

УДК 691.42

Тип статьи: обзорная статья

ГРНТИ 67.09.00

Научная специальность ВАК: 2.1.05 Строительные материалы и изделия (технические науки)

EDN PKGLUQ

DOI 10.62980/2076-0655-2024-140-153

ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОТХОДОВ СТРОИТЕЛЬНОЙ КЕРАМИКИ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ СТРОИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Баруздин А.А.¹, Закревская Л.В.¹

¹Владимирский Государственный Университет имени Александра Григорьевича и Николая Григорьевича Столетовых

АННОТАЦИЯ

Приведены основные технологические аспекты производства строительной керамики. На основе анализа литературных источников проведена комплексная оценка целесообразности использования отходов строительной керамики в качестве вторичного сырья для производства новых строительных материалов. На основании исследования работ современных ученых установлено, что отходы боя строительной керамики пригодны для использования в качестве заполнителя, частичной замены цемента и реакционно-активной добавки в бетонах и растворах. При использовании боя строительной керамики в качестве заполнителя рекомендуется ограничивать замещение натурального заполнителя на уровне 20-30%, совместно используя различные добавки: пластифицирующие и улучшающие реотехнологические и физико-механические свойства бетона. Тонкомолотые отходы кирпичного боя обладают пуццолановой активностью и при использовании в качестве реакционно-активной добавки или частичной замены цемента в бетонах и растворах до 20-25% способны улучшать структуру цементного камня, повышать прочность, снижать макропористость и проникновение хлорид-ионов, увеличивать сульфатостойкость. Такого рода вяжущее склонно к более позднему набору прочности по сравнению с портландцементом. Кроме того, отходы строительной керамики можно применять в производстве активированных щелочью цементов и шлакощелочных вяжущих, а также как сырье для производства нового кирпича или устройства оснований дорожных одежд. Выявлено, что производство строительных материалов и изделий на основе отходов строительной керамики является перспективным направлением развития строительного производства. Возможно не только получение материалов равных по качеству изделиям на натуральном сырье, но и с повышенными характеристиками.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Кирпичный бой, строительная керамика, переработка, рециклинг, заполнитель для бетонов, реакционно-активная добавка, частичная замена цемента, пуццолановая активность.

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Баруздин, А. А. Перспективы использования отходов строительной керамики при производстве строительных материалов / А. А. Баруздин, Л. В. Закревская // Техника и технология силикатов. – 2024. – Т. 31, № 2. – С. 140-153.

Type of article - scientific article

OECD 2.01 Civil engineering

FA CONSTRUCTION & BUILDING TECHNOLOGY

EDN PKGLUQ

DOI 10.62980/2076-0655-2024-140-153

PROSPECTS FOR THE USE OF CONSTRUCTION CERAMICS WASTE IN THE PRODUCTION OF BUILDING MATERIALS

Baruzdin A.A.¹, Zakrevskaya L.V.¹

¹Vladimir State University named after Alexander Grigoryevich and Nikolai Grigoryevich Stoletov

ABSTRACT

The main technological aspects of the production of building ceramics are given. Based on the analysis of literary sources, a comprehensive assessment of the feasibility of using construction ceramic waste as a secondary raw material for the production of new building materials was carried out. Based on the research of modern scientists, it has been established that the waste from the scrap of building ceramics is suitable for use as an aggregate, partial replacement of cement and a reactive additive in concretes and mortars. When using scrap of construction ceramics as an aggregate, it is recommended to limit the substitution of natural aggregate at the level of 20-30%, together using various additives: plasticizing and improving rheotechnological and physico-mechanical properties of concrete. Finely ground waste from brick scrap has pozzolan activity and, when used as a reactive additive or partial replacement of cement in concretes and mortars, up to 20-25% can improve the structure of cement stone, increase strength, reduce macroporosity and penetration of chloride ions, and increase sulfate resistance. This kind of binder is prone to a later set of strength compared to Portland cement. In addition, the waste of building ceramics can be used in the production of alkali-activated cements and slag-alkali binders, as well as raw materials for the production of new bricks or the construction of road surface bases. It has been revealed that the production of building materials and products based on construction ceramics waste is a promising direction for the development of construction production. It is possible not only to obtain materials of equal quality to products based on natural raw materials, but also with improved characteristics.

KEY WORDS: Brick scrap, building ceramics, recycling, concrete aggregate, reactive additive, partial replacement of cement, pozzolan activity.

FOR CITATION: Baruzdin, A. A. Prospects for the use of construction ceramics waste in the production of building materials / A. A. Baruzdin, L. V. Zakrevskaya // Technique and technology of silicates. – 2024. Vol. – 31, No2. – Pp. 140 – 153.

ВВЕДЕНИЕ

В процессе производства строительных материалов и изделий, возведения, ремонта, реконструкции и реновации зданий и сооружений образуется значительное количество отходов. Одним из самых распространённых видов строительных отходов наряду с бетонным ломом, древесиной и ломом металлов являются отходы строительной керамики, образующиеся как в процессе производства материалов (брак), так и в процессе строительства, ремонта и сноса зданий (бой керамики). При этом отходы керамики обладают потенциально полезными свойствами, как сырьё для новых строительных материалов, такими как пористость, прочность, долговечность и относительно невысокая плотность.

Ещё древние мастера при изготовлении растворов часто использовали цемянку. В Киевских растворах XI в. она представляет собой специально обожжённую и тонко размолотую глину. Позднее всё чаще в качестве цемянки применяется толчёный кирпичный бой, что, несомненно, было более выгодно, потому что позволяло с пользой употреблять брак кирпича. При этом наличие в растворе крупной фракции керамического заполнителя уменьшает усадку при твердении и обеспечивает раствору большую стойкость к растрескиванию, а наличие тонкодисперсной фракции керамики придает раствору пуццолановую активность [1].

Во второй половине XX в. начинает формироваться современный подход к переработке строительных отходов, который в последствии приобретает название рециклинг – переработка отходов с целью их возвращения в производственно-экономический оборот, в качестве вторичного сырья. В некоторых странах благодаря технологиям рециклинга уровень переработки строительных отходов достигает 50-90% [2]. В России не смотря на значительный накопленный опыт обращения с отходами, данные технологии находятся на стадии развития и внедрения.

Задачи исследования:

- анализ свойств отходов строительной керамики, обусловленных особенностями сырья и технологии изготовления керамических изделий;
- исследование способов подготовки и переработки отходов строительной керамики в целях использования в производстве строительных материалов;
- оценка и анализ целесообразности использования отходов строительной керамики в качестве вторичного сырья для производства новых строительных материалов;
- выявление наиболее эффективных и перспективных способов рециклинга отходов строительной керамики;

Состав отходов строительной керамики

Основным сырьём для производства керамики являются глины – осадочные горные породы, состоящие в основном из глинистых минералов, водных алюмосиликатов (каолинит $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$, монтмориллонит $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$). Размер частиц глинистых минералов не превышает 0,005 мм, форма частиц – пластинчатая. Большая удельная поверхность глинистых частиц и их гидрофильность позволяет глине поглощать и удерживать воду, именно глинистые минералы позволяют глине быть пластичной при увлажнении, достаточно прочной при высыхании и быть способной к спеканию при обжиге. Кроме глинистых минералов в глине содержатся пыль и песок, которые состоят из кварца (SiO_2), карбонатов кальция и магния (CaCO_3 и MgCO_3) и других минералов. Содержание этих компонентов также влияет на свойства и качество керамических изделий [3].

INTRODUCTION

In the process of production of building materials and products, construction, repair, reconstruction and renovation of buildings and structures, a significant amount of waste is generated. One of the most widespread types of construction waste, along with concrete scrap, wood and scrap metals, is construction ceramics waste generated both during the production of materials and during the construction, repair and demolition of buildings. At the same time, ceramic waste has potentially useful properties as raw materials for new building materials, such as porosity, strength, durability and relatively low density.

Even the ancient masters often used cemyanka in the production of mortars. In Kiev mortars of the XI century, it is a specially baked and finely ground clay. Later, crushed brick was increasingly used as a cemyanka, which, undoubtedly, was more profitable, because it allowed the waste of bricks to be usefully used. At the same time, the presence of a large fraction of ceramic aggregate in the mortar reduces shrinkage during hardening and provides the mortar with greater resistance to cracking, and the presence of a fine ceramic fraction gives the mortar pozzolan activity [1].

In the second half of the 20th century, a modern approach to the processing of construction waste began to take shape, which later acquired the name recycling – processing of waste in order to return it to production and economic turnover, as a secondary raw material. In some countries, thanks to recycling technologies, the level of recycling of construction waste reaches 50-90% [2]. In Russia, despite the considerable accumulated experience in waste management, these technologies are at the stage of development and implementation.

Research objectives:

- analysis of the properties of construction ceramics waste due to the peculiarities of raw materials and ceramic products manufacturing technology;
- research of methods of preparation and processing of construction ceramics waste for use it at the production of building materials;
- assessment and analysis of the feasibility of using construction ceramic waste as a secondary raw material for the production of new building materials;
- identification of the most effective and promising ways of recycling construction ceramics waste;

Composition of construction ceramics waste

The main raw materials for the production of ceramics are clays – sedimentary rocks consisting mainly of clay minerals, aqueous aluminosilicates (kaolinite $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$, montmorillonite $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$). The particle size of clay minerals does not exceed 0.005 mm, the particle shape is lamellar. The large specific surface area of clay particles and their hydrophilicity allows clay to absorb and retain water, it is clay minerals that allow clay to be plastic when moistened, sufficiently durable when drying and capable of sintering during firing. In addition to clay minerals, clay contains dust and sand, which consist of quartz (SiO_2), calcium and magnesium carbonates (CaCO_3 and MgCO_3) and other minerals. The

Для снижения пластичности, уменьшения усадки, улучшения сушки глин вводят отощающие добавки (песок, шлаки, золы, шамот, измельченный бой кирпича, дегидрированная глина). Для снижения плотности и теплопроводности изделий используют порообразующие добавки (доломит, угольный порошок, опилки). Когда необходимо понизить температуру спекания сырьевой смеси используют добавки-плавни (тальк, полевые шпаты, железная руда) [3].

