

В. Л. Шаповалов, А. В. Морозов, М. В. Окост, Т. П. Горбачева

ПРИМЕНЕНИЕ КЕРАМИЧЕСКИХ СФЕР В ИЗГОТОВЛЕНИИ ГЕОПОЛИМЕРА ДЛЯ ОБЛЕГЧЕННЫХ КОНСТРУКЦИЙ *

Аннотация. Настоящая работа посвящена рассмотрению возможности создания материала, имеющего улучшенные характеристики, а именно пониженный вес и теплопроводность, с использованием наполнителя в виде полых керамических сфер для снижения напряженно-деформированного состояния основания грунтовых инженерных объектов и влияния температур на стабильность грунтов. Составные элементы геополимера исследованы методами электронной микроскопии, определены их состав и некоторые свойства, а также теплопроводность, плотность и прочность на сжатие образцов геополимера. В результате выполненных исследований, показано, что добавление в состав геополимера микросфер улучшает его теплопроводные свойства и облегчает конструкцию земляного полотна.

Ключевые слова: глинистый грунт, геополимер, земляное полотно, керамические микросферы, теплопроводность, облегченные конструкции.

Для цитирования: Применение керамических сфер в изготовлении геополимера для облегченных конструкций / В. Л. Шаповалов, А. В. Морозов, М. В. Окост, Т. П. Горбачева // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. – 2025. – № 3. – С. 28–40. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_3_28.

Введение

При развитии сети железных дорог в некоторых случаях возникает необходимость сооружения земляного полотна в сложных условиях, к которым в том числе можно отнести строительство насыпей на слабых основаниях, когда необходимо обеспечить минимальную осадку, возникающую в процессе строительства и эксплуатации от собственного веса насыпи и поездных нагрузок. Данная проблема может быть решена с помощью применения облегченных конструкций земляного полотна. Другая проблема связана с влиянием неблагоприятных температурных режимов эксплуатации земляного полотна и его основания, когда в результате низких температур может происходить пучение грунта, а при высоких температурах – оттаивание многолетнемерзлых грунтов, что влечет за собой нарушение геометрии земляного полотна и его основания.

В настоящей работе рассмотрена возможность создания материала, имеющего пониженный вес и теплопроводность за счет использования наполнителя в виде полых керамических сфер, для снижения напряженно-деформированного состояния основания грунтовых инженерных объектов и уменьшения влияния температур на стабильность грунтов.

Учитывая мировой опыт, предполагается, что искомая композиция будет представлять собой геополимер, в основе которого лежит стабилизированный глинистый грунт с наполнителем в виде легкого материала с низкой теплопроводностью. Изготовление такой композиции не потребует специальных условий созревания, связанных с высокими температурами (термическая обработка). Формирование геополимера должно происходить при естественных условиях.

В качестве стабилизатора грунта, повышающего его прочность, используют различные добавки, к которым относятся цемент, добавки на основе гипса, полевые шпаты, золы уноса, натриевые и калиевые силикаты и др. Таким образом, в матрице из глинистого грунта формируется армирующий скелет, сформированный в результате химических реакций, вызванных введением стабилизирующих материалов [1–3].

Основным компонентом конструкции, позволяющим снизить ее вес и повысить теплоизоляционные свойства, являются различные пористые заполнители. Согласно ГОСТ 9758-2012 заполнители подразделяются на природные и искусственные. К природным пористым заполнителям относятся неорганические зернистые сыпучие строительные материалы, получаемые из пористых горных пород вулканического происхождения (пемзы, шлаков, туфов, крупнопористых базальтов, андезитобазальтов и андезитов) или осадочного происхождения (пористых известняков, известняков-ракушечников и

* Исследование выполнено при финансовой поддержке Федерального агентства железнодорожного транспорта (соглашение № 109-03-2025-007).

других карбонатных пород, а также алевролитов, спонголитов, опок и других кремнеземистых пород), в том числе из попутно добываемых пород и отходов обогащения горно-обогатительных предприятий, применяемых в строительстве без изменения их химического состава и фазового состояния. К искусственным заполнителям относятся пористые заполнители – неорганические зернистые сыпучие строительные материалы, получаемые обжигом вспучивающихся глинистых и других пород или отходов промышленности.

Помимо существующих и обозначенных в нормативных документах пористых наполнителей современная наука изучает возможность применения и использования других видов пористых заполнителей при производстве легких бетонов [4], например стекловидных пористых заполнителей, составов на основе шламов флотационного углеобогащения, натриево-жидкостекольных композиций с различными золошлаковыми наполнителями [5, 6] и пр.

В выполненном исследовании в качестве материала заполнителя использованы полые керамические микросферы, имеющие размеры от 0,1 до 0,6 мм.

Методы. Оптическая и электронная микроскопия

В данной работе метод оптической микроскопии использован для оценки геометрических параметров наполнителей, их структуры и распределения в образце.

Для получения микроизображения микросфер и образцов грунта в исследовании использован оптический микроскоп ЛОМО БИОЛАМ Р12 с цифровой насадкой DCM-310. Полученные изображения, снятые с различным фокусным расстоянием, обрабатывались таким образом, чтобы на всем снимке не было размытых областей, и вся исследуемая область находилась в фокусе. Такая процедура необходима при работе с рельефными образцами, к которым относятся в том числе образцы грунта.

При обследовании образцов геополимера от каждого полученного образца отделялся фрагмент, на котором предварительно шлифованием подготавливалась плоскость. На каждом образце выбирались несколько областей (от 3 до 5), в которых производилась послойная съемка для отдельной области с последующим получением объединенного снимка таким образом, чтобы вся исследуемая область находилась в фокусе.

Также для проведения исследований и оценки глубинных структур и образовавшихся связей рассматриваемых образцов геополимера, а также для анализа элементного состава проб использовался электронный сканирующий микроскоп ZEISS EVO MA 18, оснащенный энергодисперсионным рентгеновским детектором (EDAX) модели X-Max 50N. Ускоряющее напряжение варьировалось от 2 до 10 кВ. Пробы исследовались без напыления при низком вакууме. Применялись детекторы отраженных электронов (*back-scattered electrons, BE*); в этом режиме фазы или участки фаз, имеющие более высокий средний атомный вес, окрашены в более светлые оттенки. Детекторы вторичных электронов (*secondary electrons, SE*) использованы для визуализации деталей морфологии объектов.

