

Научная статья

УДК 691.542

<https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-5-443-452>

CC BY 4.0

Композиционные строительные материалы на основе наномодифицированных цементных систем

Наталья Олеговна Копаница¹ , Ольга Викторовна Демьяненко¹ , Анжелика Андреевна Куликова^{1*} , Александр Фёдорович Бурьянов² , Надежда Алексеевна Лукьянова² , Вадим Геннадьевич Соловьев² 

¹ Томский государственный архитектурно-строительный университет, Томск, Россия

² Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия

* Автор, ответственный за переписку: e-mail: lika.panda.19@gmail.com

АННОТАЦИЯ: Введение. В работе исследовалось совместное влияние наноразмерного диоксида кремния (нано-SiO₂), углеродных нанотрубок и поверхностно-активных веществ на структурно-технологические характеристики цементных композиций. **Материалы и методы исследования.** В работе представлены результаты исследования влияния различных методов диспергирования углеродных нанотрубок (УНТ) в поверхностно-активных веществах (механическое диспергирование, обработка ультразвуком, комбинированный метод) на равномерность распределения УНТ в пластификаторе и в цементной системе, а также на физико-механические характеристики цементного камня и бетона. Проведены дифференциально термический и электронно-микроскопический анализ водных дисперсий УНТ и затвердевшего активированного наномодифицированного цементного камня. **Результаты и обсуждение.** Экспериментально доказано, что перемешивание нанотрубок в цементе в сухом виде не позволяет равномерно распределять УНТ по объему смеси. При использовании углеродных нанотрубок максимальный эффект достигается при введении их в водные дисперсии пластификаторов. Процентное соотношение пластификатора составляло 1%, УНТ 0,1% на 1 литр воды. Наиболее эффективный способ диспергирования УНТ в пластификаторе – комбинированный. Полученные результаты были использованы при приготовлении составов цементного камня и бетона. **Заключение.** Результаты показывают, что комплексные добавки, состоящие из нано-SiO₂ и водных дисперсий УНТ, положительно влияют на физико-механические и структурно-технологические свойства цементного камня и бетона. Показаны графические зависимости, свидетельствующие об эффективности использования комплексных добавок в производстве цементных композитов.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: цементные системы, наномодификаторы, диоксид кремния, углеродные нанотрубки, композиционные материалы.

БЛАГОДАРНОСТИ: Исследование выполнено при финансовой поддержке НИУ МГСУ в рамках конкурса 2023 года на проведение фундаментальных и прикладных исследований (НИР/НИОКР) научными коллективами организаций–членов Отраслевого консорциума «Строительство и архитектура» в целях исполнения Программы развития НИУ МГСУ на 2021–2030 годы в рамках реализации Программы стратегического академического лидерства «Приоритет-2030».

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Копаница Н.О., Демьяненко О.В., Куликова А.А., Бурьянов А.Ф., Лукьянова Н.А., Соловьев В.Г. Композиционные строительные материалы на основе наномодифицированных цементных систем // Нанотехнологии в строительстве. 2023. Т. 15, № 5. С. 443–452. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-5-443-452>. – EDN: ZYDHKR.

ВВЕДЕНИЕ

Российскими и зарубежными учеными активно проводятся исследования в области получения и применения ультрадисперсных материалов в составах бетонных и растворных смесей различного назначения. Применение нанотехнологий в производстве композиционных материалов на основе цементных вяжущих актуально, так как введение в них

первичных наноразмерных компонентов позволит обеспечить заданные характеристики и существенно расширить функциональные возможности композиционных материалов посредством направленного управления структурообразованием материала [1–6].

Из литературных данных известны различные виды наномодифицирующих добавок (фуллерены, углеродные нанотрубки, оксидные нанотрубки и волокна и др.), которые могут быть использованы для

© Копаница Н.О., Демьяненко О.В., Куликова А.А., Бурьянов А.Ф., Лукьянова Н.А., Соловьев В.Г., 2023

