

УДК 691.32

Тип статьи: научная статья

ГРНТИ 67.09.00

Научная специальность ВАК: 2.1.5 Строительные материалы и изделия (технические науки)

EDN uguwic

DOI 10.62980/2076-0655-2026-434-445

ДЕКОРАТИВНЫЙ КОМПОЗИЦИОННЫЙ МАТЕРИАЛ НА ОСНОВЕ РЕЦИКЛИНГА ОТХОДОВ СШИТОГО ПОЛИЭТИЛЕНА И СТРОИТЕЛЬНОЙ КЕРАМИКИ

Баруздин А.А.¹, Закревская Л.В.², Доброхотов В.Б.³

^{1,2} Владимирский Государственный Университет им. Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых

³ Ярославский Государственный Технический университет

АННОТАЦИЯ

В статье представлено исследование эксплуатационных свойств декоративного композиционного материала на основе отходов боя керамического кирпича и сшитого полиэтилена. Установлено, что включение в состав заполнителя в виде дробленых отходов сшитого полиэтилена снижает текучесть и удобоукладываемость смеси, что связано с увеличенным трением частиц в смеси из-за их неправильной формы и шероховатой поверхности. Определено, что введение в состав заполнителя из отходов сшитого полиэтилена по сравнению с минеральным заполнителем позволяет снизить плотность изделий (до 1570 кг/м³). Выявлено, что образцы материала с полимерным заполнителем обладают более низкой прочностью при сжатии, при этом характер разрушения образцов более пластичный, в момент пиковой нагрузки заполнитель некоторое время удерживает структуру образца от полного разрушения. Показано, что образцы материала с заполнителем только из отходов сшитого полиэтилена обладают значительной усадкой (более 1,5 мм/м). Это связано с пониженным модулем упругости такого заполнителя, который из-за низкой жесткости не может в полной мере сдерживать усадочные деформации цементного камня. В то же время в образцах со смесью полимерного и минерального заполнителя в равных долях усадка значительно снижается (0,8-0,9 мм/м). Выявлено, что образцы материала с заполнителем из отходов сшитого полиэтилена обладают высоким сопротивлением к истиранию. Такой эффект объясняется природой сшитого полиэтилена, который благодаря своей трехмерной структуре и поперечным связям в молекулах полимера обладает высокой износостойкостью. С помощью dilatометрического метода установлено, что образцы синтезированного материала обладают достаточно высокой морозостойкостью (марка F300). На основании проведенных исследований изготовлены и представлены декоративные изделия с порфировым рисунком, которые могут быть рекомендованы для применения в качестве декоративной напольной, интерьерной или тротуарной плитки.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Рециклинг, сшитый полиэтилен, строительная керамика, отходы, прочность, плотность, истираемость, усадка.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Баруздин А.А., Закревская Л.В. Декоративный композиционный материал на основе рециклинга отходов сшитого полиэтилена и строительной керамики // Техника и технология силикатов. – 2025. – Т. 32, № 5. – С.434-445.

<https://doi.org/10.62980/2076-0655-2026-434-445>, EDN uguwic

Type of article - scientific article

OECD 2.01 Civil engineering

FA CONSTRUCTION & BUILDING TECHNOLOGY

EDN uguwic

DOI 10.62980/2076-0655-2026-434-445

DECORATIVE COMPOSITE MATERIAL BASED ON WASTE RECYCLING OF CROSS-LINKED POLYETHYLENE AND BUILDING CERAMICS

Baruzdin A.A.¹, Zakrevskaya L.V.², DobrokhotoV V.B.³

^{1,2} Vladimir State University named after Alexander Grigoryevich and Nikolai Grigoryevich Stoletov

³ Yaroslavl State Technical University

ABSTRACT

The article presents a study of the operational properties of a decorative composite material based on waste from ceramic bricks and crosslinked polyethylene. It was found that the inclusion of aggregate from waste of cross-linked polyethylene in mixture reduces the spreadability and workability of the paste, which is associated with increased friction of particles in the mixture due to their irregular shape and rough surface. It was determined that the introduction of aggregate from waste of cross-linked polyethylene compared with mineral aggregate makes it possible to reduce the density of products (up to 1,700 kg/m³). It has been revealed that samples of a material with a polymer aggregate have significantly reduced compressive strength, while the destruction of the samples occurs more plastically, at the moment of peak load, the aggregate keeps the sample structure from complete destruction for some time. It is shown that the samples of the material with aggregate only from waste of crosslinked polyethylene have a significant shrinkage (more than 1.5 mm/m). This is due to the reduced modulus of elasticity of such aggregate, which, due to its low rigidity, cannot fully restrain the shrinkage deformations of cement stone. At the same time, in samples with a mixture of polymer and mineral aggregate in equal proportions, shrinkage is significantly reduced (0.8-0.9 mm/m). It was revealed that the samples of the material with aggregate from waste of crosslinked polyethylene have a high abrasion resistance. This effect is explained by the nature of cross-linked polyethylene, which, due to its three-dimensional structure and cross-links in polymer molecules, has high abrasion resistance. Using the dilatometric method, it was found that the samples of the synthesized material have a sufficiently high frost resistance (grade F300). Based on the conducted research, decorative products with a porphyry patterns have been produced and presented, which can be recommended for use as decorative floor, interior or paving tiles.

KEY WORDS: Recycling, crosslinked polyethylene, construction ceramics, waste, compressive strength, density, abrasion resistance, shrinkage.

FOR CITATION: Baruzdin A.A., Zakrevskaya L.V. Decorative compressive material based on waste recycling of crosslinked polyethylene and building ceramics // Engineering and Technology of Silicates. – 2025. Vol. – 32, No5. – Pp. 434 – 445.

<https://doi.org/10.62980/2076-0655-2026-434-445>, EDN uguwic.

ВВЕДЕНИЕ

На рубеже XX-XXI в. одной из проблем, которые выходят на передний план становится проблема эффективной утилизации и переработки отходов. В том числе строительных и промышленных отходов. В связи с этим появляется такое понятие как рециклинг – процесс переработки, при котором отходы возвращают в экономический и производственный оборот для получения новой продукции или вторсырья для её изготовления.

Одним из распространенных отходов строительной промышленности, который обладает значительным потенциалом для вторичного применения является бой строительной керамики.

Другим видом строительных и промышленных отходов являются отходы полимеров (кабели, трубы, изоляция, окна, двери, элементы отделки), в том числе сшитых. Такие полимеры благодаря технологии сшивки имеют повышенные механические, диэлектрические, термические свойства, но по этой же причине являются трудно утилизируемыми традиционными способами [1,2]. На 2019 г. мировое производство сшитого полиэтилена превысило 260 тыс. тонн [3]. Рост производства связан с заменой традиционных полимеров на более стойкие сшитые. По данным мирового производителя кабелей «Prismian» ежегодно только у них на производстве образуется до 7500т отходов сшитого полиэтилена (или 80-150т на одно отдельное предприятие). Сопоставимое количество отходов сшитого полиэтилена образуется при производстве труб (80-150т/год на одно предприятие).

Как отходы строительной керамики, так и отходы сшитого полиэтилена представляется возможным использовать при производстве строительных композитов, бетонов, растворов на неорганическом вяжущем.

Отходы строительной керамики возможно использовать в качестве заполнителя, активной тонкодисперсной добавки, наполнителя, частичной замены цемента, пигмента [4–11].

