



## Нанотехнологии в области производства бетона

© Анатолий Васильевич Ластовка, Тамара Владимировна Данченко,  
Инна Яковлевна Петухова, Илья Андреевич Поляков

Сибирский федеральный университет, г. Красноярск, Россия

Автор, ответственный за переписку: Ластовка Анатолий Васильевич, last\_pro@mail.ru

**Аннотация.** Цель работы заключается в исследовании перспектив и возможностей использования нанотехнологий и наноматериалов в строительной сфере и, в частности, в области производства бетона. Методы исследования: совокупность способов и принципов научного познания, общих и специальных методов и приемов, а именно сравнительный анализ, моделирование, систематизация, группировка, обобщение, прогнозирование. Авторами предложен способ производства бетона с использованием материи с заданной атомной структурой. В процессе исследования установлено, что переход к работе с использованием атомов и микрочастиц приведет к повышению эффективности производимого бетона. Также отдельное внимание уделено структурной единице нанотехнологий – наночастице. Отмечено, что наночастицы могут изменить цвет искусственных покрытий, увеличить износостойкость материалов, улучшить их показатели сопротивления. При применении инновационных технологий используют усиленную сталь, композитную арматуру, нанопокртия. Кроме того, в работе представлена подробная информация о конструкционных композитах, имеющих кафельную, железную либо полимерную матрицу. Особый акцент сделан на преимуществах нанобетона. Он объединяет целую группу материалов, позволяющих, в соответствии с потребностями объекта, задать нужные характеристики изделиям и конструкциям. Расширение использования нанотехнологий в строительстве предполагает необходимость применения для дальнейших исследования и разработок междисциплинарного и многонаправленного подхода, включающего в себя такие области науки, как гражданское строительство, материаловедение, физика и другие смежные дисциплины.

**Ключевые слова:** бетон, железобетон, композит, молекулы, наночастица

**Для цитирования:** Ластовка А. В., Данченко Т. В., Петухова И. Я., Поляков И. А. Нанотехнологии в области производства бетона // Известия вузов. Инвестиции. Строительство. Недвижимость. 2022. Т. 12. № 3. С. 338–349. <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2022-3-338-349>.

### Original article

## Nanotechnologies in concrete production

Anatoly V. Lastovka, Tamara V. Danchenko, Inna Ya. Petukhova, Ilya A. Polyakov

Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russia

Corresponding author: Anatoly V. Lastovka, last\_pro@mail.ru

**Abstract.** The aim was to investigate the prospects and possibilities of using nanotechnologies and nanomaterials in construction, particularly in concrete production. The research methodology involved a set of methods and principles of scientific cognition, as well as general and specific methods and techniques, such as comparative analysis, modelling, classification, grouping, generalization and forecasting. The authors propose a method of concrete production using a matter with a specified atomic structure. It was established that the consideration of atoms and microparticles can increase the efficiency of concrete production. In addition, special attention is paid to a nanoparticle as the structural unit of nanotechnology. Nanoparticles are capable of changing the colour of artificial coatings, increasing the wear resistance of materials and improving their resistance indicators. In innovative technologies, reinforced steel, composite reinforcement and nanocoatings are used. In addition, detailed information is provided on structural composites having a ceramic, iron or polymer matrix. A particular emphasis is placed on the advantages of nanoconcrete. Nanoconcrete represents a whole group of

materials that can impart the desired characteristics to products and structures. Expanding the use of nanotechnology in construction implies the need for an interdisciplinary and multidimensional approach for further research and development, including such fields as civil engineering, materials science, physics and other related disciplines.

**Keywords:** concrete, reinforced concrete, composite, molecules, nanoparticles

**For citation:** Lastovka A. V., Danchenko T. V., Petukhova I. Ya., Polyakov I. A. Nanotechnologies in concrete production. *Izvestiya vuzov. Investitsii. Stroitel'stvo. Nedvizhimost' = Proceedings of Universities. Investment. Construction. Real estate.* 2022;12(3):338-349. (In Russ.). <https://doi.org/10.21285/2227-2917-2022-3-338-349>.

### Введение

Современный мир – это мир развивающихся нанотехнологий, которые активно используются в самых разных отраслях науки и техники, включая изготовление бетонов с определенными характеристиками. Слово «нанотехнология» чаще используется в значении «всеобъемлющее», и под ней следует понимать комплекс методик изготовления материалов, имеющих определенную

атомарную структуру, посредством управления молекулами и атомами. Нанотехнологии дают возможность получения частиц вещества и на их основе – создания устройств размером 1–100 нм.

Изготовление бетона и железобетонных изделий, несмотря на использование самого современного бетонного оборудования, является сложным и продолжительным процессом (рис. 1).



**Рис. 1.** Современный формовочный цех по изготовлению железобетонных изделий (фото автора)  
**Fig. 1.** Modern concrete molding shop (photo by the author)

Избыточная энерго- и металлоемкость этого процесса значительно сказывается на экономических показателях производства. Кроме того, свою роль играют автоматизация и механизация технологических линий. Это в большой степени воздействует на качество производимого продукта в связи с так называемым человеческим фактором. Бетон доминирует в строительной сфере по той причине, что в большинстве случаев наиболее приемлемые альтернативы ему отсутствуют.

Как известно, инновационные разработки в области изготовления бетона касаются создания его новых видов, усовершенствования арматуры, использования новых добавок. Помимо этого, ученые и практики активно

работают и над созданием более прогрессивных технологий и методов, которые дают возможность максимально восстановить или защитить бетон [1–4].

Рассмотрим особенности развития строительных комплексов в Красноярском крае.

