

**СТРОИТЕЛЬНЫЕ КОНСТРУКЦИИ, ЗДАНИЯ И СООРУЖЕНИЯ/CONSTRUCTION STRUCTURES,
BUILDINGS AND STRUCTURES**

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.154.112>

**ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЙ УСИЛЕНИЯ БЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
НАНОТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КОМПОЗИТОВ**

Научная статья

Селезнев К.А.^{1,*}

¹ГК «РМС», Москва, Российская Федерация

* Корреспондирующий автор (ska.upravlenie[at]gmail.com)

Аннотация

В данной статье исследуется применение нанотехнологических композитов для улучшения структурных свойств бетона. Присущие бетону недостатки, такие как подверженность растрескиванию и ухудшение состояния окружающей среды, ограничивают его эксплуатационные характеристики и долговечность. Нанотехнологии, основанные на манипулировании материалами на атомном и молекулярном уровнях, предлагают новаторский подход к преодолению этих ограничений путем повышения механических свойств материала и устойчивости к факторам окружающей среды. Нанокompозиты, включающие наночастицы или нановолокна, значительно повышают прочность бетона на сжатие и изгиб и долговечность. Подчеркивается роль наноматериалов на основе углерода, таких как фуллерены, углеродные нанотрубки и графен. Такие инновации, как поликарбоксилатные суперпластификаторы, разработанные методом механохимической активации, демонстрируют практические преимущества нанотехнологий при производстве бетона со значительно повышенной прочностью и эксплуатационными характеристиками. Также проводится подробный сравнительный анализ, сопоставляющий нанотехнологические композиты с традиционными методами армирования. Исследование подчеркивает преобразующий потенциал нанотехнологий в строительных материалах, предлагая понимание инновационных решений для повышения долговечности, прочности и устойчивости бетона к воздействию окружающей среды, тем самым прокладывая путь для будущих достижений в области строительных технологий.

Ключевые слова: нанотехнологии, бетон, нанокompозиты, нанонаука, наноинженерия, строительные технологии, инновации в материалах.

**RESEARCH ON TECHNOLOGIES FOR STRENGTHENING CONCRETE STRUCTURES USING
NANOTECHNOLOGY COMPOSITES**

Research article

Seleznev K.A.^{1,*}

¹GC "RMS", Moscow, Russian Federation

* Corresponding author (ska.upravlenie[at]gmail.com)

Abstract

This article explores the application of nanotechnology composites to enhance the structural properties of concrete. Inherent shortcomings of concrete, such as susceptibility to cracking and environmental degradation, limit its performance characteristics and durability. Nanotechnologies, based on manipulating materials at the atomic and molecular levels, offer an innovative approach to overcoming these limitations by enhancing the material's mechanical properties and resistance to environmental factors. Nanocomposites, incorporating nanoparticles or nanofibers, significantly increase concrete's compressive and flexural strength and durability. The role of carbon-based nanomaterials, such as fullerenes, carbon nanotubes, and graphene, is emphasized. Innovations like polycarboxylate superplasticizers, developed through mechanochemical activation, demonstrate the practical advantages of nanotechnologies in producing concrete with significantly enhanced strength and performance characteristics. A detailed comparative analysis contrasts nanotechnology composites with traditional reinforcement methods. This study underscores the transformative potential of nanotechnologies in building materials, offering insights into innovative solutions for increasing the durability, strength, and environmental resistance of concrete, thereby paving the way for future advancements in construction technologies.

Keywords: nanotechnology, concrete, nanocomposites, nanoscience, nanoengineering, construction technologies, materials innovation.

Введение

Бетон — это композитный материал, состоящий из мелких и крупных заполнителей, скрепленных жидким цементом, который со временем затвердевает. Такие качества, как прочность на сжатие, универсальность и экономичность, сделали его предпочтительным материалом для множества строительных применений — от мостов и небоскребов до дорог и плотин. Несмотря на широкое применение и присущие ему достоинства, обычный бетон подвержен растрескиванию, имеет ограниченную прочность на растяжение и уязвим к воздействию таких факторов окружающей среды, как попадание влаги и химическое воздействие, что приводит к коррозии стальной арматуры и, как следствие, к разрушению конструкции с течением времени.

Появление нанотехнологий, позволяющих манипулировать веществом на атомном, молекулярном и супрамолекулярном уровнях, открыло новые возможности в различных областях, включая строительные материалы. Нанотехнологии способны произвести революцию в строительной отрасли, улучшив физические свойства обычных

строительных материалов, сделав их более прочными, долговечными и устойчивыми к воздействию окружающей среды. В частности, интеграция нанотехнологий в бетон посредством использования нанокompозитных материалов обещает смягчить недостатки, присущие традиционному бетону, и предложить решения для повышения его механических свойств, прочности и долговечности.

Нанокompозитные материалы, включающие наночастицы или нановолокна в матричный материал, могут значительно улучшить механические свойства, такие как прочность на сжатие, прочность на изгиб и вязкость разрушения. Наноразмерные армирующие элементы также могут повысить долговечность бетона, увеличивая его устойчивость к проникновению воды, химическому воздействию и износу, тем самым продлевая срок службы бетонных конструкций [1].

Цель данной статьи — изучить потенциал композитов на основе нанотехнологий для улучшения структурных характеристик бетона. Благодаря стратегической интеграции наноматериалов, данное исследование направлено на развитие комплексного понимания того, как нанотехнологии могут быть использованы для преодоления ограничений традиционного бетона, представляя собой смену парадигмы в строительном материаловедении, которая делает акцент на повышении структурной целостности и устойчивости.