Отходы сшитого полиэтилена, как и другие полимерными отходы возможно применять в качестве заполнителя минеральных композиционных материалов. Такой наполнитель значительно влияет на свойства получаемого изделия: снижает плотность, теплопроводность, может повышать стойкость к истиранию, химстойкость, способность поглощать энергию, морозостойкость, возможно уменьшение усадки и образования микротрещин. В то же время такой наполнитель снижает прочность цементных композиций, что связано с его сниженным модулем упругости и адгезией с цементным камнем [12–20].

В современном мире возрастает интерес к внешнему облику городской среды и интерьера помещений. У строительных изделий зачастую помимо долговечности высоко ценится эстетичный внешний вид. Как отходы сшитого полиэтилена, так и отходы боя строительной керамики имеют потенциал для использования в производстве декоративных композиционных материалов. Тонкомолотый бой строительной керамики в смеси с цементом (в особенности с белым) придает цементному камню красивый декоративный оттенок. В то же время полимерные отходы зачастую обладают яркими однородными цветами. При использовании их в качестве заполнителя после набора изделием прочности можно обнажить его структуру и получить эстетичную декоративную поверхность.

INTRODUCTION

One of the problems that come to the fore at the turn of the XX-XXI centuries is the problem of effective waste disposal and utilization. Including construction and industrial waste. In this regard, there was such a thing as recycling, a recycling process in which waste is returned to economic and industrial circulation to obtain new products or recyclables for their manufacture.

One of the common construction industry wastes, which has a significant potential for reuse, is the construction ceramics waste.

Another type of construction and industrial waste is polymer waste (cables, pipes, insulation, windows, doors, finishing elements), including crosslinked ones. Such polymers have improved mechanical, dielectric, and thermal properties due to crosslinking technology, but for the same reason they are difficult to recycle using traditional methods [1,2]. The global production of cross-linked polyethylene exceeded 260 thousand tons at 2019 [3]. The increase in production was due to the substitution of traditional polymers with more resistant crosslinked ones. According to the global cable manufacturer "Prismian", up to 7500t of cross-linked polyethylene waste was generated annually in their production alone (or 80-150t per individual factory). A comparable amount of cross-linked polyethylene waste is generated during pipe production (80-150 tons/year per factory).

Waste from construction ceramics and waste from cross-linked polyethylene can be used in the production of building composites, concretes, and mortars based on inorganic binders.

Construction ceramic waste can be used as an aggregate, an active fine-dispersed additive, filler, partial replacement of cement, and pigment [4-11].

Waste of crosslinked polyethylene, like other polymer waste, can be used as an aggregate for mineral composite materials. Such an aggregate significantly affects the properties of the resulting product: density and thermal conductivity decrease, may increase abrasion resistance, chemical resistance, ability to absorb energy, frost resistance, shrinkage and formation of microcracks may decrease. At the same time, such an aggregate reduces the strength of cement compositions, which is associated with its reduced modulus of elasticity and adhesion to cement stone [12-20].

In the modern world, there is an increasing interest in the appearance of the urban environment and the interior of the premises. In addition to durability, aesthetic appearance is often highly appreciated for construction products. Both waste from cross-linked polyethylene and waste from the scrap of construction ceramics have the potential to be used in the production of decorative composite materials. Finely ground construction ceramics mixed with cement (especially white cement) gives the cement stone a beautiful decorative shade. At the same time, polymer waste often has bright, homogeneous colors. When using them as an aggregate, after the product has gained strength, its structure can be exposed and an aesthetic decorative surface can be obtained.

Целью данной работы является исследование эксплуатационных свойств декоративного композиционного материала с применением тонкомолотых отходов строительной керамики и заполнителя на основе отходов сшитого полиэтилена в сравнении с аналогичными образцами с минеральным заполнителем.

Материалы и методы

Исследования проводились на базе кафедры «Строительного производства» Владимирского Государственного Университета имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых. В рамках исследования использовались стандартные методики испытаний регламентированные ГОСТ и современные методы анализа, обеспечивающие высокую точность и воспроизводимость результатов.

В таблице 1 представлены свойства используемых материалов.

ТАБЛИЦА 1 СВОЙСТВА ИСПОЛЬЗУЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ
Table 1 Properties of the used materials

Материалы Materials	Свойства Properties
Портландцемент Portland cement	Белый цемент без минеральных добавок марки 500, ПЦБ 1-500-Д0, торговой марки «Cemix ProWhite», $S_{уд}=5000 \text{ см}^2/\text{г}$; $НГ=30-32\%$; начало схватывания 80-95 мин; конец схватывания – 120-140 мин; White cement without mineral additives grade 500, PCB 1-500-D0, trademark "Cemix ProWhite", Specific surface of particles $S_{sp}=5000 \text{ см}^2/\text{г}$; $NG=30-32\%$; the start of setting is 80-95 minutes; the end of setting is 120-140 min.;
Кирпичный бой Brick scarp	Фракция 5-20 мм, $\rho_{ист}=2650 \text{ кг}/\text{м}^3$; Fraction 5-20 mm, true density $\rho=2650 \text{ kg}/\text{m}^3$;
Отходы сшитого полиэтилена Crosslinked polyethylene waste	Фракция 2,5-5 мм, плотность $0,90 \text{ г}/\text{см}^3$ Fraction 2.5-5 mm, density $0.90 \text{ g}/\text{cm}^3$;
Отсев дробления известнякового щебня Waste during limestone crushing	Фракция 2,5-5 мм, плотность $2,70 \text{ г}/\text{см}^3$ Fraction 2.5-5 mm, density $2.70 \text{ g}/\text{cm}^3$;
Пластификатор макромер П-17	50% раствор, плотность $\geq 1,1 \text{ г}/\text{см}^3$ 50% solution, density $\geq 1,1 \text{ g}/\text{cm}^3$
Поливинилацетатная дисперсия Polyvinyl acetate dispersion	ТУ 2242-011-39778023-2015 TU 2242-011-39778023-2015

В качестве вяжущего использовался белый портландцемент без минеральных добавок марки 500 ПЦБ 1-500-Д0 торговой марки «Cemix ProWhite» соответствующий требованиям ГОСТ 965-89, ГОСТ 30515-2013.

В качестве частичной замены цемента использовались тонкомолотые отходы строительной керамики с $S_{уд} = 6000...7000 \text{ см}^2/\text{г}$, которые обладают пуццолановой активностью и при взаимодействии с гидроксидом кальция ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), содержащимся в цементном тесте, могут образовывать гидросиликаты и гидроалюминаты кальция, укрепляя структуру цементного камня, снижая высолообразование и повышая сопротивляемость выщелачиванию. Кроме того, применение тонкомолотого керамического порошка позволяет добиваться различных оттенков изделий от бледной сиены до средне-коричневого и золотисто-коричневого. Помол отходов керамики производился с помощью лабораторной шаровой мельницы ЛМ-2.

В качестве заполнителя использовались дробленые отходы сшитого полиэтилена с размером частиц 2,5-5 мм. Измельчение производилось с помощью дробилки для пластмасс XFS-300. При этом для наилучшего результата каждую партию полиэтилена подвергали измельчению несколько

The purpose of this work is to study the operational properties of a decorative composite material using finely ground construction ceramic waste and an aggregate based on cross-linked polyethylene waste in comparison with similar samples with a mineral aggregate.

Materials and methods

The research was conducted on the basis of the Department of "Construction Production" of Vladimir State University named after Alexander Grigoryevich and Nikolai Grigoryevich Stoletov. The study used standard test methods, regulated by GOST standards, and modern analysis methods that ensure high accuracy and reproducibility of the results.

Table 1 shows the properties of the used materials.

White Portland cement without mineral additives of the 500 PCB 1-500-D0 mark of the Cemix ProWhite trademark was used as binder. It complies with the requirements of GOST 965-89, GOST 30515-2013.