Можно выделить следующие факторы, которые свидетельствуют о положительной динамике:

- ассортимент изготовления стройматериалов постоянно расширяется, так как предприятия используют свою минерально-сырьевую базу;
- невысокая стоимость энергоресурсов в крае;
- Сибирский федеральный университет

является научным центром подготовки квалифицированных кадров;

– высокая конкуренция на рынке и спрос со стороны потребителей.

В то же время необходимо отметить, что конкурентоспособность фирм в строительной отрасли зависит от развития технологий, от внедрения цифровых инноваций и прогрессивных технологических решений. Благодаря новым технологиям можно снизить затраты и реагировать на меняющиеся требования клиентов.

К числу таких передовых технологий относятся нанотехнологии, которые влияют на многие отрасли и вносят значительный вклад в развитие свойств материалов. Благодаря этому существует множество применений нанотехнологий в строительной отрасли. Исследования и разработки показали, что нанотехнологии могут улучшить характеристики традиционных строительных материалов, таких как бетон и сталь.

Помимо этого, следует отметить, что строительная отрасль является источником многих экологических проблем, связанных со строительством, эксплуатацией и обслуживанием зданий. Потенциальный вклад в устойчивое развитие заключается в том, чтобы сделать нанотехнологии одной из наиболее влиятельных технологий в «зеленых» зданиях. Хотя нанотехнологические материалы готовы к широкому использованию в строительной отрасли, они еще не оказали существенного влияния на этот сектор и особенности их применения требуют дополнительных, более углубленных исследований.

#### **Методы**

Методологической основой проводимого исследования является совокупность способов и принципов научного познания, общих и специальных методов и приемов. Для обоснования актуальности, формулировки целей и задач исследования использовались методы анализа и обобщения. Также свое применение нашли эмпирические методы исследования – инструментальный мониторинг, обобщение опыта, опрос специалистов, экспертные оценки, научное прогнозирование – для прогнозирования факторов влияния на параметры бетона используемых нанотехнологий, специальных наноматериалов. Разработка предложений и рекомендаций по оптимизации процессов изготовления сверхпрочного бетона с использованием нанотехнологий выполнена с использованием методов моделирования и синтеза.

Метод экспериментальных исследований применен для определения степени

обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций путем практического использования их строительными организациями бетона, изготовленного и укрепленного по новым технологиям.

#### **Результаты и их обсуждение**

##### ***Нанотехнологии в строительстве***

Нанотехнологии – это перспективное высокотехнологичное изобретение для строительного сектора, которое позволяет повысить долговечность материалов и улучшить работу зданий и сооружений в целом. Нанотехнологии определяются как способ или метод использования материалов, размер которых обычно составляет 100 нанометров (нм) или менее. Нанотехнологии и наноматериалы открывают новые очень широкие возможности в строительной отрасли и архитектуре, например, благодаря разработке прочных, долговечных и в то же время чрезвычайно легких строительных материалов.

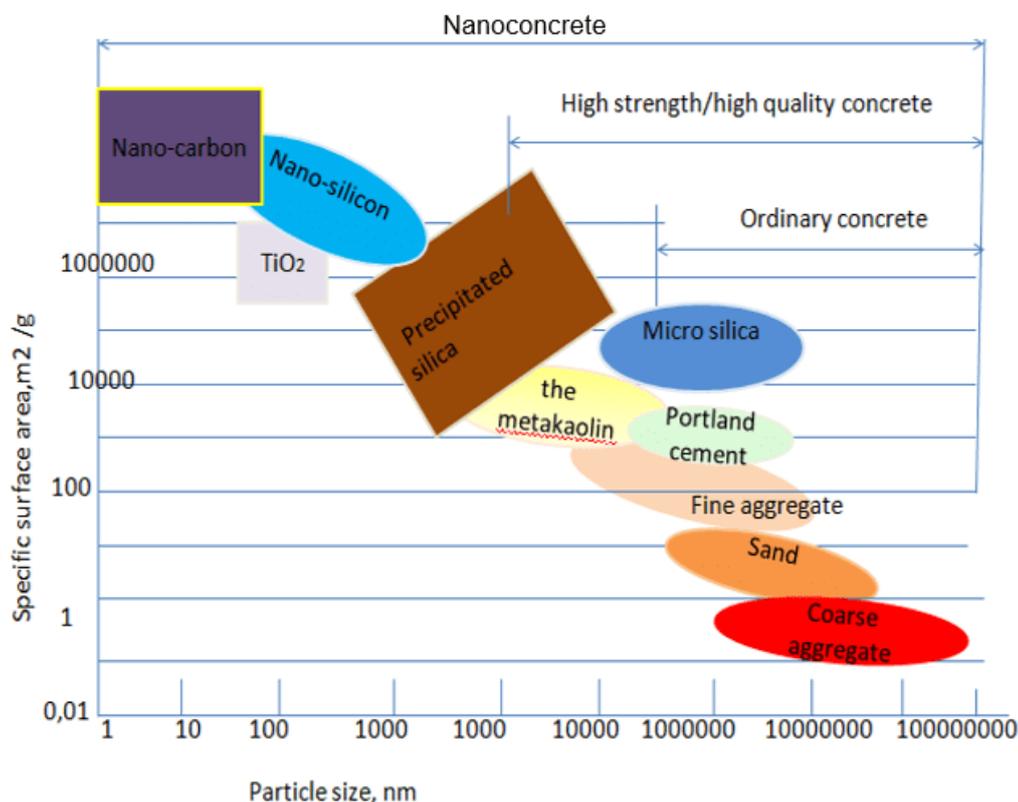
Так, новые изоляционные материалы с очень хорошими теплоизоляционными свойствами уже доступны на рынке, они позволяют проводить тепловую реабилитацию зданий, в которых обычная теплоизоляция невозможна, и могут способствовать повышению энергоэффективности. Доступен также широкий спектр методов обработки поверхностей, включая стекло, каменную кладку, дерево или металл. Благодаря им могут быть улучшены функциональные возможности, а также продлен срок службы материалов. Такие поверхностные покрытия также обещают экономию ресурсов, например воды, энергии и чистящих средств. Вопрос о том, к чему приведет использование нанотехнологий в строительной отрасли, следует рассматривать не только с точки зрения улучшения свойств и функций материалов, но и в контексте энергосбережения.

