

Композиционные материалы на основе строительных
и полимерных отходов

Александр Андреевич Баруздин, Любовь Владимировна Закревская
Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича
и Николая Григорьевича Столетовых (ВлГУ); г. Владимир, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Исследование посвящено комплексному изучению рециклинга в строительстве. Приведены анализ опыта переработки отходов строительства и полимерной промышленности, существующие способы и технологии переработки отходов сшитого полиэтилена.

Материалы и методы. Использовано исследовательское и испытательное оборудование с высокой воспроизводимостью результатов. Свойства изготовленных образцов материалов определялись по стандартным методикам, помимо этого, для изучения структуры материалов применялись методы рентгенофазового анализа, оптической и растровой электронной микроскопии.

Результаты. Разработаны составы композиционных материалов плотностью от 1750 до 2000 кг/м³, прочностью на сжатие от 20 до 40 МПа, включающие: портландцемент, отходы сшитого полиэтилена и керамического кирпича, поликарбоксилатный пластификатор, белую сажу и раствор хлорида кальция. Исследована возможность применения тонкомолотого кирпичного боя в качестве частичной замены цемента и измельченного сшитого полиэтилена в качестве заполнителя. Изучена микроструктура полученных композиционных материалов и сделан вывод о том, что заполнитель в виде сшитого полиэтилена армирует матрицу, представляющую собой продукт взаимодействия цемента, кирпичной крошки и белой сажи, в результате которого образуется прочная кристаллическая структура, состоящая из гидросиликатов и карбонатов кальция и кварца.

Выводы. Полученные результаты могут быть использованы в производстве строительных композиционных материалов на основе рециклинга отходов кирпича керамического и сшитого полиэтилена. Благодаря тому, что себестоимость представленных отходов ниже, чем у портландцемента и традиционных заполнителей (примерно на 25 %), а их переработка сопровождается снижением отрицательного воздействия на окружающую среду, композиты на их основе имеют хорошую перспективу внедрения в практику строительства.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: рециклинг, сшитый полиэтилен, кирпичный бой, микроструктура, рентгенофазовый анализ, растровая электронная микроскопия, композиционные материалы, механические свойства

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания в сфере научной деятельности Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема FZUN-2020-0015, госзадание ВлГУ). Исследования проводились с использованием оборудования межрегионального многопрофильного и междисциплинарного центра коллективного пользования перспективных и конкурентоспособных технологий по направлениям развития и применения в промышленности/машиностроении отечественных достижений в области нанотехнологий (Соглашение № 075-15-2021-692 от 05.08.2021).

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Баруздин А.А., Закревская Л.В. Композиционные материалы на основе строительных и полимерных отходов // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 2. С. 246–257. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.2.246-257

Автор, ответственный за переписку: Александр Андреевич Баруздин, baruzdin98@bk.ru.

Composite materials containing construction and polymer waste

Aleksandr A. Baruzdin, Lyubov V. Zakrevskaya

Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs (VLSU); Vladimir, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. This research is a consolidated study of recycling in the construction industry. The recycling of construction and polymer industry waste is analyzed. Currently used methods and technologies of cross-linked polyethylene waste recycling are presented.

Materials and methods. The research and testing equipment with high reproducibility of results is used. Properties of manufactured specimens of materials were determined by standard methods. Methods of X-ray phase analysis, optical and scanning electron microscopy were used to study the structure of materials.

Results. Compositions of composite materials with density from 1,750 to 2,000 kg/m³ and compressive strength from 20 to 40 MPa have been developed. Compositions included Portland cement, waste of cross-linked polyethylene and ceramic bricks, polycarboxylate plasticizer, silica filler and calcium chloride solution. The possibility of using floured broken brick as a partial replacement of cement and crushed cross-linked polyethylene as an aggregate is investigated. The microstructure

of the obtained composite materials was studied and it was concluded that cross-linked polyethylene aggregate is reinforce a homogeneous matrix, which is a product of the interaction of cement, brick powder and silica filler. During the hardening of matrix strong crystal structure consisting of hydrosilicates and calcium and quartz carbonates is formed.

Conclusions. The obtained results can be used in the production of building composite materials based on recycling of ceramic brick waste and cross-linked polyethylene. Due to the fact that the cost of the presented waste is much lower than the cost of Portland cement and traditional aggregates (by about 25 %), and their recycling is accompanied by the reduction of negative impact on the environment, composites based on them have good prospects for implementation in construction practice.

KEYWORDS: recycling, cross-linked polyethylene, broken brick, microstructure, X-ray phase analysis, scanning electron microscopy, composite materials, mechanical properties

Acknowledgements. The research was carried out within the framework of the state assignment in the sphere of scientific activity of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme FZUN-2020-0015, state assignment of VLSU). The research was carried out using the equipment of the interregional multispecialty and interdisciplinary centre of collective use of promising and competitive technologies in the areas of development and application in industry/mechanical engineering of domestic achievements in the field of nanotechnology (Agreement No. 075-15-2021-692 of August 5, 2021).

FOR CITATION: Baruzdin A.A., Zakrevskaya L.V. Composite materials containing construction and polymer waste. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(2):246-257. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.2.246-257 (rus.).

Corresponding author: Aleksandr A. Baruzdin, baruzdin982bk.ru.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время производство строительных материалов требует повышения уровня ресурсосбережения, энергоэффективности и экологичности. Один из путей решения этого вопроса — рециклинг отходов строительства.

В октябре 2022 г. Министерством строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации был утвержден паспорт программы «Применение вторичных ресурсов, вторичного сырья из отходов в сфере строительства и жилищно-коммунального хозяйства на 2022–2030 годы». Цели программы: увеличение количества отходов, вовлекаемых в хозяйственный оборот; уменьшение количества отходов строительства, отправляемых на захоронение; формирование комплексного подхода к обращению с отходами строительства на всех этапах их жизненного цикла.