Сырьевая шихта по химическому составу в зависимости от состава глин и наличия добавок может отличаться, обычно шихта содержит такие оксиды как SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , MgO , Fe_2O_3 , Na_2O , K_2O , TiO_2 . В результате обжига сырья образуется полиминеральная структура керамического камня, предопределяющая его строение и свойства, фазовый состав которой может быть представлен различными полевыми шпатами (анортит – $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$, альбит – $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$), β -кварцем, форстеритом – $2\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$, магнезиоферритом – $\text{MgO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$, гематитом – Fe_2O_3 , метаколинитом – $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$, муллитом – $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ и стеклофазой. Стеклофаза образуется из жидкой фазы на стадии спекания кирпича и обеспечивает формирование конгломерата, обуславливающего прочность керамической массы [4,5,6,7].

Согласно современным исследованиям [4-6, 9] цвет керамического кирпича главным образом зависит от содержания в используемом сырье оксидов железа, окрашивание происходит за счет гематита ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) имеющего окрас от кроваво красного до черного, а также из-за окрашивания стеклофазы в более темные (бурые) тона за счет растворения в ней железа.

Керамика один из основных строительных материалов и может применяться практически во всех элементах зданий и сооружений. Различают стеновую керамику, кровельные изделия (черепица), фасадные изделия (лицевой кирпич, плитка), изделия для внутренней отделки (облицовка стен, плитка для полов), санитарно-технические изделия, специальную керамику (кислотоупорная, огнеупорная).

Технология подготовки отходов строительной керамики

Отходы сноса, реконструкции, реновации и строительства зданий и сооружений, как правило, очень неоднородны, поэтому для последующего использования в качестве сырья для новых материалов необходима соответствующая подготовка для получения сырья с более стабильными свойствами.

Повсеместно большую часть таких отходов (до 80%) составляет бетонный лом и кирпичный бой. Большая часть отходов может быть отделена путем выборочного разрушения в сочетании с ручной и механической сортировкой перед дроблением. Небольшая часть отходов бетона, раствора и кирпича, которая трудноотделима, может быть переработана совместно в смесь кирпичного и бетонного порошка, который также может быть применен в качестве частичной замены цемента или активной кремнезем-глиноземистой добавки [10].

В целом технология подготовки может состоять из нескольких этапов. На первом этапе отходы кирпича отделяются от отходов бетона и других отходов строительства и сноса, которые идут на переработку по своей специфической технологии. Затем кирпичный бой измельчается в переработанный материал. Крупные частицы размером более 5 мм могут быть использованы в качестве заполнителя

content of these components also affects the properties and quality of ceramic products [3].

Mineral filler (sand, slags, ash, chamotte, crushed brick, dehydrated clay) are introduced to reduce plasticity and shrinkage, and improve clay drying. Pore-forming additives (dolomite, coal powder, sawdust) are used to reduce the density and thermal conductivity of products. Melting additives (talk, feldspar, iron ore) are used when it is necessary to lower the sintering temperature of the raw mixture [3].

The raw material mix may differ in chemical composition depending on the composition of clays and the presence of additives, usually the mix contains oxides such as SiO_2 , Al_2O_3 , CaO , MgO , Fe_2O_3 , Na_2O , K_2O , TiO_2 . As a result of firing of raw materials, a polymineral structure of ceramic stone is formed, which determines its structure and properties, the phase composition of which can be represented by various feldspars (anorthite – $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$, albite – $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$), β -quartz, forsterite – $2\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$, magnesioferrite – $\text{MgO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$, hematite – Fe_2O_3 , metakaolinite – $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$, mullite – $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ and glass phase. The glass phase is formed from the liquid phase at the brick sintering stage and ensures the formation of a conglomerate that determines the strength of the ceramic mass [4,5,6,7].

According to modern studies [4-6, 9], the color of ceramic bricks mainly depends on the content of iron oxides in the raw materials used, staining occurs due to hematite ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$) having a color from blood red to black, as well as due to the staining of the glass phase in darker (brown) tones due to the dissolution of iron in it.

Ceramics is one of the main building materials and can be used in almost all elements of buildings and structures. There are wall ceramics, roofing products (tiles), facade products (face bricks, tiles), products for interior decoration (wall and floor tiles), sanitary products, special ceramics (acid-resistant, fire-resistant).

Technology of preparation of construction ceramics waste

Waste from demolition, reconstruction, renovation and construction of buildings and structures is usually very heterogeneous, therefore, for subsequent use as raw materials for new materials, appropriate preparation is necessary to obtain raw materials with more stable properties.

Everywhere, most of such waste (up to 80%) is made up of concrete and brick scrap. Most of the waste can be separated by selective destruction in combination with manual and mechanical sorting before crushing. A small part of the concrete, mortar and brick waste, which is difficult to separate, can be processed together into a mixture of brick and concrete powder, which can also be used as a partial replacement for cement or an active silica-alumina additive [10].

In general, the preparation technology may consist of several stages. At the first stage, brick waste is separated from concrete waste and other construction and demolition waste, which are recycled according to their specific technology. Thereafter, the brick scrap is ground into recycled material. Large particles larger than 5 mm can be used as a concrete coarse aggregate. Particles of 0.14-5

бетона. Частицы размером 0,14-5 мм могут быть использованы в качестве мелкого заполнителя для бетонов или могут быть совместно с тонкими частицами (0-0,14 мм) измельчены в тонкодисперсный порошок. Для приготовления такого порошка используется помольное оборудование, при этом можно контролировать распределение частиц по размерам, корректируя тип помольного оборудования и продолжительность помола [10].

При этом при увеличении тонкости помола, как правило, увеличивается реакционная активность строительных порошков. Это связано с тем, что при увеличении удельной поверхности порошка повышается площадь реакции и количество активных частиц, которые способны связываться с другими частицами. Вместе с тем повышается однородность материала и однородность его свойств. В то же время для каждого порошка можно установить наиболее оптимальную тонкость помола, при которой его свойства используются наиболее полно и дальнейшее измельчение не рационально. Чрезмерно высокая тонкость помола не всегда желательна, так как дисперсный порошок требует больше воды, что может привести к повышенной усадке и растрескиванию при затвердевании [11].

С точки зрения теории Гриффитса-Орована-Ребиндера процесс измельчения происходит в несколько этапов [12]:

- возникновение дефектов и локализация концентрации напряжений при воздействии на микрочастицу вещества;
- образование зародышевых микротрещин и разрыв кристаллической целостности структуры частицы;
- рост на базе микротрещин магистральных макротрещин, приводящих к образованию поверхности разрушения;

Для дробления и измельчения строительных отходов и, в частности, отходов строительной керамики рационально будет применять щековые, конусные, валковые, ударные дробилки, а также вращающиеся шаровые, варио-планетарные, вибрационные и центробежные мельницы.

На рис.1 изображено оборудование пригодное для измельчения отходов строительной керамики.

Авторами работы [11] произведено сравнение эффективности вращающейся шаровой, варио-планетарной и вибрационной мельниц при помоле композиционного вяжущего. Результаты эксперимента показали, что вращающаяся шаровая мельница способна измельчать материал до удельной поверхности 400 м²/кг, а вибрационная и варио-планетарная до 430 и 900 м²/кг соответственно, что показывает эффективность варио-планетарной мельницы по сравнению с остальными. Вероятно, это связано с возможностью настройки данного типа мельницы с целью корректировки траектории и скорости движения мелющих тел.

Согласно результатам работы [13] при получении тонкого порошка на основе кирпичного боя при помощи шаровой мельницы с увеличением времени помола частицы не только уменьшаются в размерах, но и становятся более окатанными, происходит стачивание краев и углов частиц. Кроме того, с увеличением времени помола в частицах остается меньше пор, которые разрушаются в процессе. Вместе с тем с увеличением длительности помола частицы начинают адсорбироваться друг на друге и на крупных частицах что может несколько уменьшить удельную поверхность. Авторы не рекомендуют слишком длительное время измельчения для получения порошка из кирпичного боя, потому что в таком случае снижается эффективность и растут затраты энергии.

mm in size can be used as a fine aggregate for concrete or combined with fine particles (0-0.14 mm) can be crushed into a fine powder. Grinding equipment is used to create a such powder. The particle size distribution of the powder can be controlled by changing the type of grinding equipment or the duration of the grinding process.

At the same time, as the fineness of grinding increases, the reactivity of building powders typically increases. This is because, with an increase in the specific surface area of the powder, the reaction area and the number of active particles that can bind to other particles both increases. At the same time, the uniformity of the material and the uniformity of its properties increases. For each powder, there is an optimal grinding fineness that can be achieved, in which the properties of the powder are used most effectively and further grinding would not be rational. Excessively high fineness of grinding is not always desirable, since the dispersed powder require more water, which can lead to increased shrinkage and cracking during solidification [11].

From the point of view of the Griffiths-Orovan-Rebinder theory, the grinding process takes place in several stages [12]:

- the occurrence of defects and localization of stress concentrations when exposed on microparticles of substance;
- formation of germinal microcracks and rupture of the crystal integrity of the particle structure;
- growth on the basis of microcracks of main macrofractures leading to the formation of a fracture surface;

It will be rational to use jaw, cone, roller, impact crushers, as well as rotating ball, vario-planetary, vibratory and centrifugal mills for crushing construction waste and in particular construction ceramics waste.

Fig. 1 shows equipment suitable for crushing construction ceramic waste.

