

**СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ/CONSTRUCTION MATERIALS AND PRODUCTS**DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.72.1> EDN: WJXGOY**ДОБАВКИ ДЛЯ НАНОСТРУКТУРИРОВАННОГО БЕТОНА**

Научная статья

Ситников В.А.¹, Баранов А.С.²*¹ORCID : 0009-0006-3127-4399;²ORCID : 0000-0003-3430-1963;^{1,2}Приволжский государственный университет путей сообщения, Самара, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (a.baranov[at]samgups.ru)

Предложена: 23.06.2025; Принята: 15.10.2025; Опубликовано: 21.05.2026

Аннотация

В связи с возрастающими эксплуатационными нагрузками такие вопросы, как прочность и долговечность бетонных и железобетонных конструкций, безусловно, имеют высокое значение при строительстве новых или ремонте уже существующих сооружений. В статье представлен детальный анализ различных методов улучшения физико-механических характеристик бетона посредством добавления в его состав компонентов, таких как микрокремнезем, углеродные нанотрубки и оксид железа. Рассматриваются их влияние на основные свойства бетона, в том числе прочность при сжатии, растяжении, износостойкость и устойчивость к агрессивным химическим средам. Особое внимание уделяется преимуществам и недостаткам использования указанных добавок, включая их влияние на микроструктуру материала, а также сложности, связанные с их повсеместным внедрением в промышленное производство, например, стоимость, доступность и необходимость точного дозирования.

Также предложено альтернативное решение для повышения эксплуатационных характеристик наноструктурированного бетона при помощи использования кристаллообразующего клея. Применение кристаллообразующего клея способствует формированию более однородной и плотной микроструктуры бетона, что приводит к значительному увеличению его прочности на сжатие и растяжение, улучшению морозостойкости и снижению водопоглощения. Такой подход обеспечивает более эффективную защиту бетона от воздействия агрессивных химических сред, включая кислоты и соли, что делает его перспективным для использования в условиях повышенной влажности или агрессивной окружающей среды.

Таким образом, обосновывается возможность применения инновационных решений для создания бетона с улучшенными эксплуатационными характеристиками, где кристаллообразующий клей представляет собой конкурентоспособный вариант. Результаты исследования имеют практическую значимость для строительной отрасли, предоставляя основу для дальнейшей разработки и внедрения новых технологий в производство строительных материалов.

Ключевые слова: бетон, добавки, микрокремнезем, углеродные нанотрубки, оксид железа, строительство.**ADDITIVES FOR NANOSTRUCTURED CONCRETE**

Research article

Sitnikov V.A.¹, Baranov A.S.²*¹ORCID : 0009-0006-3127-4399;²ORCID : 0000-0003-3430-1963;^{1,2}Volga State Transport University, Samara, Russian Federation

* Corresponding author (a.baranov[at]samgups.ru)

Suggested: 23.06.2025; Accepted: 15.10.2025; Published: 21.05.2026

Abstract

Due to increasing operational loads, such issues as the strength and durability of concrete and reinforced concrete structures are certainly of great importance in the construction of new or repair of existing structures. The article presents a detailed analysis of various methods for improving the physical and mechanical properties of concrete by adding various components such as microsilica, carbon nanotubes and iron oxide to its composition. Their influence on the main properties of concrete, including compressive strength, tensile strength, wear resistance and resistance to aggressive chemical environments are considered. Particular attention is paid to the advantages and disadvantages of using these additives, including their effect on the microstructure of the material, as well as the difficulties associated with their widespread implementation in industrial production, such as cost, availability and the need for accurate dosing.

An alternative solution for improving the performance characteristics of nanostructured concrete is also proposed, using a crystal-forming adhesive. The use of crystal-forming adhesive contributes to the formation of a more uniform and dense microstructure of concrete, which leads to a significant increase in its compressive and tensile strength, improved frost resistance and reduced water absorption. This approach provides more effective protection of concrete from the effects of aggressive chemical environments, including acids and salts, which makes it promising for use in high humidity or aggressive environments.