Рециклинг строительных отходов подразумевает их переработку для повторного применения полученного сырья. Несмотря на то что накоплено достаточно много информации, данная практика в России пока не получила широкого распространения. Тем не менее известно, что большинство отходов строительства можно перерабатывать и использовать повторно в производстве новых материалов. Так, дробленый кирпичный бой, бетонный лом и его отсеvy возможно использовать в качестве заполнителя, наполнителя и добавки в бетонные смеси и растворы [1–7]; переработанные отходы гипсокартона — для производства новых гипсовых изделий [8, 9]; отходы древесины являются сырьем для композитов на основе органических заполнителей, таких как арболит, фибролит, опилкобетон и т.д. [10]; стеклобой применяется как в стекольной промышленности, так и в производстве новых строительных материалов, а также в дорожном строительстве [11–13]. Один из видов строительных отходов, рециклинг которого затруднен и изучен в меньшей сте-

пени, — это отход изоляции силовых кабелей, сантехнических труб и фитингов (сшитый полиэтилен).

Сегодня ведущие ученые говорят о стремительно возрастающей проблеме микропластика, который производится вследствие естественной деградации полимерных отходов. Воздействие микропластика на живые организмы до конца не изучено, но уже сейчас известно, что его частицы могут оказывать как отрицательное механическое воздействие, так и проникать в кровь и клеточные мембраны. Один из способов снижения этого отрицательного воздействия — переработка полимерных отходов.

С каждым годом производство сшитого полиэтилена возрастает. По состоянию на 2019 г. мировой объем выпуска труб из сшитого полиэтилена превысил 260 тыс. т [14]. Связано это с увеличением доли использования сшитого полиэтилена в ряде областей вместо традиционного полиэтилена и поливинилхлорида.

При температурах выше 75 °С полиэтилен размягчается и течет, теряя свои физические свойства. Сшивание полиэтилена позволяет сохранить желаемые свойства в более широком температурном диапазоне [15].

В результате сшивания полиэтилена между его молекулами образуется пространственная структура, благодаря которой он работает при более высоких температурах, имеет высокие механические и диэлектрические показатели, а также химическую стойкость [14].

В табл. 1 приведены основные свойства сшитого полиэтилена.

С другой стороны, из-за своей химической и термической стойкости сшитый полиэтилен плохо поддается переработке методами традиционными для обычного полиэтилена. Поэтому большая часть отходов сшитого полиэтилена подвергается захоронению или сжиганию в виде топлива [14].

Основные методы переработки сшитого полиэтилена направлены на различные способы раз-

Табл. 1. Основные свойства сшитого полиэтилена
Table 1. Main properties of cross-linked polyethylene

Свойства Properties	Значение Value
Плотность, кг/м³ Density, kg/m³	940
Температура плавления, °C Melting temperature, °C	200
Температура горения, °C Burning temperature, °C	400
Прочность на разрыв, МПа Tensile strength, MPa	22–27
Относительное удлинение при разрыве, % Relative elongation at break, %	350–800
Модуль упругости, МПа Modulus of elasticity, MPa	>550
Теплопроводность, Вт/м·К Thermal conductivity, W/m·K	0,38

рушения трехмерной молекулярной структуры для придания полимеру термопластичности, свойственной исходному полиэтилену.

Первый способ — термическая деструкция сшитого полиэтилена. При температуре до 400 °C сшитый полиэтилен ведет себя стабильно, разложение начинается при повышении температуры до 430 °C и при 500 °C полимер разлагается без образования твердого остатка. Поэтому при поддержании температуры ниже 450 °C можно использовать термодеструкцию сшитого полиэтилена для разрушения пространственной структуры и получения термопластичного полимера для вторичного применения [15].

Другой способ переработки — использование сверхкритического спирта или воды для разрушения связей сшитого полиэтилена. Однако такая переработка сопряжена с высокотехнологическим оборудованием и сложной организацией процесса, а также высокими энергетическими затратами [16].

Авторами работы [17] разработана технология, позволяющая с помощью оптимально подобранной термопластификации получать из сшитого полиэтилена материал, который можно формовать. Также авторы упоминают о том, что есть технологии по измельчению и добавлению сшитого полиэтилена к термопластам и расплавлению смеси для получения вторичного материала.

Существуют технологии, связанные с воздействием на сшитый полиэтилен ультразвука, который дает возможность убрать связи, оставив основную полимерную цепочку полиэтилена. Недостатком данной технологии являются высокие материальные затраты и необходимость высокотехнологического оборудования, поэтому эта технология используется крайне редко.

Учеными во всем мире активно изучается вопрос применения полимерных отходов в производстве строительных материалов.

Так, в труде [18] представлено исследование по улучшению свойств штукатурного раствора порошком из отходов стекла и волокнами из пластиковых отходов типа полиэтилентерефталата. Отмечается увеличение прочности на изгиб у образцов штукатурки, армированных волокнами из пластиковых отходов (1–2 % пластиковых волокон от массы гипса).

Изучены свойства бетонных смесей, в которых мелкий заполнитель из речного песка был заменен на гранулы, изготовленные путем измельчения отходов труб из поливинилхлорида (ПВХ) [19]. Отмечается, что бетоны на основе ПВХ заполнителя имеют пониженную прочность на сжатие и растяжение, однако они обладают меньшей усадкой, плотностью, а также являются более устойчивыми к проникновению хлорид-ионов. Рекомендуется при изготовлении бетонов на основе заполнителей из отходов ПВХ ограничивать их содержание до 15 % по объему. При соблюдении этих ограничений такие бетоны можно использовать для возведения легких не несущих элементов.

В то же время в публикации [20] указывается, что бетоны, содержащие пластмассовые волокна из отходов ПВХ в количестве менее 1 %, имеют повышенную прочность на сжатие и растяжение по сравнению с обычным бетоном, но при увеличении содержания переработанных пластиковых волокон сверх этого уровня происходит снижение механических характеристик бетона.

Авторы работы [21] исследовали возможность частичной замены мелкого заполнителя бетона на пластиковые отходы и сделали вывод о том, что включение пластика в состав бетона снижает его прочность на сжатие и изгиб, но при замене части цемента на микрокремнезем в составе с пластиковыми отходами удается достичь прочности, эквивалентной контрольному составу. Прочность на разрыв, согласно результатам экспериментов ав-

торов, не снижается при замене мелкого заполнителя на пластик вплоть до 6 %.

В Канаде и Индии реализовываются проекты по созданию асфальтобетонных покрытий на основе переработанного пластика, такие дороги не только превосходят по прочности и долговечности традиционные, но и позволяют очистить планету от кубометров пластикового мусора [22].

