

Использование техногенных отходов в технологии вяжущих материалов
С-А.Ю. Муртазаев^{1,2}, М.Ш. Саламанова^{1,2}, М.С. Сайдумов¹

¹Грозненский государственный нефтяной технический университет
имени академика М.Д. Миллионщикова,

¹364051, Чеченская Республика, г. Грозный, пр-т им. Х.А. Исаева, 100, Россия,

²Комплексный научно-исследовательский институт имени Х.И. Ибрагимова
Российской академии наук,

²364051, г. Грозный, ул. им. В. Алиева, 21а, Россия

Резюме. Цель. Улучшение качества и долговечности строительных материалов при одновременном снижении затрат на их реализацию и эксплуатацию является актуальной задачей строительного материаловедения. Новые технологии основаны на доминирующем положении активной вяжущей составляющей, отвечающей за ускорение гидратационных процессов вяжущего, целенаправленном формировании фазового состава и изменении структуры цементного камня. Комбинирование клинкерной и минеральной части, включение в систему химических модификаторов, правильное проектирование рецептуры и технологии приготовления вяжущей композиции и бетонной смеси, позволит достичь заданную проектную прочность, снизить расход цемента и себестоимость изделия. **Метод.** Исследования проводились согласно нормативным документам ГОСТ 310.4-81 Цементы. Методы определения предела прочности при изгибе и сжатии; ГОСТ 310.3-76 Цементы. Методы определения нормальной густоты, сроков схватывания и равномерности изменения объема; ГОСТ 30515-2013 Цементы. Общие технические условия. ГОСТ 10180-2012 Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. **Результат.** Получена комплексная пуццолановая добавка, вещественный состав которой позволит создавать более плотную структуру камня, за счет дополнительного активного источника негидратированных силикатов кальция, алюмосиликатов натрия и кальция. Полученное наполненное вяжущее обладает свойствами на порядок выше контрольных образцов. С использованием местного инертного материала и экономии 25 % клинкерной доли разработаны составы тяжелого бетона классов В20–В22,5, применяемые при заливке фундаментов, плит перекрытий, лестничных маршей, элементов мощения и других бетонных и железобетонных изделий. **Вывод.** Результаты исследований позволят с успехом реализовывать проекты мирового значения, создавая устойчивые, прочные и долговечные бетонные конструкции.

Ключевые слова: наполненные вяжущие, бетонный лом, золы, вяжущие системы, техногенные отходы, измельчение, тяжелый бетон

Для цитирования: С-А.Ю. Муртазаев, М.Ш. Саламанова, М.С. Сайдумов. Использование техногенных отходов в технологии вяжущих материалов. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2025;52(3):227-236. DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-3-227-236

Use of man-made wastes in bonding technology

S-A.Yu. Murtazaev^{1,2}, M.Sh. Salamanova^{1,2}, M.S. Saidumov¹

¹Academician M.D. Millionshchikova Grozny State Petroleum Technical University,

¹100 H.A. Isaeva Ave., Grozny 364051, Russia,

²H.I. Ibragimov Comprehensive Research Institute Russian Academy of Sciences,

²21a V. Alieva Str., Grozny 364051, Russia

Abstract. Objective. Improving the quality and durability of construction materials while reducing the costs for their implementation and operation is an urgent task of building materials science. New technologies are based on the dominant position of the active binder component, responsible for accelerating the hydration processes of the binder, the targeted formation of the phase composition and changes in the structure of the cement stone. Combination of clinker and mineral parts, inclusion in the system of chemical modifiers, correct formulation design and technology of preparation of the binder composition and concrete mixture will achieve the required design strength, reduce cement consumption and cost of the product. **Method.** The studies were conducted according to the normative documents GOST 310.4-81 Cement. Bending and compression strength methods; GOST 310.3-76 Cements. Methods for determination of normal density, latching times and evenness of change in volume; GOST 30515-2013 Cements. General technical conditions. GOST 10180-2012 Concrete. Methods of determination of strength by reference samples. **Result.** A complex pozzolanic additive has been obtained, the material composition of which will allow for the creation of a denser stone structure, due to an additional active source of unhydrated calcium silicates, sodium and calcium aluminosilicates. The resulting filled binding agent has properties that are higher than those of the control samples. Using local inert material and saving 25% of clinker share developed heavy concrete compositions classes B20-22.5, widely used in the filling of foundations, slabs, stairways, tiles and other concrete and concrete products. **Conclusion.** The proposed research results will make it possible to successfully implement projects of global importance, creating sustainable, durable and long-lasting concrete structures. The work was carried out within the framework of the state assignment of the Grozny State Oil Technical University named after acad. M.D. Millionshchikov FZNU-2024-0003 "Development of a set of low-carbon technologies for increasing the productivity and sequestration potential of the ecosystem in urban areas with the production of secondary composite materials for multifunctional purposes".

Keywords: filled binder, concrete scrap, ash, binder systems, man-made waste, grinding, heavy concrete

For citation: S-A.Yu. Murtazaev, M.Sh. Salamanova, M.S. Saidumov. Use of man-made wastes in bonding technology. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2025;52(3):227-236. (In Russ) DOI:10.21822/2073-6185-2025-52-3-227-236

Введение. С учетом повсеместных изменений в строительной отрасли, нацеленных на увеличение скорости выполнения работ, улучшение качества и долговечности строительных материалов при одновременном снижении затрат на их реализацию и эксплуатацию, высокофункциональные бетоны становятся особенно востребованными. К этой категории относятся бетоны, которые быстро затвердевают, обладают высокой прочностью, а также характеризуются низкой проницаемостью. Эти материалы обеспечивают стабильность и устойчивость к воздействию различных агрессивных сред [1–3].