регулирования свойств бетонов, растворов, сухих строительных смесей. Анализ работ Королева Е.В., Калашникова В.И., Сахарова Г.П. и др. [7–9], в том числе и наших исследований [10–13], показал перспективность применения нанодобавок, близких по составу к продуктам гидратации цемента, таких как nanoSiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , обладающих избыточной внутренней энергией и высокой химической активностью, что позволяет получить вяжущие и композиционные материалы на их основе с высокими физико-механическими характеристиками [14]. Менее исследованным наномодификатором для регулирования свойств цементных систем является наноразмерный диоксид кремния [15]. Известны различные способы его получения. С.П. Бардахановым в институте теоретической и прикладной механики СО РАН и Институте ядерной физики СО РАН (г. Новосибирск) апробирован способ получения нанодиоксида кремния [16]. Наноразмерный диоксид кремния «Тс» получен способом испарения вещества под действием электронного пучка, создаваемого электронным ускорителем. Второй способ получения нанодиоксида кремния плазменно-дуговым методом, разработанным в ТГАСУ [17], апробирован с использованием в качестве сырья диатомита (вскрышная порода).

Многие ученые отмечают преимущество наночастиц, состоящее в том, что их присутствие в композиционных строительных материалах существенно улучшает их эксплуатационные характеристики или придает материалам новые свойства, но при этом отмечается, что механизм их взаимодействия с другими компонентами в цементе и бетоне требует тщательного изучения [8, 18, 19]. Перспективным модификатором для бетонов и растворов являются углеродные нанотрубки (УНТ). В работах [1, 2, 20] авторы показали возможность применения УНТ в качестве дополнительных центров кристаллизации для продуктов гидратации цементов, а также активаторов воды затворения в бетонной смеси. Отмечается, что повысить эффективность использования УНТ в составе композиционных материалов можно выбором оптимальной технологии смешивания УНТ со связующими в различных агрегатных состояниях (в растворе, расплаве, эмульсии, суспензии, аэрозоле).

Несмотря на повышенный интерес российских и зарубежных исследователей к технологии наномодифицирования, многие эксперты выражают скептицизм в отношении выдвинутых гипотез, описывающих механизм формирования структуры цементного камня в присутствии углеродных наноразмерных частиц. Одной из основных причин противоречивых данных о влиянии углеродных нанотрубок на структуру и свойства цементной матрицы является неоднородность их распределения в среде-носителе.

Из-за высокой поверхностной энергии УНТ при синтезе образуют глобулы, размеры которых колеблются в пределах 400–900 мкм. При этом нанотрубки трудно распределяются в водной среде и требуют специальных приемов для их диспергирования.

В связи с этим разработана технология диспергирования углеродных нанотрубок в воде и водном растворе поверхностно-активных веществ, в частности суперпластификатора и других частиц, для последующей модификации ими цементной матрицы с целью повышения физико-технических характеристик бетонов является актуальной задачей.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для приготовления образцов использовали портландцемент ЦЕМ I 42,5Н (ООО «Топкинский цемент»).

В качестве наномодифицирующей добавки использовались одностенные углеродные нанотрубки (УНТ). Характеристики нанотрубок представлены в табл. 1.

Таблица 1
Характеристика УНТ

Наименование параметра	Ед. изм.	Результат испытаний
Средний внешний диаметр	нм	1,97
Массовая доля неорганических примесей	%, м.ч.	11,102
Удельная поверхность	м ² /г	546
Коэффициент G/D	–	48
Содержание УНТ	%, м.ч.	83,347

Также в качестве наномодификатора в бетонные смеси в работе применялся наноразмерный диоксид кремния (нано- SiO_2), разработанный в ТГАСУ, основанный на применении плазменно-дугового метода. Наночастицы полученного порошка имеют распределение по размерам в диапазоне от 10 до 300 нм, но наибольшее их количество (82% об.) находится в интервале до 100 нм. Пик распределения приходится на частицы размерами 11–20 нм (13% об.) [17]. Характеристики нано- SiO_2 представлены в табл. 2.

- В качестве пластификаторов использовали:
- Суперпластификатор «Штайнберг F-10 Build» – продукт на основе конденсации нафталин сульфокислоты и формальдегида;
 - Суперпластификатор «Штайнберг GROS-63 MR» – продукт на основе эфиров поликарбонилатов;

Таблица 2

Характеристики наномодификатора

Модификатор	Удельная поверхность, м ² /кг	Средний размер частиц, нм
нано-SiO ₂	38000	37,12

– ГиперПласт 60 – суперпластифицирующая и суперводоредуцирующая добавка для бетонов.

В работе представлены результаты исследования влияния различных методов диспергирования УНТ в ПАВ (механическое диспергирование, обработка ультразвуком, комбинированный метод) на равномерность распределения УНТ в пластификаторе, а также введение УНТ в сухом состоянии в цементную композицию – на физико-механические характеристики цементного камня.