Вопрос использования отходов сшитого полиэтилена в производстве строительных материалов изучен в меньшей мере, чем применение других полимерных отходов. Тем не менее проведено исследование целесообразности включения отходов сшитого полиэтилена в бетонные смеси [23]. Отмечается, что прочность бетона на сжатие, растяжение и изгиб снижается при увеличении содержания сшитого полиэтилена, особенно это характерно для смесей, содержащих крупногабаритные включения сшитого полиэтилена. Также снижается модуль упругости бетона и увеличивается усадка. Авторы связывают данные отрицательные эффекты со снижением жесткости каркаса бетона при включении сшитого полиэтилена, меньшим удельным весом кусков полиэтиленового заполнителя по сравнению с натуральными заполнителями и их плохой адгезией к цементной матрице. Положительным эффектом от введения сшитого полиэтилена в состав бетонной смеси служит снижение водопоглощения, что связано с незначительным водопоглощением самого полиэтиленового заполнителя.

Специалисты в области дорожного строительства говорят о возможности применения сшитого полиэтилена в полимерно-битумных вяжущих совместно с минеральными компонентами смесей и в качестве модификатора для битума. Отмечается перспективность применения данного вида отходов в несущем основании и дополнительных слоях основания дорожной одежды [24].

Настоящая работа направлена на изучение возможности применения измельченного сшитого полиэтилена в качестве заполнителя бетонов. При таком подходе свойства сшитого полиэтилена, обусловленные его трехмерной структурой, могут положительно повлиять на свойства изготавливаемого композита и отпадет необходимость при переработке использовать сложные технологии. Решение этого вопроса может позволить не только вторично использовать отходы сшитого полиэтилена, но также снизить потребность в природных заполнителях и сократить расходы для получения новых строительных изделий.

Также в качестве частичной замены вяжущего была использована тонкодисперсная кирпичная крошка, получаемая при дроблении кирпичного лома, что увеличивает экономический и экологический эффект предлагаемого решения.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исследования проводились на базе кафедры строительного производства ВлГУ имени Алек-

сандра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых с помощью современного оборудования и приборов, таких как пресс П-125, машина для определения прочности при изгибе МИИ-100, смеситель лабораторный ЗУБР-1400, прибор для измерения удельной поверхности и среднего размера частиц ПСХ-10, лабораторная мельница ЛБ-1, стандартный конус ПГР для определения подвижности смеси, прибор Вика, формы для образцов-балочек $16 \times 4 \times 4$ см, набор сит, оптический микроскоп МБС-9, сканирующий электронный микроскоп FIB-SEM LMI-700. Рентгенофазовый анализ (РФА) проводился на порошковом дифрактометре Bruker AXS D8 ADVANCE (модель D8, фирма-производитель Bruker Optik GmdH, Германия).

Для синтеза были использованы измельченные отходы сшитого полиэтилена; тонкодисперсная кирпичная крошка, полученная дроблением отходов кирпичного боя; портландцемент белый ПЦБ 1-500-Д0; белая сажа БС-120; 10 %-ный раствор хлорида кальция; поликарбонатный пластификатор П-17 (рис. 1).

В табл. 2 представлены свойства используемых материалов.

На рис. 2 приведен РФА применяемых отходов сшитого полиэтилена.

Из результатов РФА видно, что в отходах, помимо полиэтилена, присутствуют карбонаты магния и кальция, в меньшей степени доломит, аминокислотные соединения, дикарбоновые кислоты, технический углерод.

В табл. 3 представлен гранулометрический состав используемых отходов сшитого полиэтилена.

Из табл. 3 видно, что измельченные отходы сшитого полиэтилена представлены в основном крупными фракциями 5–10 мм, что, вероятнее всего, связано с трудностью измельчения сшитого по-



Рис. 1. Используемые материалы: *a* — тонкодисперсная кирпичная крошка; *b* — отходы сшитого полиэтилена; *c* — портландцемент белый ПЦБ 1-500-Д0; *d* — белая сажа БС-120; *e* — хлорид кальция технический; *f* — пластификатор П-17

Fig. 1. Used materials: *a* — finely-dispersed broken brick; *b* — waste of cross-linked polyethylene; *c* — white Portland cement; *d* — white carbon black; *e* — technical calcium chloride; *f* — plasticizer

Табл. 2. Свойства используемых материалов
Table 2. Properties of used materials

Материалы Materials	Свойства Properties
Портландцемент ПЦБ 1-500-Д0 Portland Cement PCB 1-500-D0	Цемент белый, без добавок, марки 500; $S_{уд} > 250 \text{ м}^2/\text{кг}$ White cement, without additives, grade 500; $S_{уд} > 250 \text{ м}^2/\text{кг}$
Кирпичная крошка Broken brick	Фракция менее 0,08 мм; $S_{уд} = 2500 \text{ см}^2/\text{г}$; $\rho_{нас} = 820 \text{ кг/м}^3$; $\rho_{ист} = 2720 \text{ кг/м}^3$ Fraction less than 0.08 mm; $S_{уд} = 2,500 \text{ см}^2/\text{г}$; $\rho_{нас} = 820 \text{ кг/м}^3$; $\rho_{ист} = 2,720 \text{ кг/м}^3$
Отходы сшитого полиэтилена Waste of cross-linked polyethylene	Фракция 2,5–5 мм Fraction 2.5–5 mm
Белая сажа БС-120 Silica filler BS-120	$S_{уд} = 12\,000 \text{ см}^2/\text{г}$; массовая доля $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ — 87 % $S_{уд} = 12,000 \text{ см}^2/\text{г}$; mass content of $\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ — 87 %
Пластификатор П-17 Plasticizer P-17	50%-ный раствор плотностью $\geq 1,1 \text{ г/см}^3$ 50 % solution with density $\geq 1.1 \text{ г/см}^3$
Раствор хлористого кальция Calcium chloride solution	Концентрация CaCl_2 — 10 % Concentration of CaCl_2 — 10 %

Идентификатор командного образца (согласованное два Тета/Тета)
Commander Sample ID (Coupled Two Theta/Theta)