Анализируя промышленный опыт применения таких бетонов [4–8], приходишь к заключению, что технология высокофункциональных композитов основана на доминирующем положении активной вяжущей составляющей, отвечающей за ускорение гидратационных процессов вяжущего, целенаправленном формировании фазового состава и изменении структуры цементного камня. Комбинирование клинкерной и минеральной части, включение в систему химических модификаторов, правильное проектирование рецептуры и технологии приготовления вяжущей композиции и бетонной смеси, позволит достичь заданную проектную прочность, снизить расход цемента и себестоимость изделия [9–13]. Производство наполненных вяжущих композиций остается объектом исследования и не теряет актуальности на протяжении многих десятилетий [14–18]. Большой интерес вызывают естественные добавки и отходы промышленности, такие как шлаки черной металлургии, топливные золы, высококварцевые пески, микрокремнезем, цеолитсодержащие и вулканические породы, мергели, глиежа, известняки, диатомит, трепел и др. Подвергая перечисленные добавки механо- или механохимической активации и примешивая к определённой доле

основного вяжущего, можно получать новый материал, показатели которого будут зависеть от свойств добавок (одной или нескольких), заменяющих клинкер цемента. Существует известная классификация наполненных вяжущих, представленная в табл. 1 [19–24].

Таблица 1. Классификация наполненных вяжущих материалов*

Table 1. Classification of padded binders

№	Вид вяжущего материала Type of binder	Содержание, масс. % Content, mass.					
		Клинкер Clinker,	Шлак slag	АМД active mineral supplements	МК microsilica	Песок кварцевый quartz sand	СП superplasticizer
1	Портландцемент Portland cement	95-100	-	до 5	-	-	-
2	Шлакопортландцемент Slag Portland cement	65-90	10-35	до 5	-	-	-
3	Пуццолановый портландцемент Puzzolanic Portland cement	65-90	до 5	до 5	-	-	-
4	Композиционный цемент Composite cement	65-88	6-29	до 5	-	-	-
5	Цемент со шлаком черной металлургии Cement with ferrous metallurgy slag	20-64	36-80	до 5	-	-	-
6	Пуццолановый цемент Puzzolanic cement	> 60	до 5	до 5	-	-	-
7	Тонкомолотые вяжущие Fine-ground binders	> 50	-	-	-	-	-
8	ВНВ (вяжущие низкой водопотребности) VNV (low water demand binders)	30-100	10-25	-	0-70	0-70	до 3

*Примечание: АМД- активные минеральные добавки, МК – микрокремнезем, СП – суперпластификатор/ Note: AMD – active mineral additives, МК – microsilica, SP – superplasticizer

Приведенная классификация клинкерных цемента позволяет отметить факт того, что с изменением качественного и количественного составов вяжущего можно получать различную продукцию, отличающуюся свойствами, назначением и стоимостью. И в зависимости от активности минеральные добавки (гидравлические, пуццолановые и микронаполнители) по-своему воздействуют на процессы формирования структуры цементного камня и физико-механические свойства композита [25, 26].

Пуццолановые добавки можно считать самыми перспективными в цементной отрасли, к ним относят шлаки черной металлургии, золы-уноса ТЭС, цеолитсодержащие породы, опока, глиежи, вулканические пемза, туф, трепел и др. Установлен эффект от применения пуццолановых добавок в вяжущей системе, присутствие аморфного кремнезема и глинозема в составе которых положительно влияет на твердеющую активную связку «C₃S – пуццолана – вода». Ускорению процессов гидратации в начальные сроки твердения способствует поверхность частиц пуццоланы, которая адсорбируя ионы Ca²⁺, способствует быстрому растворению зерен трехкальциевого силиката. Гидратные соединения скапливаются слоями вокруг C₃S и приводят к объемному расширению слоя новообразований на зернах клинкерного минерала. В результате происходит связывание продуктов гидратации, и в частности, гидроксида кальция в прочные гидратные соединения по следующей схеме: $x\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{SiO}_2 + n\text{H}_2\text{O} = x\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2 \cdot m\text{H}_2\text{O}$. Основность образованных гидросиликатных соединений может изменяться в пределах 0,8–2, и будет зависеть от количественного и качественного составов пуццолановой добавки, дисперсности, условий твердения и др. факторов. Также следует отметить, что наличие пуццоланы стабилизирует количество гидросульфаталюминатов кальция (этtringит) на более поздние сроки твердения искусственного камня, нейтрализуя возможность проявления сульфатной коррозии [27–29] в бетоне.

Методы исследования. Обозначенные положительные стороны создания наполненной вяжущей композиции «портландцемент – пуццолана» требуют более глубокого исследования с позиции использования новых рецептурно-технологических приемов

и включения в систему отходов промышленности с целью рационального природопользования и защиты окружающей среды. В качестве пуццолановой составляющей в наполненной вяжущей системе использовали бетонный лом и золы ТЭЦ. Для региона Чеченская Республика поиск реального применения этому техногенному сырью давно обсуждается на многих площадках научного сообщества, так как крупнотоннажные отходы в огромных объемах заполняют сельскохозяйственные территории, нанося ощутимый вред окружающей среде и в целом, облику региона. Помимо этого, необходимо учитывать, что на свалках скапливается полноценный сырьевой ресурс, ведь после преобразования и обогащения его можно включать повторно в технологический цикл. Что важно отметить со стороны дефицита и невозобновляемости природного минерального сырья.

На первом этапе исследования проводили подготовку минеральных порошков, так как в первозданном виде мало пользы от этого материала (рис. 1). Бетонный лом и золы ТЭЦ очищались от не нужных включений, высушивались и подвергали технологической обработке.