Исследование нанотехнологий

Исследование и интеграция нанотехнологий в строительные материалы представляют собой значительный скачок в повышении структурной устойчивости и функциональности. В основе прогресса лежит наночастица — крошечный объект размером от 1 до 100 нанометров, состоящий из нескольких десятков или тысяч атомов. Наночастицы, или нанокластеры, демонстрируют высокоупорядоченное расположение атомов, за что их называют нанокристаллами. Точная организация атомов необходима, поскольку она лежит в основе резких изменений свойств материалов, наблюдаемых на микроуровне. В частности, уменьшение размера частиц до нанометрового диапазона приводит к глубоким изменениям электронной проводимости, оптического поглощения, химической реактивности и механических характеристик материалов. Заметным следствием уменьшения размера частиц является значительное увеличение числа атомов, расположенных на поверхности частицы. Преобладание количества поверхностных атомов, в свою очередь, увеличивает удельную площадь поверхности нанопорошков, приводя к заметным изменениям поверхностной энергии и морфологии (рис. 1). Данные функции важны в изменении фундаментальных свойств и химической реактивности наноматериалов, обеспечивая такие улучшения, как повышенная каталитическая эффективность и разработка пигментов и красок, обладающих способностью к самоочищению и самовосстановлению [2], [3], [4].

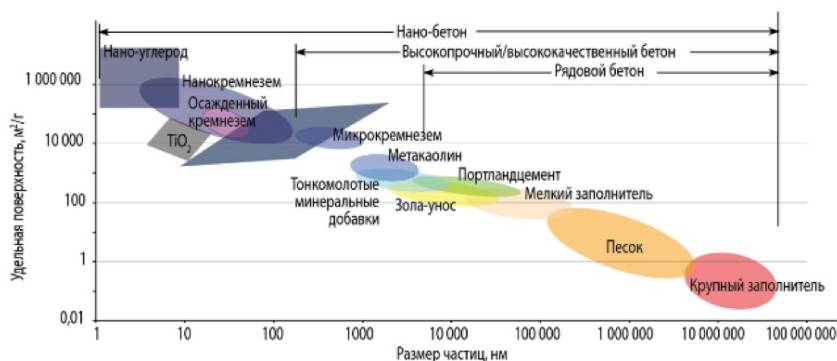


Рисунок 1 - Размер частиц и удельная поверхность компонентов бетона
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.154.112.1>

Область нанотехнологий способствовала синтезу новых углеродных структур, включая фуллерены (C₆₀), углеродные нанотрубки и графен, которые находятся на первом плане современных инноваций в области материалов [5]. Синтез одностенных нанотрубок, проводимый в строго контролируемых условиях в присутствии катализатора, подчеркивает точность, требуемую при производстве наноматериалов. Отклонения в этом процессе приводят к получению многостенных нанотрубок, подчеркивая критический характер соблюдения установленных протоколов синтеза. Спектр применения нанотрубок удивительно широк и охватывает наноэлектронные устройства, иглы для зондовых микроскопов, биологические и химические датчики, подложки для катализаторов, а также технологии, направленные на хранение и разделение газов, самовосстановление трещин и армирование композитных материалов [2]. Исключительная прочность на растяжение нанотрубок, которая, по оценкам, в двадцать раз превосходит прочность стали, делает эти материалы идеальными компонентами для следующего поколения волокон и пленок. Такие материалы способны произвести революцию в строительстве большепролетных или высотных сооружений благодаря усовершенствованным опорным механизмам [6].

Интеграция углеродных нанотрубок с традиционными полимерами стала особенно многообещающей стратегией для армирования композитных материалов. Включение всего лишь 10% одностенных нанотрубок в Zylon, самое прочное из известных искусственных волокон, привело к увеличению прочности материала на 50% [7]. Такое усовершенствование подчеркивает потенциал нанотехнологий для значительного повышения эксплуатационных

характеристик материалов за счет улучшения диспергирования и выравнивания нанотрубок в композитных структурах.

Междисциплинарные области нанонауки и наноинженерии занимают центральное место в разработке композиционных материалов на цементной основе. Нанонаука занимается нано- и микроструктурным анализом материалов, используя передовые методы исследований и моделирования для выяснения взаимосвязи между структурой и макроскопическими свойствами. Наноинженерия, с другой стороны, фокусируется на манипулировании наноразмерными объектами для создания нового поколения многофункциональных композитных материалов, характеризующихся превосходными механическими характеристиками и долговечностью. Они способны к включению низкого электрического сопротивления и обладают самоконтролем, самоочищением и самовосстановлением [2], [8], [9].

Недавние исследования в области применения нанотехнологий к компонентам цементобетона в основном были направлены на выяснение механизмов их структуры и разрушения. Передовые приборы позволяют проводить структурные наблюдения на атомарном уровне и количественную оценку свойств основного материала. Такие методы, как ядерный магнитный резонанс, атомно-силовая микроскопия, измерения микро- и нанотвердости, рассеяние нейтронов и рентгеновских лучей, ультразвуковая силовая микроскопия и ионно-лучевая нанотомография, сыграли важную роль в достижении этих результатов [2], [3], [4], [8]. Более глубокое понимание структуры материала на наноуровне способствует целенаправленному улучшению его ключевых характеристик, прокладывая путь к разработке инновационных строительных средств с повышенной долговечностью, прочностью и устойчивостью к воздействию окружающей среды.