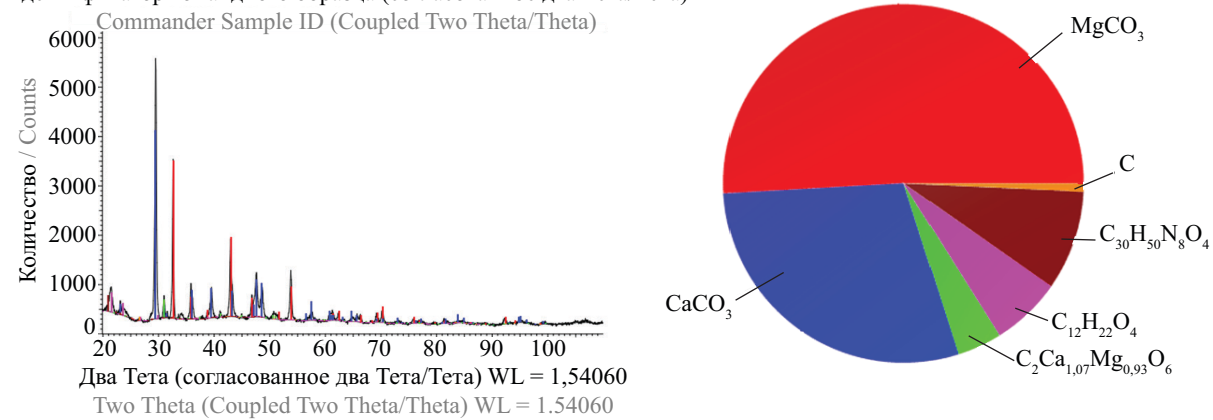


Рис. 2. Рентгенофазовый анализ отходов сшитого полиэтилена
Fig. 2. X-ray phase analysis of cross-linked polyethylene waste

Табл. 3. Гранулометрический состав отходов сшитого полиэтилена
Table 3. Granulometric composition of cross-linked polyethylene waste

Остатки Residues	Размер сит, мм Sieve size, mm							Дно Pallet
	10	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,14	
Частные остатки на ситах, % Partial residues on sieves, %	0,70	83,50	14,50	0,50	0,20	0,15	0,30	0,15

лиэтилена до более мелких фракций за счет особенностей его строения и пластинчатой формы частиц. В данной работе в качестве заполнителя была использована фракция полиэтилена 2,5–5 мм. Для уменьшения водоцементного (В/Ц) отношения и, как следствие, повышения прочности композитов применен поликарбоксилатный пластификатор П-17. С целью ускорения процесса гидратации в смесь добавляли раствор хлористого кальция, который вместе с тем уменьшает текучесть, сокращает сроки схватывания и увеличивает раннюю прочность.

Свойства синтезированных композиционных материалов устанавливались на стандартных образцах-балочках размером $16 \times 4 \times 4$ см. Образцы изготавливались по стандартной технологии: компоненты перемешивали в сухом виде, затем затворяли раствором CaCl_2 с добавлением пластификатора, формовали и оставляли во влажных условиях для набора прочности. После этого в возрасте 28 дней определяли плотность образцов, прочность на сжатие и изгиб, а также водопоглощение.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для оценки влияния пластификатора на конечную прочность образцов, а также оценки оптимального соотношения цемента и кирпичной крошки было изготовлено несколько образцов, содержащих цемент, кирпичную крошку, пластификатор и воду. Составы и результаты изучения свойств представлены в табл. 4.

Из результатов представленного эксперимента можно сделать вывод, что поликарбоксилатный пластификатор позволяет значительно снизить В/Ц отношение и повысить прочность образцов на 60–90 % по сравнению с образцами без пластификатора. Также можно отметить, что замена цемента тонкомолотой кирпичной крошкой до 20 % безболезненно сказывается на основных свойствах образцов.

Табл. 4. Составы на основе цемента и кирпичной крошки
Table 4. Compositions based on cement and broken brick

Марка состава Mark of the composition	Состав, % Composition, %	$\frac{В/Ц}{В/Т}$ $\frac{W/C}{W/S}$	Свойства / Properties			
			Плотность ρ , кг/м ³ Density ρ , kg/m ³	Прочность на сжатие $R_{сж}$, МПа Compressive strength R_{comp} , MPa	Прочность на изгиб $R_{изг}$, МПа Flexural strength R_{fp} , MPa	Водопоглощение W , % Water absorption W , %
БЦ-1 BC-1	Цемент — 75 Вода — 25 Cement — 75 Water — 25	$\frac{0,33}{0,33}$	2120	87,4	5,9	0,93
БЦК-20 BCK-20	Цемент — 60 Кирпичная крошка — 15 Вода — 25 Cement — 60 Broken brick — 15 Water — 25	$\frac{0,41}{0,33}$	2060	74,0	3,5	1,07
БЦК-40 BCK-40	Цемент — 45 Кирпичная крошка — 30 Вода — 25 Cement — 45 Broken brick — 30 Water — 25	$\frac{0,55}{0,33}$	1990	55,0	6,3	1,37
БЦ — 4(пл) BCK — 4(pl)	Цемент — 83,5 Вода — 15,8 П-17 — 0,7 Cement — 83.5 Water — 15.8 P-17 — 0.7	$\frac{0,19}{0,19}$	2230	140	9,8	0,82
БЦК — 20(пл) BCK — 20(pl)	Цемент — 66,7 Кирпичная крошка — 16,8 Вода — 15,8 П-17 — 0,7 Cement — 66.7 Broken brick — 16.8 Water — 15.8 P-17 — 0.7	$\frac{0,24}{0,19}$	2260	132	10,2	1,11
БЦК — 40(пл) BCK — 40(pl)	Цемент — 50 Кирпичная крошка — 33,5 Вода — 15,8 П-17 — 0,7 Cement — 50 Broken brick — 33.5 Water — 15.8 P-17 — 0.7	$\frac{0,32}{0,19}$	2225	104	6,7	1,62

Табл. 5. Составы синтезированных композитов

Table 5. Compositions of synthesized composites

Марка состава Mark of the composition	Компоненты, мас. % Components, wt. %					
	Портландцемент Portland Cement	Кирпичная крошка Broken brick powder	Белая сажа Silica filler	Сшитый полиэтилен Cross-linked polyethylene	Пластификатор П-17 Plasticizer P-17	10%-ный раствор CaCl ₂ 10 % Calcium chloride solution
КСП-1 KSP-1	48,00	12,00	0,80	22,57	0,43	16,20
КСП-2 KSP-2	49,00	12,25	0,80	20,95	0,45	16,55
КСП-3 KSP-3	50,00	12,50	0,80	19,40	0,45	16,85
КСП-4 KSP-4	52,50	13,13	0,80	15,40	0,47	17,70
КСП-5 KSP-5	55,00	13,75	0,80	11,45	0,50	18,50
КСП-6 KSP-6	56,00	14,00	0,80	9,80	0,50	18,90