Рис. 1 - Техногенные отходы
Fig. 1 - Man-made waste

Бетонный лом дробили в лабораторной щековой дробилке ДШ6S, до фракции 5-20 мм, для использования материала в качестве крупного заполнителя бетона; мелкая растворная фракция менее 5 мм отделялась от массы и направлялась на помол в лабораторную роликовую мельницу МЛР-15. Именно мелкая фракция, содержащая определённую долю цементного камня, представляет интерес для получения наполненных вяжущих, в надежде на проявление активности со стороны непрореагировавшей ранее части клинкерного фонда в порошке добавки. Помол золы ТЭЦ и мелкой фракции бетонного лома осуществляли в течение 30 минут, удельную поверхность полученных порошков определяли на приборе ПСХ-12, результаты испытаний представлены в табл. 2.

Таблица 2. Удельная поверхность минеральных порошков

Table 2. Specific surface area of mineral powders

Наименование добавки Name of additive	Удельная поверхность порошков, м ² /кг, помол 30 мин Specific surface area of powders, m ² /kg, milling 30 min
Бетонный лом Concrete waste	630
Золы ТЭЦ TPP ash	790

Микроструктуру частиц исследуемых порошков изучали на растровом электронном микроскопе Quanta 3D 200i (рис. 2), микрочастицы бетонного лома представлены рыхлыми зёрнами неправильной геометрической формы, а золы ТЭЦ более плотные, имеют гладкую сферическую поверхность. Химический состав добавок, % по массе:

– бетонный лом: MgO = 1.22; Al₂O₃ = 5.03; SiO₂ = 52.8; Na₂O = 0,19; CaO = 34.52; Fe₂O₃ = 3.33; TiO₂ = 0.31; K₂O = 1.31; Na₂O = 0.51; SO₃ = 0.11; ппп = 0.38.

– золы ТЭЦ: MgO = 1.44; Al₂O₃ = 10.31; SiO₂ = 55.41; Na₂O = 0,19; CaO = 12.62; Fe₂O₃ = 5.01; TiO₂ = 0.32; K₂O = 1.49; Na₂O = 1.72; SO₃ = 0.76; ппп = 10.97.

Проведенные исследования микроструктуры исследуемых добавок подтвердили наличие необходимого для синтеза новообразований оксидного состава.

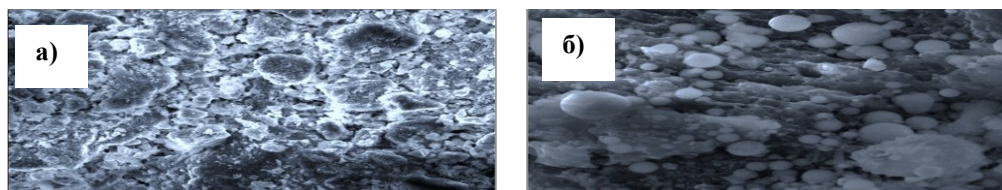


Рис. 2 - Микрофотографии микрочастиц пуццолановой добавки: а – бетонного лома; б – золы ТЭЦ
 Fig. 2 - Microphotographs of the microparticles of the Putzolan additive: a - concrete scrap; b - Power plants

Для проектирования пуццолановой добавки наполненных вяжущих рассматривали варьирование количественным составом, чтобы в дальнейшем исследовать вещественный состав. Для выявления оптимальной рецептуры было подобрано и испытано большое количество вяжущих композиций, и в результате установлено, что соотношение бетонный лом : зола ТЭЦ = 72 : 28 % считается наиболее рациональным. В дальнейших экспериментах использовалась комплексная добавка в указанном составе, и помол в предлагаемом количественном соотношении проводился совместный, для получения более однородных и гомогенных пуццолановых порошков. Время измельчения оставалось прежним 30 минут, удельная поверхность составила 726 м²/кг. Полученную добавку на основе бинарных порошков исследовали с помощью дифрактометра «ARLX'TRA» (рис. 3).

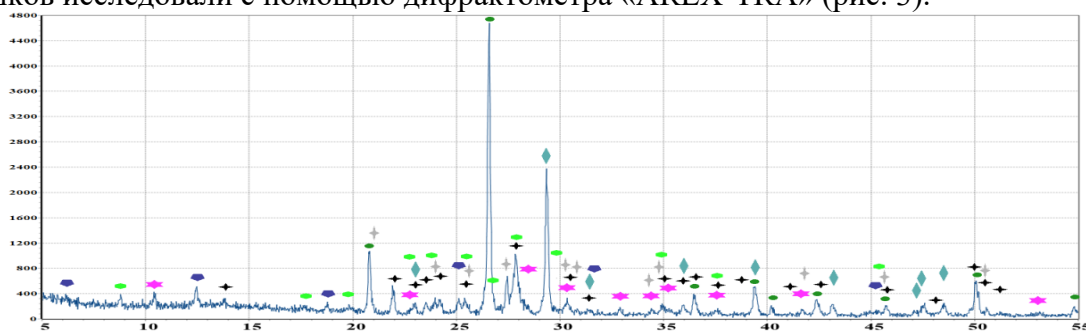


Рис. 3 - Дифрактограмма образца в сопоставлении с данными базы PDF-2

Приведенные фазы сравнения: - кварц; - хлоризированные темно-окрашенные силикаты; - C₂S; - плагиоклаз (альбит); - микроклин; - кальцит; - амфибол

Fig. 3 - X-ray diffraction pattern of a concrete sample according to PDF-2 database data

The given comparison phases: - quartz; - chloritized dark-colored silicates; - C₂S; - plagioclase (albite-oligoclase); - microcline; - calcite; - amphibole

Обсуждение результатов. Результаты рентгенофазового анализа комплексной пуццолановой добавки показали наличие следующих минералов: кальцит, кварц, белит C₂S, хлоритизированные темноцветные силикаты кальция, альбит. Зафиксированы наиболее выразительные рефлексы, принадлежащие плагиоклазу, минералам альбит NaAlSi₃O₈ и анортит CaAl₂Si₂O₈, микроклину K[AlSi₃O₈] и окристаллизованным кристаллам двухкальциевого силиката C₂S.