Thus, the possibility of using innovative solutions to create concrete with improved performance characteristics is substantiated, where crystal-forming adhesive is a competitive option. The results of the study are of practical importance for the construction industry, providing a basis for further development and implementation of new technologies in the production of building materials.

Keywords: concrete, additives, microsilica, carbon nanotubes, iron oxide, construction.

Введение

Бетон — один из важнейших строительных материалов, который на протяжении долгого времени остаётся основой для возведения самых различных объектов, от жилых домов до сложных инженерных сооружений. Популярность связана с его уникальными характеристиками, такими как прочность, долговечность и универсальность. Но современные строительные требования не стоят на месте, в связи с этим стандартных свойств бетона становится недостаточно. Применение различных добавок открывает широкие возможности для улучшения эксплуатационных характеристик материала, включая повышение механической прочности, устойчивости к внешним воздействиям. Эти инновационные подходы позволяют адаптировать бетон под конкретные условия эксплуатации, делая его ещё более эффективным и востребованным в строительной отрасли [1], [2].

Цель настоящей работы — систематизировать современные подходы к модификации бетона и обосновать выбор направлений для проведения дальнейших опытов.

Основные результаты

Микрокремнезем представляет собой ультратонкий порошок, состоящий из частиц диоксида кремния (SiO_2). Это побочный продукт производства кремния и его сплавов, который находит широкое применение в бетонной индустрии [3]. Его основное преимущество заключается в способности значительно улучшать прочность бетона за счёт заполнения микропор в цементной матрице. В результате добавления структура бетона становится более плотной, что обеспечивает повышение его прочности на сжатие и изгиб. Также микрокремнезем снижает проницаемость материала, что делает его менее восприимчивым к проникновению воды и агрессивных химических веществ, таких как хлориды и сульфаты. Данное свойство особенно важно для конструкций, работающих в условиях повышенной влажности или воздействия химически агрессивных сред. Ещё одним преимуществом является повышение стойкости к истиранию, что делает бетон с микрокремнеземом подходящим для мостов и других конструкций, подвергающихся интенсивным механическим нагрузкам [4]. Но имеется и ряд недостатков, которые не позволяют считать данную добавку универсальной и безальтернативной. Производство микрокремнезема требует значительных энергозатрат, что сказывается на его стоимости. Помимо этого, при добавлении микрокремнезема в бетон требуется тщательное перемешивание, чтобы избежать агломерации частиц. Высокие дозировки этой добавки могут снижать удобоукладываемость смеси. Для производства бетона с микрокремнеземом обычно используют его в количестве от 5 до 10% от массы цемента. В процессе приготовления сначала тщательно смешивают цемент, песок и щебень, далее добавляют микрокремнезем, и только после этого воду. Это обеспечивает равномерное распределение добавки в смеси и максимальную эффективность её действия [5], [6].

В работе [7] приводятся данные, показывающие эффективность добавления микрокремнезема в заполнитель бетона. В ходе проведенного исследования автор установил, что введение 30% микрокремнезема в бетонную смесь позволяет увеличить прочность материала на сжатие более чем в 2 раза (рис. 1). В то же время прочность бетона на изгиб увеличилась примерно на 16% (рис. 2). Это наглядно показывает эффективность данной добавки при попытках увеличения прочности бетона. Но стоит отметить тот факт, что при добавке более 30% результаты уже идут в обратную сторону и прочность бетона начинает значительно снижаться [8].



Рисунок 1 - Прочность бетона на сжатие
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.72.1.1>

Примечание: источник [8]



Рисунок 2 - Прочность бетона на изгиб
DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.72.1.2>

Примечание: источник [8]

Несмотря на, казалось бы, высокую эффективность микрокремнезема, его нельзя назвать универсальной добавкой по ряду причин. Высокие дозировки этой добавки могут снижать удобоукладываемость смеси. Этот эффект можно компенсировать добавлением суперпластификаторов, которые увеличивают подвижность бетонной смеси, но в то же время значительно повышают стоимость готового продукта. Также необходимы соблюдение правильной технологии приготовления, постоянное и тщательное перемешивание во избежание агломерации частиц.