Особенности фазовых превращений в цементной системе и изменение массы химически связанной воды определены дериватографическим анализом с помощью прибора STA 449 F3 Jupiter.

Электронно-микроскопический анализ осуществлялся с помощью растрового электронного микроскопа JEOL JSM 6000.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Экспериментально доказано, что перемешивание нанотрубок в цементе, в сухом виде, не позволяет равномерно распределять УНТ по объему смеси.

При использовании углеродных нанотрубок максимальный эффект достигается при введении их в водные дисперсии пластификаторов. Процентное соотношение пластификатора составляло 1%, УНТ

0,1% на 1 литр воды. Вода добавлялась в смесь УНТ и пластификатора, затем полученный раствор перемешивался тремя способами:

- ультразвуковая обработка с помощью ультразвукового диспергатора типа УЗДН-2Т в течение 2 часов;
- перемешивание в высокоскоростной бисерной мельнице в течение 2 часов;
- комбинированный, включающий высокоскоростное перемешивание в бисерной мельнице в течение 2 часов с последующей ультразвуковой обработкой (УЗДН-2Т) в течение 2 часов.

Установлено, что первые два способа не позволяют УНТ равномерно распределиться в объеме водной суспензии. На рис. 1–3 представлены микрофотографии суспензий, полученных с помощью комбинированного метода.

Исследования микроструктуры образцов водных суспензий с УНТ с помощью растрового электронного микроскопа показали наличие областей с относительно равномерным распределением нанотрубок по объему (рис. 2–3), областей без них и агломератов диаметром порядка 10 мкм. На микрофотографиях (рис. 1) отчетливо видны агломераты, представляющие собой значительное количество соединенных между собой нанотрубок, что может быть характерно именно для гибких одностенных нанотрубок с наибольшим отношением длины к диаметру. В составе пластификатора ГП-60 присутствуют модифицированные поликарбонатилаты, которые не позволяют УНТ смешиваться и равномерно распределяться в объеме смеси. Таким образом, предложенный способ перемешивания УНТ в водной суспензии пластификатора является перспективным и для дальнейших исследований использовались два вида пластификатора: Штайнберг F-10 Build, Штайнберг GROS-63 MR.



Рис. 1. Распределение УНТ в водной дисперсии гиперпластификатора ГП-60 (x5000)

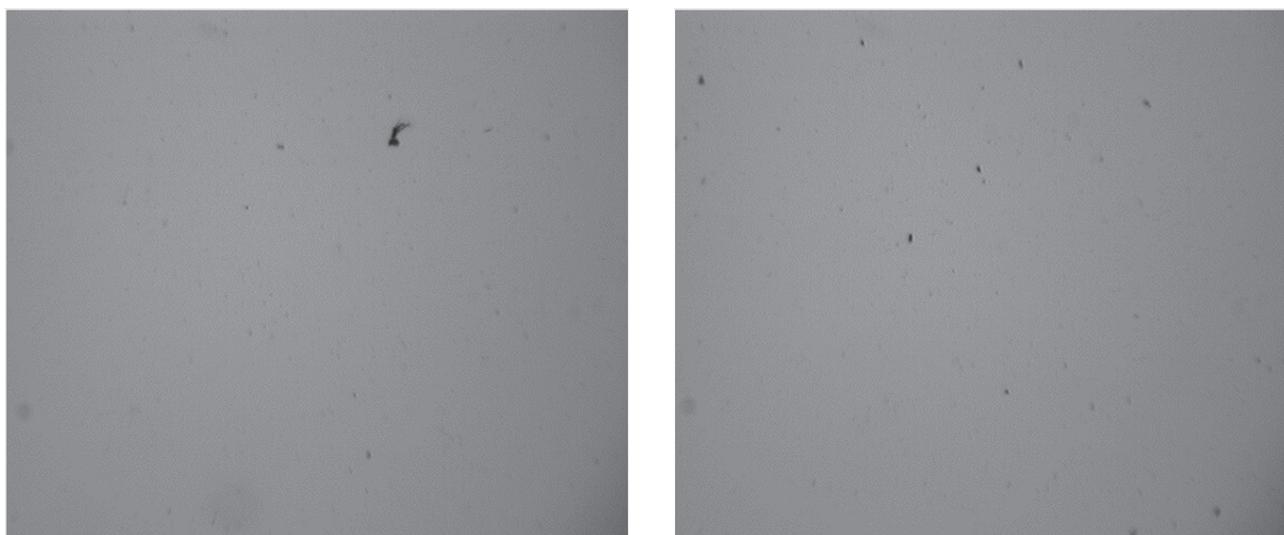


Рис. 2. Распределение УНТ в водной дисперсии пластификатора Штайнберг GROS-63 MR (x5000)