Табл. 6. Свойства синтезированных композитов

Table 6. Properties of synthesized composites

Марка состава Mark of the composition	Наименование свойств Name of properties			
	Плотность ρ , кг/м ³ Density ρ , kg/m ³	Прочность на сжатие $R_{сж}$, МПа Compressive strength R_{comp} , МПа	Прочность на изгиб $R_{изг}$, МПа Flexural strength R_{fp} , МПа	Водопоглощение W , мас. % Water absorption W , wt. %
КСП-1 KSP-1	1762	20,4	4,0	2,13
КСП-2 KSP-2	1787	23,1	4,3	2,05
КСП-3 KSP-3	1799	26,6	4,3	2,30
КСП-4 KSP-4	1813	37,0	4,6	1,86
КСП-5 KSP-5	1943	41,6	4,5	2,23
КСП-6 KSP-6	1961	43,5	4,8	2,02

В табл. 5 приведены составы синтезированных композитов.

В табл. 6 представлены свойства синтезированных композитов.

Согласно табл. 6, можно сделать вывод, что увеличение содержания заполнителя из сшитого полиэтилена снижает прочность композита на сжатие и изгиб, что согласуется с результатами авторов [16, 18, 20] и, вероятнее всего, связано со сниженными механическими характеристиками сшитого полиэтилена относительно матрицы.

В то же время все испытанные образцы отличались достаточно низким водопоглощением, что со-

ответствует выводам работы [20]. Данный эффект наблюдается как за счет уменьшенного водопоглощения сшитого полиэтилена, так и за счет высокой плотности матрицы и, очевидно, малого количества пор. Сниженное водопоглощение представленных композитов позволяет сделать прогноз о высоких характеристиках морозостойкости материала, что будет изучено в дальнейших исследованиях.

В результате экспериментов замечено, что в момент формирования происходит расслоение матричной фазы (вяжущее) и заполнителя (полиэтилен) за счет низкой плотности последнего, о чем свидетельствуют фото (рис. 3, а). Это явление не может

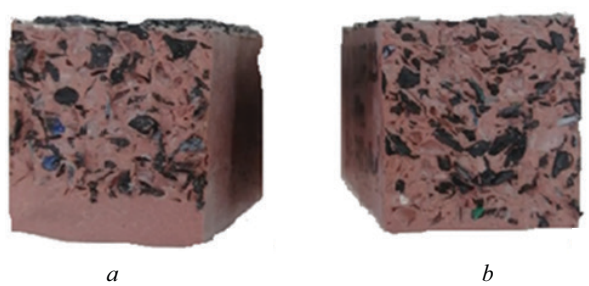


Рис. 3. Сечение образцов: *a* — присутствует расслоение; *b* — расслоение отсутствует

Fig. 3. Specimen cross-section: *a* — there is stratification; *b* — there is no stratification

не сказаться на объективности и точности определения физико-технических свойств. Испытания с помощью ИПС-МГ4.03 показывают, что прочность матричной фазы превосходит среднюю прочность образца в 1,5 раза. Для объективной оценки свойств композита необходимо обеспечить равномерное распределение заполнителя. Этого можно достичь с помощью:

- технологических приемов (послойная укладка смеси с выдержкой);
- изменения реологических свойств матрицы путем корректировки водоцементного отношения;

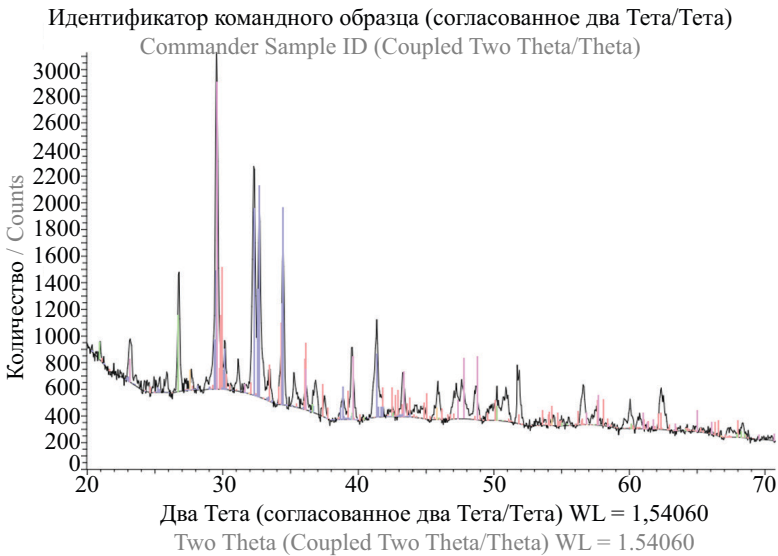


Рис. 5. Рентгенофазовый анализ матрицы образцов

Fig. 5. X-ray phase analysis of the specimen matrix

Табл. 7. Кристаллический состав матрицы образцов

Table 7. Crystal composition of the specimen matrix

Номер компонента Component No.	1	2	3	4	5
Компонент Component	$\text{Ca}_{27}\text{O}_{45}\text{Si}_9$	CaO_5Si_2	CaCO_3	SiO_2	MnS
Содержание, % Content, %	43,23	37,02	16,40	2,89	0,46

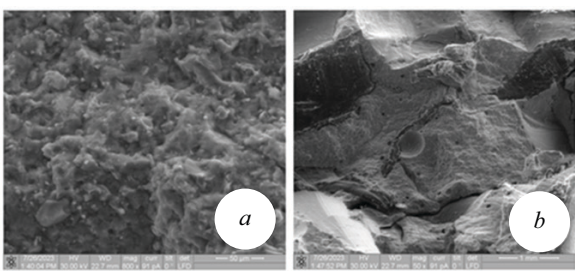
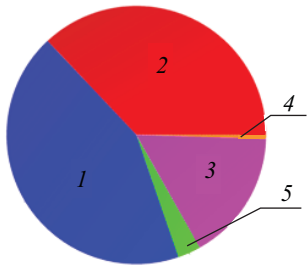


Рис. 4. Исследование микроструктуры образцов с помощью растровой электронной микроскопии: *a* — микроструктура матрицы; *b* — частицы полиэтилена, встроенные в матрицу

Fig. 4. Study of microstructure of specimens using scanning electron microscopy: *a* — matrix microstructure; *b* — polyethylene particles integrated in the matrix

- увеличения концентрации заполнителя до 20 % (рис. 3, *b*).