Углеродные нанотрубки представляют собой материалы с уникальной структурой, состоящей из атомов углерода, образующих полые цилиндры диаметром в нанометровом масштабе, активно исследуются и применяются для улучшения механических характеристик бетона. Они значительно увеличивают прочность бетона, образуя прочные связи с цементной матрицей и улучшая сопротивление растяжению и сжатию. Дополнительным преимуществом является повышение трещиностойкости. Нанотрубки способствуют перераспределению напряжений, что снижает риск образования трещин в конструкции. Кроме того, бетон с углеродными нанотрубками обладает улучшенной электропроводностью, что открывает возможности для применения в специальных конструкциях, таких как антиобледенительные покрытия и датчики. Но, несмотря на безусловные преимущества, их использование сопряжено с определёнными трудностями. Нанотрубки склонны к агломерации, поэтому требуется использование диспергаторов и сложного оборудования для равномерного распределения в смеси. Их высокая стоимость и необходимость модификации поверхности для повышения совместимости с цементной матрицей также являются серьёзными ограничениями. Для приготовления бетона с углеродными нанотрубками их добавляют в количестве 0,05–0,2% от массы цемента. Сначала нанотрубки диспергируют в воде с использованием ультразвукового оборудования, затем эту водную суспензию вводят в бетонную смесь. Такой метод позволяет достичь равномерного распределения нанотрубок и максимального улучшения свойств бетона.

В ходе проведенных исследований [9] авторы получили следующие результаты при добавлении углеродных нанотрубок в бетон (рис. 3). Наиболее оптимальное количество от массы цемента составляет 0,1%, что позволило увеличить прочность более чем в два раза.

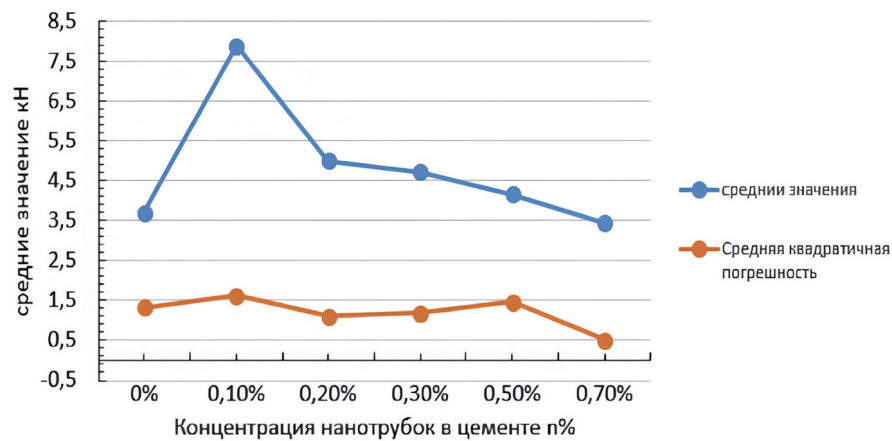


Рисунок 3 - График зависимости среднего значения кН от концентрации нанотрубок в цементе

DOI: <https://doi.org/10.60797/mca.2026.72.1.3>*Примечание: на основе источника [9]*

Стоит также отметить, что, как и микрокремнезем, углеродные нанотрубки трудно назвать универсальным средством. Они тоже подвержены агломерации и требуют тщательного соблюдения технологии изготовления.

Оксид железа, который широко применяется для окрашивания бетона, а также для улучшения его физических характеристик, представляет собой пигмент в виде порошка красного, жёлтого, чёрного или коричневого цвета. Его использование позволяет создавать бетон различных цветов, что особенно важно для архитектурных и дизайнерских проектов. Кроме того, оксид железа обеспечивает устойчивость бетона к ультрафиолетовому излучению, благодаря чему цвет не выцветает под воздействием солнечного света. Мелкодисперсный порошок оксида железа способствует уплотнению цементной матрицы, что также улучшает прочностные характеристики бетона. Однако для получения насыщенных цветов требуется значительное количество добавки, что увеличивает затраты. При высоких дозировках возможно изменение времени схватывания и уменьшение прочности бетона, поэтому необходима точность в дозировании. Обычно оксид железа вводят в количестве 3–5% от массы цемента. При приготовлении сначала сухие компоненты — цемент, песок, щебень и пигмент — тщательно перемешиваются для равномерного распределения цвета, после чего добавляют воду. Такой подход позволяет получить однородный цвет и сохранить оптимальные физические свойства бетона [10].