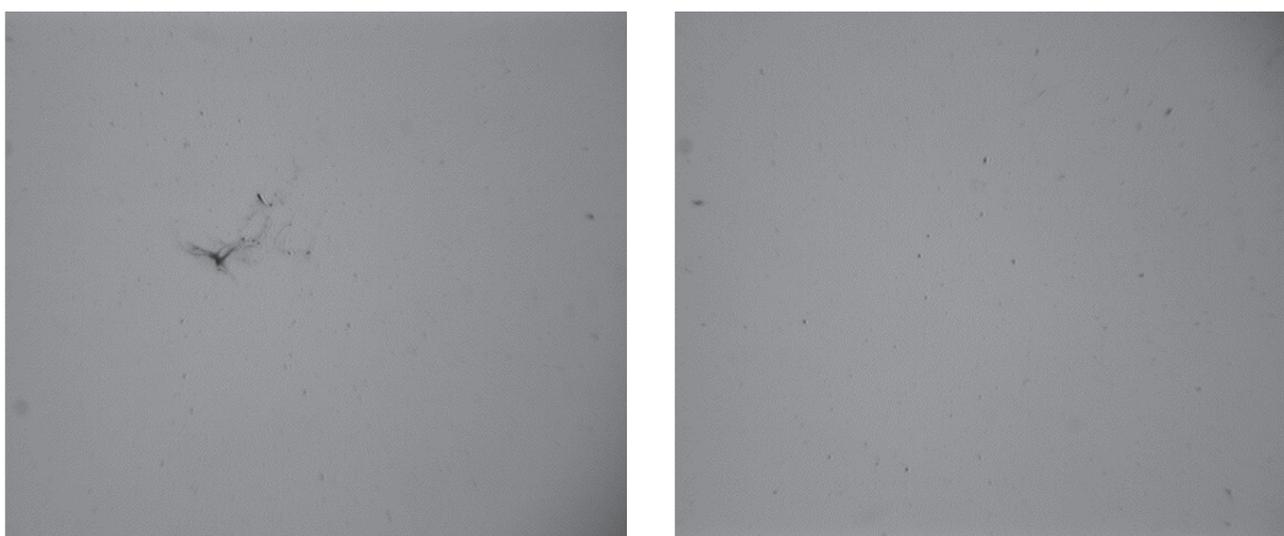


Рис. 3. Распределение УНТ в водной дисперсии пластификатора Штайнберг F-10 Build (x5000)

Для изучения влияния водных дисперсий УНТ на физико-механические свойства цементных систем были изготовлены образцы цементного камня с содержанием добавок 0,3; 0,4; 0,5; 0,6% от массы цемента. Добавка водной дисперсии вводилась в цементную систему перед водой затворения и интенсивно перемешивалась. Готовились образцы-кубики размерами 20×20×20 мм из теста нормальной плотности, которые хранились в воздушно-влажных условиях. Прочность при сжатии образцов оценивалась в 3, 7, 28 суток твердения. Результаты испытаний представлены на рис. 4–5.

Полученные результаты исследований позволяют сделать вывод, что водные дисперсии УНТ повышают прочность цементного камня на всех сроках

твердения. Максимальный прирост прочности цементного камня с добавкой водных дисперсий УНТ при введении 0,5% для GROS-63 MR-28%, для F-10 Build – 18%. Введение дисперсии УНТ приводит к структурным изменениям цементного камня, связанным с образованием плотной оболочки по поверхности твердых фаз, включая частицы цемента. При этом формируются пространственные каркасные ячейки в модифицированной цементной матрице с плотными слоями кристаллогидратов, что ведет к общему упрочнению матрицы. Дальнейшие исследования проводились с процентным соотношением добавки 0,5%.