Изучение микроструктуры с помощью растровой электронной микроскопии говорит о том, что заполнитель в виде сшитого полиэтилена распределяется в однородной матрице (рис. 4, *a*), представляющей собой продукт взаимодействия цемента, кирпичной крошки и белой сажи, в результате которого образуется прочная кристаллическая структура, состоящая из гидросиликатов и карбона-



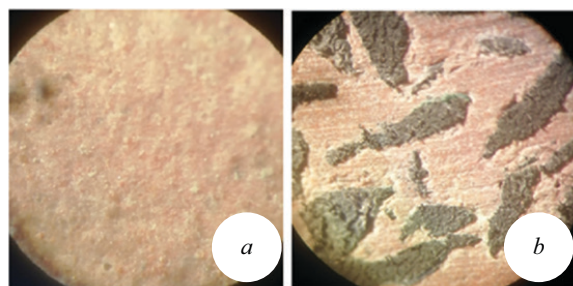


Рис. 6. Исследование микроструктуры образцов с помощью оптической микроскопии: *a* — микроструктура матрицы; *b* — частицы полиэтилена, встроенные в матрицу

Fig. 6. Study of microstructure of specimens using optical microscopy: *a* — microstructure of the matrix; *b* — polyethylene particles integrated in the matrix

тов кальция и кварца (рис. 5 и табл. 7). На рис. 4, *b* отчетливо видны частицы полиэтилена, плотно встроенные в матрицу, очевидно за счет как физического, так и химического взаимодействия, обусловленного присутствием технического углерода в составе полиэтилена.

Данные выводы также подтверждаются снимками с оптического микроскопа (рис. 6).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ И ОБСУЖДЕНИЕ

Замена цемента тонкомолотой кирпичной крошкой до 20 % безболезненно сказывается на основных эксплуатационных свойствах образцов.

Введение в состав поликарбоксилатного пластификатора позволяет значительно снизить В/Ц отношение и прочность образцов на 60–90 % по сравнению с образцами без пластификатора.

Увеличение содержания заполнителя из сшитого полиэтилена снижает прочность композита на сжатие и изгиб, что, вероятнее всего, связано со сниженными механическими характеристиками сшитого полиэтилена относительно матрицы.

Все испытанные образцы отличались достаточно низким водопоглощением. Данный эффект наблюдается как за счет уменьшенного водопоглощения сшитого полиэтилена, так и за счет высокой плотности матрицы и, очевидно, малого количества пор. Сниженное водопоглощение представленных композитов позволяет сделать прогноз о высо-

ких характеристиках морозостойкости материала, что будет изучено в дальнейших исследованиях.

В момент формирования композита происходит расслоение матричной фазы (вяжущее) и заполнителя (полиэтилен) за счет низкой плотности последнего. Это сказывается на объективности и точности определения свойств. Испытания с помощью ИПС-МГ4.03 показывают, что прочность матричной фазы превосходит среднюю прочность образца в 1,5 раза. Для объективной оценки свойств композита необходимо обеспечить равномерное распределение заполнителя по сечению образца.

Изучение микроструктуры с помощью растровой электронной микроскопии и рентгенофазового анализа говорит о том, что заполнитель в виде сшитого полиэтилена распределяется в однородной матрице, представляющей собой продукт взаимодействия цемента, кирпичной крошки и белой сажи, в результате которого образуется прочная кристаллическая структура, состоящая из гидросиликатов и карбонатов кальция и кварца.

При исследовании образцов с помощью растровой электронной и оптической микроскопии отчетливо видны частицы полиэтилена, плотно встроенные в матрицу, очевидно за счет как физического, так и химического взаимодействия, обусловленного присутствием технического углерода в составе полиэтилена.

Синтезированные составы могут быть рекомендованы для промышленного использования в качестве кладочного материала для внутренних и наружных работ.

Предварительный экономический расчет позволяет прогнозировать перспективы внедрения композита в практику строительства, так как себестоимость отходов кирпича и сшитого полиэтилена гораздо ниже себестоимости цемента и традиционных наполнителей (примерно на 25 %).

Рециклинг полимерных и строительных отходов с целью производства новых композиционных материалов дает возможность снизить отрицательное воздействие на живые организмы и окружающую среду.

Преимущество данной работы заключается в комплексном рециклинге строительных и полимерных отходов, направленном на достижение синергетического эффекта взаимодействия компонентов и получение высоких технологических и эксплуатационных характеристик материалов.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Романенко И.И., Петровнина И.Н., Еличев К.А., Романенко М.И. Пробуждение гидравлической активности наполнителей и заполнителей из лома глиняного кирпича // Инженерный вестник Дона. 2022. № 11 (95). С. 563–572. EDN NDFRPP.
2. Aliabdo A.A., Abd-Elmoaty M., Hassan H.H. Utilization of crushed clay brick in concrete industry //

Alexandria Engineering Journal. 2014. Vol. 53. Issue 1. Pp. 151–168. DOI: 10.1016/j.aej.2013.12.003

3. Магсумов А.Н., Шарипьянов Н.М. Использование бетонного лома в качестве крупного заполнителя для производства бетонных смесей // Символ науки: международный научный журнал. 2018. № 6. С. 29–33. EDN XQHPIT.