The authors of the work [11] compared the efficiency of rotating ball, vario-planetary and vibration mills when grinding a composite binder. The results of the experiment showed that a rotating ball mill is capable of grinding material up to a specific surface area of 400 м²/kg, and a vibrating and vario-planetary mill up to 430 and 900 м²/kg, respectively, which shows the efficiency of the vario-planetary mill compared to the others. This is probably due to the possibility of configuring this type of mill in order to adjust the trajectory and speed of movement of grinding elements.

According to the results of work [13], when obtaining finely ground powder based on brick waste with the help of a ball mill, with increasing grinding time, the particles not only decrease in size, but also become more rounded, the edges and corners of the particles are worn off. In addition, with increasing grinding time, fewer pores remain in the particles, which are destroyed in the process. At the same time, with an increase in the grinding time, the particles begin to adsorb on each other and on large particles, which may slightly reduce the specific surface area. The authors do not recommend too long a grinding time to obtain powder from a brick waste, because in this case efficiency decreases and energy costs increase.

РИСУНОК 1

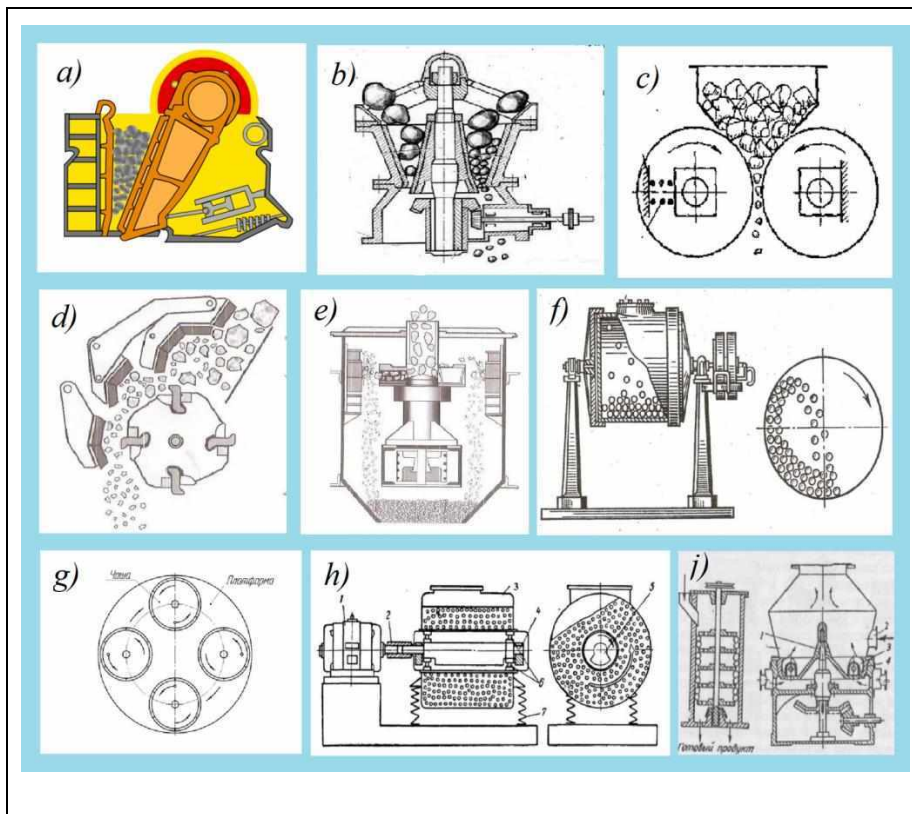
ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ИЗМЕЛЬЧЕНИЯ ОТХОДОВ СТРОИТЕЛЬНОЙ КЕРАМИКИ

- a – щековая дробилка
- b – конусная дробилка
- c – валковая дробилка
- d, e – ударные дробилки
- f – шаровая мельница
- g – варио-планетарная мельница
- h – вибрационная мельница
- i – центрифужные мельницы

Figure 1

Equipment for crushing construction ceramics waste

- a – jaw crusher
- b – cone crusher
- c – roller crusher
- d, e – impact crushers
- f – ball mill
- g – vario-planetary mill
- h – vibration mill
- i – centrifugal mills



Авторы работы [14] изучили зависимость индекса активности и удельной поверхности кирпичного порошка от времени помола в шаровой мельнице. По результатам эксперимента при 70 и 90 минутах помола была получена удельная поверхность порошка 408 и 467 м²/кг соответственно и индекс активности 57,2 и 67,2% соответственно. Таким образом при увеличении времени помола вместе с ростом удельной поверхности происходит рост активности порошка из кирпичного боя.

Согласно [15] при замене части клинкера отходами кирпичного боя и их совместном помоле при производстве цемента снижается время необходимое для измельчения. Такой же эффект наблюдается в работе [16]. Автор отмечает, что при помоле шлакощелочных вяжущих с добавкой молотого боя керамического кирпича сокращается время помола по сравнению с бездобавочным вяжущим. Это связано с пониженными абразивными свойствами боя керамического кирпича и ведет к общему снижению потребления энергии.

Использование отходов строительной керамики в качестве заполнителя для бетонов и растворов

Особенностью заполнителя на основе боя керамического кирпича является то, что он имеет ту же структуру, что и исходный материал, обладает такой же пористостью и прочностью. На частицах керамического заполнителя в процессе дробления остаются фрагменты растворной части, доля которой может составлять до 15-20% по массе. Отходы кирпичного боя обладают повышенным водопоглощением, что подразумевает их применение совместно с пластификаторами. Увеличенная водопотребность такого заполнителя влияет на структурообразование бетонов и растворов. Происходит перераспределение воды между жидкой, твердой и газообразной фазой и меняются реологические свойства бетонной смеси. При введении в бетонную смесь такой заполнитель сначала поглощает жидкую

The authors of [14] studied the dependence of the activity index and specific surface area of brick powder on the grinding time in a ball mill. According to the results of the experiment, at 70 and 90 minutes of grinding, the specific surface area of the powder was 408 and 467 m²/kg, respectively, and the activity index was 57.2 and 67.2%, respectively. Thus, with an increase in the grinding time, along with an increase in the specific surface area, the activity of the powder from the brick fight increases.

According to [15], when replacing a part of the clinker with brick waste and grinding them together during cement production, the time required for grinding is reduced. The same effect is observed in [16]. The author notes that when grinding slag-alkali binders with the addition of ground ceramic brick, the grinding time is reduced compared to the additive-free binder. This is due to the reduced abrasive properties of the ceramic brick particles and leads to an overall reduction in energy consumption.

The use of construction ceramic waste as an aggregate for concrete and mortars

The peculiarity of the aggregate based on the waste of ceramic bricks is that it has the same structure as the source material, has the same porosity and strength. Fragments of the mortar part remain on the particles of the ceramic aggregate during the crushing process, the proportion of which can be up to 15-20% by weight. Waste from brick has increased water absorption, which implies their use in conjunction with plasticizers. The increased water requirement of such an aggregate affects the structure formation of concretes and mortars. There is a redistribution of water between the liquid, solid and gaseous phases and the rheological properties of the concrete mixture change. When introduced into a concrete mixture, such an aggregate first absorbs the liquid phase, and then, in the process of gaining concrete strength, gives it to a hardening cement stone,

фазу, а затем в процессе набора прочности бетона отдает ее в твердеющий цементный камень, что способствует образованию плотной структуры [17-24].

Авторы работы [25] для избегания добавления излишней воды в состав бетона и сохранения водоцементного соотношения предварительно увлажняют заполнитель из кирпичного боя, а затем высушивают его с поверхности.

Средняя и насыпная плотность щебня из дробленого керамического кирпичного боя ниже, чем плотность натуральных заполнителей. Угловатая, неправильная форма частиц кирпичного боя и наличие пор обеспечивают хорошее сцепление с цементной матрицей. Немаловажную роль играет прочность щебня из кирпичного лома, чем она выше, тем выше прочность получаемого бетона [26-28].

Благодаря повышенной пористости поверхностных слоев кирпичного боя тонкодисперсные частицы вяжущего проникают в поры и капилляры, где при гидратации образуют новообразования обеспечивая формирование прочных связей между матрицей и заполнителем [29].

На основе заполнителя из боя керамического кирпича возможно получать бездобавочные бетоны марок В7,5-В15 с плотностью, не превышающей 1750 кг/м³. Однако такие бетоны вследствие высокой водопотребности заполнителей имеют недостатки – большой расход воды и цемента, высокое В/Ц соотношение, низкие показатели удобоукладываемости. Поэтому при изготовлении бетонов на основе боя керамического кирпича целесообразно использовать различные добавки, в том числе и пластифицирующие, улучшающие реотехнологические и физико-механические свойства бетона. Такой подход позволяет получать облегченные керамобетоны классов по прочности В12,5-В30 [17-19].

Исследователями отмечается, что замена, как крупного, так и мелкого заполнителя более чем на 20-30% приводит к значительному ухудшению прочностных характеристик, тогда как, когда уровень замены не превышает 20-30% возможно получение бетонов без значительного снижения прочности или без снижения вовсе [24,30,31,32]. Кроме того, при увеличении содержания заполнителей из кирпичного боя отмечается увеличение стойкости бетона к истиранию [30] и повышение влияния характеристик конкретного отхода кирпичного боя на свойства бетона [31].

Водопроницаемость бетона с заполнителем из кирпича всегда выше, чем водопроницаемость бетона с натуральными заполнителями эквивалентной прочности. Водопроницаемость бетона с кирпичным заполнителем зависит от прочности бетона на сжатие, водопоглощения и пористости получаемого бетона, а также прочности и водопоглощения самого кирпичного заполнителя [28].

Применение заполнителя из дробленого кирпичного боя может снизить себестоимость производства бетона на 35% [18].

Более высокие характеристики имеют бетоны с заменой натуральных заполнителей на отходы керамики с низким водопоглощением, так в работе [33] авторы утверждают, что прочность такого бетона при замене натуральных заполнителей до 50% возрастает по сравнению с контрольными образцами. Авторы связывают такой прирост прочности с улучшенной межфазной зоной вследствие шероховатости заполнителя, а также с повышенной прочностью используемой спечённой керамики. При этом при увеличении замены свыше 50% происходит снижение

which contributes to the formation of a monolithic structure [17-24].