В ходе исследований было установлено, что при введении добавки водной дисперсии УНТ в цемент-

Рис. 4. Прочность при сжатии цементного камня с добавкой водной дисперсии F-10 Build (У)

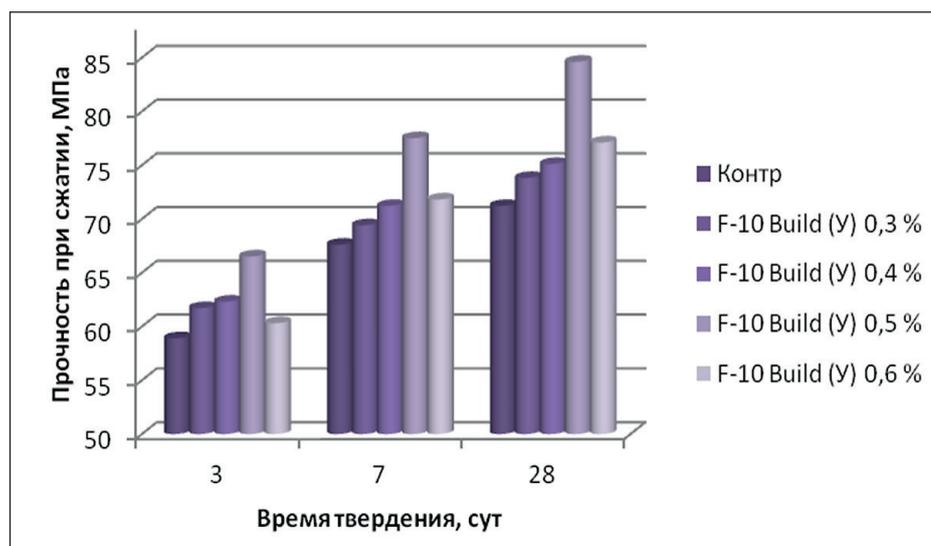
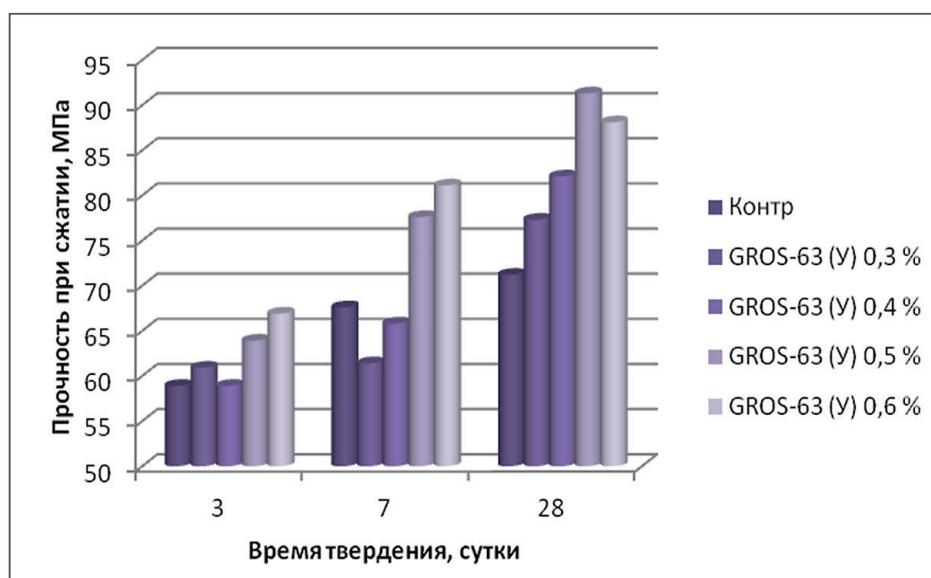


Рис. 5. Прочность при сжатии цементного камня с добавкой водной дисперсии GROS-63 MR (У)



ную систему изменяются реологические характеристики цементного раствора. Испытания были проведены с помощью «Конуса растекаемости КР-1». Результаты испытания представлены в табл. 3.

Анализ полученных результатов позволяет сделать вывод об эффективности пластифицирующих комплексных добавок. Состав 5 имеет больший распыл при меньшей водопотребности, что также подтверждает рациональный состав полученной модифицирующей добавки.