Это особенно важная перспектива, поскольку высокий процент всей используемой энергии (например, 41 % в Соединенных Штатах) потребляется коммерческими зданиями и жилыми домами в таких приложениях, как отопление, освещение и кондиционирование воздуха. Комбинируя наночастицы и традиционные строительные материалы, можно добиться исключительных свойств материалов для строительства систем с большими пролетами и сверхвысоких высот. Наночастицы определяются как ультратонкие частицы размером от 1 до 100 нанометров в диаметре. В их состав входит от нескольких десятков до нескольких тысяч атомов (рис. 2).

В последние десятилетия были проведены широкие научные исследования различных

применений наночастиц в строительной отрасли и в индустрии изготовления строительных материалов. Преимущества использования наночастиц в строительстве огромны, они дают возможность достигнуть исключительных физических и химических свойств модифицированных строительных материалов. Среди многих различных типов наночастиц диоксид титана, углеродные нанотрубки,

диоксид кремния, медь, глина и оксид алюминия являются наиболее широко используемыми наночастицами в строительном секторе. Перспективы наночастиц, наблюдаемые в строительстве, находят свое отражение и в других адаптирующих отраслях, стимулируя рост спроса и объемов производства с очень большой скоростью.



**Рис. 2.** Размер частиц и удельная поверхность компонентов бетона  
**Fig. 2.** Particle size and specific surface area of concrete components

Рассмотрим, к каким результатам приводит использование наночастиц в строительной отрасли. Открытием стало то, что благодаря их применению меняется цвет искусственных покрытий, появилась возможность создавать специальные антибактериальные покрытия и материалы, способные самоочищаться. Ряд положительных эффектов приводит к тому, что ультрафиолетовая защита увеличивает износостойкость материалов. Кроме того, они способствуют предупреждению появления желтизны, что весьма важно для дверей и окон, сделанных из металлопластика. За счет своих способностей к устойчивости наночастицы способствуют увеличению показателей сопротивления материалов на плоскости пластиковых труб.

В связи с этим можно предположить, что наноматериалы, обладающие уникальными

магнитными, тепловыми и оптическими характеристиками, позволят осуществить прорыв в производстве стройматериалов. Результаты многолетних трудов ученых по инновационным технологиям производители используют для улучшения изготавливаемой продукции. Усиленная сталь, бетон, композитная арматура, различные нанопокртия – перечисленные материалы заново исследуются как материалы с новыми не изученными характеристиками и свойствами.

Особого внимания заслуживают конструкционные композиты, которые обладают большим спектром вариантов применения. Это добавки для разнообразных конструкций, имеющих кафельную, железную либо полимерную матрицу.

Композиты, в состав которых входят углеволокно и полимерная матрица, – это

углепластики. Материалы, состоящие из многих компонентов и пластичной основы – матрицы, по изученным характеристикам обладают повышенной прочностью и жесткостью. Конструкционные композиты классифицируются по многим видам, но далеко не все они базируются на керамической, металлической или полимерной матрице. В качестве примера можно привести углепластик, который получен из углеродных волокон и полимерной матрицы, он применяется в авиастроении, изготовлении космической техники, медицинского оборудования, протезов, а также различного спортивного инвентаря.

В отношении существующих сплавов металлов с высоким показателем вязкости, которые используют в строительстве гидротехнических, дорожных объектов, провели исследования с использованием нанопокровов. В результате исследуемая прочная сталь изменила свои характеристики, заметно увеличилась стойкость металла к коррозии, появились водо- и грязеотталкивающие, теплоизоляционные свойства.

Изучение и открытия важных качеств нанопокровов продолжаются, к ним относится энергосбережение. Нанопокровы обладают таким уникальным свойством, как накопление солнечной энергии, поэтому в будущем они могут стать полноценными батареями. С использованием прозрачных наногелей изготавливают звуко- и теплоизоляционные материалы.

Кроме того, применение нанокompозитов становится все более важным при производстве и в процессе структурного ремонта поврежденных трубопроводов. Так, обмотки из нанокompозитов используются для ремонта проржавевших стальных трубопроводов, в результате чего он может быть завершен в относительно короткий срок, а передача жидкости в трубопроводной системе не нарушается во время ремонта. Нанокompозитные трубопроводы, армированные волокном, становятся реальной альтернативой стальным трубопроводам с точки зрения производительности и стоимости. Конструкция трубопровода обычно включает внутреннюю непроницаемую барьерную трубу, по которой транспортируется жидкость (газ или жидкость под давлением), защитный слой над барьерной трубой, межфазный слой над защитным слоем, несколько композитных слоев из стекло- или углеродного волокна, внешний барьерный слой под давлением и внешний защитный слой [1, 3, 5].