Минералогический состав пуццолановой комплексной добавки позволит улучшить свойства вяжущей системы «портландцемент – пуццолана» за счет дополнительного источника негидратированных силикатов кальция, алюмосиликатов натрия и кальция. А более высокая дисперсность добавки позволит создать плотную и непроницаемую структуры бетонного композита, что положительно скажется на прочности и долговечности материала. Топологическая модель контактной зоны «портландцемент – комплексная пуццолановая добавка – вода» (удельная поверхность пуццоланы 726 м²/кг), представленная на рис. 4, дает возможность визуального восприятия процессов фазообразования за счет образования диффузионного геля C–S–H из гидратов силиката кальция низкой основности, развивающего прочностные характеристики композита.

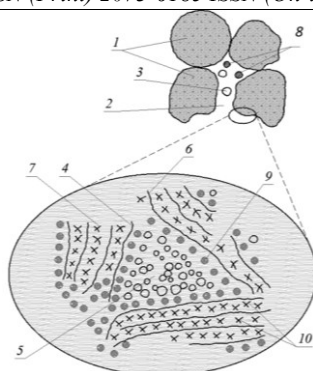


Рис. 4 - Модель диффузионного геля C-S-H с использованием пуццолановой добавки:

1 – область геля C-S-H; 2, 4 – плотный контакт; 3 – поры между микрочастицами;
5 – внутрикристаллизационные поры; 6 – прослойки воды; 7 – междукристаллизационные поры;
8–10 – активные частицы добавки $(2-200) \cdot 10^{-9} \text{ м}$

Fig. 4 - C-S-H diffusion gel model with the use of Putzolin additive:

1 -gel area C-S-H; 2, 4 - close contact; 3 - pores between the microparticles; 5 - intra-crystallization pores;
6 - water interlayers; 7 - Intercrystallization pores; 8-10 - Active additive particles $(2-200) \cdot 10^{-9} \text{ м}$

Рецептуры наполненного вяжущего подбирались экспериментальным путем, исследования проводились в соответствии с ГОСТ 310.4-81 Цементы. Методы определения предела прочности при изгибе и сжатии; ГОСТ 310.3-76 Цементы. Методы определения нормальной густоты, сроков схватывания и равномерности изменения объема; ГОСТ 30515-2013 Цементы. Общие технические условия. Установлена оптимальная рецептура наполненного комплексной пуццолановой добавкой вяжущего, количественный состав портландцемент 75%, «бетонный лом – зола ТЭЦ» 25%. В качестве основной составляющей вяжущей системы использовали портландцемент М500 без добавочный АО «Чеченцемент». Свойства полученного материала, в сравнении с контрольным образцами, представлены в табл. 2.

Таблица 2. Результаты исследований цемента

Table 2. Results of cement studies

№	Свойства цемента Cement Properties	Показатели Indicators	
		ПЦ	ПЦ – пуццолана
1	Тонкость помола, остаток на сите №008, % Grinding Fineness, Residue on 008 sieve, %	8,4	5,2
2	Нормальная густота, % Normal Density, %	25,0	26,3
3	Сроки схватывания, час-мин: Setting Time, Hrs-Mins: начало Start конец End	2 часа 21 минут	2 часа 52 минут
		3 часа 23 минут	3 часа 40 минут
4	Активность, МПА Activity, MPa	50,2	52,4

Результаты испытаний показали, что экономия клинкерной доли до 25% привела к повышению водопотребности цементного теста, причина чему более высокая дисперсность наполненного цемента. Но реакционноспособные по отношению к воде частицы комплексной пуццоланы заполняют межзерновое пространство вяжущей системы, и одновременно выполняют роль водопроводящих каналов к дефектным точкам клинкерных частиц, что способствует повышению активности наполненного вяжущего. Микрофотографии, полученные с помощью растрового электронного микроскопа Quanta 3D 200i позволяют наблюдать эффект от применения бинарных порошков, структура цементного камня более плотная, поры и пустоты заполнены дополнительной порцией новообразований, что положительно отразится на прочности образцов. С использованием наполненного вяжущего, природных мелкого и крупного заполнителя местного региона были подобраны и изготовлены образцы тяжелого бетона согласно ГОСТ 10180-2012 Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам; ГОСТ 12730.1-78 Бетоны. Методы определения плотности. Инертный материал – кварцевый песок модуль крупности 1,9, крупный заполнитель известняковый щебень фракции 5-20мм, соответствовали требованиям ГОСТ 8736-2014 Песок для строительных работ.

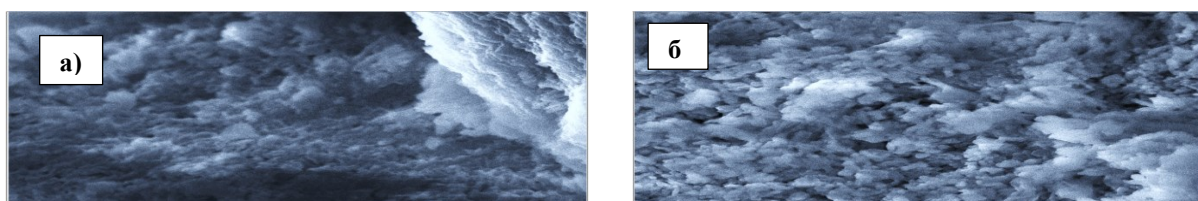


Рис. 5 - Микрофотографии образцов цементного камня на основе наполненного вяжущего (а) и портландцемента (б)

Fig. 5 - Microphotographs of samples of cement stone based on filled with binder (a), Portland cement (b)

Технические условия; ГОСТ 8267-93 Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия. Составы и свойства тяжелых бетонных смесей и бетонов приведены в табл. 3.