Finely ground construction ceramic waste with a specific surface area of $6000...7000 \text{ cm}^2/\text{g}$ was used as a partial replacement for cement. It has pozzolan activity and interacts with calcium hydroxide ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), contained in cement paste, can form calcium hydrosilicates and hydroaluminates, strengthening the structure of cement stone, reducing formation of efflorescence and increasing leaching resistance. In addition, the use of finely ground ceramic powder makes it possible to achieve various shades of products from pale siena to medium brown and golden brown. Ceramic waste was ground using an LM-2 laboratory ball mill.

Crushed waste of cross-linked polyethylene with a particle size of 2.5-5 mm was used as an aggregate. The crushing was carried out using an XFS-300 plastic crusher. At the same time, for the best result, each batch of polyethylene was crushed several times. The smallest fraction possible to obtain on the used equipment was

раз. В работе была использована наименьшая фракция возможная к получению на используемом оборудовании. Частицы более 5 мм подвергались повторному измельчению.

Также был использован минеральный наполнитель в виде отсевов дробления известнякового щебня фракцией 2,5-5 мм.

Для изменения реологических свойств смеси, корректировки водоцементного соотношения и как следствие повышения прочности исследуемых композитов была использована поликарбоксилатная пластифицирующая добавка Макромер П-17 и поливинилацетатная дисперсия (ПВА).

В процессе изготовления образцов была оценена консистенция полученного теста. Консистенция оценивалась по расплыву на встряхивающем столике конуса Хагермана. Свежеприготовленную смесь укладывали в конус и встряхивали на столике 30 раз в течение 30 секунд после чего измерили диаметр расплыва.

Контроль прочности синтезированных образцов осуществлялся в соответствии с ГОСТ-10180-2012. Механические испытания проводились с использованием пресса ПИ-2000-II компании «МЕТРОТЕСТ» (нагрузка до 2000 кН, относительная погрешность силоизмерителя $\pm 1\%$, перемещение подвижной плиты до 360 мм, абсолютная погрешность измерения перемещения подвижной плиты при перемещениях до 10 мм - $\pm 0,1$ мм).

Испытание образцов на истираемость производилось в соответствии с ГОСТ-13087-2018 на круге истирания типа ЛКИ-3М. Истираемость образцов характеризуется потерей массы и изменением высоты образцов, которые вычисляются по формулам (1) и (2):

$$G = \frac{m_1 - m_2}{F} \quad (1)$$

$$\Delta l = l_0 - l \quad (2)$$

Где G – потеря массы образцов после четырех циклов испытания (общий путь истирания 600 м), г/см²;

m_1 – масса образца до испытания, г;

m_2 – масса образца после четырех циклов испытания, г;

F – площадь истираемой грани образца, см²;

Δl – уменьшение высоты образца, мм;

l_0 – средняя высота образца до испытания, мм;

l – средняя высота образца после испытания, мм;

Оценку деформаций усадки у синтезированных образцов производили согласно ГОСТ 24544-2020 на приборе, представленном на рис.1е. Образцы расплаубливали через 24 часа после формирования и сразу устанавливали в устройство для определения усадки и снимали начальные показания прибора. Далее показания приборов снимали через 1,2,3 7 сут и каждую неделю до окончания эксперимента.

Оценку морозостойкости синтезированных образцов производили ускоренным dilatометрическим методом. При такой методике у изготовленных образцов определяется начальный объём, затем их насыщают водой по ГОСТ 10060-2012. Насыщенный водой образец помещают в камеру dilatометра, во вторую камеру помещают стандартный образец, камеры заполняют керосином и герметизируют. Dilатометр помещают в морозильную камеру, выдерживают 30 мин и начинают замораживать со скоростью 0,3 °C/мин до достижения температуры минус (18 ± 2) °C. На графиках фиксируют абсолютные объёмные деформаций испытуемого и стандартного образца во время замораживания и выделяют скачкообразное изменение разности объёмных деформаций, обусловленное переходом воды в лёд. Далее по табличным значениям по максимальному

used in the work. Particles larger than 5 mm were subjected to repeated grinding.

A mineral aggregate in the form of limestone crushing dropout with a fraction of 2.5-5 mm was also used.

Polycarboxylate plasticizing additive Macromer P-17 and a polyvinyl acetate dispersion (PVA) were used to change the rheological properties of the mixture, adjust the water-cement ratio and, as a result, increase the strength of the studied composites.

During the sample manufacturing process, the consistency of the resulting pastes was evaluated. The consistency was assessed by the spreading on the shaking table of the Hagerman cone. The freshly prepared mixture was placed in a cone and shaken on a table 30 times for 30 seconds, after which the diameter of the spread was measured.

The strength control of the synthesized samples was carried out in accordance with GOST-10180-2012. Mechanical tests were carried out using a PI-2000-II press from "METROTEST" company (load up to 2000 kN, relative error of the force meter $\pm 1\%$, displacement of the movable plate up to 360 mm, absolute measurement error of displacement of the movable plate when moving up to 10 mm - ± 0.1 mm).

The samples were tested for abrasion in accordance with GOST-13087-2018 on an LKI-3M type abrasion circle. The abrasion resistance of the samples is characterized by a loss of mass and a change in the height of the samples, which are calculated according to formulas (1) and (2):

Where G is the mass loss of the samples after four test cycles (total abrasion distance 600 m), g/cm²;

m_1 is the mass of the sample before the test, g;

m_2 is the mass of the sample after four test cycles, g;

F is the area of the test face of the sample, cm²;

Δl is a decrease in the height of the sample, mm;

l_0 is the average height of the sample before the test, mm;

l is the average height of the sample after the test, mm;

The shrinkage deformations of the synthesized samples were evaluated according to GOST 24544-2020 on the device shown in Fig.1e. The samples were extracted after 24 hours after molding and immediately installed in a shrinkage detection device and the initial readings of the device were taken. Further, the device readings were taken after 1,2,3 7 days and every week until the end of the experiment.

The frost resistance of the synthesized samples was assessed using a dilatometric method. With this method, the initial volume of the produced samples is determined, then they are saturated with water according to GOST 10060-2012. The sample saturated with water is placed in the dilatometer chamber, a standard sample is placed in the second chamber, the chambers are filled with kerosene and sealed. The dilatometer is placed in a freezer, held for 30 minutes and begins to freeze at a rate of 0.3 °C/min until a temperature of minus (18 ± 2) °C is reached. The graphs record the absolute volumetric deformations of the test and the standard sample during freezing and highlight the abrupt change in the difference in volumetric deformations

относительному увеличению разности объемной деформации испытуемых и стандартного образцов определяется марка по морозостойкости.

Для испытаний на прочность и определения усадочных деформаций использовались образцы балочки размерами 40x40x160 мм. Для испытания на истираемость были изготовлены образцы кубы размерами 70x70x70 мм. Оценка морозостойкости dilatометрическим способом осуществлялась на образцах размерами 100x100x100 мм. Набор прочности образцов происходил в лабораторных условиях при температуре 18-22 °С и влажности воздуха 50-70%.

На рисунке 1 представлено используемое оборудование.

В таблице 2 представлены составы испытуемых образцов.

caused by the transition of water to ice. Further, according to the tabular values for the maximum relative increase in the difference in volumetric deformation of the test and standard samples, the frost resistance grade is determined.

For strength tests and the determination of shrinkage deformations, beam samples of 40x40x160 mm were used. For the abrasion test, cube samples with dimensions of 70x70x70 mm were made. The assessment of frost resistance by dilatometric method was carried out on samples measuring 100x100x100 mm. The samples were hardened in laboratory conditions at a temperature of 18-22 °C and an air humidity of 50-70%.