The authors of the work [25], in order to avoid the addition of excessive water to the concrete composition and preserve the water-cement ratio, pre-moisten the aggregate from the brick waste, and then dry it from the surface.

The apparent density and bulk density of crushed ceramic brick rubble is lower than the density of natural aggregates. The angular, irregular shape of the brick waste particles and the presence of pores ensure good adhesion to the cement matrix. The strength of crushed stone from brick scrap plays an important role, the higher it is, the higher the strength of the resulting concrete [26-28].

Due to the increased porosity of the surface layers of the brick waste, fine particles of the binder penetrate into the pores and capillaries, where they form reaction products during hydration, ensuring the formation of strong bonds between the matrix and the aggregate [29].

On the basis of an aggregate from a ceramic brick waste, it is possible to obtain additive-free concretes of strength classes B7.5-B15 with a density not exceeding 1750 kg/m³. However, such concretes, due to the high water demand of aggregates, have disadvantages - high consumption of water and cement, high W/C ratio, low workability. Therefore, in the manufacture of concrete based on the waste of ceramic bricks, it is advisable to use various additives, including plasticizers, which improve the rheological and physico-mechanical properties of concrete. This approach makes it possible to obtain lightweight ceramic concrete of strength classes B12,5-B30 [17-19].

The researchers note that the replacement of both large and small aggregates by more than 20-30% leads to a significant decrease in strength characteristics, whereas when the replacement level does not exceed 20-30%, it is possible to obtain concretes without a significant decrease in strength or without a decrease at all [24,30,31,32]. In addition, with an increase in the content of aggregates from the brick waste, an increase in the abrasion resistance of concrete is noted [30] and the influence of the characteristics of a particular waste of brick on the properties of concrete is increase [31].

The water permeability of concrete with a brick aggregate is always higher than the water permeability of concrete with natural aggregates of equivalent strength. The water permeability of concrete with brick aggregate depends on the compressive strength of concrete, water absorption and porosity of the resulting concrete, as well as the strength and water absorption of the brick aggregate itself [28].

The use of aggregate from crushed brick can reduce the cost of concrete production by 35% [18].

Concretes with replacement of natural aggregates for ceramic waste with low water absorption have higher characteristics, so in [33] the authors claim that the strength of such concrete increases compared with control samples when replacement of natural aggregates does not exceed 50%. The authors attribute this increase in strength to an improved interfacial zone due to the roughness of the aggregate, as well as to the increased strength of the used sintered ceramics. At the same time, with an increase in replacement of more than 50%, there is a decrease in strength, which, as the authors note, is associated with a decrease in the workability of the concrete mixture.

прочности, что как отмечают авторы связано со снижением обрабатываемости бетонной смеси.

Используя мелкодисперсный дробленый бой керамического кирпича вместо песка, можно получать штукатурные растворы, не уступающие по характеристикам традиционным. Как показывают современные исследования, такие растворы менее подвижны и требуют использования пластифицирующих добавок, однако они имеют лучшие показатели водоудерживающей способности, расслаиваемости и теплопроводности [34].

Авторы исследования [35] также отмечают, что замена заполнителя в растворе на переработанную мелкую фракцию керамического кирпича до 10% в целом положительно сказывается на всех его характеристиках: увеличение прочности на сжатие и изгиб, а также адгезионной прочности, снижение коэффициента водопоглощения и повышение водоудерживающей способности. Исключениями являются усадка и паропроницаемость, которые незначительно ухудшаются (увеличение усадки на 13%, снижение паропроницаемости на 25%).

Кладочные растворы с наполнителем из тонкодисперсных отходов керамики характеризуются максимальной адгезией к керамическому кирпичу. Благодаря средству составов в зоне контакта образуется тождественная структура обеспечивающая монолитность кладки [29].

Использование отходов керамики в качестве частичной замены цемента и гидравлической добавки

Как было сказано ранее, еще во времена Византии, а затем и в Древней Руси при приготовлении строительных растворов активно применялся толченый кирпич – цемянка. Современными учеными установлено, что тонкомолотый кирпичный бой может обладать пуццолановой активностью, это обусловлено переходом кристаллических структур глин в аморфные соединения при обжиге кирпича в температурном интервале 700-1200°C. Отходы керамического кирпича содержат кварц и соединения полевых шпатов (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO) и при затворении с гидроксидом кальция (известью) и водой при твердении способны образовывать гидроалюминаты и гидросиликаты кальция.

Условием протекания реакции является pH раствора равное 12,5 и температура 25°C [25, 36-38].

Согласно [39] основой реакционной способности обожженных глинистых материалов является то, что при температуре 600-800 °C основной компонент глин – инертный каолинит ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) обезвоживается и переходит в активный каолиновый ангидрит – метакаолинит ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), аморфизированный в следствие удаленной гидратной воды. При взаимодействии таких глин с гидроксидом кальция происходит образование гидросиликатов кальция CSH(B) и гидрат геленита $2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$. При обжиге глин при более высоких температурах 900-1000°C химическая активность снижается в следствие того, что происходит перестроение решетки метакаолинита, а при 1000-1200°C образуются малоактивные муллит и кристобалит, при температуре более 1200°C образуются соответствующие стекла, поэтому материалы, получаемые обжигом глин в температурном диапазоне 900-1200°C характеризуются сниженной активностью относительно обожженных глинистых материалов получаемых при 600-800°C.

Using fine crushed ceramic brick instead of sand, it is possible to obtain plaster mortars that are not inferior in characteristics to traditional mortars. As modern studies show, such mortars are less workability and require the use of plasticizing additives, however, they have better indicators of water retention, delamination and thermal conductivity [34].

The authors of the study [35] also note that replacing the aggregate in the mortar with a recycled fine fraction of ceramic bricks up to 10% has a generally positive effect on all its characteristics: an increase in compressive and bending strength, adhesive strength, a decrease in the coefficient of water absorption and an increase in water retention capacity. The exceptions are shrinkage and vapor permeability, which deteriorate slightly (an increase in shrinkage by 13%, a decrease in vapor permeability by 25%).

Masonry mortars with an aggregate made of finely dispersed ceramic waste are characterized by maximum adhesion to ceramic bricks. Due to the affinity of the compositions in the contact zone, an identical structure is formed ensuring the solidity of the masonry [29].

The use of ceramic waste as a partial replacement for cement and a hydraulic additive

As mentioned earlier, even in the time of Byzantium, and then in Ancient Russia, crushed brick was actively used in the preparation of mortars. Modern scientists have established that finely ground brick can have pozzolan activity, this is due to the transition of crystalline clay structures into amorphous compounds during brick firing in the temperature range 700-1200 °C. Ceramic brick waste contains quartz and feldspars compounds (SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , MgO), when it combined with calcium hydroxide (lime) and water during hardening, are capable of forming calcium hydroaluminates and hydrosilicates.

The conditions of the reaction are pH of the solution is 12.5 and the temperature is 25 °C [25, 36-38].

According to [39], the basis of the reactivity of burnt clay materials is that at a temperature of 600-800 °C,

the main component of clay - inert kaolinite ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) is dehydrated and passes into active kaolinite anhydrite – metakaolinite ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$), amorphized as a result of deletion of hydrate water. When such solids interact with calcium oxide hydrate, calcium hydrosilicates CSH(B) and selenite hydrate $2\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ are formed. When firing clays at higher temperatures 900-1000°C chemical activity decreases due to the fact that the metakaolinite structure is rearranged, and at 1000-1200 °C low-activity mullite and cristobalite are formed, at temperatures above 1200°C the corresponding glasses are formed, therefore, materials obtained by firing clays in the temperature range 900-1200°C are characterized by reduced activity relative to burnt clay materials obtained at 600-800 °C.

The activity of mineral raw materials depends on the surface energy of the bonds. A lower surface bond energy indicates a lower energy consumption to break the corresponding chemical bond. In [13], a study was conducted on the effect of the particle size of finely ground brick powder on its pozzolan activity and the properties of

Активность минерального сырья зависит от поверхностной энергии связей. Более низкая энергия поверхностной связи указывает на меньшее потребление энергии для разрыва соответствующей химической связи. В работе [13] проведено исследование влияния размера частиц тонкомолотого порошка из кирпичного боя на его пуццолановую активность и свойства цементного теста. Установлено, что при уменьшении среднего диаметра частиц кирпичного порошка происходит снижение химической связи Si-O и Al-O. Активность порошка повышается благодаря тому, что в процессе механического помола могут образовываться искажения и несовершенства кристаллической решетки тетраэдров кремнезема и октаэдров оксида алюминия, образуются фазы с высокой активностью и низкой поверхностной энергией.

Установлено, что с заменой части цемента на тонкомолотый кирпичный бой и уменьшением размера его частиц понижается содержание портландита ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) в цементной пасте, что свидетельствует о проявлении кирпичным порошком пуццолановой активности (вступает в реакцию с $\text{Ca}(\text{OH})_2$ и образует гидросиликаты кальция). Вместе с тем для проявления пуццолановой активности кирпичной крошкой необходимо больше времени, по сравнению со шлаками и летучей золой, что связано с тем, что кирпичный порошок имеет медленную кинетику реакции из-за большей степени кристаллизации [13].

Оптимальный уровень замены цемента на тонкомолотую крошку керамического кирпича находится в пределах 10-25%. При таком уровне замены основные эксплуатационные и физико-механические характеристики бетона либо не претерпевают значительных изменений, либо улучшаются. При этом полученные в результате пуццолановой активности и дополнительной гидратации непрореагировавших зерен цемента дополнительные гидраты увеличивают плотность матрицы и улучшают структуру цементного камня. Отмечается уменьшение количества макропор, утоньшение самой структуры пор в цементном камне, снижение сорбционной способности и проникновения хлорид-ионов, повышение сульфатостойкости. Кроме того, отмечается увеличение прочности таких композиций на поздних сроках по сравнению с контрольными образцами [25,36,37,40-42].