#### **Нанотехнологии в производстве бетона**

Бетон с высокими эксплуатационными характеристиками (*HPC*) — это бетон, который

был разработан как более долговечный и, при необходимости, более прочный материал, чем обычный бетон. Смеси *HPC* состоят, по существу, из тех же материалов, что и обычные бетонные смеси, но пропорции разработаны или спроектированы таким образом, чтобы обеспечить прочность и долговечность, необходимые для структурных и экологических требований проекта. Высокопрочный бетон определяется как имеющий указанную прочность на сжатие 8000 фунтов на квадратный дюйм (55 МПа) или выше. Над этой актуальной разработкой трудятся крупнейшие производители Японии, Германии, Швейцарии и Норвегии [6, 7]. Механизмы образования структуры и разрушения работают на каждом уровне. Это как нано-, микро-, так и макромасштабы.

Благодаря нанотехнологиям возможно также создание сверхпрочного бетона (*UHPC*), который представляет собой цементный бетонный материал, имеющий минимальную заданную прочность на сжатие 17 000 фунтов на квадратный дюйм (120 МПа) с заданными требованиями к долговечности, пластичности при растяжении и прочности; для достижения заданных требований в смесь обычно включаются волокна.

Сверхвысокоэффективный бетон также известен как реактивный порошок бетон (*RPC*). Материал обычно изготавливается путем соединения портландцемента, дополнительных цементирующих материалов, реактивных порошков, известняковой и/или кварцевой муки, мелкого песка, высокоэффективных водопонижающих добавок и воды.

Материал может быть приготовлен таким образом, чтобы обеспечить прочность на сжатие свыше 29 000 фунтов на квадратный дюйм (200 МПа). Использование мелкозернистых материалов для матрицы также обеспечивает плотную, гладкую поверхность, которая ценится за эстетику и способность точно передавать детали формы на затвердевшую поверхность. В сочетании с металлическими, синтетическими или органическими волокнами она может достигать прочности на изгиб до 7 000 фунтов на кв. дюйм (48 МПа) и выше.

Нанохимия позволяет конструировать в направлении от самого незначительного размера к самому большому, позволяет создать множество новой продукции, которую можно с успехом использовать в бетонных технологиях. В частности, в настоящее время активно создаются новые добавки для бетона.

Главным образом это поликарбоксилатные суперпластификаторы [6, 8]. Более высокие показатели (в частности, более прочный

цементный камень до 115 МПа при контрольной прочности 72–89 МПа) достигаются благодаря тому, что формируются органоминеральные нанослои (наносетки) на частицах цемента. При этом происходит аморфизация поверхности [1, 5, 9, 10].

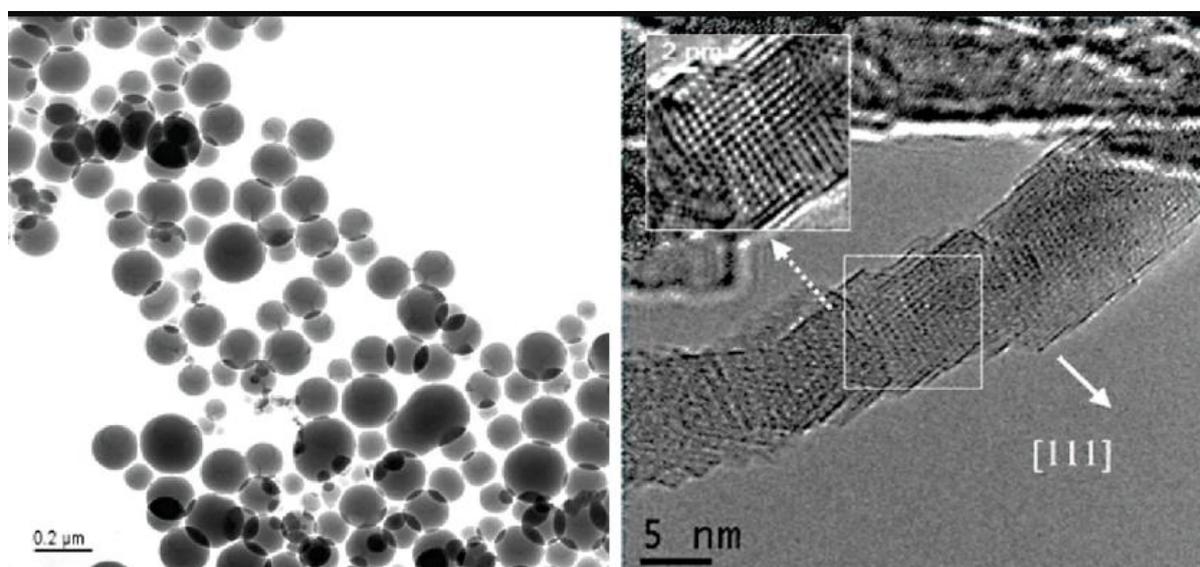
За счет того, что наночастицы используются в обычных стройматериалах, эти материалы обретают специфические характеристики, которые очень важны при возведении специальных, большепролетных и высотных конструкций [11–13].

Как уже отмечалось ранее, в последние годы добавление наноматериалов в бетонные смеси привлекает все большее внимание ученых, и в данном контексте  $\text{nano-SiO}_2$  (нанокремнезем, рис. 2, 3)  $\text{nano-Al}_2\text{O}_3$  являются

очень актуальными темами исследования.

Нано- $\text{SiO}_2$  представляет собой белый пушистый порошок из аморфного кремнезема высокой чистоты. Из-за малого размера частиц  $\text{nano-SiO}_2$  обладает такими преимуществами, как большая удельная поверхность, сильная поверхностная адсорбция, большая поверхностная энергия, высокая химическая чистота и хорошая дисперсия.

Самой слабой зоной в бетоне является граница раздела между цементной матрицей и заполнителем. Добавление соответствующего количества  $\text{nano-SiO}_2$  в бетон может повысить прочность границы раздела и очистить поры, что позволит эффективно снизить водопроницаемость бетона.