Figure 1 shows the equipment used.

Table 2 shows the compositions of the tested samples.

РИСУНОК 1

ИСПОЛЬЗУЕМОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И ПРИБОРЫ

- а – лабораторная шаровая мельница ЛМ-2;
- б – измельчитель для пластмасс XFS-300;
- в – встряхивающий столик и конус Хагермаана;
- г – пресс ПИ-2000-П;
- д – лабораторный круг истирания ЛКИ-3М;
- е – устройство для определения усадки;
- ж – камера dilatометра;

Figure 1

Equipment and devices used

- a - laboratory ball mill LM-2;
- b - plastic shredder XFS-300;
- c - shaking table and Hagerman cone;
- d - press PI-2000-P;
- e - laboratory circle of abrasion test LKI-3M;
- f - shrinkage detection device;
- g - dilatometer camera;



ТАБЛИЦА 2 СОСТАВЫ ИСПЫТУЕМЫХ ОБРАЗЦОВ

Table 2 Compositions of the tested samples

Марка образца Mark of the sample	Компоненты, кг/м ³ Components, kg/m ³						
	Заполнитель из отходов сшитого полиэтилена Aggregate from waste of cross-linked polyethylene	Отсев дробления известнякового щебня Dropout from limestone crushing	Портланд цемент белый ПЦБ 1-500-Д0 White Portland cement PCB 1-500-D0	Тонкомолотый порошок из отходов строительной керамики Finely ground powder from construction ceramics waste	Поливинил-ацетатная дисперсия (ПВА) Polyvinyl Acetate dispersion (PVA)	Пластификатор Макромер П-17 Plasticizer Makromer P-17	Вода Water
ПЭ-100 PE-100	385	-	810	350	125	20	205
ИЗВ/ПЭ-50/50 LS/PE-50/50	193	577	810	350	125	20	205
ИЗВ-100 LS-100	-	1155	810	350	125	20	205

Результаты исследования и их обсуждение

The results of the study and their discussion

В таблице 3 приведены свойства испытанных образцов композитов.

Table 3 shows the properties of the tested composite samples.

ТАБЛИЦА 3 СВОЙСТВА ИСПЫТАННЫХ ОБРАЗЦОВ КОМПОЗИТОВ
Table 3 Compositions of the tested samples

Марка образца Mark of the sample	Свойства образцов Properties of the samples						
	Расплав смеси на встряхивающем столике D, мм Spreading of the mixture on the shaking table D, mm	Плотность ρ, кг/м ³ Density ρ, kg/m ³	Предел прочности при сжатии R _{сж} , МПа Compressive strength R _{comp} , МПа	Усадочные деформации в возрасте 60 сут Δl, мм/м Shrinkage deformations at the age of 60 days Δl, mm/m	Морозостойкость по dilatометрическому методу F, циклов Frost resistance according to the dilatometric method F, cycles	Истираемость по изменению массы G, г/см ² Abrasion resistance by weight change G, g/cm ²	Истираемость по изменению высоты образца A, мм Abrasion resistance by changing the height of the sample A, mm
ПЭ-100 PE-100	110	1570	26,4	1,88	300	0,129	0,25
ИЗВ/ПЭ-50/50 LS/PE-50/50	140	1875	43,0	0,82	300	0,065	0,20
ИЗВ-100 LS-100	200	2195	83,8	0,75	300	0,349	1,75

На рис.2 представлены результаты определения консистенции смесей, из которых были изготовлены образцы. Из представленных результатов видно, что включение в состав дробленых отходов сшитого полиэтилена снижает текучесть и удобоукладываемость смеси. Такой эффект объясняется неправильной формой и шероховатой поверхностью частиц сшитого полиэтилена. Увеличивается трение частиц с цементным тестом и друг о друга, увеличивается количество цементного теста необходимого для обволакивания заполнителя.

Figure 2 shows the results of determining the consistency of the mixtures from which the samples were made. It can be seen from the presented results that the inclusion in mixture of aggregate from crushed cross-linked polyethylene reduces its fluidity and workability. This effect is explained by the irregular shape and rough surface of the cross-linked polyethylene particles. The friction of the particles with the cement paste and against each other increases, and the amount of cement paste needed to coat the aggregate increases.

РИСУНОК 2

РЕЗУЛЬТАТЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОНСИСТЕНЦИИ СМЕСЕЙ

а – расплав смесей;
б – диаграмма расплава смесей в зависимости от марки образца

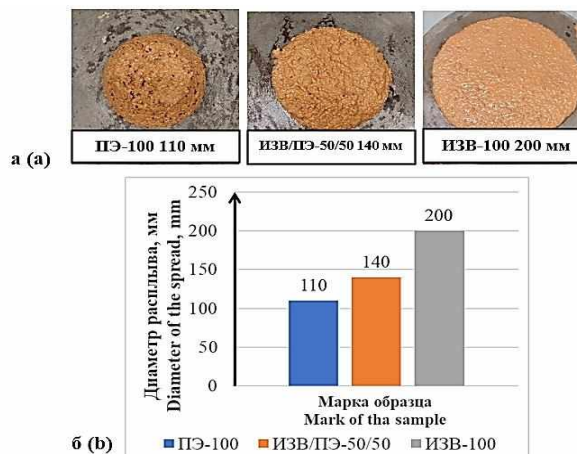


Figure 2

Results of determination of the consistency of pastes

a - spread of mixtures;
b - the diagram of cone spread of mixtures depending on the brand of the sample

Согласно результатам испытаний при увеличении содержания заполнителя из дробленых отходов сшитого полиэтилена уменьшается плотность получаемых образцов (с 2195 кг/м³ до 1570 кг/м³), такой результат объясняется низкой плотностью полимерных отходов.

При этом при увеличении содержания заполнителя из дробленых отходов сшитого полиэтилена значительно падает прочность образцов при сжатии (Табл.3). Такой

According to the test results, with an increase in the content of aggregate from crushed waste of crosslinked polyethylene, the density of the obtained samples decreases (from 2195 kg/m³ to 1570 kg/m³), this result is explained by the low density of aggregate from polymer waste.

At the same time, with an increase in the aggregate from crushed waste of crosslinked polyethylene content, the compressive strength of the samples significantly decreases

эффект объясняется разной физико-химической природой цементной матрицы и заполнителя из полимерных отходов и низким модулем упругости последнего. В случае, когда модуль упругости заполнителя больше или равен модулю упругости цементного камня (образец ИЗВ-100) напряжение передается через заполнитель, образуя пути передачи напряжений, заполнитель выполняет роль каркаса. В случае с заполнителем из сшитого полиэтилена (образец ПЭ-100) его модуль упругости ниже, чем у цементного камня, поэтому передача напряжений происходит по более жестким участкам строительного раствора.

По полученным при испытании на сжатие данным построены графики напряжения-деформации (рис.3). Восходящая ветвь у графиков всех трех образцов направлена под одним углом, тогда как ниспадающая ветвь с увеличением содержания заполнителя из сшитого полиэтилена становится более горизонтальной и пик диаграммы, соответствующий моменту разрушения, становится более сглаженным. Это подтверждает тот факт, что разрушение образцов с заполнителем из сшитого полиэтилена происходит более пластично, в момент пиковой нагрузки заполнитель некоторое время удерживает структуру образца от полного разрушения, в то время в образцах с минеральным заполнителем разрушение происходит хрупко (Рис.4).