В качестве альтернативы более изученным и традиционным добавкам стоит отметить клеевые добавки для формирования кристаллов внутри цемента, которые представляют собой инновационное решение, направленное на повышение прочности и долговечности бетона. Основным компонентом таких добавок являются сульфатные соединения, которые вступают в реакцию с гидратными фазами цемента, формируя микрокристаллы. Эти кристаллы не только заполняют микропоры, но и укрепляют структуру бетона, улучшая его сопротивляемость растяжению, сжатию и воздействию химически агрессивных сред. Важным преимуществом является способность таких добавок улучшать водонепроницаемость материала, что особенно важно для гидротехнических сооружений и конструкций, эксплуатирующихся во влажной среде. Кроме того, кристаллообразующий клей способствует снижению образования трещин за счёт перераспределения напряжений внутри структуры бетона. Однако использование таких добавок требует строгого соблюдения дозировок и технологии введения в смесь. Для приготовления бетонной смеси с такими добавками сначала смешиваются цемент, песок и щебень. Затем добавляется клей, предварительно растворённый в воде, что позволяет обеспечить равномерное распределение активных компонентов. После тщательного перемешивания смеси активируется процесс кристаллизации, в результате чего образуется бетон с улучшенными эксплуатационными характеристиками, устойчивый к повышенным механическим и химическим нагрузкам. Проведённый анализ позволяет сделать вывод о перспективности использования кристаллообразующих добавок при модификации бетона. Дальнейшие исследования планируется сосредоточить на определении оптимальных пропорций добавки и изучении её влияния на физико-механические свойства материала, в том числе в условиях прессования. Полученные данные станут основой для практических рекомендаций по применению данной технологии в строительной отрасли.

Заключение

Каждая из рассмотренных добавок имеет свои преимущества и ограничения, которые следует учитывать при проектировании бетонных смесей. Микрокремнезем подходит для задач, требующих высокой прочности и долговечности. Углеродные нанотрубки — перспективное решение для повышения механических характеристик и создания инновационных материалов. Оксид железа — выбор для декоративных и архитектурных целей. Клеевые добавки с кристаллообразующими свойствами являются современным решением для повышения водонепроницаемости и долговечности. Важным этапом является точный расчёт пропорций добавок, правильная технология их введения в смесь и тщательное перемешивание. Современные технологии также позволяют комбинировать различные добавки, что открывает ещё больше возможностей для создания материалов с уникальными



свойствами. Оптимизация состава бетонной смеси с использованием добавок — это путь к повышению эффективности строительства и долговечности сооружений.

Применение данной добавки в обычном бетоне может быть оправдано. Тогда как изучению вопроса влияния кристаллообразующего клея на свойства бетонной смеси в стесненных условиях прессования или гиперпрессования, должного внимания не уделялось.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

Conflict of Interest

None declared.