Обработка изображений осуществлялась в программном комплексе Gwyddion с получением информации о размерах и параметрах структурных элементов образца.

Определение теплопроводности

Теплопроводность определялась с использованием прибора ИТП-МГ4. Принцип его работы основан на создании стационарного теплового потока, проходящего через плоский образец определенной толщины, направленного перпендикулярно к лицевым граням образца, и измерении плотности теплового потока и температуры противоположной грани. Для сыпучих материалов образец помещался в специальную форму и уплотнялся. Для твердых материалов были подготовлены образцы с размером 100×100 мм. Толщина образцов составляла от 13 до 19 мм.

Определение прочности

В качестве стандарта-аналога измерения прочности на сжатие экспериментальных образцов был принят ГОСТ 10180-2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам». Прочность на сжатие подготовленных образцов из функциональных компонентов определялась в лабораторных условиях с использованием приборов, обеспечивающих статическую нагрузку на поверхность образца, установленного между нижней опорной площадкой и верхней металлической пластиной. Испытания проводились с использованием двух установок: прибора одноосного сжатия автоматизированного вычислительного комплекса «АСИС» и мобильного испытательного пресса «МИП-50Э» для измерения прочности на сжатие бетонных образцов. Ввиду ограничений функциональных возможностей АВК «АСИС» по предельным усилиям более плотные образцы испытывались в прессе «МИП-50Э».

Образцы кубовидной формы предварительно осматривались, измерялись, взвешивались. Особое внимание уделялось плоскостности опорных поверхностей и перпендикулярности смежных граней образцов. Нагружение образцов проводилось непрерывно с постоянной скоростью нарастания нагрузки до разрушения (появления трещин в образце), либо до прекращения нарастания разрушающей нагрузки. Время нагружения всех образцов до их разрушения не превышало 30 с. За разрушающую нагрузку принималось максимальное усилие, достигнутое в процессе испытания.

Прочность образцов на сжатие R (МПа) для каждого образца рассчитывалась как отношение предельной разрушающей нагрузки P (кН) к площади опирания штока пресса на поверхность образца F (см²) через металлическую пластину. Далее для определения результата серии измерений вычислялось среднее арифметическое значение.

Материалы. Глинистый грунт

В качестве матрицы для создания геополимера использован глинистый грунт, отобранный из насыпи построенного железнодорожного земляного полотна. В табл. 1 приведены физические характеристики грунта. Исследуемый грунт в соответствии с действующими нормативными документами можно классифицировать как глину легкую пылеватую.

Таблица 1

Физические характеристики исследуемого грунта

Характеристика	Значение
Влажность на границе раскатывания W_p , %	19,08
Влажность на границе текучести W_L , %	40,67
Число пластичности I_p , %	21,59
Оптимальная влажность W_{opt} , %	19,50
Плотность скелета сухого грунта, уплотненного при оптимальной влажности ρ_{max}^d , г/см ³	1,81
Плотность частиц грунта ρ_s , г/см ³	2,76
Коэффициент пористости после нагрузки e	0,64
Пористость n , %	39

Исследованные образцы характеризуются массивной текстурой и комковатой структурой (рис. 1), образованной агрегатами песчаных и пылеватых зерен в глинистой массе. Микроструктура – скелетная (зернистая), в которой глинистый материал покрывает поверхность зерен или располагается на контактах песчаных и пылеватых зерен, и матричная, образованная сплошной неориентированной глинистой массой, содержащей беспорядочно ориентированные зерна.

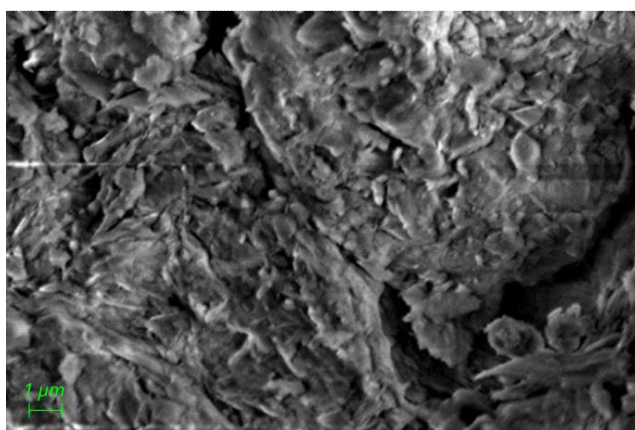


Рис. 1. Изображение поверхности пробы глинистого грунта

С помощью энергодисперсионного рентгеновского детектора (EDAX) модели X-Max 50N определен элементный состав глинистого грунта. Для более точного определения состава выполнено исследование на различных образцах глинистого грунта, на которых выбирались различные области. Всего было получено и обработано 29 спектров, по которым уточнялся элементный состав проб. Усредненные значения вклада каждого элемента, выраженные в процентах, приведены в табл. 2.

Таблица 2

Элементы в составе пробы

Элементы	O	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Pb	Fe	C
Среднее значение	47.2	1.4	13.7	22.2	1.1	2.7	5.1	0.2	2.6	3.2

Портландцемент

В качестве одного из связующих материалов использован портландцемент марки М-500, как наиболее распространенный материал, имеющий высокую эффективность в повышении прочностных характеристик глинистых грунтов и при этом невысокую стоимость. Обычно портландцемент получают спеканием сырьевой смеси, в состав которой входит 22–25 % глины и 75–78 % известняка. Плотность цемента в рыхлом состоянии находится в пределах 0,9–1,3 т/м³, в уплотненном – 1,5–2 т/м³. Используемый портландцемент имел насыпную плотность, равную 1,1 т/м³.