(Table 3). This effect is explained by the different physical and chemical nature of the cement matrix and polymer waste and the low modulus of elasticity of this aggregate. In the case when the modulus of elasticity of the aggregate is greater than or equal to the modulus of elasticity of cement stone (sample LS-100), stress is transmitted through the aggregate, forming stress transmission lines, the filler acts as a frame. In the case of cross-linked polyethylene aggregate (PE-100 sample), its modulus of elasticity is lower than that of cement stone, so stress transfer occurs over more rigid sections of the mortar.

Based on the data obtained during the compression test, stress-strain graphs are constructed (Fig.3). The ascending branch of the graphs of all three samples is directed at the same angle, while the descending branch becomes more horizontal with an increase in the content of crosslinked polyethylene aggregate and the peak of the chart corresponding to the moment of destruction becomes more smoothed. This confirms the fact that the destruction of samples with an aggregate made of cross-linked polyethylene occurs more plastically; at the moment of peak load, the aggregate keeps the sample structure from complete destruction for some time, while in samples with a mineral aggregate, destruction occurs fragile (Fig.4).

РИСУНОК 3

ГРАФИКИ НАПРЯЖЕНИЯ-ДЕФОРМАЦИЙ СИНТЕЗИРОВАННЫХ ОБРАЗЦОВ

Figure 3

Stress-strain graphs of synthesized samples

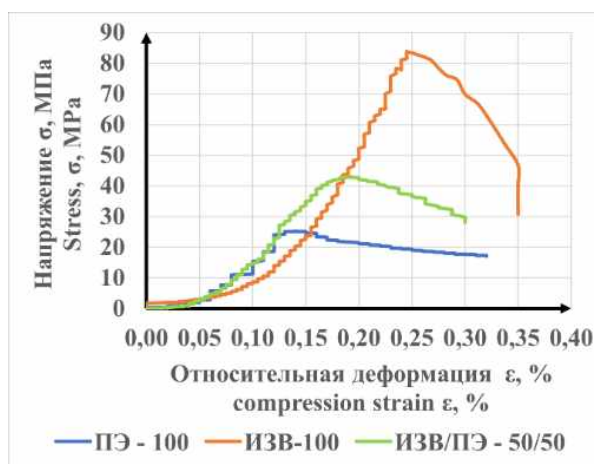


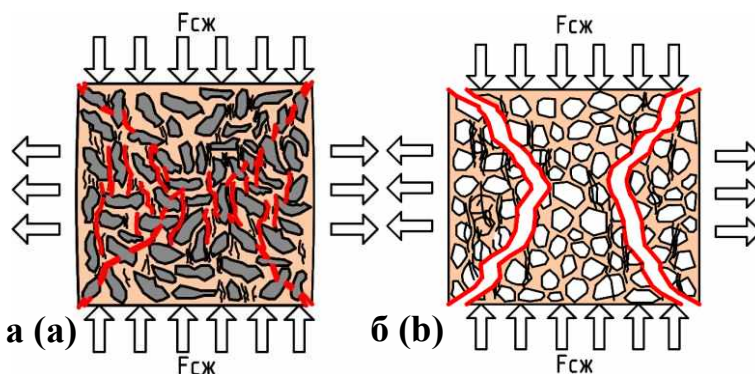
РИСУНОК 4

ХАРАКТЕР ПОВЕДЕНИЯ ОБРАЗЦОВ ПРИ РАЗРУШАЮЩЕЙ НАГРУЗКЕ

а – образец с заполнителем из отходов сшитого полиэтилена (ПЭ-100);
б – образец с минеральным заполнителем из отсевов дробления известняка (ИЗВ-100)

Figure 4

The nature of the destruction of samples
a - sample with aggregate from waste of crosslinked polyethylene (PE-100);
b - sample with mineral aggregate from dropout from limestone crushing (LS-100)



В представленном исследовании проведена оценка усадки синтезированных композиционных материалов и

In the presented study, the shrinkage of synthesized composite materials was evaluated and graphs of

построены графики усадочных деформаций (Рис.). Исследование усадки было проведено в первые 60 суток твердения образцов. Для сравнения на рис.5 приведен график усадочных деформаций цементного камня с 20% заменой цемента на тонкомолотый порошок из отходов керамического кирпича.

Из представленных графиков видно, что наибольшей усадкой закономерно обладает образец цементного камня (ЦК). Также несколько меньшей, но всё ещё значительной усадкой обладает образец с заполнителем только из отходов сшитого полиэтилена (ПЭ-100). Это связано с пониженным модулем упругости такого заполнителя, который из-за низкой жесткости не может в полной мере сдерживать усадочные деформации цементного камня. В то же время образцы со смесью заполнителя из известняка и отходов сшитого полиэтилена (ИЗВ/ПЭ-50/50) показывают намного меньшую усадку на уровне с образца на основе только натурального природного известнякового заполнителя (ИЗВ-100).

shrinkage deformations were constructed (Fig.5). The shrinkage was studied during the first 60 days of sample hardening. For comparison, Fig.5 shows the graph of shrinkage deformations of cement stone with 20% cement replacement by finely ground powder from ceramic brick waste.

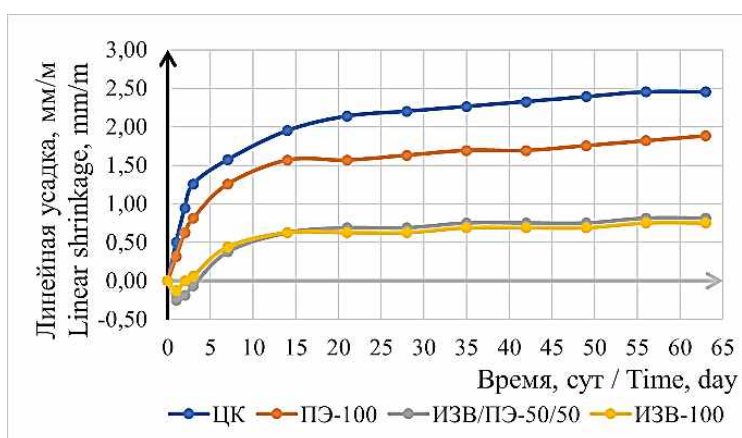
It can be seen from the presented graphs that the cement stone sample naturally has the greatest shrinkage. A sample with an aggregate made only of cross-linked polyethylene (PE-100) waste has a smaller, but still significant shrinkage. This is due to the reduced modulus of elasticity of such an aggregate, which, due to its low rigidity, cannot fully restrain the shrinkage deformations of cement stone. At the same time, samples with a mixture of limestone aggregate and waste cross-linked polyethylene (LS/PE-50/50) show a much lower shrinkage at the same level as the sample based only on natural limestone aggregate (LS-100).

РИСУНОК 5

ГРАФИКИ УСАДОЧНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ СИНТЕЗИРОВАННЫХ ОБРАЗЦОВ МАТЕРИАЛОВ

Figure 5

Graphs of shrinkage deformations synthesized material samples



На рис.6 представлены результаты испытания образцов синтезированных материалов на истираемость по ГОСТ 13087-2018. Из представленных результатов видно, что образцы с содержанием заполнителя из отходов сшитого полиэтилена (ПЭ-100 и ИЗВ/ПЭ-50/50) обладают намного большим сопротивлением истиранию чем образцы с натуральным природным заполнителем (ИЗВ-100). Такой эффект объясняется природой сшитого полиэтилена, который благодаря своей трехмерной структуре и поперечным связям в молекулах полимера в том числе обладает высокой износостойкостью.