В работе [43] было проведено исследование, направленное на изучение свойств бетонов с заменой части вяжущего смесью тонкомолотого порошка из переработанного бетона и тонкомолотого порошка из кирпичного боя. Установлено, что увеличение доли переработанного тонкодисперсного наполнителя на основе кирпича и бетона уменьшает подвижность смеси, влияние на подвижность усиливается при увеличении доли порошка на основе кирпичного боя, кроме того, чем более выражена пористая структура наполнителя, тем больше вероятность что часть воды и пластификатора будет поглощена этими порами. Пористость же самого получаемого бетона по результатам авторов растет с увеличением доли переработанного наполнителя, а структура становится рыхлой, что связано с пористостью порошка на основе кирпичного и бетонного лома и тем, что активность такого наполнителя ниже, чем у цемента. Полученные образцы с коэффициентом замещения цемента 15% по прочностным характеристикам не уступали контрольным составам, однако, при увеличении доли замены до 45% механические характеристики сильно

cement paste. It was found that with a decrease in the average diameter of brick powder particles, the chemical bond Si-O and Al-O decreases. The activity of the powder increases due to the fact that distortions and imperfections of the crystal structure of silica tetrahedra and aluminum oxide octahedra can form during mechanical grinding, phases with high activity and low surface energy are formed.

It was found that with the replacement of a part of cement with finely ground brick and a decrease in the size of its particles, the content of portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) in cement paste decreases which indicates the manifestation of the brick powder of pozzolan activity (reacts with $\text{Ca}(\text{OH})_2$ and forms calcium hydrosilicates). At the same time, more time is needed for the manifestation of pozzolan activity by brick chips, compared with slags and fly ash, which is due to the fact that brick powder has a slow reaction kinetics due to a greater degree of crystallization [13].

The optimal level of replacement of cement with finely ground powder of ceramic bricks is in the range of 10-25%. At this level of replacement, the basic operational and physico-mechanical characteristics of concrete either do not undergo significant changes or improve. At the same time, additional hydrates obtained as a result of pozzolan activity and additional hydration of unreacted cement grains increase the density of the matrix and improve the structure of the cement stone. There is a decrease in the number of macropores, a thinning of the pore structure itself in cement stone, a decrease in sorption capacity and penetration of chloride ions, and an increase in sulfate resistance. In addition, there is an increase in the strength of such compositions at a later date compared with control samples [25,36,37,40-42].

In [43], a study was conducted aimed at studying the properties of concretes with the replacement of a part of the binder of mixture of fine-ground powder from recycled concrete and brick waste. It was found that an increase in the proportion of recycled fine-dispersed filler based on brick and concrete reduces the plasticity of the mixture, the effect on plasticity increases with an increase in the proportion of powder based on brick waste, in addition, the more pronounced the porous structure of the filler, the more likely it is that part of the water and plasticizer will be absorbed by these pores. According to the authors, the porosity of the resulting concrete increases with an increase in the proportion of recycled filler, and the structure becomes loose, which is due to the porosity of the powder based on brick and concrete scrap and the fact that the activity of such filler is lower than that of cement. The obtained samples with a cement substitution coefficient of 15% were not inferior in strength characteristics to the control compositions, however, with an increase in the proportion of replacement to 45%, the mechanical characteristics decrease greatly, therefore such a filler is suitable for partial replacement of cement only within reasonable limits.

Mixing recycled powder from brick waste with recycled powder from scrap concrete can contribute to the activation of the pozzolanic reaction in concretes based on them. In addition, it is possible to improve the mechanical characteristics of concrete based on recycled powder by adding 10% calcium hydroxide to the composition, which will ensure the completeness of the reaction and compensate for the decrease in the content of hydration products

ухудшаются, поэтому такой наполнитель пригоден для частичной замены цемента только в разумных пределах.

Смешение переработанного порошка из отходов кирпича с переработанным порошком из отходов бетонного лома может способствовать активизации пуццолановой реакции в бетонах на их основе. Кроме того, можно повысить механические характеристики бетона на основе переработанного порошка добавкой в состав 10% гидроксида кальция, который обеспечит полноту протекания реакции и компенсирует снижение содержания продуктов гидратации [10]. Также, повысить прочностные характеристики такого рода изделий можно с помощью повышения температуры отверждения и модификации тонкомолотой добавки жидким стеклом и растворами щелочей [36,44].

Другие способы рециклинга отходов строительной керамики

Помимо использования в качестве заполнителя и активной добавки в традиционных бетонах отходы керамического кирпича возможно эффективно применять при производстве разного рода композиционных шлакощелочных вяжущих.

В работе [7] представлено исследование активированных щелочью гибридных цементов на основе отходов красного глиняного кирпича. Была получена максимальная прочность на сжатие образцов 54,38 МПа через 28 дней твердения при комнатной температуре при использовании только отходов кирпича в присутствии щелочного активатора NaOH и $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$. Совместное присутствие 20% портландцемента и силиката натрия в щелочном активаторе позволило получить образцы прочностью на сжатие 102,6 МПа через 28 дней твердения при комнатной температуре.

Работа [16] посвящена разработке составов композиционных шлакощелочных вяжущих с добавками молотого боя керамического кирпича, растворов и бетонов на их основе и исследованию их свойств. Установлено, что добавка молотого боя керамического кирпича при содержании до 30% позволяет увеличить прочность шлакощелочных вяжущих до 30-32%, а при содержании 60% позволяет получать равнопрочные с бездобавочными составы. Введение 30% добавки молотого боя керамического кирпича способствует повышению степени гидратации и образованию более плотной, однородной тонкозернистой структуры. Отмечается, что бетоны на шлакощелочных вяжущих с добавкой молотого керамического кирпича имеют пониженный уровень высолообразования по сравнению с такими же бездобавочными бетонами. В результате данного исследования были разработаны составы рядовых, высокопрочных и особо быстротвердеющих шлакощелочных бетонов с добавкой молотого боя керамического кирпича классов по прочности от B20 до B80, по водонепроницаемости W10-W25, по морозостойкости от F300 до F800. Вместе с тем, расчетная стоимость такого композиционного шлакощелочного вяжущего по данным авторов ниже стоимости портландцемента от 30% до 300% в зависимости от марки вяжущего и вида затворителя.

Отходы строительной керамики можно повторно использовать в качестве компонента сырьевой шихты для производства нового кирпича. Анализ данных, представленных в работе [45] позволяет сделать вывод, что увеличение доли кирпичного порошка в сырьевой шихте повышает водопоглощение и в то же время прослеживается

[10]. Also, it is possible to increase the strength characteristics of such products by increasing the curing temperature and modifying the finely ground additive with water-glass and alkali solutions [36,44].

Other ways of recycling construction ceramics waste

In addition to being used as an aggregate and an active additive in traditional concretes, ceramic brick waste can be effectively used in the production of various kinds of composite slag-alkali binders.

Work [7] presents a study of alkali-activated hybrid cements based on red clay brick waste. The maximum compressive strength of the samples was 54.38 MPa after 28 days of hardening at room temperature using only brick waste in the presence of an alkaline activator NaOH and $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$. The combined presence of 20% Portland cement and sodium silicate in the alkaline activator made it possible to obtain samples with a compressive strength of 102.6 MPa after 28 days of hardening at room temperature.

The work [16] is devoted to the development of compositions of composite slag-alkali binders with additives of ground ceramic bricks, mortars and concretes based on them and the study of their properties. It was found that the addition of ground ceramic brick at a content of up to 30% allows to increase the strength of slag-alkali binders to 30-32%, and at a content of 60% allows to obtain equally strong with additive-free compositions. The introduction of a 30% additive of ground ceramic brick helps to increase the degree of hydration and the formation of a denser, homogeneous fine-grained structure. It is noted that concretes based on slag-alkali binders with the addition of ground ceramic bricks have a reduced level of salinity formation compared with the same additive-free concretes. As a result of this study, compositions of ordinary, high-strength and especially fast-hardening slag-alkali concretes with the addition of ground ceramic brick of strength classes from B20 to B80, water resistance classes W10-W25, frost resistance classes from F300 to F800 were developed. At the same time, the estimated cost of such a composite slag-alkali binder, according to the authors, is lower than the cost of Portland cement from 30% to 300%, depending on the grade of binder and type of solvent.

The waste of building ceramics can be reused as a component of the raw material charge for the production of new bricks. An analysis of the data presented in [45] allows us to conclude that an increase in the proportion of brick powder in the raw material mixture increases water absorption and at the same time a decrease in apparent density, total shrinkage, coefficient of thermal conductivity and compressive strength of samples is observed. Thus, the authors [45] recommend the optimal content of ceramic brick combat in the raw material charge of 10-30%, since at values greater than 30% the compressive strength decreases below the set of standart values, and at values less than 10% there is no significant decrease in the thermal conductivity coefficient. Products made of low-melting clay with the addition of ceramic brick powder have sufficient color saturation and purity of tone. Using this technology, with a limitation of brick waste of 10-30%, it is

динамика снижения средней плотности, общей усадки, коэффициента теплопроводности и прочности образцов при сжатии. Таким образом авторы [45] рекомендуют оптимальное содержание боя керамического кирпича в сырьевой шихте 10-30%, так как при значениях более 30% снижается прочность при сжатии ниже нормируемого, а при значениях меньших 10% не наблюдается существенного снижения коэффициента теплопроводности. Изделия из легкоплавкой глины с добавкой порошка боя керамического кирпича имеют достаточную цветовую насыщенность и чистоту тона. По такой технологии с ограничением содержания порошка кирпичного боя 10-30% возможно получать керамический кирпич марок по прочности M125, M150.