Нанотехнологии в бетоне

Бетон, наиболее широко используемый антропогенный материал, превращается в наноструктурированный многофазный композит, который со временем претерпевает изменения [10], [11]. Внедрение нанотехнологий в бетон предлагает подход к улучшению его характеристик за счет использования наночастиц для заполнения промежутков между минеральными добавками и частицами цемента [12], [13].

Основные характеристики бетона связаны с механическими свойствами укрепленных бетонных структур, характеристиками нанокомпозитных материалов, а также моделированием процессов внедрения и распределения наночастиц в бетонной матрице:

Прочность на сжатие укрепленного бетона, модифицированного наночастицами:

$$\sigma_c = f(\sigma_{c0}, V_f, d_p, \tau), \quad (1)$$

где: σ_c — прочность на сжатие композитного бетона, σ_{c0} — исходная прочность на сжатие бетона без добавок, V_f — объемное содержание наночастиц в композите, d_p — диаметр наночастиц, τ — параметр, характеризующий взаимодействие между наночастицами и бетонной матрицей.

Модуль упругости бетона с нанодобавками:

$$E_c = E_{c0} (1 + k \cdot V_f), \quad (2)$$

где: E_c — модуль упругости модифицированного бетона, E_{c0} — модуль упругости чистого бетона, k — коэффициент, учитывающий улучшение механических свойств за счет добавления наночастиц, V_f — объемное содержание наночастиц.

Формула Дебая для расчета теплопроводности нанокомпозитного бетона:

$$\lambda = 3k_B T / 2\pi^2 v \cdot (1/3 \cdot L^2 + d^2), \quad (3)$$

где: λ — теплопроводность, k_B — постоянная Больцмана, T — температура, v — скорость звука в материале, L — средняя длина свободного пробега фононов, d — размер наночастиц.

Модель перколяции для оценки электропроводности нанокомпозитов:

$$\sigma = \sigma_0 (p - p_c)^t, \quad (4)$$

где: σ — электропроводность композита, σ_0 — электропроводность при пороге перколяции, p — доля проводящего наполнителя, p_c — критическая доля наполнителя для создания проводящего пути, t — критический индекс проводимости.

Метод использования наночастиц для заполнения промежутков может быть реализован с помощью двух различных принципов (рис. 2): подход «сверху-вниз» предполагает коллоидное измельчение портландцемента, в то время как подход «снизу-вверх» использует самосборку посредством топомимических реакций, активируемых механохимически.



Рисунок 2 - Схема подходов «сверху вниз» и «снизу вверх» в нанотехнологии
 DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.154.112.2>

Конструктивные возможности нанохимии «снизу-вверх» привели к появлению новых продуктов, специально разработанных для улучшения технологии производства бетона. Заметным достижением в этой области является разработка поликарбоксилатных суперпластификаторов, являющихся результатом механохимической активации цемента с помощью интенсификаторов измельчения на основе поликарбоксилатных эфиров, которые оказались исключительно эффективным методом модулирования свойств цементных материалов, как в их пластичном, так и в затвердевшем состоянии. Заметное увеличение прочности — до 115 МПа по сравнению с базовой прочностью 72-89 МПа — объясняется образованием органоминеральных нанослоев или наносетей на частицах цемента и аморфизацией их поверхностей [14].

В свою очередь, структура и механизмы деградации бетона действуют в разных масштабах, от нано- и микро- до макроуровня. Центральное место в его наноструктуре занимает аморфная фаза силикат-гидрата кальция (C-S-H), служащая связующим «клеем», который объединяет компоненты бетона и сам по себе является наноматериалом (рис. 3).

Кристаллизованный C—S—H
2×2 мкм²

Атомное разрешение
20×20 нм²

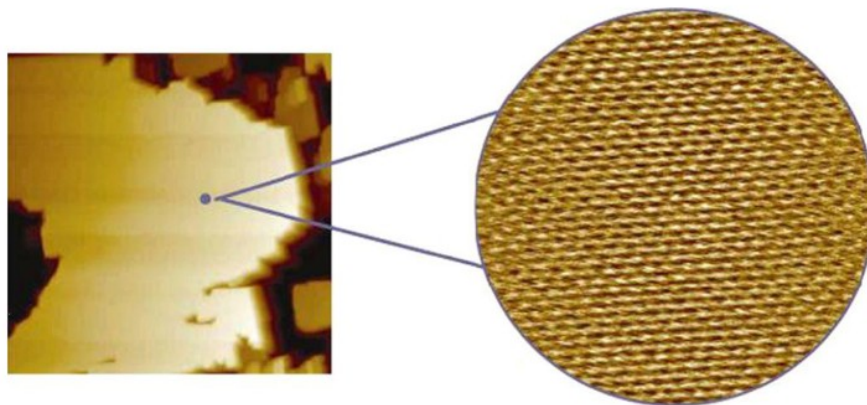


Рисунок 3 - Наноразмерная структура C—S—H, кристаллизованная на кальцитной подложке и обнаруженная при помощи АСМ (атомно-силового микроскопа)
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.154.112.3>

Наночастицы C—S—H размером в среднем 5-10 нм служат основными центрами зарождения продуктов гидратации портландцемента, что приводит к заметному уменьшению пористости, и, следовательно, проницаемости цементной массы [15].

Таким образом, интеграция наночастиц в обычные строительные материалы наделяет их отличительными свойствами, необходимыми для строительства высотных, большепролетных и специализированных сооружений [10], [11], [16].