Таблица 3. Результаты испытаний бетонной смеси и бетона

Table 3. Concrete mixture and concrete test results

№ состава	В/Ц	Расход материалов на 1 м ³ бетона, кг Material consumption per 1 m3 of concrete					Марка подвижности	Плотность смеси, Density of the mixture, кг/см ³	Водоотделение, % по массе Water separation,	Прочность на сжатие, 28 сут, МПа Compressive strength, 28 days,
		Щебень Crushed stone	Песок Sand	НВ	Добавка Additive	Вода Water				
1	0,42	1200	618	400	4,0	168	ПЗ	2387	0,3	25,2
2	0,43	1190	613			172	П4	2383	0,4	25,8
3	0,46	1180	608			184	П5	2378	0,6	24,7
4	0,41	1170	622			164	ПЗ	2389	0,1	26,9
5	0,49	1180	610	400*	4,0	196	П5	2380	0,3	22,5

Примечание: НВ – наполненное вяжущее портландцемент 75% : «бетонный лом – зола ТЭЦ» 25%; состав № 5* – портландцемент М500 без добавки АО «Чеченцемент»; добавка Sika ViscoCrete 5-600 SK на основе поликарбоксилатных эфиров, дозировка 1,0% от массы цемента. Note: НВ – filled binder Portland cement 75%: “concrete scrap – thermal power plant ash” 25%; composition No. 5* – Portland cement M500 without additives from Chechencement JSC; Sika ViscoCrete 5-600 SK additive based on polycarboxylate esters, dosage 1.0% of the cement weight.

Как показали данные исследований, технические свойства бетонной смеси и бетона изменяются в зависимости от количественного состава инертного материала, так как расход вяжущего оставался постоянным. Состав 5 показал максимальный прирост прочности 26,9 МПа, минимальное водоотделение 0,1 %, что указывает на правильно подобранный состав формовочной смеси на 1 м³ бетона, расход кварцевого песка 622 кг и комплексная пуццолановая добавка в количестве 134 кг, суперпластификатор Sika ViscoCrete 5-600 SK, препятствует расслоению бетонной смеси и ухудшению свойств верхних слоев бетона.

Исследования микроструктуры образцов состава 5 дает представление о структуре искусственного камня (рис. 6), основная масса которой плотно пронизана пластинчатыми агрегатами гидратов алюминатов и силикатов кальция различного состава. Химический состав варьирует в агрегатах с разными структурно-текстурными особенностями (рис. 7, табл. 4), присутствуют массивные скрытокристаллические агрегаты алюмосиликатного и слагающие основную массу раскристаллизованные трещиноватые агрегаты, сложенные гидратированными кальциевыми силикатами.

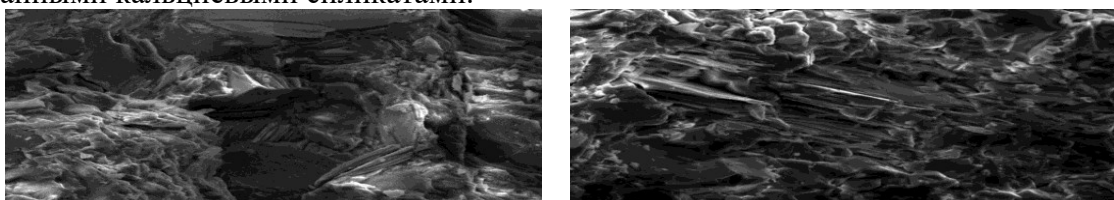


Рис. 6 - Микрофотографии образцов бетона состава 5 при увеличении 2500 крат

Fig. 6 - Microphotographs of concrete samples of composition 5 magnified 2500 crt

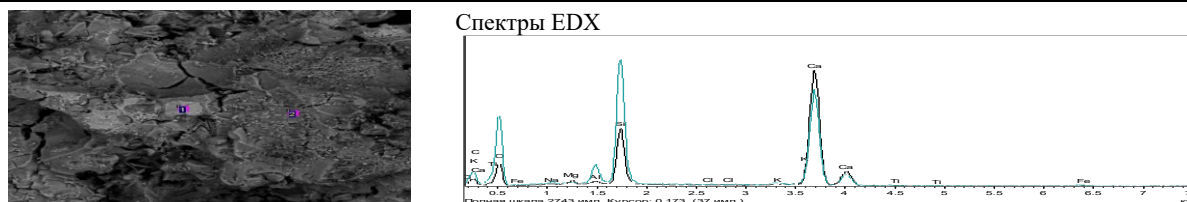


Рис. 7 - Пример вариации составов гидратированных силикатов кальция

Fig. 7 - Example of variations of hydrated calcium silicate compositions

Таблица 4. Результаты анализа участков, указанных на рис. 7

Table 4. Results of the analysis of the plots shown in Fig. 7

	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	K ₂ O	CaO	TiO ₂	FeO	Итого
1	0.90	1.55	4.37	29.50	0.31	45.46	0.00	2.46	84.55
2	0.65	0.12	5.15	40.52	0.41	34.99	0.21	1.17	83.22

Вывод. Результаты рентгенофазового анализа комплексной пуццолановой добавки подтвердили наличие минералов: кальцит, кварц, белит C₂S, силикатов кальция разной основности, альбит, анортит, микроклин. Вещественный состав вяжущей системы «портландцемент – пуццолана» позволит создавать более плотную структуру камня, а за счет дополнительного активного источника негидратированных силикатов кальция, алюмосиликатов натрия и кальция повышается прочность бетонных композитов. Топологическая модель контактной зоны «портландцемент – комплексная пуццолановая добавка – вода» дает возможность визуального восприятия процессов фазообразования за счет образования диффузионного геля C–S–H из гидратов силиката кальция низкой основности, развивающего прочностные характеристики композита.