Исследованные образцы цемента характеризуются гетерогенной структурой, состоящей из различных фаз. В микроструктуре цемента, приведенного на изображениях рис. 2, можно выделить несколько основных фаз, которые отличаются различной формой зерен исследуемого образца. Так, на изображении видны кристаллы призматической или шестигранной формы, которые можно отнести к алитам (C_3S , $3CaO \cdot SiO_2$) или трехкальциевым силикатам. Также присутствует небольшое количество зерен округлой и неправильной формы, что характерно для двухкальциевых силикатов (C_2S , $2CaO \cdot SiO_2$), кроме этого присутствуют зерна кубической формы и кристаллы в виде призм (игольчатой формы), что связано с наличием трехкальциевого алюмината (C_3A , $3CaO \cdot Al_2O_3$) и четырехкальциевого алюмоферрита (C_4AF , $4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$). Микроизображения при увеличении $\times 2500$ и $\times 5500$ приведены на рис. 2.

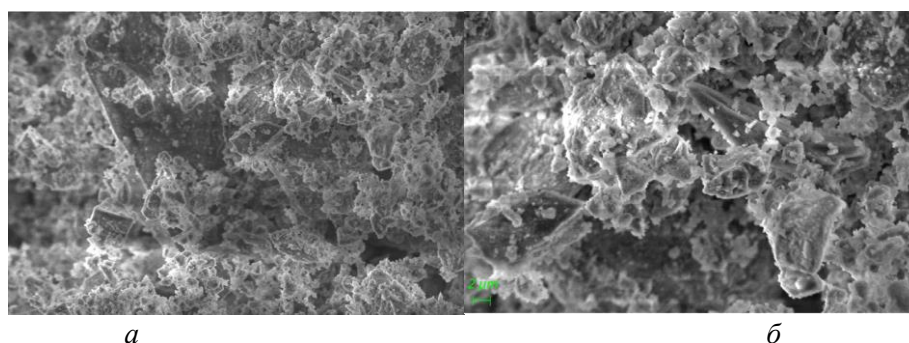


Рис. 2. Изображение поверхности пробы портландцемента:
a – увеличение $\times 2500$; *б* – увеличение $\times 5500$

Выполненный элементный анализ цемента показал наличие в составе пробы С, О, Na, Mg, Al, Si, S, Ca, Fe, Zn. Наибольший вклад вносят кислород (39 %) и образующие элементы портландцемента – кремний (6 %) и кальций (48 %). Остальное составляют натрий, магний, алюминий, сера, железо и цинк. Анализ выполнен по нескольким областям и отдельным точкам на участке пробы.

Всего было проанализировано 10 областей и локальных участков. Статистические характеристики по выбранным участкам приведены в табл. 3.

Таблица 3

**Статистические характеристики концентраций элементов
на выбранных участках пробы портландцемента (%)**

Концентрация	C	O	Na	Mg	Al	Si	S	Ca	Fe	Zn
Максимальная	3,74	55,48	0,24	1,91	3,3	14	3,45	69,06	4,31	0,64
Минимальная	0,27	20,09	0,24	0,17	0,58	1,56	0,85	28,5	0,58	0,14
Усредненная	2,16	38,72	0,24	0,54	1,10	6,48	1,98	47,98	1,84	0,33
Стандартное отклонение	1,15	12,34	-	0,57	0,85	4,10	1,06	16,05	1,45	0,19

Выявление в пробах алюминия и железа может свидетельствовать о небольшом наличии в пробе трехкальциевого алюмината и тетырехкальциевого алюмоферрита.

Микросферы

Для снижения веса конструкции и теплопроводности в геополимеры могут добавляться различные наполнители, имеющие меньшую плотность. Наиболее часто применяемые материалы были перечислены выше. В данной работе в качестве добавки использовались полые керамические микросферы, которые представляют собой легкий сыпучий светлый порошок, состоящий из отдельных полых частиц сферической формы. Микросферы отличаются низкой плотностью, высокой механической прочностью с пределом прочности от 15 до 30 МПа, термостойкостью и низкой теплопроводностью. В табл. 4 приведены некоторые их физические свойства, а в табл. 5 химический состав, характерный для данного материала.

Таблица 4

Физические свойства микросфер

Показатель	Значение
Истинная плотность, кг/м ³	650–800
Насыпная плотность, кг/м ³	350–430
Влажность, масс. %	< 0,5
Размер частиц, мм	0,04–0,6

Таблица 5

Химический состав микросфер

Соединение	Процентное содержание, %
SiO ₂	60–75
Al ₂ O ₃	25–35
Fe ₂ O ₃	3–5
CaO	1–4
TiO ₂	0,5–2
MgO	0,5–2

Размерные параметры сфер. С помощью оптического микроскопа получены микроизображения трех фракционных составов микросфер с паспортными размерами фракций 0,04–0,12, 0,1–0,3 и 0,3–0,6 мм. Исследование выполнено с целью оценки фактического размера, формы и внутренней структуры микросфер.

Определение фактического размера микросфер. Для проведения измерений не требовалась специальная пробоподготовка. Перед измерением микросферы размещались на липкой ленте таким образом, чтобы сформировался один слой толщиной, соответствующей фракции материала. На рис. 3–5 приведены микроизображения образцов полых сфер.