Например, наночастицы SiO₂ (nano-SiO₂) (нанокремнезема) (рис. 4) показали большие перспективы в высококачественных и самоуплотняющихся бетонных смесях, повышая обрабатываемость и прочность. Большинство экспериментальных работ было сосредоточено на наночастицах SiO₂, раскрывающих их важную роль в разработке самоуплотняющегося бетона с уменьшенным тепловыделением [17].

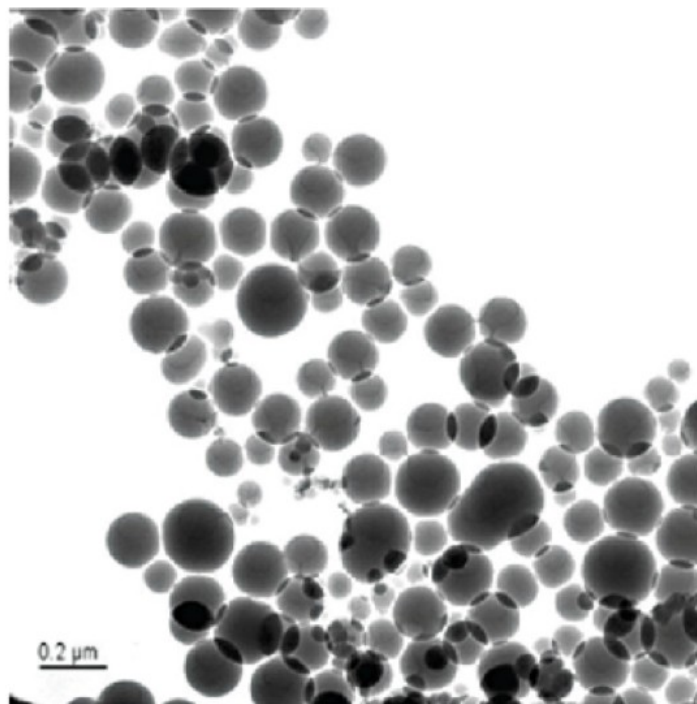


Рисунок 4 - Частицы нанокремнезема
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.154.112.4>

Было обнаружено, что для увеличения прочности частицы nano-SiO₂ эффективнее, чем кварцевая пыль. За 28 сут 10%-я смесь nano-SiO₂ с дисперсными компонентами увеличивает прочность при сжатии цементных растворов на 26 %, а 15%-я смесь кварцевой пыли — всего на 10% (рис. 5).

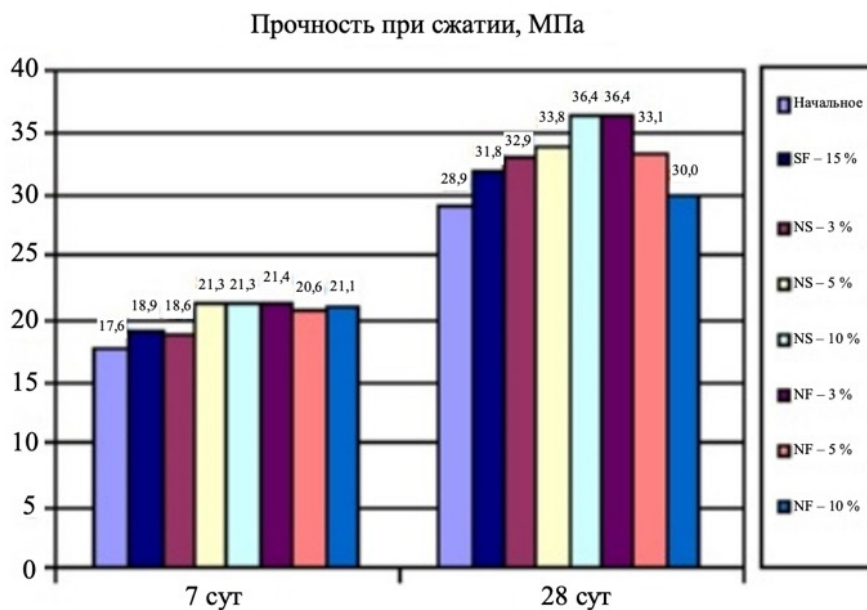


Рисунок 5 - Прочность при сжатии цементных растворов с разными дозировками нано-SiO₂ (NS) и нано-Fe₂O₃ (NF) в сравнении с растворами портландцемента и кварцевой пыли (SF)
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.154.112.5>

Использование папо-SiO₂, особенно в виде суспензии, в качестве реологического модификатора в дозировках 1–2% по отношению к массе вяжущего продемонстрировало превосходное сцепление, уменьшенную сегрегацию воды и сведенное к минимуму расслаивание в бетонных смесях [16].

Рецептура самогерметизирующегося бетона с пониженным тепловыделением, включающая цемент наряду с минеральными добавками, такими как доменный шлак, известняк и летучая зола, была значительно оптимизирована за счет добавления папо-SiO₂ [18]. Что не только улучшает обрабатываемость смеси, но и максимизирует прочность на сжатие. Признана роль Nano-SiO₂ в качестве усилителя реологических свойств в плотных и прочных цементных композициях, при этом его ускоряющее действие на гидратацию C3S особенно отмечается за то, что он способствует более быстрому образованию геля C—S—H.

Стоит также отметить высокопрочный суперпластифицированный бетон, содержащий значительное количество золы-уноса с низким содержанием кальция и папо-SiO₂, демонстрирующий быстрое протекание пуццолановой реакции папо-SiO₂ и значительно повышающий пуццолановую активность золы-уноса. Доказано, что введение папо-SiO₂ даже в минимальных дозировках уменьшает образование СН на границе раздела с наполнителями и уменьшает размер кристаллов СН, тем самым повышая прочность бетона на сжатие и растяжение на ранних стадиях затвердевания.