**Рис. 3.** Частицы нанокремнезема (слева) [1, 12, 14] и нановолокна  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , предоставленные ANF Development (справа). В процессе фотосъемки применялась просвечивающая электронная микроскопия

**Fig. 3.** Particles of nano-silica (left) [1, 12, 14] and nano-fibers  $\text{Al}_2\text{O}_3$  provided by ANF Development (right). Photos taken using transmission electron microscopy

Нанокремнезем также может оптимизировать микроструктуру переработанного бетона. Частицы кремнезема способствуют реакции гидратации для получения более плотных гелеобразных материалов, что может улучшить прочность границы раздела между отработанным бетоном и цементным раствором [3].

Н. D. Raghavendra Prasad [2] сравнил улучшающее воздействие коллоидного  $\text{nano-SiO}_2$  и порошкообразного  $\text{nano-SiO}_2$  на механические свойства бетона и обнаружил, что порошкообразный  $\text{nano-SiO}_2$  способствует образованию большего количества C-S-H в растворе. Поэтому порошок  $\text{nano-SiO}_2$  более эффективен для улучшения механических свойств бетона. Объем пор цементного

раствора, приготовленного путем замены части цемента на  $\text{nano-SiO}_2$ , может быть уменьшен на 13,4 %, и это не оказывает отрицательного влияния на пористость и проницаемость цементного раствора.

Следует отметить, что нановолокна (к примеру,  $\text{nano-Al}_2\text{O}_3$ , см. рис. 3, справа) – это еще один перспективный элемент, который применяется в технологии изготовления бетона [15–17]. Например, из результатов экспериментальных испытаний следует, что образцы кирпича NA, содержащие наночастицы  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , имеют значительно более высокую прочность на нагрузку по сравнению с образцами без частиц  $\text{NanoAl}_2\text{O}_3$  и другими образцами кирпича в каждом возрасте твердения.

Также установлено, что оптимальное соотношение NanoAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, которое может быть лучшим содержанием для замены цемента, составляет около 1,5 % для испытаний на прочность [18].

Для исследования влияния наночастиц Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> на прочность на сжатие, сорбцию и начальное водопоглощение бетона наночастицы Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> были добавлены в различных количествах: 0,5, 1, 2, 4 и 8 % в составе цемента. Прочность на сжатие была проверена через 7, 28 и 90 дней твердения, и результаты показали, что прочность бетона на сжатие увеличивается до 10 % в 28 дней при добавлении 0,5 % наноглинозема в качестве замены цемента. Почти такие же результаты были зарегистрированы и для других возрастов. Что касается начального водопоглощения и проницаемости, то приблизительный результат заключается в том, что они оба уменьшаются при увеличении дозировки наноглинозема [8].

Коррозия арматуры в бетоне считается существенным фактором, способствующим возникновению недостатков железобетона, которые приводят к (часто преждевременному) разрушению зданий и сооружений. Как правило, заделанная сталь защищена щелочным раствором в порах бетона путем образования пассивного оксидно-гидроксидного слоя на поверхности стальной арматуры. Однако эта пассивация стальной арматуры может быть нарушена в результате снижения щелочности (из-за карбонизации или воздействия кислоты) или присутствия избыточного количества хлорид-ионов.

В данном случае наноматериалы также позволяют решить обозначенную задачу. Добавление наноматериалов, включая нанокремнезем, нано-CaCO<sub>3</sub>, CNT и углеродное нановолокно, может повысить устойчивость бетона к коррозии арматуры. Присутствие нанокремнезема и нано-CaCO<sub>3</sub> в бетонах из золы уноса уменьшает общую капиллярную пористость и диаметр пор, тем самым снижая водопроницаемость и диффузионную способность хлоридов, и, в конечном итоге, снижая скорость коррозии заделанной арматуры.

Помимо использования в качестве добавок в свежем бетоне, наночастицы также изучаются на предмет их применения для восстановления старого бетона.

Новый метод, названный электрокинетической обработкой наночастицами, предназначен для введения электрически заряженных наноматериалов (нанокремнезема и наноалюмината) в старый бетон и перемещения их к армированной арматуре путем приложения электрического поля.

Помимо восстановления потрескавшегося бетона, эта обработка также эффективна для уменьшения коррозии арматуры, что может быть связано с уменьшением содержания хлоридов, улучшением микроструктуры и дополнительным образованием C-S-H.

В зависимости от назначения и целей возведения, эксплуатации зданий и сооружений может быть использован конкретный наноматериал. Если речь идет о внутренних перекрытиях, частных зданиях, в большинстве своем используются облегченные варианты. Аэродромные полосы, автострада и скоростные магистрали, платформы для добычи газа и нефти нуждаются в более прочных формах. Для массивных железобетонных сооружений, мостов, высотных зданий наиболее приемлемым является сверхпрочный нанобетон.

В таблице представлены основные качества усовершенствованного камня и его достоинства.

С появлением наночастиц ударными темпами стали развиваться многие сферы промышленности. Новые материалы превосходят аналоги и расширяют горизонты. Слово «нанотехнология» прочно вошло во многие отрасли.

Таким определением обозначают мельчайшие частицы с уникальными свойствами. Вот и сфера строительных материалов стала объектом внедрения полезных добавок-малюток. Развитие методов характеристик наноразмерной структуры материалов на основе цемента и компьютерного материаловедения дали возможность ученым изучить структуру бетона, задать необходимые улучшенные технические характеристики.

Одним из результатов разработок ученых стал нанобетон: он и производится по особой технологии, и состав имеет уникальный. В основе материала – либо специальные нанодобавки, заменяющие традиционные пластификаторы, либо компоненты, измельченные особым образом.