Fig.6 shows the results of testing samples of synthesized materials for abrasion according to GOST 13087-2018. It can be seen from the presented results that samples containing aggregate from waste cross-linked polyethylene (PE-100 and LS/PE-50/50) have a much higher abrasion resistance than samples with natural aggregate (LS-100). This effect is explained by the nature of crosslinked polyethylene, which, due to its three-dimensional structure and transverse bonds in polymer molecules has high abrasion resistance.

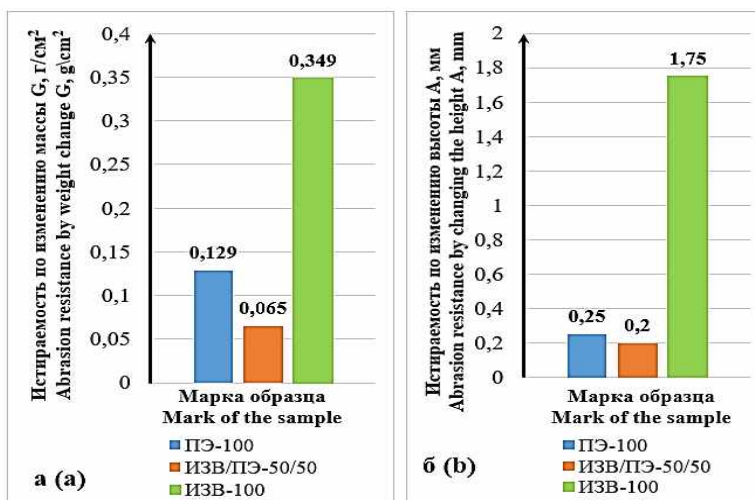
РИСУНОК 6

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЯ ОБРАЗЦОВ СИНТЕЗИРОВАННЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ИСТИРАЕМОСТЬ

а – диаграмма истираемости образцов по изменению массы;
б – диаграмма истираемости образцов по изменению высоты

Figure 6

The results of testing samples of synthesized materials for abrasion
a - diagram of the abrasion resistance of samples by weight change;
b - diagram of the abrasion resistance of samples by height change



Проведена косвенная оценка морозостойкости образцов материала дилатометрическим способом. На рис.7 приведены графики зависимости абсолютных объёмных деформаций при замораживании испытуемых и стандартного образцов от времени.

An indirect assessment of the frost resistance of the material samples was carried out using a dilatometric method. Fig.7 shows graphs of the dependence of absolute volumetric deformations during freezing of the subjects and standard samples on time.

РИСУНОК 7

ЗАВИСИМОСТИ АБСОЛЮТНЫХ ОБЪЁМНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ПРИ ЗАМОРАЖИВАНИИ ИСПЫТУЕМЫХ И СТАНДАРТНОГО ОБРАЗЦОВ ОТ ВРЕМЕНИ

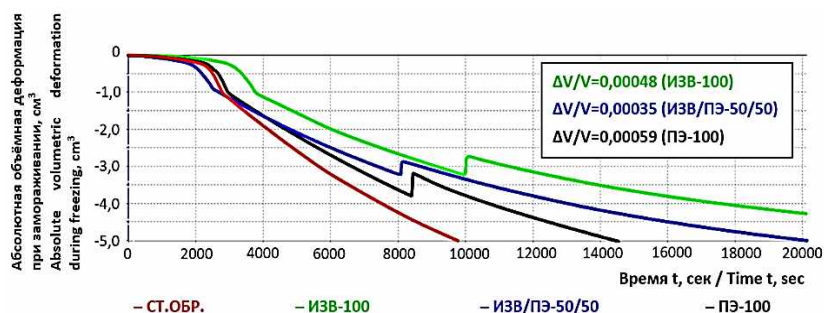


Figure 7

Time dependencies of absolute volumetric deformations during freezing of test and standard samples

Максимальное относительное увеличение разности объёмных деформаций составило 0,00048 (образец ИЗВ-100), 0,00035 (образец ИЗВ/ПЭ-50/50), 0,00059 (образец ПЭ-100). В соответствии ГОСТ 10060.3-95 данные результаты можно интерпретировать как марку по морозостойкости F300 во всех трех случаях. Стоит учитывать, что данный ГОСТ в настоящий момент не актуален и для точного установления марки по морозостойкости необходимо использовать стандартную методику. Тем не менее полученный результат позволяет полагать что полученные композиционные материалы обладают достаточно высокой морозостойкостью.

The maximum relative increase in the difference in volume deformations was 0.00048 (sample LS-100), 0.00035 (sample LS/PE-50/50), 0.00059 (sample PE-100). In accordance with GOST 10060.3-95, these results can be interpreted as the frost resistance mark F300 in all three cases. It should be borne in mind that this GOST is currently not relevant, and to accurately establish the mark for frost resistance, it is necessary to use a standard methodology. Nevertheless, the obtained result suggests that the obtained composite materials have a sufficiently high frost resistance.

На основании проведенных исследований и разработанных составов были синтезированы образцы декоративного материала с мозаичным, порфировым рисунком. Технология производства включала такие этапы как дозировка и перемешивание компонентов, формовка и распалубливание изделий, шлифовка поверхности для вскрытия структуры материала, шпатлевка пор и микродефектов, полировка и при необходимости покрытие поверхности защитными составами (лаками, пропитками, гидрофобизаторами). Данные изделия могут быть рекомендованы для применения в качестве декоративной напольной, интерьерной или тротуарной плитки. Внешний вид полученных изделий представлен на рис.8.

Based on the conducted research and the developed compositions, samples of decorative material with mosaic porphyry patterns were synthesized. The production technology included such steps as dosing and mixing of components, molding and demolding of products, surface grinding to reveal the structure of the material, filling of pores and microdefects, polishing and, if necessary, coating the surface with protective compounds (varnishes, impregnations, water repellents). These products can be recommended for use as decorative floor, interior or paving tiles. The appearance of the obtained products is shown in Fig.8.

РИСУНОК 8

ВНЕШНИЙ ВИД ПОЛУЧЕННЫХ ДЕКОРАТИВНЫХ ИЗДЕЛИЙ



Figure 8

The appearance of the obtained decorative products

Заклучение

Результаты проведенных исследований можно обобщить следующими основными выводами:

1. Включение в состав композиционного материала дробленых отходов из сшитого полиэтилена снижает текучесть и удобоукладываемость смеси в связи с неправильной формой и шероховатой поверхностью частиц такого заполнителя. Увеличивается трение частиц с цементным тестом и друг о друга и повышается количество цементного теста необходимого для обволакивания заполнителя.

2. Образцы с заполнителем из дробленых отходов сшитого полиэтилена обладают сниженной плотностью (1570 кг/м³), что связано с низкой плотностью самих полимерных отходов.

3. У образцов материала с заполнителем в виде отходов сшитого полиэтилена значительно снижены прочностные показатели, что связано с разной физико-химической природой цементной матрицы и заполнителя из полимерных отходов и низким модулем упругости последнего.

4. Разрушение образцов с заполнителем из сшитого полиэтилена происходит более пластично, в момент пиковой нагрузки заполнитель некоторое время удерживает структуру образца от полного разрушения, в то время как в образцах с минеральным заполнителем разрушение происходит хрупко.

5. Образцы с заполнителем только из отходов сшитого полиэтилена показали значительную усадку в первые 60 сут твердения. Это связано с пониженным модулем упругости такого заполнителя, который из-за низкой жесткости не может в полной мере сдерживать усадочные деформации цементного камня. В то же время намного меньшей усадкой обладают образцы со смесью заполнителя из известняка и отходов сшитого полиэтилена.