Исследования влияния различных доз и размеров наночастиц SiO₂ на портландцементные пасты показали, что наночастицы меньшего размера в малых количествах значительно увеличивают прочность цементного камня на сжатие. Такое повышение прочности и долговечности объясняется образованием протяженных кремний-кислородных цепей в структуре геля C—S—H [19], [20].

Эффективность наноматериалов в бетоне, несмотря на то, что для их производства требуется менее 1% цемента по массе, зависит от масштабируемости и экономической эффективности их производства. Методы промышленного производства наноматериалов включают плазменно-дуговую обработку, плазменный пиролиз, химическое осаждение из газовой фазы, электроосаждение, золь-гель синтез, механохимические процессы и использование природных наносистем. Среди них золь-гель синтез (рис. 6) выделяется как распространенный метод получения наноразмерных материалов, таких как нанокремнезем, с использованием тетраэтоксисилана в качестве прекурсора и получением аморфного нанокремнезема SiO₂ с высокой удельной поверхностью [2].



Рисунок 6 - Золь-гель синтез
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.154.112.6>

Положительное воздействие наночастиц на микроструктуру и свойства материалов на основе цемента обусловлено их способностью повышать вязкость, заполнять пустоты, выступать в качестве центров зарождения, способствовать образованию более мелких и однородных кристаллов, участвовать в пуццолановых реакциях и улучшать поверхность раздела между цементной пастой и наполнителями. Кроме того, они блокируют трещины и повышают структурную целостность цементных материалов, что приводит к повышению прочности при ударе, растяжении и изгибе.

Таким образом тенденция к использованию все более мелкодисперсных материалов в бетонных технологиях отражается на размерах и удельной поверхности используемых частиц. На протяжении десятилетий были достигнуты значительные успехи в технологии производства бетона за счет введения все более мелких частиц, включая микро-, а затем и нанокремнезем. Нановолокна, такие как папо- Al_2O_3 (рис. 7), представляют собой еще одну возможность в повышении эксплуатационных характеристик бетона, указывая на будущее, в котором бетон будет не только конструкционным материалом, но и передовым композитом с инженерными свойствами на наноуровне [10].

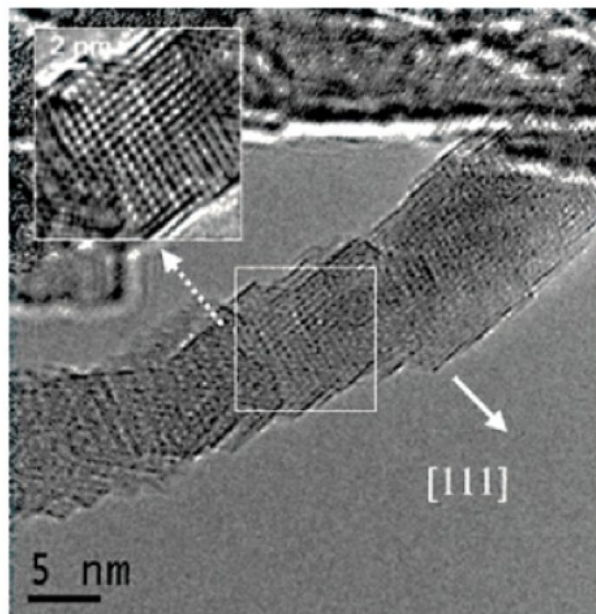


Рисунок 7 - Нановолокна Al_2O_3
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.154.112.7>

Сравнение нанотехнологических композитов с другими современными методами

Нанотехнологические композиты, характеризующиеся включением в них наночастиц или нановолокон, значительно улучшают механические свойства, долговечность и устойчивость бетона к воздействию окружающей среды. Улучшения объясняются наноразмерными эффектами, которые включают заполнение пор в бетонной матрице, модификацию микроструктуры материала и улучшение межфазной переходной зоны между цементной пастой и наполнителями.

Напротив, традиционные методы армирования, такие как использование стальной арматуры и армированных волокнами полимеров (FRP — fiber-reinforced polymers), в основном основаны на макромасштабных модификациях для повышения целостности конструкции. Стальная арматура, обеспечивая значительную прочность на растяжение, подвержена коррозии, что приводит к проблемам с долговечностью и увеличению затрат на техническое обслуживание. Стеклопластиковые материалы обладают коррозионной стойкостью и более высоким отношением прочности к весу, чем сталь, но их применение ограничено высокой стоимостью и потенциальными проблемами с длительным сроком службы при определенных условиях окружающей среды.

Основное преимущество нанотехнологических композитов перед традиционными методами заключается в их способности не только улучшать конструктивные характеристики, но и наделять бетон новыми функциональными возможностями — самовосстанавливающиеся свойства и улучшенные тепловые характеристики. Более того, использование наноматериалов может привести к снижению углеродного следа бетона за счет оптимизации состава и уменьшения необходимого количества цемента.

Однако, высокая стоимость наноматериалов в сочетании со сложностью обеспечения равномерного распределения в бетонной матрице создает значительные препятствия. Кроме того, существуют опасения относительно потенциального воздействия наноматериалов на здоровье и окружающую среду, что требует тщательной оценки рисков и разработки протоколов безопасного обращения и использования.

Что касается областей применения, нанотехнологические композиты перспективны для высокопроизводительных применений, где решающее значение имеют улучшенные механические свойства, долговечность и многофункциональность. Что включает инфраструктуру, подверженную воздействию суровых условий окружающей среды, здания, требующие повышения энергоэффективности (табл. 1).