Наноразмерные вяжущие вещества могут придать бетону новые свойства в отношении обрабатываемости, прочности и долговечности. Добавление наночастиц диоксида кремния заполняет поры в бетоне, делая его более плотным и твердым. Сверхвысокоэффективный/высокопрочный бетон также содержит стальные волокна, которые повышают прочность на разрыв. Эти виды бетона достигают прочности на сжатие, подобной прочности стали, более 200 Н/мм<sup>2</sup>.

Полимерные добавки (например, искусственные смолы) способствуют разжижению и стабилизации цементной суспензии, которая

используется для создания самоуплотняющихся бетонов. Высокая прочность и плотность нано-модифицированного бетона позволяет создавать особенно легкие и хрупкие конструкции, такие как мосты. Новые ремонтные растворы, которые, основаны на нанотехнологиях, характеризуются улучшенными техническими свойствами, такими как большая плотность, прочность на изгиб и сжатие при растяжении, а также морозостойкость. Также утверждается, что они помогают минимизировать повреждения бетона. Кроме того,

небольшой вес и простота в обработке обещают дополнительные преимущества для пользователя. Новые полимерные дисперсии с наноразмерным диоксидом кремния, который подмешивается в цемент, призваны продлить долговечность дорог и в то же время обещают улучшенную обрабатываемость. Как и в сверхвысокоэффективном бетоне, наночастицы SiO<sub>2</sub> заполняют промежутки между частицами бетона, создавая особенно однородную и плотную бетонную матрицу.

#### Основные качества усовершенствованного камня и его достоинства

#### The main qualities of the improved stone and its advantages

Свойства	Комментарии	Преимущества
Прочность	В 1,5 раза выше простого бетона	Долговечность
	Разрушает только интенсивный и длительный ультразвук	
Устойчивость к температурным изменениям	Интервал воздействия — от -180 до +800 градусов Цельсия	Использование в экстремальных условиях
Бактерицидность	Выделяет атомарный кислород	Поддерживает особый микроклимат
Крепкое сцепление бетона и металла	Проникает к участку коррозии, восстанавливая прочность	Реставрационные работы
Малый вес	Обеспечивается уменьшенным объемом воды в растворе	Облегчение всей конструкции, удешевление стройки за счет менее мощного фундамента
Однородность структуры	Не дает трещин, расслоения, надломов	Возможность использовать метод литья
Водонепроницаемость	Не требует гидроизоляции	Не пропускает влагу внутрь помещений
Огнеупорность	+800 градусов Цельсия	Пожаробезопасность
Химическая устойчивость к кислотам и щелочам	В результате взаимосвязи наночастиц	Использование в агрессивной среде
Низкая стираемость	За счет однородности и плотности массы высокая удароустойчивость	Хорош для дорожных и напольных покрытий

Кроме того, полимеры в дисперсии обладают водоотталкивающими свойствами. Это снижает водопоглощающую способность дорожного основания и повышает морозостойкость.

Эти новые добавки позволяют получить дополнительные преимущества: для изготовления дорожного полотна можно использовать местные материалы (песок, глину или вынутый грунт), при этом транспортировка материала будет осуществляться на меньшие расстояния.

Процесс схватывания вяжущего вещества (например, цемента) и полимерной добавки может происходить как в пресной, так и в соленой воде, а обработка возможна даже при температуре ниже -10° С [4].

#### Заключение

Однако на сегодняшний день применение рассматриваемых технологий в сфере

строительства довольно ограничено, так как передовые идеи главным образом направлены на то, чтобы достичь поверхностного эффекта, а не создать новые структуры стройматериалов. Технологические процессы, по которым изготавливаются изделия, конструкции на сегодняшний день отвечают всем требованиям СП и ГОСТ.

Тем не менее, достижения глобальных исследований в сфере нанотехнологий уже применяются в строительстве. Это многие производственные процессы, которые не обходятся без конструкционных композиционных материалов, имеющих уникальные показатели прочности.

Также в процессе производства применяются инновационные разновидности арматурных сталей. Помимо строительной отрасли сфера использования наноматериалов и нанотехнологий стремительно расширяется.

Композиционные покрытия на основе нанобетона нашли свое широкое применение для канализационных сооружений, которые находятся под влиянием агрессивной среды.

Многослойный композит также подходит для стен и полов зданий общего пользования – торговых и административных центров, парковок, школ. Для лучшего понимания инженерных свойств и сложности бетона на основе цемента и дополнительных цементирующих материалов в наномасштабе необходимо

использовать междисциплинарный и многонаправленный подход, включающий в себя такие области науки, как гражданское строительство, материаловедение, физика и другие смежные дисциплины.