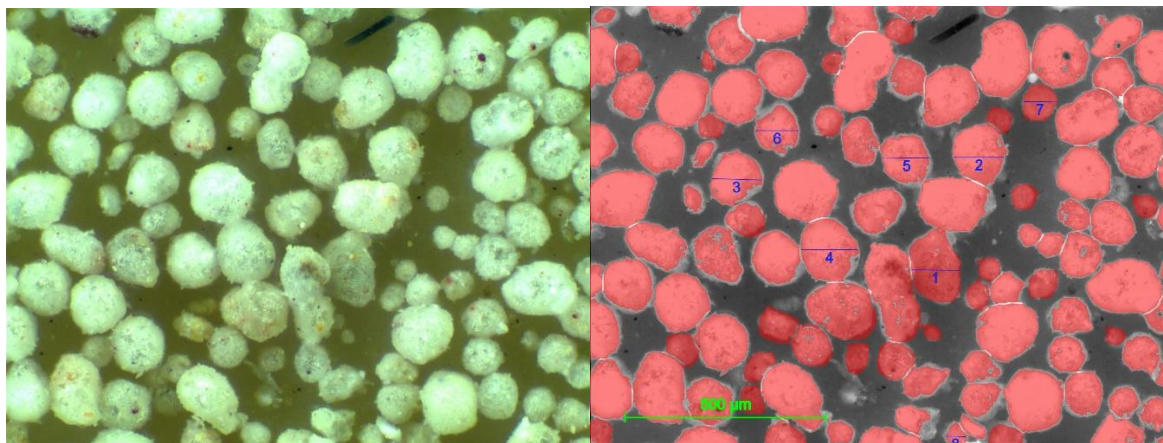


Рис. 3. Паспортная фракция 0,04–0,12 мм

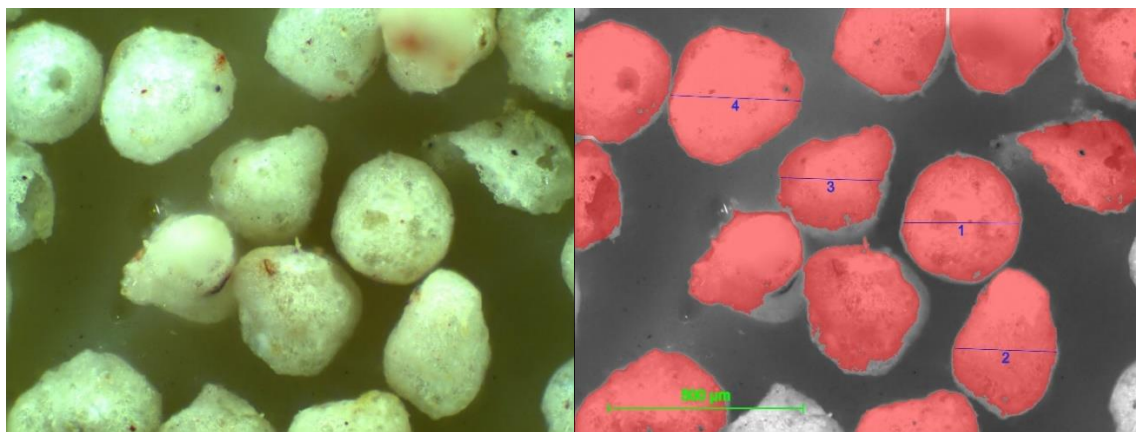


Рис. 4. Паспортная фракция 0,1–0,3 мм

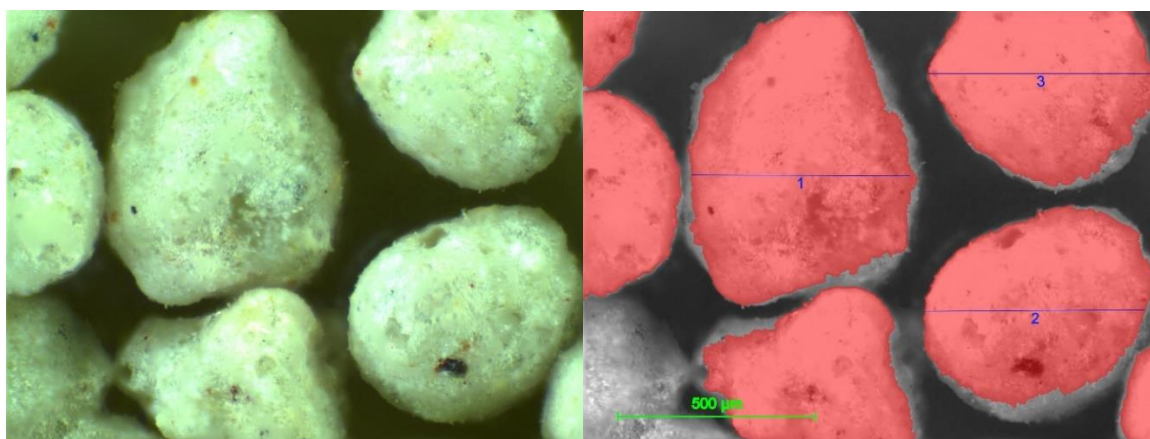


Рис. 5. Паспортная фракция 0,3–0,6 мм

Для трех видов проб определены значения максимального и минимального размера гранул (d_f), которые были сопоставлены с паспортными значениями (d_p), а также определена разница этих значений (Δ). Полученные данные сведены в табл. 6.

Таблица 6

Размерные параметры сфер

	Фракция 0,04–0,12 мм			Фракция 0,1–0,3 мм			Фракция 0,3–0,6 мм		
	d_f	d_p	Δ	d_f	d_p	Δ	d_f	d_p	Δ
Минимальный диаметр, мм	0,077	0,040	0,037	0,215	0,100	0,115	0,321	0,300	0,021
Максимальный диаметр, мм	0,119	0,120	0,001	0,323	0,300	0,023	0,496	0,600	0,104

Измерения показали, что размеры гранул находятся в пределах паспортных значений, за исключением образца с заявленным размером фракций 0,1–0,3 мм. Для этого образца максимальный размер был превышен на 0,023 мм.

Структура сфер (заполненность внутреннего пространства и толщина стенок)

Для определения толщины стенок и оценки распределения пустот внутри микросфер была выполнена предварительная пробоподготовка, которая заключалась в приготовлении смеси из микросфер и прозрачного клеевого раствора на основе полиуретана с последующим его отверждением и шлифованием поверхности до состояния, при котором происходит вскрытие пор в шлифе.

Подготовленные образцы исследовались на микроскопе. На изображениях выделялись сферы со вскрытыми порами, на которых выполнялось измерение толщины стенок сфер в различных местах

и на разных частицах. В качестве примера на рис. 6 приведено изображение сфер образца с размерами фракций 0,3–0,6 мм с раскрытыми внутренними полостями.