Таблица 1 - Примеры применения нанотехнологий в строительном секторе

DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.154.112.8>

Нанотехнологическое Применение	Пример Проекта	Преимущества	Ограничения
Нанокремнезем в высокопроизводительном бетоне	Бурдж Халифа, Дубай, ОАЭ	- Увеличенная прочность на сжатие - Улучшенная долговечность	- Высокая стоимость - Риски для здоровья при вдыхании
Углеродные нанотрубки в структурном армировании	Шанхайская башня, Шанхай, Китай	- Повышенная прочность - Улучшенная гибкость	- Проблемы с равномерным распределением - Высокая стоимость и ограниченная доступность
Покрyтия из диоксида титана для самоочищающихся поверхностей	Церковь Святого Семейства (Саграда Фамилия), Барселона, Испания	- Самоочищение - Положительное влияние на окружающую среду	- Ограниченная эффективность в тени или в помещении - Вопросы долговечности

В заключение, хотя нанотехнологические композиты обладают существенными преимуществами по сравнению с традиционными методами армирования, включая повышенную долговечность, функциональные свойства и потенциально сниженное воздействие на окружающую среду, их более широкое внедрение зависит от преодоления проблем экономики и безопасности. Будущие исследования должны быть сосредоточены на методах снижения затрат, разработке стандартизированных протоколов безопасности и исследовании новых наноматериалов с повышенными эксплуатационными характеристиками и меньшим воздействием на окружающую среду.

Заключение

В заключение в этой статье представлено всестороннее исследование интеграции нанотехнологий в армирование бетона, подчеркивающий преобразующий подход к устранению ограничений, присущих традиционному бетону. Благодаря внедрению в бетон нанокompозитов, таких как наночастицы и нановолокна, были достигнуты значительные успехи в повышении его механических свойств, долговечности и устойчивости к ухудшению состояния окружающей среды. В исследовании тщательно рассматриваются типы применимых нанокompозитов, их влияние на физические и механические свойства бетона, а также лежащие в основе механизмы, способствующие этим улучшениям.

Роль наноматериалов на основе углерода, включая фуллерены, углеродные нанотрубки и графен, подчеркивается за их исключительный вклад в инновации материалов, обеспечивающий беспрецедентную прочность на растяжение и потенциал в разработке передовых композиционных материалов. Также подчеркнута синергия между нанонаукой и нанотехнологией в создании новых композиционных материалов на основе цемента, характеризующихся превосходными эксплуатационными характеристиками и многофункциональными свойствами, такими как способность к самоочищению и самовосстановлению.

Достижения в области аналитических методов способствовали более глубокому пониманию наноструктуры бетона, особенно с акцентом на фазу гидрата силиката кальция, которая играет ключевую роль в его связующих

свойствах. Такие инновации, как поликарбоксилатные суперпластификаторы, появляющиеся в результате механохимической активации цемента, демонстрируют практические преимущества нанотехнологий в повышении прочности и эксплуатационных характеристик бетона.

Эта статья не только проливает свет на потенциал нанотехнологий произвести революцию в строительной отрасли, преодолев традиционные ограничения, связанные с бетоном, но и закладывает основу для будущих исследований и инноваций в области строительных материалов. Что подчеркивает важность междисциплинарного сотрудничества в продвижении строительных технологий, прокладывая путь к разработке устойчивых, долговечных и высокоэффективных строительных материалов будущего.

Конфликт интересов

Не указан.

Рецензия

Шкиндеров М.С., Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ, Казань Российская Федерация
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.154.112.9>

Conflict of Interest

None declared.

Review

Shkinderov M.S., Kazan National Research Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan Russian Federation
DOI: <https://doi.org/10.60797/IRJ.2025.154.112.9>