Это позволит более достоверно определить влияние нанотехнологий на важные процессы, связанные с производством и использованием бетона, строительных материалов, включая изменения показателей прочности, долговечности и адаптированных свойств.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Жданок С.А., Полонина Е.Н., Леонович С.Н. Влияние полимерных суперпластификаторов на различные виды углеродных наноматериалов // Инженерно-физический журнал. 2022. Т. 95. № 1. С. 165–168.
2. Prasad H. D. R., Sitaram N. Performance of nano materials for the strength development in concrete cube used as Partial replacement for cement at different temperatures // Materials today: proceedings. 2021. Vol. 45. Part 7. p. 7253-7258. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.415>.
3. Kejin Wang, Gdoutos M. K., Sobolev K., Shah S. P. Preface to the TRR Special Collection on Nanotechnology of Cement and Concrete // Transportation research record. 2021. Vol. 2675. Iss. 9. p. 1-3. <https://doi.org/10.1177/03611981211041627>.
4. Shiyu Zhang, Liang Shen, Hao Deng, Qinze Liu, Xinda You, Jinqiu Yuan, et al. Ultrathin Membranes for Separations: A New Era Driven by Advanced Nanotechnology // Advanced materials. 2022. Vol. 34. Iss. 21. p. 14-20. <https://doi.org/10.1002/adma.202108457>.
5. Моисеева В. И., Пирогова Я. В., Тюменцев М. Е., Паньков П. А. Нанотехнологии в области производства строительных материалов // Инновации и инвестиции. 2019. № 11. С. 293–297.
6. Dahlan A. S. Impact of nanotechnology on high performance cement and concrete // Journal of molecular structure. 2021. Vol. 1223. p. 128896. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2020.128896>.
7. Faraj R. H., Mohammed A. A., Omer K. M. Self-compacting concrete composites modified with nanoparticles: A comprehensive review, analysis and modeling // Journal of building engineering. 2022. Vol. 50. p. 104170. <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2022.104170>.
8. Bhatta D. P., Singla S., Garg R. Microstructural and strength parameters of Nano-SiO<sub>2</sub> based cement composites // Materials today: proceedings. 2021. Vol. 46. Part 15. p. 6743-6747. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.276>.
9. Конторов А. М., Глущенко А. Ю. Цементобетоны: получение, свойства, применение. Модификация цементобетонов кремнийорганическими соединениями – полисилазанами и полисилоксанами // Бутлеровские сообщения. 2021. Т. 68. № 12. С. 43–52. <https://doi.org/10.37952/ROI-jbc-01/21-68-12-43>.
10. Mustafa T. S., El Hariri M. O. R., Nader M. A., Montaser W. M. Enhanced shear behaviour of reinforced concrete beams containing Nano-Titanium // Engineering structures. 2022. Vol. 257. p. 114082. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114082>.
11. Жданок С. А., Потапов В. В., Полонина Е. Н., Леонович С. Н. Модификация цементных бетонов добавками, содержащими наноразмерные материалы // Инженерно-физический журнал. 2020. Т. 93. № 3. С. 669-673.
12. Марко О. Ю., Ливинская В. А., Корбут Е. Е. Бетонные смеси и бетон с добавкой "УКД-1" - оценка изменений свойств // Проблемы современного бетона и железобетона. 2019. № 11. С. 164–188. <https://doi.org/10.35579/2076-6033-2019-11-11>.
13. Nair P. A. K., Vasconcelos W. L., Paine K., Calabria-Holley J. A review on applications of sol-gel science in cement // Construction and building materials. 2021. Vol. 291. p. 123065. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123065>.
14. Huseien G. F., Khalid N. H. A., Mirza J. Nanotechnology for smart concrete. Boca Raton: CRC Press, 2022. 287 p.
15. Моница Т. А., Антонов И. И. Современные материалы и технологии в прототипировании. Нанотехнологии и наноматериалы // Декоративное искусство и предметно-пространственная среда. Вестник МГХПА. 2021. № 2-2. С. 20–28.
16. Слдозян Р. Д., Михалева З. А., Ткачев А. Г. Физико-механические свойства композитов строительного назначения с углеродными наноструктурами // Материаловедение.

Энергетика. 2020. Т. 26. № 2. С. 103–113. <https://doi.org/10.18721/JEST.26208>.

17. Фиговский О., Штейнбок А. Нанотехнологии в строительстве // Строительство: новые технологии – новое оборудование. 2021. № 2. С. 4–18.

18. Murad Y. Compressive strength prediction for concrete modified with nanomaterials // Case studies in construction materials. 2021. Vol. 15. p. 45-56. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00660>.

## REFERENCES

1. Zhdanok SA, Polonina EN, Leonovich SN. Influence of polymer superplasticizers on various types of carbon nanomaterials. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal = Journal of engineering physics and thermophysics*. 2022;1:165-168. (In Russ.).
2. Prasad HDR, Sitaram N. Performance of nano materials for the strength development in concrete cube used as Partial replacement for cement at different temperatures. *Materials today: proceedings*. 2021;45-7:7253-7258. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.03.415>.
3. Kejin Wang, Gdoutos MK, Sobolev K, Shah SP. Preface to the TRR Special Collection on Nanotechnology of Cement and Concrete. *Transportation research record*. 2021;2675(9): 1-3. <https://doi.org/10.1177/03611981211041627>.
4. Shiyu Zhang, Liang Shen, Hao Deng, Qinze Liu, Xinda You, Jinqiu Yuan, et al. Ultrathin Membranes for Separations: A New Era Driven by Advanced Nanotechnology. *Advanced materials*. 2022;34(21):14-20. <https://doi.org/10.1002/adma.202108457>.
5. Moiseeva VI, Pirogova JaV, Tjumencev ME, Pan'kov PA. Nanotechnology in the production of building materials. *Innovatsii i investitsii*. 2019;11:293-297. (In Russ.).
6. Dahlan AS. Impact of nanotechnology on high performance cement and concrete. *Journal of molecular structure*. 2021;1223:128896. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2020.128896>.
7. Faraj RH, Mohammed AA, Omer KM. Self-compacting concrete composites modified with nanoparticles: A comprehensive review, analysis and modeling. *Journal of building engineering*. 2022;50:104170. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2022.104170>.
8. Bhatta DP, Singla S, Garg R. Microstructural and strength parameters of Nano-SiO<sub>2</sub> based cement composites. *Materials today: proceedings*. 2021;46-15:6743-6747. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.04.276>.
9. Kontorov AM, Glushhenko AJu. Cement concrete: production, properties, application. Modification of cement concretes with organosilicon compounds - polysilazanes and polysiloxanes.