Также бой строительной керамики, как и другие отходы строительства и сноса зданий возможно применять в дорожном строительстве в качестве отсыпки и оснований для дорожных одежд.

Авторами работы [46] установлено, что при устройстве оснований дорожных одежд возможно применение укрепленных цементом минеральных материалов с заменой до 50% на отходы, образующиеся от сноса зданий и сооружений. При этом применение в таких работах модификатора MADOR позволяет добиться физико-механических характеристик сопоставимых с характеристиками обработанного цементом щебеночно-песчаных смесей. Прочность при сжатии образцов обработанного цементом щебеночно-песчаных смесей и таких же смесей с применением модификатора и 50% заменой на отходы, образующиеся от сноса зданий и сооружений, отличается не более чем на 1%.

В работе [47] авторы приходят к выводу, что такое вторичное сырье как бой кирпича, лом бетона, вторичный щебень, асфальтовая крошка обладает более низкими физико-механическими показателями по сравнению с гранитным щебнем и его не целесообразно рекомендовать на дорогах с повышенной нагрузкой, однако его рационально использовать при строительстве дорог более низких категорий, внутризаводских и транспортно-технологических путей предприятий. Большим преимуществом вторичного щебня в этом случае является то, что он обладает более низкой себестоимостью. При этом, как отмечают авторы во вторичном щебне, как и в природном количестве вредных примесей не превышает нормируемых значений.

Заключение

Результаты проведенного анализа современных исследований посвященных переработке отходов строительной керамики можно обобщить следующими основными выводами:

1. Полиминеральная структура керамического камня чаще всего представлена различными полевыми шпатами (анортит – $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$, альбит – $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$), β -кварцем, форстеритом – $2\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$, магнезиоферритом – $\text{MgO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$, гематитом – Fe_2O_3 , метакаолинитом – $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$, муллито – $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ и стеклофазой.

2. Технология подготовки отходов строительной керамики состоит из нескольких этапов: отделение от других отходов, измельчение, сортировка. Крупные частицы более 5 мм используются в качестве крупного заполнителя. Частицы размером 0,14-5 мм могут быть использованы в

possible to obtain ceramic bricks of strength grades M125, M150.

Also, the waste of building ceramics, as well as other waste from construction and demolition of buildings, can be used in road construction as a filling and bases for road surfaces.

The authors of the work [46] found that when laying the foundations of roadways, it is possible to use cement-reinforced mineral materials with up to 50% replacement aggregate by waste generated from the demolition of buildings and structures. The use of the MADOR modifier in such works makes it possible to achieve physical and mechanical characteristics comparable to those of crushed stone-sand mixtures treated with cement. The compressive strength of samples of cement-treated crushed stone-sand mixtures and the same mixtures with the use of a modifier and 50% replacement of aggregate by waste generated from the demolition of buildings and structures differs by no more than 1%.

In [47], the authors conclude that such secondary raw materials as brick waste, concrete scrap, secondary stone, asphalt wreckage have lower physical and mechanical properties compared to granite stone and it is not advisable to recommend it on roads with increased load, but it is rational to use it in the construction of lower roads categories, intra-factory and transport-technological routes of enterprises. The big advantage of secondary crushed stone in this case is that it has a lower cost. At the same time, as the authors note, in secondary crushed stone, as in natural, the amount of harmful impurities does not exceed the normalized values.

Conclusions

The results of the analysis of modern research on the recycling of construction ceramics waste can be summarized by the following main conclusions:

1. The polymineral structure of ceramic stone is most often represented by various feldspar (anorthite – $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$, albite – $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 6\text{SiO}_2$), β -quartz, forsterite – $2\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$, magnesioferrite – $\text{MgO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$, hematite – Fe_2O_3 , metakaolinite – $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$, mullite – $3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 2\text{SiO}_2$ and glass phase.

2. The technology of waste preparation of building ceramics consists of several stages: separation from other waste, crushing, sorting. Large particles larger than 5 mm are used as a coarse aggregate. Particles of 0.14-5 mm in size can be used as a fine aggregate or can be combined

качестве мелкого заполнителя или могут быть совместно с тонкими частицами (0-0,14 мм) измельчены в тонкодисперсный порошок.

3. Для дробления и измельчения строительных отходов и, в частности, отходов строительной керамики рационально применять щековые, конусные, валовые, ударные дробилки, а также вращающиеся шаровые, вибрационные и центробежные мельницы.

4. При помоле клинкера или шлакощелочных вяжущих с добавкой боя керамического кирпича уменьшается время помола, что связано с низкими абразивными свойствами боя керамики и способствует снижению потребления энергии.

5. Заполнитель на основе отходов керамического кирпичного боя обладает такой же пористостью и прочностью что и исходный материал – кирпич, помимо этого обладает высокой водопотребностью, более низкой плотностью чем натуральные заполнители, угловатой и неправильной формой.

6. При замене натуральных заполнителей на заполнители на основе отходов строительной керамики в среднем рекомендуется не превышать долю замены 20-30%. При этом целесообразно использовать различные добавки: пластифицирующие и улучшающие реотехнологические, физико-механические свойства бетона.

7. Тонкомолотые отходы керамического кирпича обладают пуццолановой активностью и при затворении с гидроксидом кальция могут образовывать гидросиликаты и гидроалюминаты кальция.

8. При использовании тонкомолотого кирпичного боя в качестве частичной замены цемента в среднем рекомендуется не превышать долю замены 10-25%. При этом за счет пуццолановой реакции улучшается структура цементного камня, увеличивается прочность, уменьшается количество макропор, снижается проникновение хлорид-ионов, повышается сульфатостойкость.

9. Повысить реакционную способность порошка из кирпичного боя можно путем увеличения удельной поверхности, смешения с порошком молотого лома бетона, добавкой гашеной извести, изменением температуры отверждения, обработкой жидким стеклом и растворами щелочей.

10. Помимо использования отходов керамики в качестве сырья для традиционных бетонов и растворов их также можно применять в производстве активированных щелочью цементов и шлакощелочных вяжущих, а также как сырье для производства нового кирпича и устройства оснований дорожных одежд.

11. Отходы строительной керамики целесообразно применять как вторичное сырье для производства строительных материалов. При этом возможно не только получение материалов равных по качеству изделиям на натуральном сырье, но и с повышенными характеристиками. Рециклинг отходов строительства и строительной керамики, в частности, способствует снижению отрицательного влияния на окружающую среду, уменьшению расходов на производство строительных материалов и снижению потребления натурального кондиционного сырья.

Литература:

1. Раппопорт П.А. Строительное производство Древней Руси (X-XIII в.) [Электронный ресурс]. URL: <https://tehlib.com/arhitektura/stroitel-ny-e-materialy-izvest-i-ras/> (Дата обращения 20.01.2024).

with fine particles (0-0.14 mm) crushed into a fine powder.

3. It is rational to use jaw, cone, roller, impactor crushers, as well as rotating ball, vibrating and centrifugal mills for crushing and grinding construction waste and in particular waste of construction ceramics.

4. When grinding clinker or slag-alkali binders with the addition of ceramic brick waste, the grinding time is reduced, which is due to the low abrasive properties of ceramic waste and helps to reduce energy consumption.

5. The aggregate based on the waste of ceramic brick waste has the same porosity and strength as the original material – brick. In addition, it has a high water demand, lower density than natural aggregate, angular and irregular shape.

6. When replacing natural fillers with fillers based on construction ceramic waste, on average, it is recommended not to exceed the replacement rate of 20-30%. At the same time, it is advisable to use various additives: plasticizing and improving the technological, physical and mechanical properties of concrete.

7. Finely ground ceramic brick waste has pozzolan activity and, when combined with calcium hydroxide, can form calcium hydrosilicates and hydroaluminates.

8. When using finely ground brick as a partial replacement of cement, it is recommended on average not to exceed the replacement rate of 10-25%. At the same time, due to the pozzolan reaction, the structure of the cement stone improves, the strength increases, the number of macropores decreases, the penetration of chloride ions decreases, and the sulfate resistance increases.

9. It is possible to increase the reactivity of the powder from the brick waste by increasing the specific surface area, mixing it with ground scrap concrete, adding slaked lime, changing the curing temperature, treating mixture with water-glass and alkali solutions.

10. In addition to using ceramic waste as raw materials for traditional concretes and mortars, they can also be used in the production of alkali-activated cement and slag-alkali binders, as well as raw materials for the production of new bricks and the construction of base of road surfacings.

11. It is advisable to use construction ceramic waste as a secondary raw material for the production of building materials. At the same time, it is possible not only to obtain materials of equal quality to products based on natural raw materials, but also with improved characteristics. Recycling of construction waste and building ceramics waste, in particular, helps to reduce the negative impact on the environment, reduce the cost of producing building materials and reduce the consumption of natural conditional raw materials.

References:

1. Rappoport P.A. Construction production of Ancient Russia (X-XIII centuries). URL: <https://tehlib.com/arhitektura/stroitel-ny-e-materialy-izvest-i-ras/> (In Russian).