6. Образцы материала с заполнителем из отходов сшитого полиэтилена обладают высоким сопротивлением истиранию. Такой эффект объясняется природой сшитого полиэтилена, который благодаря своей трехмерной структуре и поперечным связям в молекулах полимера в том числе обладает высокой износостойкостью.

7. На основании проведенной оценки морозостойкости dilatометрическим способом установлено, что полученные образцы обладают достаточно высокой морозостойкостью (марка F300).

8. Наилучшими свойствами по результатам исследований обладали образцы со смесью полимерного и минерального заполнителя. При достаточно высокой прочности такие образцы обладают повышенным сопротивлением истиранию, высокой морозостойкостью, сниженной плотностью и усадкой.

9. На основании проведенных исследований изготовлены и представлены декоративные изделия с порфировым рисунком, которые могут быть рекомендованы для применения в качестве декоративной напольной, интерьерной или тротуарной плитки.

Литература:

1. Thomas J., Thomas M.E., Thomas S. Crosslinked Polyethylene: State-of-the-Art and New Challenges. *Crosslinkable Polyethylene: Manufacture, Properties, Recycling, and Applications*. – 2021. – Pp.1–15. https://doi.org/10.1007/978-981-16-0514-7_1.
2. Chandran N., Sivadas A., Anuja E., Baby D., Ramdas R. XLPE: Crosslinking Techniques and Recycling Process. *Crosslinkable Polyethylene: Manufacture, Properties, Recycling, and*

Conclusions

The results of the conducted research can be summarized by the following main conclusions:

1. The inclusion of crushed waste from crosslinked polyethylene in the composition of the composite material reduces the fluidity and workability of the mixture due to the irregular shape and rough surface of the particles of such an aggregate. The friction of the particles with the cement paste and against each other increases, and the amount of cement paste needed to coat the aggregate increases.

2. Samples with aggregate from crushed waste of crosslinked polyethylene have a reduced density (1,570 kg/m³), which is due to the low density of the polymer waste itself.

3. Samples of the material with an aggregate in the form of crosslinked polyethylene waste have significantly reduced strength indicators. This effect is explained by the different physical and chemical nature of the cement matrix and polymer waste and the low modulus of elasticity of this aggregate.

4. The destruction of samples with an aggregate made of crosslinked polyethylene occurs more plastically; at the moment of peak load, the aggregate protects the sample structure from complete destruction for some time, while in samples with a mineral aggregate, destruction occurs fragile.

5. The samples from only the crosslinked polyethylene waste aggregate showed significant shrinkage during the first 60 days of hardening. This is due to the reduced modulus of elasticity of such an aggregate, which, due to its low rigidity, cannot fully restrain the deformation of cement stone. At the same time, samples with a mixture of limestone aggregate and cross-linked polyethylene waste have much less shrinkage.

6. Material samples with aggregate from waste crosslinked polyethylene have high abrasion resistance. This effect is explained by the nature of cross-linked polyethylene, which, due to its three-dimensional structure and cross-links in polymer molecules, also has high abrasion resistance.

7. Based on the conducted assessment of frost resistance by the dilatometric method, it was found that the obtained samples have a sufficiently high frost resistance (mark F300).

8. Samples with a mixture of polymer and mineral aggregate had the best properties according to the results of the studies. With sufficiently high strength, such samples have increased abrasion resistance, high frost resistance, reduced density and shrinkage.

9. Based on the conducted research, decorative products with a porphyry pattern have been produced and presented, which can be recommended for use as decorative floor, interior or paving tiles.

References:

1. Thomas J., Thomas M.E., Thomas S. Crosslinked Polyethylene: State-of-the-Art and New Challenges. *Crosslinkable Polyethylene: Manufacture, Properties, Recycling, and Applications*. – 2021. – Pp.1–15. https://doi.org/10.1007/978-981-16-0514-7_1.
2. Chandran N., Sivadas A., Anuja E., Baby D., Ramdas R. XLPE: Crosslinking Techniques and Recycling Process. *Crosslinkable Polyethylene: Manufacture, Properties, Recycling, and*