Список литературы / References

1. Гречихина Е.А. Перспективы применения современных композиционных материалов и нанотехнологий в строительстве / Е.А. Гречихина, А.Р. Ткачева, Ю.С. Скотар // Физика и современные технологии в АПК : материалы XI Всероссийской молодежной конференции молодых ученых, студентов и школьников с международным участием. — Орел: ООО Полиграфическая фирма «Картуш», 2020. — С. 204–206. — EDN AFAFBX.
2. Bhushan B. Springer handbook of nanotechnology : in 3 volumes / B. Bhushan. — Berlin : Springer, 2017.
3. Nasrollahzadeh M. An introduction to nanotechnology / M. Nasrollahzadeh, S. Sajadi, M. Sajadi [et al.] // Interface Science and Technology. — 2019. — Vol. 28. — P. 1–27.
4. Klabunde K.J. Nanoscale materials in chemistry / K.J. Klabunde [et al.]. — New York : Wiley, 2021.
5. Parumandla N. Effect of Al₂O₃ and SiC nano reinforcements on microstructure, mechanical and wear properties of surface nanocomposites fabricated by friction stir processing / N. Parumandla, K. Adepu // Materials Science. — 2018. — Vol. 24. — № 3. — P. 338–344.
6. Jiang Q. Additive manufactured carbon nanotube/epoxy nanocomposites for heavy-duty applications / Q. Jiang, H. Zhang, D. Rusakov [et al.] // ACS Applied Polymer Materials. — 2020. — Vol. 3. — № 1. — P. 93–97. — DOI: 10.1021/acsapm.0c01011.
7. Rashid T.Ur. Mechanical properties of electrospun fibers – a critical review / T.Ur. Rashid, R.E. Gorga, W.E. Krause // Advanced Engineering Materials. — 2021. — Vol. 23. — № 9. — 2100153 p. — DOI: 10.1002/adem.202100153. — EDN HTNOWC.
8. Papadaki D. Applications of nanotechnology in construction industry / D. Papadaki, G. Kiriakidis, T. Tsoutsos // Fundamentals of nanoparticles. — 2018. — P. 343–370. — DOI:10.1016/b978-0-323-51255-8.00011-2.
9. Yan W. Characteristics of epoxy Resin/SiO₂ nanocomposite insulation: Effects of plasma surface treatment on the nanoparticles / W. Yan, B.T. Phung, Z.J. Han [et al.] Journal of Nanoscience and Nanotechnology. — 2013. — Vol. 13. — № 5. — P. 3371–3376. — DOI: 10.1166/jnn.2013.7267.
10. Sobolev K. How Nanotechnology Can Change the Concrete World / K. Sobolev, M.F. Gutiérrez // Progress in Nanotechnology. — 2014. — P. 113–116.
11. Yoo D.Y. Nanomaterials in ultra-high-performance concrete (UHPC) – a review / D.Y. Yoo, T. Oh, N. Banthia // Cement and Concrete Composites. — 2022. — Vol. 134. — 104730 p.
12. Акулова М.В. Современные технологии бетонных композитов / М.В. Акулова, Н.С. Голубев, А. Семенов // Первая конференция научно-образовательного консорциума «Иваново». — Иваново : Ивановский государственный университет, 2022. — С. 3–6. — EDN HCHNPI.
13. Филинская Е.А. Нанотехнологии в конструкциях из бетона XXI века / Е.А. Филинская // Наука, образование и экспериментальное проектирование. — 2021. — № 1. — С. 275–277.
14. Склифос В.О. Наночастицы для полимерных композиционных материалов в строительстве / В.О. Склифос, А.А. Рыжко, Д.П. Щеглов // Перспективы науки. — 2021. — № 5 (140). — С. 123–125. — EDN PVWDVC.
15. Ahmed H.U. The role of nanomaterials in geopolymer concrete composites: A state-of-the-art review / H.U. Ahmed, A.A. Mohammed, A.S. Mohammed // Journal of Building Engineering. — 2022. — Vol. 49. — 104062 p. — DOI: 10.1016/j.job.2022.104062. — EDN DIJOKG.
16. Olafusi O.S. Application of nanotechnology in concrete and supplementary cementitious materials: a review for sustainable construction / O.S. Olafusi, E.R. Sadiku, Ja. Snyman [et al.] // SN Applied Sciences. — 2019. — Vol. 1. — № 6. — P. 1–8. — DOI: 10.1007/s42452-019-0600-7. — EDN EWZNNI.
17. Потапов В.В. Способ модификации комплексной добавки бетона, включающей гидротермальные наночастицы SiO₂ и многослойные углеродные нанотрубки : пат. 2750497 РФ, МПК51, В82Y 30/00 / В.В. Потапов, Е.Н. Полонина, С.Н. Леонович [и др.]; заявитель и патентообладатель В.В. Потапов, Е.Н. Полонина, С.Н. Леонович [и др.]. — № 2020138511; заявл. 2020-11-23; опубл. 2021-06-28. — 5 с.

18. Onaizi A.M. Effect of nanomaterials inclusion on sustainability of cement-based concretes: A comprehensive review / A.M. Onaizi, N.H.A.S. Lim, M. Samadi [et al.] // *Construction and Building Materials*. — 2021. — Vol. 306. — 124850 p. — DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124850. — EDN IAMMTB.
19. Huseien G.F. Sustainability of nanomaterials based self-healing concrete: An all-inclusive insight / G.F. Huseien, K.W. Shah, A.R.M. Sam // *Journal of Building Engineering*. — 2019. — Vol. 23. — P. 155–171. — DOI: 10.1016/j.jobe.2019.01.032.
20. Фиговский О.Л. Инновации в отрасли строительных материалов. Часть 2 / О.Л. Фиговский, А.З. Штейнбок, Д.И. Шуваев [и др.] // *Химия, физика и механика материалы*. — 2021. — № 1 (28). — С. 54–83. — EDN OKBDAO.

