolana Fly ash-based cement composites by reinforcing Graphene Oxide nanosheets. Journal of Building Engineering. **42(15)**, 102521. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102521
25. Seisenova A., Nuraly A., Baiseitov D. et al. (2025) Comprehensive Assessment of Ash and Slag Waste for the Synthesis of Silicon-Based Functional Materials. *Processes*. **13(9)**, 2722. https://doi.org/10.3390/pr13092722
26. Lu C., Shen Q., Zhang Z. et al. (2025) Synergistic effect of waste steel slag powder and fly ash in sustainable high strength engineered cementitious composites: From microstructure to macro-performance. *Journal of Building Engineering*. **113(11)**, 114039. https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.114039
27. Chowdhurya J.A., Islama M.S., Islama M.A. et al. (2025) Analysis of mechanical properties of fly ash and boiler slag integrated geopolymer composites. *Sustainable Structures*. **5(2)**, 73. https://doi.org/10.54113/j.sust.2025.000073
28. Pang S., Wang W., Wang X. (2025) Study on the compressive performance and numerical simulation of fiber-reinforced geopolymer stabilized aeolian sand subgrade materials. *Scientific Reports*. **15(1)**, 8976. https://doi.org/10.1038/s41598-025-87214-1
29. Zhang P., Mao Y., Gao Z. et al. (2025) Efficient utilization of waste drilling mud to prepare material stabilized with fly ash/slag based geopolymer for subgrade engineering. *Journal of Environmental Management*. **373(6)**, 123600. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123600
30. Hsissou R., Seghiri R., Benzekri Z. et al. (2021) Polymer composite materials: A comprehensive review. *Composite structures*. **262**, 113640. https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.113640
31. Bisht N., Vishwakarma J., Jaiswal S. et al. (2025) Synergizing chemistry: unveiling the potential of hybrid fillers for enhanced performance in shape memory polymers. *Advanced Composites and Hybrid Materials*. **8(1)**, 7. https://doi.org/10.1007/s42114-024-01059-2
32. Hajizadeh S., Kirsebom H., Mattiasson B. (2010) Characterization of macroporous carbon-cryostructured particle gel, an adsorbent for small organic molecules. *Soft Matter*. **6(21)**, 5562-5569. https://doi.org/10.1039/C0SM00311E

This publication is licensed under a CC BY-NC 4.0

33. Altunbaş C., Aslan A., Kuşat K. et al. (2022) Synthesis and characterization of a new cryogel matrix for covalent immobilization of catalase. *Gels*. **8(8)**, 501. https://doi.org/10.3390/gels8080501
34. Schejtman S.D.G., Irranca S.M., Igarzabal C.I.A. et al. (2020) Redefining the chemistry of super-macroporous materials: when dendritic molecules meet polymer cryogels. *Polymer Chemistry*. **11(27)**, 4507-4519. https://doi.org/10.1039/D0PY00542H
35. Savina I.N., Zoughaib M., Yergeshov A.A. (2021) Design and assessment of biodegradable macroporous cryogels as advanced tissue engineering and drug carrying materials. *Gels*. **7(3)**, 79. https://doi.org/10.3390/gels7030079
36. Schubert U.S., Behrendt F., Gottschaldt M. (2024) Surface functionalized cryogels–characterization methods, recent progress in preparation and application. *Materials Horizons*. **11**, 4600-4637 https://doi.org/10.1039/D4MH00315B
37. Charlie R., Loïc F., Laurent C. et al. (2024) From water molecule mobility to water-resistance of swollen oriented and non-oriented cellulose nanofibril cryogels. *Cellulose*. **31(17)**, 10191-10207. https://doi.org/10.1007/s10570-024-06178-z
38. Michurov D.A., Andreasyan G.A., Lozinsky V.I. (2024) Cryostructuring of Polymeric Systems: 68. Evaluation of Poly (vinyl alcohol) Composite Cryogels Filled with Poly (3-hydroxybutyric acid)-Based Microspheres of Different Porous Morphology as Potential Delivery Systems for Drugs of Various Water-Solubility. *Gels*. **10(11)**, 734. https://doi.org/10.3390/gels10110734
39. GOST 30108-94 Building materials and elements. Determination of specific activity of natural radioactive nuclei. https://docs.cntd.ru/document/871001235
40. GOST 28622-2012 Soils. Laboratory method for determination of frost-heave degree. https://docs.cntd.ru/document/1200101299