Review

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

Список литературы / References

1. Суглобов А.В. Мелкозернистый бетон повышенной прочности с наномодифицирующей добавкой / А.В. Суглобов, Е.В. Чивикова // Строительство-2016 : материалы II Брянского международного инновационного форума. — Брянск : Брянская государственная инженерно-технологическая академия, 2016. — Т. 1. — С. 158–163. — EDN YMTSUB.
2. Жданок С.А. Нанотехнологии в строительном материаловедении: реальность и перспективы / С.А. Жданок, Б.М. Хрусталева, Э.И. Батяновский [и др.] // Вестник Белорусского национального технического университета. — 2009. — № 3. — С. 5–22. — EDN WFJNZF.
3. Бутакова М.Д. Влияние кремнийсодержащих добавок на свойство водонепроницаемости бетонных образцов / М.Д. Бутакова, А.В. Михайлов, С.С. Сарибекян // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Строительство и архитектура. — 2017. — Т. 17. — № 2. — С. 34–41. — DOI: 10.14529/build170205. — EDN YNZZKH.
4. Нагрузова Л.П. Применение отходов Новокузнецкого ферросплавного завода при производстве бетонов заводского и монолитного изготовления / Л.П. Нагрузова, К.В. Сазнов, А.Ю. Кононов, А. Кубанычбек // Современные научные исследования и разработки. — 2018. — Т. 2. — № 5 (22). — С. 394–398. — EDN XYNHKP.
5. Мухаматдырова С.Р. Адаптация микроорганизмов к тяжелым металлам / С.Р. Мухаматдырова, Е.В. Кузина, М.Г. Искужина [и др.] // Известия Уфимского научного центра РАН. — 2023. — № 4. — С. 31–43. — DOI: 10.31040/2222-8349-2023-0-4-31-43. — EDN BYFDSY.
6. Абдуллаев М.А.В. Высокопрочные мелкозернистые бетоны на основе комплексной нанодобавки / М.А.В. Абдуллаев, А.М. Абдуллаев, Р.М. Абдуллаев // Известия высших учебных заведений. Строительство. — 2024. — № 6 (786). — С. 78–93. — DOI: 10.32683/0536-1052-2024-786-6-78-93. — EDN DECHZJ.
7. Джаббарова Н.Э. Влияние добавки микрокремнезема на прочность бетона / Н.Э. Джаббарова, У.Ф. Гасанова // Проблемы науки. — 2022. — № 1 (69). — С. 12–15. — EDN JGTONX.
8. Джагарян И.Г. Влияние активного кремнезема на долговечность бетонных и железобетонных изделий / И.Г. Джагарян, М.С. Анянов, В.С. Ковалев // Перспективы развития рельсового транспорта в условиях интенсивного внедрения новых технологий, импортозамещения и параллельного импорта : материалы V Международной выставки-конференции «ИНТЕРМЕТРО». — Москва : Транспорт РУТ, 2023. — С. 26–33. — EDN AIZBLS.
9. Атоликшоев М.Д. Исследование прочности бетона с добавлением нанотрубок / М.Д. Атоликшоев, А.А. Гошев // Молодые учёные России : сборник статей VIII Всероссийской научно-практической конференции. — Пенза : Наука и Просвещение, 2021. — С. 45–47. — EDN KVBPRX.
10. Скоркин М.Е. Повышение физико-механических характеристик мелкозернистых бетонов модифицированием комплексной добавкой / М.Е. Скоркин // Научные исследования. — 2016. — № 4 (5). — С. 18–20. — EDN WADZEP.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Suglobov A.V. Melkozernistyj beton povyshennoj prochnosti s nanomodificiruyushchej dobavkoj [Fine-grained concrete of increased strength with a nanomodifying additive] / A.V. Suglobov, E.V. Chivikova // Stroitel'stvo-2016 [Construction-2016] : proceedings of the II Bryansk International Innovation Forum. — Bryansk : Bryansk State Engineering and Technology Academy, 2016. — Vol. 1. — P. 158–163. — EDN YMTSUB. [in Russian]
2. Zhdanok S.A. Nanotekhnologii v stroitel'nom materialovedenii: real'nost' i perspektivy [Nanotechnology in Construction Material Science: Reality and Prospects] / S.A. Zhdanok, B.M. Khroustalev, E.I. Batyanovsky [et al.] // Vestnik Belorusskogo nacional'nogo tekhnicheskogo universiteta [Bulletin of the Belarusian National Technical University]. — 2009. — № 3. — P. 5–22. — EDN WFJNZF. [in Russian]
3. Butakova M.D. Vliyanie kremnijsoderzhashchikh dobavok na svojstvo vodonepronicaemosti betonnykh obrazcov [Influence of Silicon-Containing Additives on the Property of the Watertightness of Concrete Samples] / M.D. Butakova, A.V. Mikhailov, S.S. Saribekyan // Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arkhitektura [Bulletin of South Ural State University. Series: Construction Engineering and Architecture]. — 2017. — Vol. 17. — № 2. — P. 34–41. — DOI: 10.14529/build170205. — EDN YNZZKH. [in Russian]
4. Nagruzova L.P. Primenenie otkhodov Novokuzneckogo ferrospravnogo zavoda pri proizvodstve betonov zavodskogo i monolitnogo izgotovleniya [Use of wastes from the Novokuznetsk Ferroalloy Plant in the production of factory and monolithic concrete] / L.P. Nagruzova, K.V. Saznov, A.Yu. Kononov, A. Kubanychbek // Sovremennye nauchnye issledovaniya i