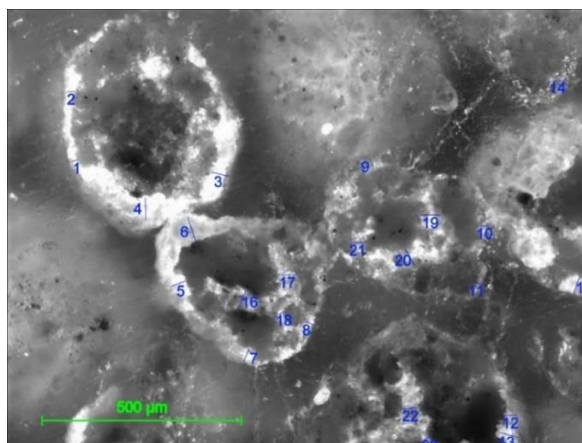


Рис. 6. Оценка размеров стенок микросфер образца с размерами фракций 0,3–0,6 мм

Для измеренных характеристик получены максимальные, минимальные и средние значения толщины стенки микросфер. Полученные значения приведены в табл. 7 и на графике рис. 7.

Таблица 7

Размерные параметры стенок микросфер

Значения толщины стенок микросфер	Образец с размерами фракции 0,04–0,12 мм	Образец с размерами фракции 0,1–0,3 мм	Образец с размерами фракции 0,3–0,6 мм
Среднее значение толщины стенки микросферы, мм	0,0118	0,0200	0,0310
Максимальное значение толщины стенки микросферы, мм	0,0180	0,0359	0,0682
Минимальное значение толщины стенки микросферы, мм	0,0071	0,0086	0,0127

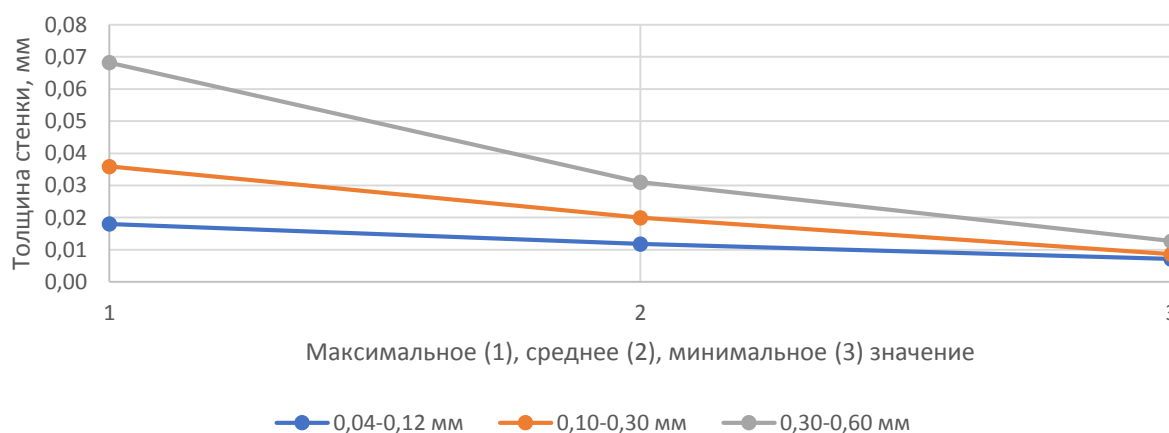


Рис. 7. Толщина стенок микросфер

На рис. 7 видно, что с увеличением размера фракций также увеличивается и толщина стенок. При этом можно отметить, что максимальное значение толщины стенки сферы может составлять 10 % от максимального размера фракции. Таким образом, прочность микросферы может меняться в зависимости от ее фракционного состава.

Микроструктура и элементный состав сфер

Для более детального изучения микроструктуры сфер и определения их элементного состава были выполнены исследования на электронном микроскопе (микросферы с размерами фракций 0,1–0,3 мм). На рис. 8 приведены изображения микросфер при увеличении в 771 (рис. 8, а) и 5170 (рис. 8, б) раз.

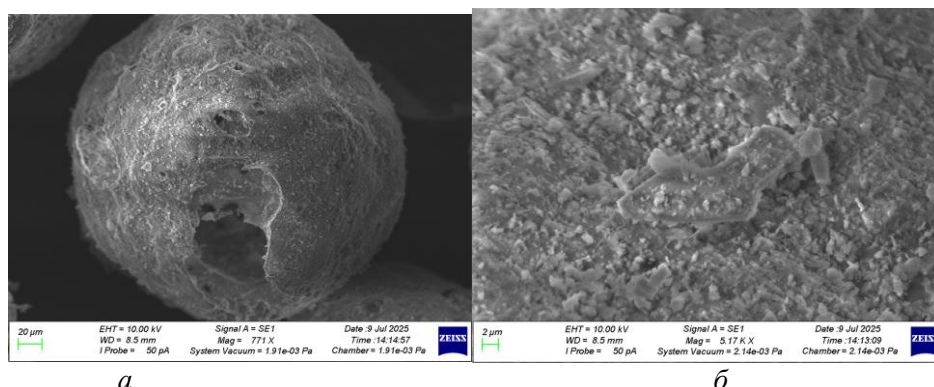


Рис. 8. Микроизображение сферы (образец с размерами фракций 0,1–0,3 мм)

Форма и геометрические параметры сфер, определенные с помощью электронной микроскопии, схожи с теми, которые были получены на оптическом микроскопе. Формы гранул не всегда сферические и имеют в отдельных случаях частичное разрушение поверхности с образованием внутренних пустот, поверхность шероховатая.

При большем увеличении (см. рис. 8, б) на поверхности сферы можно наблюдать отдельные частички чешуйчатой формы размером от 0,1 до 20 микрометра, достаточно равномерно распределенные по ее поверхности.

Выполненный элементный анализ показал наличие в составе пробы С, О, Na, Mg, Al, Si, S, К, Ca, Zn, Fe, Br, Sr.