Установлена оптимальная рецептура наполненного вяжущего, количественный состав портландцемент 75%, «бетонный лом – зола ТЭЦ» 25%. Свойства полученного материала на порядок выше контрольных образцов. С использованием местного инертного материала и экономии 25 % клинкерной доли разработаны составы тяжелого бетона классов В20–В22,5, широко применяемые при заливке фундаментов, плит перекрытий, лестничных маршей, элементов мощения и других бетонных и железобетонных изделий. Результаты исследования позволяют расширить сырьевую базу для цементной отрасли и строительных материалов в целом. Даже небольшая экономия дорогого и ресурсоемкого материала положительно отразится на окружающей среде, так как проблемы декарбонизации экономики актуальны и требуют всеобщего реагирования.

Благодарности. Работа выполнена в рамках государственного задания ГГНТУ им. акад. М.Д. Миллионщикова FZNU-2024-0003 «Разработка комплекса низкоуглеродных технологий повышения продуктивности и секвестрационного потенциала экосистемы на урбанизированных территориях с получением вторичных композиционных материалов полифункционального назначения».

Acknowledgments. This work was completed within the framework of the state assignment FZNU-2024-0003 to the M.D. Millionshchikov Gorky State Petroleum Technological University "Development of a Complex of Low-Carbon Technologies for Enhanced Productivity and Sequestration Potential of Ecosystems in Urbanized Areas with the Production of Secondary Composite Materials for Multifunctional Purposes."

Библиографический список:

1. Травуш В.И., Кузеванов Д.В., Каприелов С.С., Волков Ю.С. Бетон как экологический фактор снижения углеродного следа в среде обитания // Бетон и железобетон. 2022. № 3 (611). С. 10-14.
2. Каприелов С.С., Шейнфельд А.В., Чилин И.А. Оптимизация параметров технологии бетона для обеспечения термической трещиностойкости массивных фундаментов // Строительные материалы. 2022. № 10. С. 41-51.
3. Нелюбова В.В., Усиков С.А., Строкова В.В., Нецвет Д.Д. Состав и свойства самоуплотняющегося бетона с использованием комплекса модификаторов // Строительные материалы. 2021. № 12. С. 48-54.
4. Stroková V.V., Nikulina M.V., Baskakov P.S., Abzalilova A.V., Esina A.Y. Influence of a hydrophobic emulsion on the surface properties of coatings of water-dispersion acrylic paint. Materials Science Forum. 2021 1040 MSF:165-171.
5. Маилян Д.Р., Несветаев Г.В., Коллеганов Н.А. К определению трещиностойкости железобетонных балок из различных видов бетонов // Инженерный вестник Дона. 2023. № 1(97). С. 533-548.
6. Cherpurnenko A.S., Nesvetaev G.V., Koryanova Yu.I., Yazyev B.M. Simplified model for determining the stress-strain state in massive monolithic foundation slabs during construction // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. 2022. (18 (3)): 126-136.