- Butlerovskie soobshcheniya = Butlerov Communications*. 2021;68(12):43-52. (In Russ.). <https://doi.org/10.37952/ROI-jbc-01/21-68-12-43>.
10. Mustafa TS, El Hariri MOR, Nader MA, Montaser WM. Enhanced shear behaviour of reinforced concrete beams containing Nano-Titanium. *Engineering structures*. 2022;257:114082. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114082>.
11. Zhdanok SA, Potapov VV, Polonina EN, Leonovich SN. Modification of cement concrete by admixtures containing nanosized materials. *Inzhenerno-fizicheskii zhurnal = Journal of engineering physics and thermophysics*. 2020;3: 669-673. (In Russ.).
12. Marko OJu, Livinskaja VA, Korbut EE. Concrete mixtures and concrete with the addition of "UKD-1" - evaluation of changes in properties. *Problemy sovremennogo betona i zhelezo-betona*. 2019;11:164-188. (In Russ.). <https://doi.org/10.35579/2076-6033-2019-11-11>.
13. Nair PAK, Vasconcelos WL, Paine K, Calabria-Holley J. A review on applications of sol-gel science in cement. *Construction and building materials*. 2021;291:123065. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.123065>.
14. Huseien GF, Khalid NHA, Mirza J. Nanotechnology for smart concrete. Boca Raton: CRC Press; 2022. 287 p.
15. Monina TA, Antonov II. Modern materials and technologies in prototyping. Nanotechnology and nanomaterials. *Dekorativnoe iskusstvo i predmetno-prostranstvennaya sreda. Vestnik MGKhPA*. 2021;2:20-28. (In Russ.).
16. Sldozian RJ, Mikhaleva ZA, Tkachev AG. Physico-mechanical properties of building composites with carbon nanostructures. *Materialovedenie. Energetika*. 2020;2:103-113. (In Russ.). <https://doi.org/10.18721/JEST.26208>.
17. Figovskii O, Shteinbok A. Nanotechnology in construction. *Stroitel'stvo: novye tehnologii – novoe oborudovanie*. 2021;2:4-18. (In Russ.).
18. Murad Y. Compressive strength prediction for concrete modified with nanomaterials. *Case studies in construction materials*. 2021;15:45-56. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2021.e00660>.

**Информация об авторах**

**А. В. Ластовка,**  
кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры строительных конструкций и  
управляемых систем  
Инженерно-строительного института,  
Сибирский федеральный университет,  
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79,  
Россия,  
e-mail: last\_pro@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0003-0751-1631>

**Т. В. Данченко,**  
старший преподаватель кафедры  
геометрического моделирования и  
компьютерной графики Института  
архитектуры и дизайна,  
Сибирский федеральный университет,  
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79,  
Россия,  
e-mail: Danchenko\_53@inbox.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-8146-6608>

**И. Я. Петухова,**  
кандидат технических наук, доцент,  
доцент кафедры строительных конструкций и  
управляемых систем  
Инженерно-строительного института,  
Сибирский федеральный университет,  
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79,  
Россия,  
e-mail: isi\_skius@sfu-kras.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-8442-2064>

**И. А. Поляков,**  
старший преподаватель кафедры  
строительных конструкций и управляемых  
систем Инженерно-строительного института,  
Сибирский федеральный университет,  
660041, г. Красноярск, пр. Свободный, 79,  
Россия,  
e-mail: polyakov\_ilya@bk.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-8442-2064>

**Вклад авторов**

Все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации. Ластовка А. В. несет ответственность за плагиат.

**Конфликт интересов**

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Information about the authors**

**Anatoli V. Lastovka,**  
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,  
Associate Professor of the Department of  
Building Structures and Controlled Systems of  
the Institute of Civil Engineering,  
Siberian Federal University,  
79 Svobodny Ave., Krasnoyarsk, 660041,  
Russia,  
e-mail: last\_pro@mail.ru  
<https://orcid.org/0000-0003-0751-1631>

**Tamara V. Danchenko,**  
Senior Lecturer of the Department of Geometric  
Modeling and Computer Graphics of the Institute  
of Architecture and Design,  
Siberian Federal University,  
79 Svobodny Ave., Krasnoyarsk, 660041,  
Russia,  
e-mail: Danchenko\_53@inbox.ru  
<https://orcid.org/0000-0002-8146-6608>

**Inna Ya. Petukhova,**  
Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor,  
Associate Professor of the Department of  
Building Structures and Controlled Systems of  
the Institute of Civil Engineering,  
Siberian Federal University,  
79 Svobodny Ave., Krasnoyarsk, 660041,  
Russia,  
e-mail: isi\_skius@sfu-kras.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-8442-2064>

**Ilya A. Polyakov,**  
Senior Lecturer of the Department of Building  
Structures and Controlled Systems of the  
Institute of Civil Engineering,  
Siberian Federal University,  
79 Svobodny Ave., Krasnoyarsk, 660041,  
Russia,  
e-mail: polyakov\_ilya@bk.ru  
<https://orcid.org/0000-0001-8442-2064>

**Contribution of the authors**

The authors contributed equally to this article. Lastovka A. V. bears the responsibility for plagiarism.

**Conflict of interests**

The authors declare no conflict of interests regarding the publication of this article.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

The final manuscript has been read and approved by all the co-authors.

Статья поступила в редакцию 29.07.2022.  
Одобрена после рецензирования 15.08.2022.  
Принята к публикации 19.08.2022.

The article was submitted 29.07.2022.  
Approved after reviewing 15.08.2022.  
Accepted for publication 19.08.2022.