Наибольшее элементное содержание пробы составляют кислород (57 %), кремний (23 %), алюминий (8 %) и натрий (7 %). Остальные элементы вносят в состав пробы незначительный вклад.

Всего было проанализировано 10 областей и локальных участков. Статистические характеристики для элементных концентраций по выбранным участкам приведены в табл. 8.

Таблица 8

Статистические характеристики элементных концентраций (%) в микросферах для совокупности выбранных участков

Концентрация	С	О	Na	Mg	Al	Si	S	К	Ca	Fe	Br	Sr
Максимальная	7,23	66,46	11,57	0,54	14,08	31,85	0,32	2,82	2,26	4,50	3,69	1,43
Минимальная	3,52	44,65	3,54	0,17	4,87	18,22	0,09	0,25	0,18	0,40	3,69	1,43
Усредненная	5,57	56,65	6,82	0,32	8,46	23,07	0,21	0,79	0,99	1,11	3,69	1,43
Стандартное отклонение	1,53	6,94	3,21	0,14	2,98	4,24	0,12	0,75	0,62	1,25	-	-

Обсуждение результатов

Из рассмотренных компонентов были изготовлены образцы геополимера, состоящие из глины, цемента и микросфер в соотношении соответственно 40:30:30 % по массе. Использованы два наполнителя с размерами фракций 0,1–0,3 и 0,3–0,6 мм. Образцы изготавливались при увлажнении до состояния удобоукладываемой смеси, при этом влажность смеси составляла 40 %. Подготовленная смесь укладывалась в специальные формы размером 100×100×20 мм для испытания на теплопроводность и размером 40×40×40 мм для испытания на прочность.

С помощью электронной микроскопии выполнен анализ двух образцов геополимера с различными связующими. Первый образец представляет собой геополимер, состоящий из глины и цемента с добавлением керамических микросфер (рис. 9). На рис. 9 отображен характер расположения микросфер в геополимере. Видно, что частички глины, связанные цементом, обволакивают микросферы.

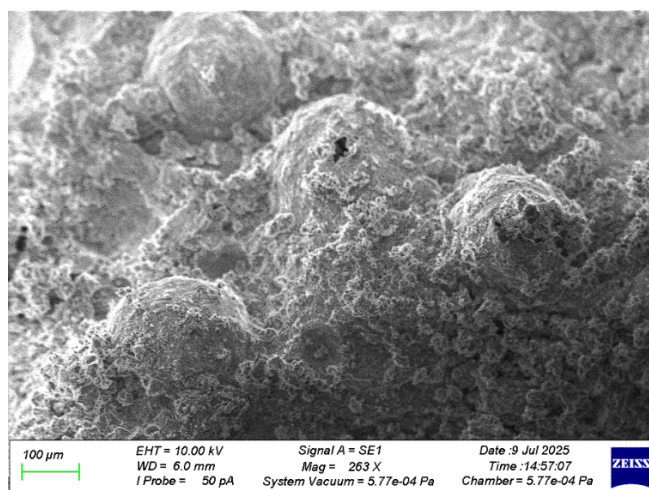


Рис. 9. Встроенные микросферы с размерами фракций 0,1–0,3 мм в структуре геополимера

При более сильном увеличении можно наблюдать образование в результате гидратации кристаллов игольчатой (рис. 10, *а*) и призмovidной (рис. 10, *б*) формы. Такие кристаллы образуются в геополимере как на границе с микросферами, так и в пространстве между ними. Формирование кристаллов приводит к увеличению прочности образца за счет образования более прочных связей между частицами глины и их агрегациями, а также с поверхностью микросфер.

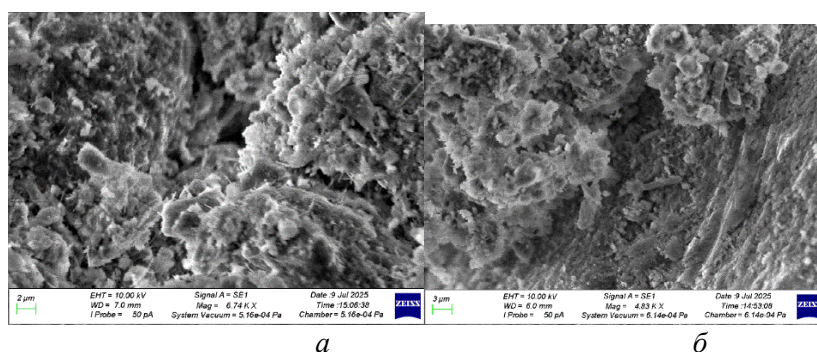


Рис. 10. Образования игольчатой и призмovidной формы

Выполненный элементный анализ на большом участке образца показал наличие в составе пробы С, О, Na, Mg, Al, Si, S, K, Ca, Fe.

Наибольшее элементное содержание пробы составляют кислород (54 %), углерод (14 %), кремний (12 %), алюминий (7 %) и кальций (9 %). Остальные элементы вносят незначительный вклад в состав пробы.

Всего было проанализировано восемь областей и локальных участков. Статистические характеристики элементных концентраций на совокупности выбранных участков приведены в табл. 9.

Таблица 9

Статистические характеристики элементных концентраций (%) в геополимере для совокупности выбранных участков

Концентрация	С	О	Na	Mg	Al	Si	S	K	Ca	Fe
Максимальная	15,89	66,13	2,53	0,98	16,30	14,22	0,38	1,59	10,48	28,37
Минимальная	12,57	45,00	0,46	0,74	4,57	8,12	0,25	0,58	6,41	1,78
Усредненная	14,03	53,95	1,34	0,86	6,92	12,07	0,31	0,95	8,59	6,00
Стандартное отклонение	1,25	6,07	0,87	0,09	4,07	1,83	0,05	0,33	1,25	9,87

Можно наблюдать результаты гидратации цемента с формированием связей с глинистыми частицами и их агрегациями, а также возникновение связей на поверхности сфер.