7. Lesovik V.S., Popov D.Yu., Fediuk R.S., Usanova K.Iu. Composite binders with superabsorbent polymers // Construction of Unique Buildings and Structures. 2023 (3(108)): 10803.
8. Alaskhanov A.Kh., Lesovik V.S., Tolstoy A. "Green" composites based on technogenic raw materials // AIP Conference Proceedings. 2023. 153-158.
9. Баженов Ю.М., Демьянова В.С., Калашников В.И. Модифицированные высококачественные бетоны // Москва: Ассоциация строительных вузов. 2006. 289 с.
10. Калашников В.И. Промышленность нерудных строительных материалов и будущее бетонов // Строительные материалы. 2008. № 3. С. 20-24.
11. Муртазаев С-А. Ю., Саламанова М.Ш. Перспективы использования термоактивированного сырья алюмосиликатной природы // Приволжский научный журнал. 2018. Т. 46. № 2. С. 65–70.
12. Каприелов С.С. Модифицированные высокопрочные бетоны классов В80 и В90 в монолитных конструкциях. // Строительные материалы. 2008. № 3. С.9-13.
13. Саламанова М.Ш., Сайдумов М.С., Муртазаева, Т.С-А., Хубаев М. С-М. Высококачественные модифицированные бетоны на основе минеральных добавок и суперпластификаторов различной природы // Инновации и инвестиции. 2015. № 8. С. 159-163.
14. Муртазаев С-А.Ю., Саламанова М.Ш., Алиев С.А., Бисултанов Р.Г. Горные породы вулканического происхождения как заполнители для получения легких бетонов // Научное обозрение. 2015 № 7. С. 105-113.
15. Саламанова М.Ш., Бисултанов Р.Г., Мовсулов М.М. Перспективные возможности получения качественных мелкозернистых композитов // Вестник ГНТУ. Технические науки. 2023. Том XIX. № 2(32). С. 94–101.
16. Муртазаев С-А.Ю., Саламанова М.Ш., Корянова Ю.И. Разработка полиморфной вяжущей системы на основе карбонатной добавки // Научно-технический журнал Вестник ГНТУ. Технические науки. 2023. Том XIX. № 3(33). С. 96–103.
17. Yang J., Qu D., Hu J., Song L., Cheng B. Research on singular value detection method of concrete dam deformation monitoring. Measurement. 2021. Vol.179: 109457.
18. Chen J., Jia Q., Xu S., Fan P., The PDEM-based time-varying dynamic reliability analysis method for a concrete dam subjected to earthquake. Structures. 2021. Vol. 33: 2964-2973.
19. Gowripalan N., Shakor P., Rocker P. Pressure exerted on formwork by self-compacting concrete at early ages: A review. Case Studies in Construction Materials. 2021. Vol.15: 00642.
20. Nagajothi S., Elavenil S. Strength assessment of geopolymer concrete using M-sand Int. J.Chem. Sci.2016;1:115 – 126
21. Amer I., Kohail M., El-Feky M.S., Rashad A. and Khalaf M. A. A Review on Alkali-Activated Slag Concrete. // Ain Shams Engineering Journal. 2021. 12: 1475-1499.
22. Zemlyanskaya A.G., Lapunova K.A., Semenova M.Yu. Dry masonry mixtures based on siliceous opal-cristobalite rocks for clinker bricks. Construction Materials and Products. 2024;7(2):5. doi.org/10.58224/2618-7183-2024-7-2-5
23. Klyuev S.V., Slobodchikova N.A., Saidumov M.S., Abumuslimov A.S., Mezhdidov D.A., Khezhev T.A. Application of ash and slag waste from coal combustion in the construction of the earth bed of roads. Construction Materials and Products. 2024. 7 (6). 3. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2024-7-6-3>
24. Murtazaev S-A.Yu., Salamanova M.Sh., Saidumov M.S., Gatsaev Z.Sh., Alaskhanov A.Kh., Murtazaeva T.S-A. Development of geopolymer binders. Construction Materials and Products. 2024;7 (6):4.
25. Shcherban' E.M., Beskopylny A.N., Stel'makh S.A., Mailyan L.R., Shilov A.A., Nguyen Quang Hiep, Yamin Song, Chernil'nik A.A., Elshaeva D.M. Study of thermophysical characteristics of variatropic concretes. Construction Materials and Products. 2024. 7 (4). 2. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2024-7-4-2>
26. Nesvetaev G.V., Koryanova Yu.I., Shut V.V. Specific heat dissipation of concrete and the risk of early cracking of massive reinforced concrete foundation slabs. Construction Materials and Products. 2024. 7 (4). 3.
27. Stel'makh S.A., Beskopylny A.N., Shcherban' E.M., Mavzolevskii D.V., Drukarenko S.P., Chernil'nik A.A., Elshaeva D.M., Shilov A.A. Influence of Corn Cob Ash Additive on the Structure and Properties of Cement Concrete. Construction Materials and Products. 2024. 7 (3). 2. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2024-7-3-2>
28. Salamanova M.Sh., Gatsaev Z.Sh., Syzrantsev V.V. Investigation of the properties of alkaline binders with the addition of finely dispersed bentonite. Bulletin of the Moscow State University of Civil Engineering. 2022; 17(8):1017–1026.
29. Salamanova M.Sh., Murtazaev S.-A.Yu. Cements of alkaline activation the possibility of reducing the energy intensity of building composites. Construction Materials] 2019; 7:32–40. doi. org/10.31659/0585-430X-2019-772-7-32-40

References:

1. Travush V.I., Kuzevanov D.V., Kaprielov S.S., Volkov Yu.S. Concrete as an environmental factor in reducing the carbon footprint in the environment. *Concrete and reinforced concrete*. 2022; 3 (611):10-14. (In Russ)
2. Kaprielov S.S., Sheinfeld A.V., Chilin I.A. Optimization of concrete technology parameters to ensure thermal crack resistance of massive foundations. *Construction materials*. 2022;10:41-51. (In Russ)
3. Nelyubova V.V., Usikov S.A., Strokova V.V., Netsvet D.D. Composition and properties of self-compacting concrete using a complex of modifiers. *Construction materials*. 2021;12:48-54. (In Russ)
4. Strokova V.V., Nikulina M.V., Baskakov P.S., Abzalilova A.V., Esina A.Y. Influence of a hydrophobic emulsion on the surface properties of coatings of water-dispersion acrylic paint. *Materials Science Forum*. 2021;1040 MSF:165-171.
5. Mailyan D.R., Nesvetaev G.V., Kolleganov N.A. To determine the crack resistance of reinforced concrete beams from various types of concrete. *Engineering Bulletin of the Don*. 2023;1(97):533-548. (In Russ)
6. Chepurmenko A.S., Nesvetaev G.V., Koryanova Yu.I., Yazyev B.M. Simplified model for determining the stress-strain state in massive monolithic foundation slabs during construction. *International Journal for Computational Civil and Structural Engineering*. 2022;18 (3): 126-136.
7. Lesovik V.S., Popov D.Yu., Fediuk R.S., Usanova K.Iu. Composite binders with superabsorbent polymers. *Construction of Unique Buildings and Structures*. 2023 (3(108)): 10803. (In Russ)
8. Alaskhanov A.Kh., Lesovik V.S., Tolstoy A. "Green" composites based on technogenic raw materials. *AIP Conference Proceedings*. 2023:153-158.
9. Bazhenov Yu.M., Demyanova V.S., Kalashnikov V.I. Modified high-quality concrete. Moscow: Association