2. Аксенова Л.Л., Бугаенко Л.В., Хлебених С.Н. Переработка и утилизация строительных отходов для получения эффективных зеленых композитов. // *Современные тенденции технических наук: материалы III Международной научной конференции, октябрь 2014. Казань.* — 2014. — С. 63-65.
3. Попов К.Н., Каддо М.Б. Строительные материалы и изделия: Учеб. — Москва: Высш. шк., 2001. — 367с.: ил.
4. Яценко Н.Д., Зубехин А.П. Научные основы инновационных технологий керамического кирпича и управление его свойствами в зависимости от химико-минералогического состава сырья. // *Строительные материалы.* — 2014. — С.28-31.
5. Зубехин А.П., Яценко Н.Д., Филатова Е.В., Боляк В.И., Веревкин К.А.. Керамический кирпич на основе различных глин: фазовый состав и свойства. // *Строительные материалы.* — 2010. — С.47-49.
6. Зубехин А.П., Бельмаз Н.С., Филатова Е.В. Фазовый состав керамического кирпича из глин различного состава. // *Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки.* — 2003. — №2. — С.90-92.
7. Robayo R.A., Mulford A., Munera J., Gutiérrez R.M.de. Alternative cements based on alkali-activated red clay brick waste. *Construction and Building Materials.* — 2016. — Vol. 128. — Pp. 163–169. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.10.023
8. Степанова М.П. Технология строительных композитов на основе портландито-алюмосиликатной контактно-конденсационной системы твердения. автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05. Воронеж. — 2013. — 23 с.
9. Баранов Е.В., Шелковникова Т.И. Особенности получения керамического кирпича светлых тонов. // *Вестник БГТУ им. В.Г.Шухова.* — 2016. — №7. — С.18-21.
10. Tang Q., Ziming M., Wu H., Wang W. The utilization of eco-friendly recycled powder from concrete and brick waste in new concrete: A critical review. *Cement and concrete composites.* — 2020. — No.114. DOI:10.1016/j.cemconcomp.2020.103807.
11. Fediuk R.S., Ibragimov R.A., Lesovik V.S., Pak A.A., Krylov V.V., Poleschuk M.M., Stoyushko N.Y., Gladkova N.A. Processing equipment for grinding of building powders. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering.* — 2018. doi:10.1088/1757-899X/327/4/042029
12. Веригин Ю.А., Веригина Я.Ю. Теоретические основы процессов измельчения вещества в технологии производства строительных материалов. // *Ползуновский вестник.* — 2013. — №4-1. — С.51-54.
13. 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. DOI:10.1016/j.cemconcomp.2020.103807.
14. Xu C., Yang X. Study on Activation of Waste Clay Brick Powder. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering.* — 2020. DOI:10.1088/1757-899X/744/1/012028.
15. Naceri A., Hamina M.C. Use of waste brick as partial replacement of cement in mortar. *Waste management.* — 2009. — No. 29. — Pp.2378-2384. DOI:10.1016/j.wasman.2009.03.026
16. Соколов А.А. Композиционные шлакощелочные вяжущие с добавками молотого боя керамического кирпича, растворы и бетоны на их основе: автореф. дисс. ... канд. техн. наук. 05.23.05. Казань. — 2006. — 20 с.
17. Муртазаев С-А.Ю., Хадисов В.Х., Хаджиев М.Р. Использование отходов производственного брака и керамического боя кирпича для приготовления легкого бетона // *Труды грозненского государственного нефтяного технического университета им. академика М.Д. Миллионщикова.* — 2011. — № 11. — С. 157–162.
18. Хаджиев М.Р. Бетонные композиты на заполнителях из керамического кирпичного боя // *Евразийский союз ученых.* — 2014. — №5. — С.37–40.
19. Хаджиев М.Р. Керамобетон на основе вторичных заполнителей из кирпичного боя для мелкоштучных стеновых изделий: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05. Грозный. — 2015. — 25 с.
20. Хаджиев М.Р., Хадисов В.Х. Мелкоштучные стеновые изделия из легкого керамобетона для ограждающих конструкций зданий и сооружений // *Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки.* — 2014. — № 4. — С.137–142.
2. Aksenova L.L., Bugaenko L.V., Hlebenskih S.N. Recycling and disposal of construction waste to produce efficient green composites. // *Sovremennye tendencii tekhnicheskikh nauk: materialy III Mezhdunarodnoj nauchnoj konferencii, orctober 2014. Kazan.* — 2014. — Pp. 63-65 (In Russian).
3. Popov K.N., Kaddo M.B. Building materials and products. —Moscow. — 2001. — 367 p. (In Russian).
4. Yatsenko N.D., Zubekhin A.P. Scientific foundations of innovative technologies of ceramic bricks and management of its properties depending on the chemical and mineralogical composition of raw materials. // *Stroitel'nye materialy.* — 2014. — Pp.28-31 (In Russian).
5. Zubekhin A.P., Yatsenko N.D., Filatova E.V., Bolyak V.I., Verevkin K.A. Ceramic bricks based on various clays: phase composition and properties. // *Stroitel'nye materialy.* — 2010. — Pp.47-49 (In Russian).
6. Zubekhin A.P., Belmaz N.S., Filatova E.V. The phase composition of ceramic bricks made of clays of various compositions. // *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Severo-Kavkazskij region. Tekhnicheskie nauki.* — 2003. — No.2. — Pp.90-92 (In Russian).
7. Robayo R.A., Mulford A., Munera J., Gutiérrez R.M.de. Alternative cements based on alkali-activated red clay brick waste. *Construction and Building Materials.* — 2016. — Vol. 128. — Pp. 163–169. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2016.10.023
8. Stepanova M.P. The technology of building composites based on a Portland-aluminosilicate contact-condensation hardening system: *abstract of dis. ... candidate of technical sciensies: 05.23.05. Voronezh.* — 2013. — 23 Pp. (In Russian).
9. Baranov E.V., Shelkovnikova T.I. Features of obtaining ceramic bricks in light tones. // *Vestnik BGTU im. V.G. Shuhova.* — 2016. — No.7. — Pp.18-21. (In Russian).
10. Tang Q., Ziming M., Wu H., Wang W. The utilization of eco-friendly recycled powder from concrete and brick waste in new concrete: A critical review. *Cement and concrete composites.* — 2020. — No.114. DOI:10.1016/j.cemconcomp.2020.103807.
11. Fediuk R.S., Ibragimov R.A., Lesovik V.S., Pak A.A., Krylov V.V., Poleschuk M.M., Stoyushko N.Y., Gladkova N.A. Processing equipment for grinding of building powders. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering.* — 2018. doi:10.1088/1757-899X/327/4/042029
12. Verigin Yu.A., Verigina Ya.Yu. Theoretical foundations of the processes of grinding substances in the technology of production of building materials. // *Polzunovskij vestnik.* — 2013. — No.4-1. — Pp..51-54 (In Russian).
13. 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. DOI:10.1016/j.cemconcomp.2020.103807.
14. Xu C., Yang X. Study on Activation of Waste Clay Brick Powder. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering.* — 2020. DOI:10.1088/1757-899X/744/1/012028.
15. Naceri A., Hamina M.C. Use of waste brick as partial replacement of cement in mortar. *Waste management.* — 2009. — No. 29. — Pp.2378-2384. DOI:10.1016/j.wasman.2009.03.026
16. Sokolov A.A. Composite slag-alkali binders with additives of ground ceramic brick, mortars and concretes based on them: *abstract of dis. ... candidate of technical sciensies. 05.23.05. Kazan.* — 2006. — 20 p. (in Russian).
17. Murtazaev S-A.U., Hadisov V.H., Hadzhiev M.R. The use of industrial waste and ceramic brick scrap for the preparation of lightweight concrete // *Trudy groznenskogo gosudarstvennogo neftyanogo tekhnicheskogo universiteta im. akademika M.D. Millionshchikova.* — 2011. — No. 11. — Pp. 157–162 (in Russian).
18. Hadzhiev M.R. Concrete composites on aggregates from ceramic brick scrap // *Eurasian union of scientists.* — 2014. — No. 5. — Pp.37–40 (in Russian).
19. Hadzhiev M.R. Ceramic concrete based on secondary aggregates from brick scrap for small-piece wall products. *abstract of dis. ... candidate of technical sciensies. 05.23.05. Grozny.* — 2015. — 25 p. (in Russian).
20. Hadzhiev M.R., Hadisov V.H. Small-piece wall products made of lightweight ceramic concrete for enclosing structures of buildings and structures // *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki.* — 2014. — No. 4. — Pp.137–142 (in Russian).