Теплопроводность

В соответствии с методикой проведения измерений теплопроводности образцы помещались в прибор и фиксировались прижимным винтом с созданием давления на образец, равного 2,5 кПа. Толщина образца определялась по отсчетному устройству с точностью до 0,1 мм. На электронном блоке в режиме «Измерение» задавались толщина образца и диапазон температур, после чего запускалось измерение. В результате были получены значения эффективной теплопроводности λ и теплового сопротивления R для испытуемых образцов, приведенные в табл. 10.

Испытания показали, что использование микросфер с фракциями 0,1–0,3 мм и 0,3–0,6 мм в качестве наполнителя для смеси глины и цемента позволяет снизить вес конструкции, изготовленной из геополимера в 1,53 и 1,60 раза соответственно по сравнению с применением уплотненного глинистого грунта, что значительно снизит нагрузку на основание, даже если на геополимер заменить лишь часть насыпи. При этом рассматриваемая композиция имеет и улучшенные показатели теплопроводности, которая уменьшилась соответственно в 2,94 и 2,21 раза.

Таблица 10

Результаты измерений теплопроводности материалов

Название материала	Эффективная теплопроводность λ , Вт/м·К	Плотность ρ , г/см ³
Глина в сыпучем сухом состоянии	0,180	1,10
Цемент в сыпучем сухом состоянии	0,107	1,01
Глина сухая с коэффициентом уплотнения, равным 1	0,910	1,81
Глиноцементная смесь сухая (30 % цемента) после 28 дней созревания	0,720	1,47
Керамические микросферы фракции 0,1–0,3 мм в сыпучем сухом состоянии	0,098	0,45
Керамические микросферы фракции 0,3–0,6 мм в сыпучем сухом состоянии	0,093	0,40
Глиноцементная смесь сухая с наполнителем в виде сфер с фракциями 0,1–0,3 мм после 28 дней созревания	0,309	1,18
Глиноцементная смесь сухая с наполнителем в виде сфер с фракциями 0,3–0,6 мм после 28 дней созревания	0,411	1,13

Прочность на сжатие

Прочность на сжатие подготовленных образцов из глины и глиноцементной смеси, в т. ч. с добавлением микросфер, определялась в лабораторных условиях с использованием приборов, обеспечивающих статическую нагрузку на поверхность образца, установленного между нижней опорной площадкой и верхней металлической пластиной. Испытания проводились с использованием автоматизированного вычислительного комплекса «АСИС» (метод одноосного сжатия).

Образцы кубовидной формы размером 40×40×40 мм по 4 образца для каждой серии испытаний выдерживались в камере нормального твердения 28 суток. Затем образцы предварительно осматривались, измерялись, взвешивались. Нагружение образцов проводилось непрерывно с постоянной скоростью нарастания нагрузки. Фиксировалось максимальное значение нагрузки, при которой образец разрушался (появление вертикальных или наклонных трещин). Прочность образцов на сжатие (МПа) вычислялась как отношение предельной разрушающей нагрузки (кН) к площади верхней грани образца (м²).

Усредненные значения прочности образцов на сжатие R (МПа) приведены в табл. 11.

Таблица 11

Результаты измерений прочности на сжатие

Материал	Прочность на сжатие R , МПа
Глина сухая с коэффициентом уплотнения, равным 1	2,20
Глиноцементная смесь сухая (30% цемента) после 28 дней созревания	3,20

Окончание табл. 11

Материал	Прочность на сжатие R , МПа
Глиноцементная смесь сухая с наполнителем в виде сфер фракции 0,1–0,3 мм после 28 дней созревания	2,23
Глиноцементная смесь сухая с наполнителем в виде сфер фракции 0,3–0,6 мм после 28 дней созревания	2,67
Напряжения возникающие в основании насыпи высотой 16 м, сложенной из глинистого грунта	0,32
Допустимые напряжения на основной площадке земляного полотна	0,08–0,12

Из табл. 11 видно, что прочность на сжатие образцов геополимера значительно превышает напряжения от собственного веса конструкции и подвижного состава, которые возникают в грунтах земляного полотна и его основания. Полученная прочность образцов позволяет применять данный геополимер как в качестве теплоизоляционного слоя на основной площадке земляного полотна для предотвращения промерзания грунта и его пучения, так и для формирования тела насыпи для снижения нагрузки на основание земляного полотна.

Выводы

Полученные результаты позволяют сформулировать следующие основные выводы:

– внутреннее пространство микросфер имеет перегородки, что повышает их прочность. Толщина стенок микросфер составляет в среднем от 0,0118 до 0,031 мм в зависимости от фракции. С увеличением размера фракции увеличивается толщина стенок сфер. Микросферы имеют шероховатую поверхность, что способствует формированию прочной структуры геополимера. Основными элементами сферы являются кремний и алюминий, как и у глинистого грунта, использованного для создания геополимера;

– в геополимере, как на границе с микросферами, так и в пространстве между ними, при гидратации формируются кристаллы игольчатой и призмочувидной формы. Образование кристаллических связей способствует увеличению прочности образца;

– применение микросфер в геополимере снижает вес конструкции до 1,6 раза и улучшает показатель теплопроводности почти в 3 раза;

– прочность изготовленных образцов позволяет применять данный геополимер как в качестве теплоизоляционного слоя на основной площадке земляного полотна, так и для создания облегченных конструкций железнодорожного пути.

Список литературы

1 Чунюк, Д. Ю. Практический опыт применения метода «Геокомпозит» при новом строительстве // Д. Ю. Чунюк, С. М. Сельвиан // Перспективы науки. – 2021. – № 2 (137). – С. 182–187. – ISSN 2077-6810. – EDN LLKLRT.

2 Abelev, M. Y. Experimental investigations of the effectiveness of the “geocomposite” method of soil grouting in the beds of buildings on backfill sands / M. Y. Abelev, I. V. Averin, U. A. Korableva // Soil Mechanics and Foundation Engineering. – 2015. – Vol. 52, No. 2. – P. 84–87. – DOI 10.1007/s11204-015-9310-3.