4. Ахмед А.А., Федюк Р.С., Лисейцев Ю.Л., Тимохина Р.А., Муралли Г. Использование бетонного лома Ирака в качестве наполнителя и заполнителя тяжелого и легкого бетона // Строительные материалы и изделия. 2020. Т. 3. № 3. С. 28–39. EDN NKXOKJ.
5. Хаджиев М.Р. Бетонные композиты на заполнителях из керамического кирпичного боя // Евразийский союз ученых. 2014. № 5–3 (5). С. 37–40. EDN VXLZVN.
6. Larsen O., Samchenko S., Naruts V. Blended binder based on Portland cement and recycled concrete powder // Magazine of Civil Engineering. 2022. No. 5 (113). P. 11306. DOI: 10.34910/MCE.113.6. EDN ZLGLFF.
7. Larsen O.A. Environmental aspects of dismantling of old buildings during the reconstruction in Moscow // SGEM International Multidisciplinary Scientific GeoConference EXPO Proceedings. 2019. DOI: 10.5593/sgem2019/6.2/S26.015
8. Bumanis G., Zorica J., Korjamins A., Bajare D. Processing of gypsum construction and demolition waste and properties of secondary gypsum binder // Recycling. 2022. Vol. 7. Issue 3. P. 30. DOI: 10.3390/recycling7030030
9. Hansen S., Perdam S. Application of recycled gypsum wallboards in cement mortar // 7th International Conference on Engineering Mechanics and Materials, CSCE Annual Conference. 2019.
10. Кислицына С.Н., Шитова И.Ю. Способы переработки отходов деревообрабатывающей промышленности : учебное пособие. Пенза : ПГУАС, 2016. 140 с.
11. Минько Н.И., Калатози В.В. Использование стеклобоя в технологии материалов строительного назначения // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2018. № 1. С. 82–88. DOI: 10.12737/article_5a5dbf09319de9.71561256. EDN PSPLFC.
12. Бессмертный В.С., Жерновой Ф.Е., Дорохова Е.С., Изотова И.А., Гокова Е.Н. Эффективный материал для зеленого строительства на основе вторичного стекольного боя // Интеллектуальные строительные композиты для зеленого строительства : Междунар. науч.-практ. конф., посвящ. 70-летию заслуженного деятеля науки РФ, члена-корреспондента РААСН, доктора технических наук, профессора Валерия Станиславовича Лесовика. 2016. С. 111–116. EDN WHQSLP.
13. Samchenko S.V., Zaitseva A.A. Possibility of the use of ground glass break in the production of aerated concrete // Solid State Phenomena. 2022. Vol. 334. Pp. 233–239. DOI: 10.4028/p-354i45
14. Чалов К.В., Луговой Ю.В., Косивцов Ю.Ю., Сульман Э.М. Исследование кинетики термодеструкции сшитого полиэтилена // Бюллетень науки и практики. 2019. Т. 5. № 12. С. 37–46. DOI: 10.33619/2414-2948/49/04. EDN BYTQCF.
15. Багаутдинов И.З., Кувшинов Н.Е. Преимущества применения кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена // Инновационная наука. 2016. № 3–3. С. 51–53. EDN VQBFFB.
16. Goto T. Recycling of silane cross-linked polyethylene for insulation of cables using supercritical alcohol // EINA. 2004. № 13. Pp. 39–40.
17. Tokuda S., Horikawa S., Negishi K., Uesugi K., Hirukawa H. Thermoplasticizing technology for the recycling of crosslinked polyethylene // Furukawa Review. 2003.
18. Salim K., Houssam A., Belaid A., Brahim H. Reinforcement of building plaster by waste plastic and glass // Procedia Structural Integrity. 2019. Vol. 17. Pp. 170–176. DOI: 10.1016/J.PROSTR.2019.08.023
19. Kou S.C., Lee G., Poon C.S., Lai W.L. Properties of lightweight aggregate concrete prepared with PVC granules derived from scraped PVC pipes // Waste Management. 2009. Vol. 29. Issue 2. Pp. 621–628. DOI: 10.1016/j.wasman.2008.06.014
20. Сиков Н.Е., Серёгин А.И., Юркин Ю.В. Использование пластиковых отходов в качестве заполнителя в цементном растворе и приготовлении бетона // Инженерный вестник Дона. 2022. № 8 (92). С. 259–270. EDN OKBHDS.
21. Harini B. Use of recycled plastic waste as partial replacement for fine aggregate in concrete // International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. 2015. Vol. 4. Issue 9. Pp. 8596–8603.
22. Лысянников А.В., Третьякова Е.А., Лысяникова Н.Н. Переработанный пластик в дорожном строительстве // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2017. № 7. С. 105–115. EDN ZROUHV.
23. Zéhila G.-Ph., Assaad J.J. Feasibility of concrete mixtures containing cross-linked polyethylene waste materials // Construction and Building Materials. 2019. Vol. 226. Pp. 1–10. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.285
24. Бурмицкий М.С., Олихова Ю.В., Ивашкина В.Н. Перспективы применения отходов сшитого полиэтилена в составе полимерно-битумных вяжущих и асфальтобетонных смесей // Успехи в химии и химической технологии. 2020. Т. 34. № 7 (230). С. 87–89. EDN QXCJZV.

Поступила в редакцию 11 сентября 2023 г.

Принята в доработанном виде 6 октября 2023 г.

Одобрена для публикации 1 декабря 2023 г.

ОБ АВТОРАХ: Александр Андреевич Баруздин — аспирант кафедры строительного производства; Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (ВлГУ); 600000, г. Владимир, ул. Горького, д. 87; РИНЦ ID: 1211011, ORCID: 0000-0002-7391-1396; baruzdin98@bk.ru;

Любовь Владимировна Закревская — кандидат технических наук, доцент кафедры строительного производства; Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых (ВлГУ); 600000, г. Владимир, ул. Горького, д. 87; РИНЦ ID: 878855, Scopus: 57163450600, ORCID: 0000-0002-7064-7235; lvzak@mail.ru.

Вклад авторов:

Баруздин А.А. — сбор материала, проведение экспериментальных исследований, написание текста статьи, итоговые выводы.