razrabotki [Modern Scientific Research and Development]. — 2018. — Vol. 2. — № 5 (22). — P. 394–398. — EDN XYNHKP. [in Russian]

5. Mukhamatdyarova S.R. Adaptatsiya mikroorganizmov k tyazhelym metallam [Adaptation of Microorganisms to Heavy Metals] / S.R. Mukhamatdyarova, E.V. Kuzina, M.G. Iskuzhina [et al.] // Izvestiya Ufimskogo nauchnogo centra RAN [Proceedings of the Ufa Scientific Center of the Russian Academy of Sciences]. — 2023. — № 4. — P. 31–43. — DOI: 10.31040/2222-8349-2023-0-4-31-43. — EDN BYFDSY. [in Russian]

6. Abdullaev M.A.V. Vysokoprochnye melkozernistye betony na osnove kompleksnoj nanodobavki [High-Strength Fine-Grained Concretes Based on a Complex Nanoadditive] / M.A.V. Abdullaev, A.M. Abdullaev, R.M. Abdullaev // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Stroitel'stvo [News of Higher Educational Institutions. Construction]. — 2024. — № 6 (786). — P. 78–93. — DOI: 10.32683/0536-1052-2024-786-6-78-93. — EDN DECHZJ. [in Russian]

7. Dzhabarova N.E. Vliyanie dobavki mikrokremszema na prochnost' betona [Influence of microsilica additive on concrete strength] / N.E. Dzhabarova, U.F. Gasanova // Problemy nauki [Problems of Science]. — 2022. — № 1 (69). — P. 12–15. — EDN JGTONX. [in Russian]

8. Dzhagaryan I.G. Vliyanie aktivnogo kremnezema na dolgovechnost' betonnykh i zhelezobetonnykh izdelij [Influence of active silica on the durability of concrete and reinforced concrete products] / I.G. Dzhagaryan, M.S. Anyanov, V.S. Kovalev // Perspektivy razvitiya rel'sovogo transporta v usloviyakh intensivnogo vnedreniya novykh tekhnologij, importozameshcheniya i parallel'nogo importa [Prospects for the Development of Rail Transport in the Context of Intensive Introduction of New Technologies, Import Substitution and Parallel Import] : proceedings of the V International Exhibition-Conference "INTERMETRO". — Moscow : Transport RUT, 2023. — P. 26–33. — EDN AIZBLS. [in Russian]

9. Atolikshoev M.D. Issledovanie prochnosti betona s dobavleniem nanotrubok [Investigation of the Strength of Concrete with the Addition of Nanotubes] / M.D. Atolikshoev, A.A. Goshev // Molodye uchenye Rossii [Young Scientists of Russia] : collection of articles of the VIII All-Russian Scientific and Practical Conference. — Penza : Nauka i Prosveshchenie, 2021. — P. 45–47. — EDN KVBPRX. [in Russian]

10. Skorkin M.E. Povyshenie fiziko-mekhanicheskikh kharakteristik melkozernistykh betonov modifitsirovaniem kompleksnoj dobavkoj [Improving the physical and mechanical characteristics of fine-grained concrete by modification with a complex additive] / M.E. Skorkin // Nauchnye issledovaniya [Scientific Research]. — 2016. — № 4 (5). — P. 18–20. — EDN WADZEP. [in Russian]