3 Татьянников, Д. А. Влияние сжимаемости армирующего материала на осадку фундамента при штамповых модельных испытаниях на примере геокомпозита / Д. А. Татьянников, В. И. Клевеко // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура. – 2013. – № 2. – С. 124–132. – ISSN 2224-9826.

4 Прочностные характеристики легкого бетона на

References

1 Chunyuk, D. Yu. Practical experience of applying the “Geocomposite” method in new construction” / D. Yu. Chunyuk, S. M. Selviyan // Prospects of Science. – 2021. – No. 2 (137). – P. 182–187. – ISSN 2077-6810. – EDN LLKLRT.

2 Abelev, M. Y. Experimental investigations of the effectiveness of the “geocomposite” method of soil grouting in the beds of buildings on backfill sands / M. Y. Abelev, I. V. Averin, U. A. Korableva // Soil Mechanics and Foundation Engineering. – 2015. – Vol. 52, No. 2. – P. 84–87. – DOI 10.1007/s11204-015-9310-3.

3 Tatymanikov, D. A. Effect of compressibility of reinforcing material on foundation settlement during stamp model tests using geocomposite as an example / D. A. Tatymanikov, V. I. Kleveko // Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Construction and Architecture. – 2013. – No. 2. – P. 124–132. – ISSN 2224-9826.

4 Strength characteristics of lightweight concrete

пористых заполнителях / Б. Ш. Ризаев, А. Т. Мамадалиев, О. К. Фозилов, Б. Ё. Шаропов, М. А. К. Мухторалиева // *Universum : технические науки*. – 2022. – № 6-3 (99). – С. 11–15. – DOI 10.32743/UniTech.2022.99.6.13881.

5 **Абдрахимов, В. З.** Использование отхода обогащения угля и бейделлитовой глины в производстве пористого заполнителя на основе жидкостекольных композиций / В. З. Абдрахимов // *Известия высших учебных заведений. Строительство*. – 2019. – № 7 (727). – С. 25–34. – DOI 10.32683/0536-1052-2019-727-7-25-34.

6 **Абдрахимов, В. З.** Применение отходов флотационного обогащения антрацитов в производстве пористого заполнителя на основе жидкостекольных композиций / В. З. Абдрахимов // *Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Строительство и архитектура*. – 2020. – Т. 11, № 1. – С. 92–101. – DOI 10.15593/2224-9826/2020.1.09.

on porous fillers / B. Sh. Rizaev, A. T. Mamadaliyev, O. K. Fozilov, B. Y. Sharopov, M. A. K. Mukhtoralieva // *Universum : technical sciences*. – 2022. – No. 6-3 (99). – P. 11–15. – DOI 10.32743/UniTech.2022.99.6.13881.

5 **Abdrakhimov, V. Z.** Use of coal enrichment waste and beidellite clay in the production of porous filler based on liquid glass compositions / V. Z. Abdrakhimov // *News of Higher Educational Institutions. Construction*. – 2019. – No. 7 (727). – P. 25–34. – DOI 10.32683/0536-1052-2019-727-7-25-34.

6 **Abdrakhimov, V. Z.** Application of anthracite flotation enrichment waste in production of porous aggregate based on liquid-glass compositions / V. Z. Abdrakhimov // *Bulletin of Perm National Research Polytechnic University. Construction and Architecture*. – 2020. – Vol. 11, No. 1. – P. 92–101. – DOI 10.15593/2224-9826/2020.1.09.

V. L. Shapovalov, A. V. Morozov, M. V. Okost, T. P. Gorbacheva

THE USE OF CERAMIC SPHERES IN THE MANUFACTURE OF GEOPOLYMER FOR LIGHTWEIGHT STRUCTURES

Abstract. This work is devoted to the consideration of the possibility of creating a material with improved characteristics, namely reduced weight and thermal conductivity, using a filler in the form of hollow ceramic spheres to reduce the stress-strain state of the foundation of soil engineering objects and the effect of temperatures on soil stability. The constituent elements of the geopolymer were studied by electron microscopy methods, their composition and some properties were determined, as well as thermal conductivity, density and compressive strength of geopolymer samples. As a result of the studies, it was shown that adding microspheres to the geopolymer improves its thermal conductivity properties and lightens the design of the roadbed.

Keywords: clay soil, geopolymer, roadbed, ceramic microspheres, thermal conductivity, lightweight structures.

For citation: The use of ceramic spheres in the manufacture of geopolymer for lightweight structures / V. L. Shapovalov, A. V. Morozov, M. V. Okost, T. P. Gorbacheva // *Vestnik Rostovskogo Gosudarstvennogo Universiteta Putej Soobshcheniya*. – 2025. – No. 3. – P. 28–40. – DOI 10.46973/0201-727X_2025_3_28.

Сведения об авторах

Шаповалов Владимир Леонидович

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Путь и путевое хозяйство»,
доктор технических наук, доцент,
e-mail: cpd@rgups.ru

Окост Максим Викторович

Ростовский государственный университет путей сообщения (РГУПС),
кафедра «Изыскания, проектирование и строительство железных дорог»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: okostmv@rgups.ru

Information about the authors

Shapovalov Vladimir Leonidovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair “Track and Track Facilities”,
Doctor of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: cpd@rgups.ru

Okost Maksim Victorovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair “Survey, Design and Construction of Railways”,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: okostmv@rgups.ru

Морозов Андрей Владимирович

Ростовский государственный университет путей
сообщения (РГУПС),
кафедра «Физика»,
кандидат технических наук, доцент,
e-mail: cpd@rgups.ru

Горбачева Татьяна Петровна

Ростовский государственный университет путей
сообщения (РГУПС),
кафедра «Путь и путевое хозяйство»,
ассистент,
e-mail: nanami1995@bk.ru

Morozov Andrey Vladimirovich

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair “Physics”,
Candidate of Engineering Sciences,
Associate Professor,
e-mail: cpd@rgups.ru

Gorbacheva Tatiana Petrovna

Rostov State Transport University (RSTU),
Chair “Track and Track Facilities”,
Assistant,
e-mail: nanami1995@bk.ru