- Applications. – 2021. – Pp. 167–188. https://doi.org/10.1007/978-981-16-0514-7_7.
3. Чалов К.В., Луговой Ю.В., Косивцов Ю.Ю. Исследование кинетики термодеструкции сшитого полиэтилена // Бюллетень науки и практики. – 2019. – Т. 5, № 12. – С.37–46.
 4. Gonzalez J.S., Gaillarde F. L., Perez S.L.S., Ros P.S., Lopez M.A.S. Influence of recycled brick aggregates on the properties of structural concrete for the manufacture of precast prestressed beams. *Construction and Building Materials*. – 2017. – Vol. 149. – Pp. 507–514.
 5. Ahmad S.I., Hossain M.A. Water permeability characteristics of normal strength concrete made from crushed clay bricks as a coarse aggregate. *Advances in Materials Science and Engineering*. – 2017. – Pp. 109–119. <https://doi.org/10.1155/2017/7279138>.
 6. Zhao Y., Gao J., Liu C., Chen X., Xu Z. The partial-size effect of waste clay brick powder on its pozzolanic activity and properties of blended cement. *Journal of cleaner production*. – 2020. – No.242. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103807>.
 7. Alsadey S. Properties of concrete using crushed brick as coarse aggregate // *International Journal of Advances in Mechanical and Civil Engineering*. – 2019. – Vol.6., No.3 – Pp. 44–47.
 8. Shao J., Gao J., Zhao, Y., Chen X. Study on the pozzolanic reaction of clay brick powder in blended cement pastes. *Construction and Building Materials*. – 2019. – No.213. – Pp.209–215. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.307>.
 9. Aliabdo A.A. Abd-Elmoati M., Hassan H.H. The use of crushed clay bricks in the concrete industry. *Alexandria Engineering Journal*. – 2014. – Vol. 53. – No. 1. – Pp. 151–168. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2013.12.003>.
 10. Ge Z., Gao Z., Sun R., Zheng L. Mix design of concrete with recycled clay-brick-powder using the orthogonal design method. *Construction and building materials*. – 2012. – No.31. – Pp.289–293. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.01.002>.
 11. Баруздин А.А., Закревская Л.В. Перспективы использования отходов строительной керамики при производстве строительных материалов // *Техника и технология силикатов*. – 2024. – Т. 31, № 2. – С. 140–153. <https://doi.org/10.62980/2076-0655-2024-140-153>.
 12. Баруздин А.А., Закревская Л.В. Перспективы применения отходов полимеров в качестве заполнителей бетона // *Техника и технология силикатов*. – 2024. – Т. 31, № 3. – С. 247–261. <https://doi.org/10.62980/2076-0655-2024-247-261>.
 13. Gu L., Ozbakkaloglu T. Use of recycled plastics in concrete: A critical review. *Waste Management*. Elsevier Ltd. – 2016. – No. 51. – Pp. 19–42. <https://doi.org/10.1002/ieam.5630030412>.
 14. Thorneycroft J., Orr J., Savoikar P., Ball R.J. Performance of structural concrete with recycled plastic waste as a partial replacement for sand. *Construction and building materials*. – 2018. – No.161. – Pp.63–69. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.127>.
 15. Galvão J. C. A., Portella K. F., Joukoski A., Mendes R., & Ferreira, E. S. Use of waste polymers in concrete for repair of dam hydraulic surfaces. *Construction and Building Materials*. – 2011. – Vol.25, No.2. – Pp.1049–1055. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.0>.
 16. Oti J., Adeleke B.O., Rathnayake M., Kinuthia J. M., Ekwulo E. Strength and Durability Characterization of Structural Concrete Made of Recycled Plastic // *Materials*. – 2024. – Vol. 17, № 8. <https://doi.org/10.3390/ma17081841>.
 17. Hu S., Tang H., Han S. Energy Absorption Characteristics of PVC Coarse Aggregate Concrete under Impact Load // *International Journal of Concrete Structures and Materials*. – 2021. <https://doi.org/10.1186/s40069-021-00465-w>.
 18. Ghemouti Y., Rabehi B. Strength and durability of mortar made with plasticsbag waste (MPBW). *International Journal of Concrete Structures and Materials*. – 2012. – Vol.6, No.3. – Pp.145–153. <https://doi.org/10.1007/s40069-012-0013-0>.
 19. Zéhil G.-Ph., Assaad J.J. Feasibility of concrete mixtures containing cross-linked polyethylene waste materials. *Construction and Building Materials*. – 2019. – Vol. 226. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.285>.
 - Applications. – 2021. – Pp. 167–188. https://doi.org/10.1007/978-981-16-0514-7_7.
 3. Chalov K.V., Lugovoj Yu.V., Kosivcov Yu.Yu. Investigation of the kinetics of thermal degradation of cross-linked polyethylene // *Byulleten' nauki i praktiki*. – 2019. – Vol. 5, No.12. – Pp. 37–46.
 4. Gonzalez J.S., Gaillarde F. L., Perez S.L.S., Ros P.S., Lopez M.A.S. Influence of recycled brick aggregates on the properties of structural concrete for the manufacture of precast prestressed beams. *Construction and Building Materials*. – 2017. – Vol. 149. – Pp. 507–514.
 5. Ahmad S.I., Hossain M.A. Water permeability characteristics of normal strength concrete made from crushed clay bricks as a coarse aggregate. *Advances in Materials Science and Engineering*. – 2017. – Pp. 109–119. <https://doi.org/10.1155/2017/7279138>.
 6. Zhao Y., Gao J., Liu C., Chen X., Xu Z. The partial-size effect of waste clay brick powder on its pozzolanic activity and properties of blended cement. *Journal of cleaner production*. – 2020. – No.242. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2020.103807>.
 7. Alsadey S. Properties of concrete using crushed brick as coarse aggregate // *International Journal of Advances in Mechanical and Civil Engineering*. – 2019. – Vol.6., No.3 – Pp. 44–47.
 8. Shao J., Gao J., Zhao, Y., Chen X. Study on the pozzolanic reaction of clay brick powder in blended cement pastes. *Construction and Building Materials*. – 2019. – No.213. – Pp.209–215. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.307>.
 9. Aliabdo A.A. Abd-Elmoati M., Hassan H.H. The use of crushed clay bricks in the concrete industry. *Alexandria Engineering Journal*. – 2014. – Vol. 53. – No. 1. – Pp. 151–168. <https://doi.org/10.1016/j.aej.2013.12.003>.
 10. Ge Z., Gao Z., Sun R., Zheng L. Mix design of concrete with recycled clay-brick-powder using the orthogonal design method. *Construction and building materials*. – 2012. – No.31. – Pp.289–293. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.01.002>.
 11. Baruzdin A.A., Zakrevskaya L.V. Prospects for the use of construction ceramics waste in the production of building materials // *Engineering and Technology of Silicates* – 2024. Vol. – 31, No2. – Pp. 140 – 153. <https://doi.org/10.62980/2076-0655-2024-140-153>.
 12. Baruzdin A.A., Zakrevskaya L.V. Prospects for the use of polymer waste as concrete aggregates // *Engineering and Technology of Silicates*. – 2024. Vol. – 31, No-3. – Pp. 247 – 261, <https://doi.org/10.62980/2076-0655-2024-247-261>.
 13. Gu L., Ozbakkaloglu T. Use of recycled plastics in concrete: A critical review. *Waste Management*. Elsevier Ltd. – 2016. – No. 51. – Pp. 19–42. <https://doi.org/10.1002/ieam.5630030412>.
 14. Thorneycroft J., Orr J., Savoikar P., Ball R.J. Performance of structural concrete with recycled plastic waste as a partial replacement for sand. *Construction and building materials*. – 2018. – No.161. – Pp.63–69. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.11.127>.
 15. Galvão J. C. A., Portella K. F., Joukoski A., Mendes R., & Ferreira, E. S. Use of waste polymers in concrete for repair of dam hydraulic surfaces. *Construction and Building Materials*. – 2011. – Vol.25, No.2. – Pp.1049–1055. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.06.0>.
 16. Oti J., Adeleke B.O., Rathnayake M., Kinuthia J. M., Ekwulo E. Strength and Durability Characterization of Structural Concrete Made of Recycled Plastic // *Materials*. – 2024. – Vol. 17, № 8. <https://doi.org/10.3390/ma17081841>.
 17. Hu S., Tang H., Han S. Energy Absorption Characteristics of PVC Coarse Aggregate Concrete under Impact Load // *International Journal of Concrete Structures and Materials*. – 2021. <https://doi.org/10.1186/s40069-021-00465-w>.
 18. Ghemouti Y., Rabehi B. Strength and durability of mortar made with plasticsbag waste (MPBW). *International Journal of Concrete Structures and Materials*. – 2012. – Vol.6, No.3. – Pp.145–153. <https://doi.org/10.1007/s40069-012-0013-0>.
 19. Zéhil G.-Ph., Assaad J.J. Feasibility of concrete mixtures containing cross-linked polyethylene waste materials. *Construction and Building Materials*. – 2019. – Vol. 226. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.285>.

- Building Materials. – 2019. – Vol. 226. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.285>.
20. Yesilata B., Isiker Y., Turgut P. Thermal insulation enhancement in concretes by adding waste PET and rubber pieces. *Construction and Building Materials*. – 2009. – Vol. 23, No.5. – Pp.1878–1882. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.09.014>

Работа выполнена в рамках государственного задания в сфере научной деятельности Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема FZUN-2024-0004, 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 №075-03-2024-112 от 17.01.2024г.).

The research was carried out within the state assignment in the field of scientific activity of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme FZUN-2024-0004, state assignment of VISU). The study was carried out using the equipment of the interregional multispecialty and interdisciplinary center for the collective usage 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. 075-03-2024-112 of January 17, 2024).

Баруздин Александр Андреевич – аспирант кафедры «Строительное производство», ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» (ВлГУ),
E-mail: baruzdin98@bk.ru (автор для связи)

Закревская Любовь Владимировна – кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Владимирский государственный университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых» (ВлГУ), E-mail: lvzak@mail.ru

Доброхотов Владимир Борисович – кандидат химических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Ярославский государственный технический университет» (ЯГТУ), E-mail: dobrokhotovvb@yandex.ru

Вклад авторов: Закревская Л.В. – научное руководство, научное редактирование статьи; Баруздин А.А. – идея, проведение эксперимента, обработка материала, написание статьи; Доброхотов В.Б. – анализ морозостойкости dilatометрическим методом.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Baruzdin Aleksandr Andreevich – Postgraduate student of «Construction production» department, Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletov (VISU),
E-mail: baruzdin98@bk.ru (author for contact)

Zakrevskaya Lyubov Vladimirovna – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Vladimir State University named after A.G. and N.G. Stoletov (VISU),
E-mail: lvzak@mail.ru

Dobrokhotov Vladimir Borisovich – Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, Yaroslavl State Technical University, E-mail: dobrokhotovvb@yandex.ru

Contribution of the author: Zakrevskaya L.V. – scientific guidance, scientific editing of the article; Baruzdin A.A. – idea, conducting an experiment, processing of material, writing of the article; Dobrokhotov V.B. – analysis of frost resistance by the dilatometric method.

The authors declare that there is no conflict of interest.