- of Construction Universities. 2006. 289 p. (In Russ)
10. Kalashnikov V.I. Industry of non-metallic building materials and the future of concrete. *Construction materials*. 2008;3:20-24. (In Russ)
 11. Murtazaev S.A. Yu., Salamanova M.Sh. Prospects for the use of thermally activated raw materials of aluminosilicate nature. *Volga Scientific Journal*. 2018; 46(2):65–70. (In Russ)
 12. Kaprielov S.S. Modified high-strength concrete of classes B80 and B90 in monolithic structures. *Construction Materials*. 2008; 3:9-13. (In Russ)
 13. Salamanova M.Sh., Saidumov M.S., Murtazaeva, T.S.-A., Khubaev M. S-M. High-quality modified concrete based on mineral additives and superplasticizers of various natures. *Innovations and investments*. 2015;8:159-163. (In Russ)
 14. Murtazaev S.A.Yu., Salamanova M.Sh., Aliev S.A., Bisultanov R.G. Rocks of volcanic origin as fillers for producing lightweight concrete. *Scientific review*. 2015; 7:105-113. (In Russ)
 15. Salamanova M.Sh., Bisultanov R.G., Movsulov M.M. Promising possibilities for producing high-quality fine-grained composites. *Scientific and technical journal Vestnik GGNTU. Technical Science*. 2023; XIX 2(32):94–101. (In Russ)
 16. Murtazaev S.-A.Yu., Salamanova M.Sh., Koryanova Yu.I. Development of a polymorphic binder system based on a carbonate additive. *Scientific and technical journal Vestnik GGNTU. Technical science*. 2023; XIX. 3(33): 96–103.
 17. Yang J., Qu D., Hu J., Song L., Cheng B. Research on singular value detection method of concrete dam deformation monitoring. *Measurement*. 2021;179: 109457.
 18. Chen J., Jia Q., Xu S., Fan P., The PDEM-based time-varying dynamic reliability analysis method for a concrete dam subjected to earthquake. *Structures*. 2021; 33:2964-2973.
 19. Gowripalan N., Shakor P., Rocker P. Pressure exerted on formwork by self-compacting concrete at early ages: A review. *Case Studies in Construction Materials*. 2021;15:00642.
 20. Nagajothi S., Elavenil S. Strength assessment of geopolymer concrete using M-sand Int. J.Chem. Sci.2016;1:115 – 126.
 21. Amer I., Kohail M., El-Feky M.S., Rashad A. and Khalaf M. A. A Review on Alkali-Activated Slag Concrete. *Ain Shams Engineering Journal*. 2021;12: 1475-1499.
 22. Zemlyanskaya A.G., Lapunova K.A., Semenova M.Yu. Dry masonry mixtures based on siliceous opal-cristobalite rocks for clinker bricks. *Construction Materials and Products*. 2024;7 (2):5. /doi.org/10.58224/2618-7183-2024-7-2-5
 23. Klyuev S.V., Slobodchikova N.A., Saidumov M.S., Abumuslimov A.S., Mezhdov D.A., Khezhev T.A. Application of ash and slag waste from coal combustion in the construction of the earth bed of roads. *Construction Materials and Products*. 2024;7(6):3. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2024-7-6-3> (In Russ)
 24. Murtazaev S.-A.Yu., Salamanova M.Sh., Saidumov M.S., Gatsaev Z.Sh., Alaskhanov A.Kh., Murtazaeva T.S.-A. Development of geopolymer binders. *Construction Materials and Products*. 2024;7(6):4 (In Russ)
 25. Shcherban' E.M., Beskopylny A.N., Stel'makh S.A., Mailyan L.R., Shilov A.A., Nguyen Quang Hiep, Yamin Song, Chernil'nik A.A., Elshaeva D.M. Study of thermophysical characteristics of variotropic concretes. *Construction Materials and Products*. 2024. 7 (4). 2. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2024-7-4-2>
 26. Nesvetaev G.V., Koryanova Yu.I., Shut V.V. Specific heat dissipation of concrete and the risk of early cracking of massive reinforced concrete foundation slabs. *Construction Materials and Products*. 2024;7(4):3.
 27. Stel'makh S.A., Beskopylny A.N., Shcherban' E.M., Mavzolevskii D.V., Drukarenko S.P., Chernil'nik A.A., Elshaeva D.M., Shilov A.A. Influence of Corn Cob Ash Additive on the Structure and Properties of Cement Concrete. *Construction Materials and Products*. 2024;7 (3):2. <https://doi.org/10.58224/2618-7183-2024-7-3-2>
 28. Salamanova M.Sh., Gatsaev Z.Sh., Syzrantsev V.V. Investigation of the properties of alkaline binders with the addition of finely dispersed bentonite. *Bulletin of the Moscow State University of Civil Engineering*. 2022;17(8):1017–1026.
 29. Salamanova M.Sh., Murtazaev S.-A.Yu. Cements of alkaline activation the possibility of reducing the energy intensity of building composites. *Construction Materials* 2019;7: 32–40. DOIorg/10.31659/0585-430X-2019-772-7-32-40

Сведения об авторах:

Саид-Альви Юсупович Муртазаев, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технологии строительного производства; s.murtazaev@mail.ru

Мадина Шахидовна Саламанова, доктор технических наук, доцент, профессор кафедры технологии строительного производства, директор НТЦКП «Современные строительные материалы и технологии»; madina_salamanova@mail.ru

Магомед Саламувич Сайдумов, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры технологии строительного производства; saidumov_m@mail.ru

Information about authors:

Said-Alvi Yu. Murtazaev, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Department of Construction Production Technology; s.murtazaev@mail.ru

Madina Sh. Salamanova, Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Prof., Department of Construction Technology; Director of the Scientific and Technical Center of Collective Use “Modern Building Materials and Technologies”; madina_salamanova@mail.ru

Saidumov M. Salamovich, Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Assoc. Prof., Department of construction production technology; saidumov_m@mail.ru

Конфликт интересов/Conflict of interest.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов/The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию/Received 14.06.2025.

Одобрена после рецензирования/Revised 28.07.2025.

Принята в печать /Accepted for publication 10.09.2025.