Список литературы на английском языке / References in English

1. Grechikhina E.A. Perspektivy primeneniya sovremennykh kompozicionnykh materialov i nanotekhnologij v stroitel'stve [Prospects for the use of modern composite materials and nanotechnology in construction] / E.A. Grechikhina, A.R. Tkacheva, Yu.S. Skotar // *Fizika i sovremennye tehnologii v APK [Physics and modern technologies in the agro-industrial complex] : proceedings of the XI All-Russian Youth Conference of Young Scientists, Students and Schoolchildren with International Participation*. — Orel : LLC Printing Company "Cartouche", 2020. — P. 204–206. — EDN AFAFBX. [in Russian]
2. Bhushan B. Springer handbook of nanotechnology : in 3 volumes / B. Bhushan. — Berlin : Springer, 2017.
3. Nasrollahzadeh M. An introduction to nanotechnology / M. Nasrollahzadeh, S. Sajadi, M. Sajjadi [et al.] // *Interface Science and Technology*. — 2019. — Vol. 28. — P. 1–27.
4. Klabunde K.J. Nanoscale materials in chemistry / K.J. Klabunde [et al.]. — New York : Wiley, 2021.
5. Parumandla N. Effect of Al₂O₃ and SiC nano reinforcements on microstructure, mechanical and wear properties of surface nanocomposites fabricated by friction stir processing / N. Parumandla, K. Adepu // *Materials Science*. — 2018. — Vol. 24. — № 3. — P. 338–344.
6. Jiang Q. Additive manufactured carbon nanotube/epoxy nanocomposites for heavy-duty applications / Q. Jiang, H. Zhang, D. Rusakov [et al.] // *ACS Applied Polymer Materials*. — 2020. — Vol. 3. — № 1. — P. 93–97. — DOI: 10.1021/acsp.0c01011.
7. Rashid T.Ur. Mechanical properties of electrospun fibers – a critical review / T.Ur. Rashid, R.E. Gorga, W.E. Krause // *Advanced Engineering Materials*. — 2021. — Vol. 23. — № 9. — 2100153 p. — DOI: 10.1002/adem.202100153. — EDN HTNOWC.
8. Papadaki D. Applications of nanotechnology in construction industry / D. Papadaki, G. Kiriakidis, T. Tsoutsos // *Fundamentals of nanoparticles*. — 2018. — P. 343–370. — DOI:10.1016/b978-0-323-51255-8.00011-2.
9. Yan W. Characteristics of epoxy Resin/SiO₂ nanocomposite insulation: Effects of plasma surface treatment on the nanoparticles / W. Yan, B.T. Phung, Z.J. Han [et al.] *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. — 2013. — Vol. 13. — № 5. — P. 3371–3376. — DOI: 10.1166/jnn.2013.7267.
10. Sobolev K. How Nanotechnology Can Change the Concrete World / K. Sobolev, M.F. Gutiérrez // *Progress in Nanotechnology*. — 2014. — P. 113–116.
11. Yoo D.Y. Nanomaterials in ultra-high-performance concrete (UHPC) – a review / D.Y. Yoo, T. Oh, N. Banthia // *Cement and Concrete Composites*. — 2022. — Vol. 134. — 104730 p.
12. Akulova M.V. Sovremennye tehnologii betonnykh kompozitov [Modern technologies of concrete composites] / M.V. Akulova, N.S. Golubev, A. Semenov // *Pervaja konferencija nauchno-obrazovatel'nogo konsorciuma "Ivanovo" [The first conference of the scientific and educational consortium "Ivanovo"]*. — Ivanovo : Ivanovo State University, 2022. — P. 3–6. — EDN HCHHPI. [in Russian]
13. Filinskaya E.A. Nanotekhnologii v konstrukcijah iz betona XXI veka [Nanotechnologies in concrete structures of the 21st century] / E.A. Filinskaya // *Nauka, obrazovanie i eksperimental'noe proektirovanie [Science, education and experimental design]*. — 2021. — № 1. — P. 275–277. [in Russian]
14. Sklifos V.O. Nanochasticy dlja polimernykh kompozicionnykh materialov v stroitel'stve [Nanoparticles for polymer composite materials in construction] / V.O. Sklifos, A.A. Ryzhko, D.P. Shcheglov // *Perspektivy nauki [Science Prospects]*. — 2021. — № 5 (140). — P. 123–125. — EDN PVWDVC. [in Russian]
15. Ahmed H.U. The role of nanomaterials in geopolymer concrete composites: A state-of-the-art review / H.U. Ahmed, A.A. Mohammed, A.S. Mohammed // *Journal of Building Engineering*. — 2022. — Vol. 49. — 104062 p. — DOI: 10.1016/j.jobe.2022.104062. — EDN DIJOKG.
16. Olafusi O.S. Application of nanotechnology in concrete and supplementary cementitious materials: a review for sustainable construction / O.S. Olafusi, E.R. Sadiku, Ja. Snyman [et al.] // *SN Applied Sciences*. — 2019. — Vol. 1. — № 6. — P. 1–8. — DOI: 10.1007/s42452-019-0600-7. — EDN EWZNNI.
17. Potapov V.V. Sposob modifikacii kompleksnoj dobavki betona, vkluchajushhej gidrotermal'nye nanochasticy SiO₂ i mnogoslojnye uglerodnye nanotrubki [A method for modifying concrete with a complex additive including hydrothermal SiO₂ nanoparticles and multi-walled carbon nanotubes] : pat. 2750497 Russian Federation, MPK51, B82Y 30/00 / V.V. Potapov, E.N. Polonina, S.N. Leonovich [et al.]; the applicant and the patentee V.V. Potapov, E.N. Polonina, S.N. Leonovich [and others]. — № 2020138511; application 2020-11-23; publ. 2021-06-28. — 5 p. [in Russian]
18. Onaizi A.M. Effect of nanomaterials inclusion on sustainability of cement-based concretes: A comprehensive review / A.M. Onaizi, N.H.A.S. Lim, M. Samadi [et al.] // *Construction and Building Materials*. — 2021. — Vol. 306. — 124850 p. — DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2021.124850. — EDN IAMMTB.
19. Huseien G.F. Sustainability of nanomaterials based self-healing concrete: An all-inclusive insight / G.F. Huseien, K.W. Shah, A.R.M. Sam // *Journal of Building Engineering*. — 2019. — Vol. 23. — P. 155–171. — DOI: 10.1016/j.jobe.2019.01.032.

20. Figovsky O.L. Innovacii v otrasli stroitel'nyh materialov. Chast' 2 [Innovations in the construction materials industry. Part 2] / O.L. Figovsky, A.Z. Steinbock, D.I. Shuvaev [et al.] // Himija, fizika i mehanika materialy [Chemistry, physics and mechanics of materials]. — 2021. — № 1 (28). — P. 54–83. — EDN OKBDAO. [in Russian]