Закревская Л.В. — научное руководство, научное редактирование текста, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

- Romanenko I.I., Petrovna I.N., Yelichev K.A., Romanenko M.I. Awakening the hydraulic activity of fillers and aggregates from scrap clay bricks. *Engineering Journal of Don*. 2022; 11(95):563-572. EDN NDFRPP. (rus.).
- Aliabdo A.A., Abd-Elmoaty M., Hassan H.H. Utilization of crushed clay brick in concrete industry. *Alexandria Engineering Journal*. 2014; 53(1):151-168. DOI: 10.1016/j.aej.2013.12.003
- Magsumov A.N., Sharipyanov N.M. The use of concrete scrap as a coarse aggregate for the production of concrete mixtures. *Symbol of Science: International Scientific Journal*. 2018; 6:29-33. EDN XQHPIT. (rus.).
- Ahmed A.A., Fedyuk R.S., Liseytshev Yu.L., Timokhin R.A., Murali G. Use of Iraq concrete scrap as filler and aggregate of heavyweight and lightweight concrete. *Construction Materials and Products*. 2020; 3(3):28-39. EDN NKXOKJ. (rus.).
- Khadzhiyev M.R. Concrete composites on aggregates from ceramic brick scrap. *Eurasian Union of Scientists*. 2014; 5-3(5):37-40. EDN VXLZVN. (rus.).
- Larsen O., Samchenko S., Naruts V. Blended binder based on Portland cement and recycled concrete powder. *Magazine of Civil Engineering*. 2022; 5(113):11306. DOI: 10.34910/MCE.113.6. EDN ZLGLFF.
- Larsen O.A. Environmental aspects of dismantling of old buildings during the reconstruction in Moscow. *SGEM International Multidisciplinary Scientific GeoConference EXPO Proceedings*. 2019. DOI: 10.5593/sgem2019/6.2/S26.015
- Bumanis G., Zorica J., Korjamins A., Bajare D. Processing of gypsum construction and demolition waste and properties of secondary gypsum binder. *Recycling*. 2022; 7(3):30. DOI: 10.3390/recycling7030030
- Hansen S., Perdam S. Application of recycled gypsum wallboards in cement mortar. *7th International Conference on Engineering Mechanics and Materials, CSCE Annual Conference*. 2019.
- Kislitsyna S.N., Shitova I.Yu. *Methods of processing waste from the woodworking industry : textbook*. Penza, PGUAS, 2016; 140. (rus.).
- Min'ko N.I., Kalatozi V.V. The use of cullet in the technology of materials for construction purposes. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2018; 1:82-88. DOI: 10.12737/article_5a5dbf09319de9.71561256. EDN PSPLFC. (rus.).
- Bessmertnyy V.S., Zhernovoy F.E., Dorokhova E.S., Izotova I.A., Gokova E.N. An effective material for green construction based on secondary glass scrap. *Intelligent building composites for green construction : international scientific and practical conference dedicated to the 70th anniversary of the Honored Scientist of the Russian Federation, corresponding member of the RAASN, Doctor of Technical Sciences, Professor Valery Stanislavovich Lesovik*. 2016; 111-116. EDN WHQSLP. (rus.).
- Samchenko S.V., Zaitseva A.A. Possibility of the use of ground glass break in the production of aerated concrete. *Solid State Phenomena*. 2022; 334:233-239. DOI: 10.4028/p-354i45
- Chalov K., Lugovoy Yu., Kosivtsov Yu., Sulman E. Investigation of the kinetics of thermal degradation of cross-linked polyethylene. *Bulletin of Science and Practice*. 2019; 5(12):37-46. DOI: 10.33619/2414-2948/49/04. EDN BYTQCF. (rus.).
- Bagautdinov I.Z., Kuvshinov N.E. Advantages of using cables with cross-linked polyethylene insulation. *Innovation Science*. 2016; 3-3:51-52. EDN VQBFFB. (rus.).
- Goto T. Recycling of silane cross-linked polyethylene for insulation of cables using supercritical alcohol. *EINA*. 2004; 13:39-40.
- Tokuda S., Horikawa S., Negishi K., Uesugi K., Hirukawa H. Thermoplasticizing technology for the recycling of crosslinked polyethylene. *Furukawa Review*. 2003.

18. Salim K., Houssam A., Belaid A., Brahim H. Reinforcement of building plaster by waste plastic and glass. *Procedia Structural Integrity*. 2019; 17:170-176. DOI: 10.1016/J.PROSTR.2019.08.023

19. Kou S.C., Lee G., Poon C.S., Lai W.L. Properties of lightweight aggregate concrete prepared with PVC granules derived from scraped PVC pipes. *Waste Management*. 2009; 29(2):621-628. DOI: 10.1016/j.wasman.2008.06.014

20. Sikov N.E., Seryogin A.I. Use of plastic waste as aggregate in cement mortar and concrete preparation. *Engineering journal of Don*. 2022; 8(92):259-270. EDN OKBHDS. (rus.).

21. Harini B. Use of recycled plastic waste as partial replacement for fine aggregate in concrete. *Inter-*

national Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology. 2015; 4(9):8596-8603.

22. Lysyannikov A.V., Tretiakova E.A., Lysyannikova N.N. Recycled plastic in road construction. *Izvestiya Tula State University. Technical sciences*. 2017; 7:105-115. EDN ZROUHV. (rus.).

23. Zéhila G.-Ph., Assaad J.J. Feasibility of concrete mixtures containing cross-linked polyethylene waste materials. *Construction and Building Materials*. 2019; 226:1-10. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.285

24. Burmitsky M.S., Olikhova Yu.V., Ivashkina V.N. Prospects of application of plastic waste in the composition of polymer-bitumen binders and asphalt mixtures. *Advances in Chemistry and Chemical Technology*. 2020; 34(7):87-89. EDN QXCJZV. (rus.).

Received September 11, 2023.

Adopted in revised form on October 6, 2023.

Approved for publication on December 1, 2023.

B I O N O T E S: **Aleksandr A. Baruzdin** — postgraduate student of the Department of Construction Production; **Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs (VLSU)**; 87 Gorky st., Vladimir, 600000, Russian Federation; ID RSCI: 1211011, ORCID: 0000-0002-7391-1396; baruzdin98@bk.ru;

Lyubov V. Zakrevskaya — Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Construction Production; **Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs (VLSU)**; 87 Gorky st., Vladimir, 600000, Russian Federation; ID RSCI: 878855, Scopus: 57163450600, ORCID: 0000-0002-7064-7235; lvzak@mail.ru.

Contribution of the authors:

Aleksandr A. Baruzdin — collecting materials, processing materials, conducting experimental studies, writing the text of the article, final conclusions.

Lyubov V. Zakrevskaya — scientific supervision, scientific text editing, final conclusions.

The authors declare no conflict of interest.