21. Батдалов М.М., Хадисов В.Х. Использование кирпичного боя для производства строительных композитов // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2011. – № 23. – С.102-105.
22. Муртазаев С.А.Ю., Сайдумов М.С., Хаджиев М.Р., Хадисов В.Х. Ячеистый керамобетон на основе заполнителей из вторичного сырья // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – 2014. – №3 (34). – С.74-81.
23. Dina M. Sadek. Physico-mechanical properties of solid cement bricks containing recycled aggregates. *Journal of advanced research*. – 2012. – No. 3. – Pp.253-260. DOI:10.1016/j.jare.2011.08.001.
24. Debieb F., Kenai S. The use of coarse and fine crushed bricks as aggregate in concrete. *Construction and building materials*. – 2008. – No. 22(5). – Pp.886-893. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2006.12.013.
25. 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. DOI:10.1016/j.aej.2013.12.003.
26. Романенко И.И. Применение лома глиняного кирпича в качестве крупного заполнителя бетонов. // Инженерный вестник Дона. – 2022. – №12.
27. 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.
28. 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. DOI:10.1155/2017/7279138.
29. Аласханов А.Х. Полифункциональные строительные композиты на основе техногенного сырья: автореф. дис. ... доктора техн. наук: 2.1.5. Грозный. – 2023. – 41с.
30. Brito J., Pereira A.S., Correia J.R., Mechanical behaviour of non-structural concrete made with recycled ceramic aggregates. *Cement and Concrete Composites*. – 2005. – No. 27. – Pp. 429–433. DOI:10.1016/j.cemconcomp.2004.07.005.
31. Cachim P. B. Mechanical properties of brick aggregate concrete. *Construction and Building Materials*. – 2009. – No. 23. – Pp. 1292–1297. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2008.07.023.
32. Salahaldeen A. Properties of concrete using crushed brick as coarse aggregate. *International Journal of Advances in Mechanical and Civil Engineering*. – 2019. – Vol. 3. – Pp.44-47.
33. Torkittikul, P., Chaipanich, A. Utilization of ceramic waste as fine aggregate within Portland cement and fly ash concretes. *Cement and Concrete Composites*. – 2010. – No.32. – Pp. 440–449. DOI:10.1016/j.cemconcomp.2010.02.004.
34. Успанова А.С., Исламов А.А., Куразов М.С., Иноркаев И.С.-А., Вахажи Х.-М.М. Строительные штукатурные смеси на основе мелкой фракции продукта дробления кирпичного боя и производственного брака кирпича // Фундаментальные основы строительного материаловедения. Сборник докладов международного онлайн конгресса. – Белгород. – 2017. – С. 906–913.
35. Silva J., Brito de J., Veiga R. Incorporation of fine ceramics in mortars. *Construction and Building Materials*. – 2009. – Vol.23. – Pp.556–564. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2007.10.014.
36. 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.
37. Goncalves J.P., Tavares L.M., Toledo Filho R.D., Fairburn E.M.R. Performance evaluation of the effectiveness of cement slurries modified with metakaolin or ground bricks. *Building and Building Materials*. – 2009. – Vol. 23. – No.5. – Pp.1971-1979. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2008.08.027.
38. 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. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2012.01.002.
39. Волженский А.В., Буров Ю.С., Колокольников В.С. Минеральные вяжущие вещества: Учеб. – Москва: Издательство литературы по строительству, 1966. – 406 с.
21. Batdalov M.M., Hadisov V.H. The use of brick scrap for the production of building composites // *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. – 2011. – No. 23. – Pp.102-105. (in Russian).
22. Murtazaev S-A.U., Sajdumov M.S., Hadzhiev M.R., Hadisov V.H. Cellular ceramic concrete based on aggregates from secondary raw materials // // *Vestnik Dagestanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Tekhnicheskie nauki*. – 2014. – No. 3 (34). – Pp.74-81 (in Russian).
23. Dina M. Sadek. Physico-mechanical properties of solid cement bricks containing recycled aggregates. *Journal of advanced research*. – 2012. – No. 3. – Pp.253-260. DOI:10.1016/j.jare.2011.08.001.
24. Debieb F., Kenai S. The use of coarse and fine crushed bricks as aggregate in concrete. *Construction and building materials*. – 2008. – No. 22(5). – Pp.886-893. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2006.12.013.
25. 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. DOI:10.1016/j.aej.2013.12.003.
26. Romanenko I.I. The use of clay brick scrap as a large aggregate of concrete. // *Inzhenernyj vestnik Dona*. – 2022. – No.12 (in Russian).
27. 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.
28. 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. DOI:10.1155/2017/7279138.
29. Alashanov A.H. Multifunctional building composites based on technogenic raw materials: *abstract of dis. ... doctor of technical sciences*. 2.1.5. Grozny. – 2023. – 41 p. (in Russian).
30. Brito J., Pereira A.S., Correia J.R., Mechanical behaviour of non-structural concrete made with recycled ceramic aggregates. *Cement and Concrete Composites*. – 2005. – No. 27. – Pp. 429–433. DOI:10.1016/j.cemconcomp.2004.07.005.
31. Cachim P. B. Mechanical properties of brick aggregate concrete. *Construction and Building Materials*. – 2009. – No. 23. – Pp. 1292–1297. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2008.07.023.
32. Salahaldeen A. Properties of concrete using crushed brick as coarse aggregate. *International Journal of Advances in Mechanical and Civil Engineering*. – 2019. – Vol. 3. – Pp.44-47.
33. Torkittikul, P., Chaipanich, A. Utilization of ceramic waste as fine aggregate within Portland cement and fly ash concretes. *Cement and Concrete Composites*. – 2010. – No.32. – Pp. 440–449. DOI:10.1016/j.cemconcomp.2010.02.004.
34. Uspanova A.S., Islamov A.A., Kurazov M.S., Inorkaev I.S.-A., Vahazhi H.-M.M. Construction plaster mixtures based on a fine fraction of the product of crushing of brick scrap and production waste of bricks // *Fundamentalnye osnovy stroitel'nogo materialovedeniya. Sbornik докладов mezhdunarodnogo onlajn kongressa*. – Belgorod. – 2017. – Pp. 906–913 (in Russian).
35. Silva J., Brito de J., Veiga R. Incorporation of fine ceramics in mortars. *Construction and Building Materials*. – 2009. – Vol.23. – Pp.556–564. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2007.10.014.
36. Romanenko I.I., Petrovnina I.N., Elichev K.A., Romanenko M.I. Awakening of hydraulic activity of fillers and aggregates from clay bricks scrap // *Inzhenernyj vestnik Dona*. – 2022. – No. 11(95). – Pp.563–572 (in Russian).
37. Goncalves J.P., Tavares L.M., Toledo Filho R.D., Fairburn E.M.R. Performance evaluation of the effectiveness of cement slurries modified with metakaolin or ground bricks. *Building and Building Materials*. – 2009. – Vol. 23. – No.5. – Pp.1971-1979. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2008.08.027.
38. 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. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2012.01.002.
39. Volzhenskij A.V., Burov Yu.S., Kolokol'nikov V.S. Mineral binders. – Moscow. – 1966. – 406 p. (in Russian).
40. Toledo Filho R.D., Goncalves J.P., Americano B.B., Fairbairn E.M.R. Potential for use of crushed waste calcined-clay brick as supplementary cementitious material in Brazil. *Cement and concrete*

40. Toledo Filho R.D., Gonçalves J.P., Americano B.B., Fairbairn E.M.R. Potential for use of crushed waste calcined-clay brick as supplementary cementitious material in Brazil. *Cement and concrete research*. – 2007. – No.37. – Pp.1357-1365. DOI:10.1016/j.cemconres.2007.06.005.
41. O'Farrell M., Sabir B.B., Wild S. Strength and chemical resistance of mortars containing brick manufacturing clays subjected to different treatments. *Cement and concrete composites*. – 2006. No.28. – Pp.790-799. DOI:10.1016/j.cemconcomp.2006.05.014.
42. 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. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.03.307.
43. Liu C., Liu H., Wu J. Effect of Recycled Mixed Powder on the Mechanical Properties and Microstructure of Concrete. *Journal of renewable materials*. – 2022. – Vol.10. – No.5. – Pp.1397-1414. DOI:10.32604/jrm.2022.018386.
44. Liu, S., Dai, R., Cao, K. Zhiyang G. The Role of Sintered Clay Brick Powder During the Hydration Process of Cement Pastes. *Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Civil Engineering*. – 2017. – No.41. – Pp.159–165. DOI:10.1007/s40996-017-0049-0.
45. Фоменко А.И., Грызлов В.С., Каптюшина А.Г. Отходы керамического кирпича как эффективный компонент строительных композитов. // *Современные наукоемкие технологии*. – 2016. – №2. – С.260-264.
46. Подольский В.П., Матвиенко Ф.М., Быкова А.А., Авдеева Н.Ю. Разработка технологий применения отходов от сноса зданий для устройства укрепленных цементом оснований автодорог с использованием модификатора MADOR. // *Научный журнал строительства и архитектуры*. – 2023. – №4. – С.156-162.
47. Губская А.Г., Гапотченко А.П., Сенатова К.С., Олецькая Л.П. Возможность замены природного щебня и гравия вторичным сырьем при строительстве и ремонте дорог. // *Дорожное строительство и его инженерное обеспечение: материалы Международной научно-технической конференции. Белорусский национальный технический университет. Минск. – 2020. – С. 227-234.*
- research. – 2007. – No.37. – Pp.1357-1365. DOI:10.1016/j.cemconres.2007.06.005.
41. O'Farrell M., Sabir B.B., Wild S. Strength and chemical resistance of mortars containing brick manufacturing clays subjected to different treatments. *Cement and concrete composites*. – 2006. No.28. – Pp.790-799. DOI:10.1016/j.cemconcomp.2006.05.014.
42. 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. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.03.307.
43. Liu C., Liu H., Wu J. Effect of Recycled Mixed Powder on the Mechanical Properties and Microstructure of Concrete. *Journal of renewable materials*. – 2022. – Vol.10. – No.5. – Pp.1397-1414. DOI:10.32604/jrm.2022.018386.
44. Liu, S., Dai, R., Cao, K. Zhiyang G. The Role of Sintered Clay Brick Powder During the Hydration Process of Cement Pastes. *Iranian Journal of Science and Technology - Transactions of Civil Engineering*. – 2017. – No.41. – Pp.159–165. DOI:10.1007/s40996-017-0049-0.
45. Fomenko A.I., Gрызлов V.S., Каптюшина A.G. Ceramic brick waste as an effective component of building composites. // *Sovremennye naukoemkie tekhnologii*. – 2016. – No.2. – Pp.260-264 (in Russian).
46. Podol'skij V.P., Matvienko F.M., Bykova A.A., Avdeeva N.Yu. Development of technologies for the use of waste from demolition of buildings for the construction of cement-reinforced foundations of highways using the MADOR modifier. // *Nauchnyj zhurnal stroitel'stva i arhitektury*. – 2023. – No.4. – Pp.156-162(in Russian).
47. Gubskaya A.G., Gapotchenko A.P., Senatova K.S., Oleckaya L.P. The possibility of replacing natural crushed stone and gravel with secondary raw materials during the construction and repair of roads. // *Dorozhnoe stroitel'stvo i ego inzhenernoe obespechenie: materialy Mezhdunarodnoj nauchno-tekhnicheskoy konferencii. Belarusian National Technical University. Minsk. – 2020. – Pp. 227-234 (in Russian).*

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 5 августа 2021 года).

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-2020-0015, 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. 075-15-2021-692 of August 5, 2021).

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

Вклад авторов: *Закревская Л.В.* – идея, научное руководство, научное редактирование статьи; *Баруздин А.А.* – обработка материала, написание статьи.

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

Contribution of the author: *Zakrevskaya L.V.* – idea, scientific guidance, scientific editing of the article; *Baruzdin A.A.* – processing of material, writing of the article.

The authors declare that there is no conflict of interest.