Опыт применения полифункциональных модифицирующих добавок в бетонные смеси показывает, что комплексные добавки более эффективны, чем однокомпонентные добавки, которые наряду с улучшением каких-либо свойств бетона или бетонной смеси могут существенно снизить другие технологические показатели. Применение таких добавок позволяет более эффективно влиять на про-

цессы гидратации цемента, направленно регулируя структуру цементного камня и бетона, замедлять его старение и повышать долговечность, что обеспечит высокие эксплуатационные качества бетонных изделий и конструкций. Ранее в работах была доказана эффективность применения оксидных наночастиц в бетонных смесях. Анализ результатов по оценке влияния характеристик наноSiO_2 , способов их получения и введения в цементное тесто, а также содержания добавок на свойства вяжущего позволил определить рациональное соотношение наноразмерных добавок в цементной матрице, равное 0,03% от массы цемента (прирост прочности составляет 32%). Полученные результаты согласуются с данными других исследователей в работах [14], в которых отмечено, что чрезмерно высокая дозировка, например, наноразмерных частиц кремнезема, может привести к «отравлению» системы, значительному

Таблица 3

Результаты определения растекаемости цементного раствора с водными дисперсиями УНТ

№	Состав	В/Ц	Растекаемость (мм)
1	Контрольный	0,295	180
2	Ц+F-10 Build	0,275	195
3	Ц+GROS-63 MR	0,27	200
4	Ц+F-10 Build (У)	0,27	205
5	Ц+GROS-63 MR (У)	0,26	220

замедлению процессов гидратации и твердения. Это может объясняться большой реакционной способностью площади их поверхности, высокой химической активностью, что создает условия для химического связывания воды затворения кремнеземом в малорастворимые кристаллогидраты, и, соответственно, возможно возникновение дефицита воды для процессов гидратации минералов цемента. В данной работе приведены результаты исследования совместного влияния нано-SiO₂ с водными дисперсиями УНТ на физико-механические и реологические свойства бетонов.

Для оценки совместного влияния комплексной модифицирующей добавки на физико-механические свойства цементного камня были изготовлены образцы-кубики при соотношении добавок нано-SiO₂ 0,03%, GROS-63 MR, F-10 Build 0,5% от массы цемента. Результаты испытаний приведены в табл. 4.

Анализ данных, приведенных в табл., позволил выбрать рациональный состав цементного камня (№ 5), прирост прочности которого составляет 57,4%. Это может быть связано с процессами, происходящими на наноуровне в совместном присутствии в составе цемента компонентов УНТ и наноSiO₂. Поликарбоксилаты, являющиеся основой для равномерного распределения УНТ, служат как пластификатором, так и основой для эффективного взаимодействия нано-SiO₂ и УНТ, формирования каркасных ячеек в модифицированной цементной матрице с плотными слоями кристаллогидратов. Согласно данным

табл., начало схватывания контрольного образца составляет 1 час 40 минут, а конец – 3 часа 20 минут. У модифицированных образцов цементного теста ускоряются сроки схватывания на 10 минут (начало схватывания) и на 15 минут (конец схватывания) с использованием водной дисперсии УНТ F-10 Build (У), на 20 минут (начало схватывания) и на 30 минут (конец схватывания) с водной дисперсией УНТ GROS-63 MR (У).

Для объяснения полученных результатов и установления закономерностей формирования состава, структуры и свойств цементного камня был проведен дериватографический анализ (ДТА) цементного камня состава (№ 5). Особенности фазовых превращений в цементной системе и изменение массы химически связанной воды определены в интервале температур от 20 до 1000°C. На рис. 6 представлены сравнительные термограммы контрольного и модифицированного образцов цементного камня с кривыми ТГ и ДСК.

Методом ТГ и ДСК установлено, что на термограммах цементного камня контрольного и с комплексной добавкой эндоэффекты, соответствующие диссоциации кальцита, образовавшегося в результате частичной карбонизации Ca(OH)₂ существенно различаются по площади. На термограмме цементного камня с комплексной добавкой площадь пика в два раза больше, что может быть связано с наложением термоэффектов дегидратации дополнительно образовавшихся гидросиликатов. Для подтверждения

Таблица 4

Определение физико-механических свойств цементного камня

№	Состав	Сроки схватывания, мин		Прочность при сжатии (28 сут.), МПа
		Начало	Конец	
1	Контрольный	180	240	68,1
2	Ц+F-10 Build (У)	180	225	79,6
3	Ц+GROS-63 MR (У)	170	225	89,2
4	Ц+F-10 Build+ нано-SiO ₂ (У)	170	225	86,5
5	Ц+GROS-63 MR+ нано-SiO ₂ (У)	160	210	107,2

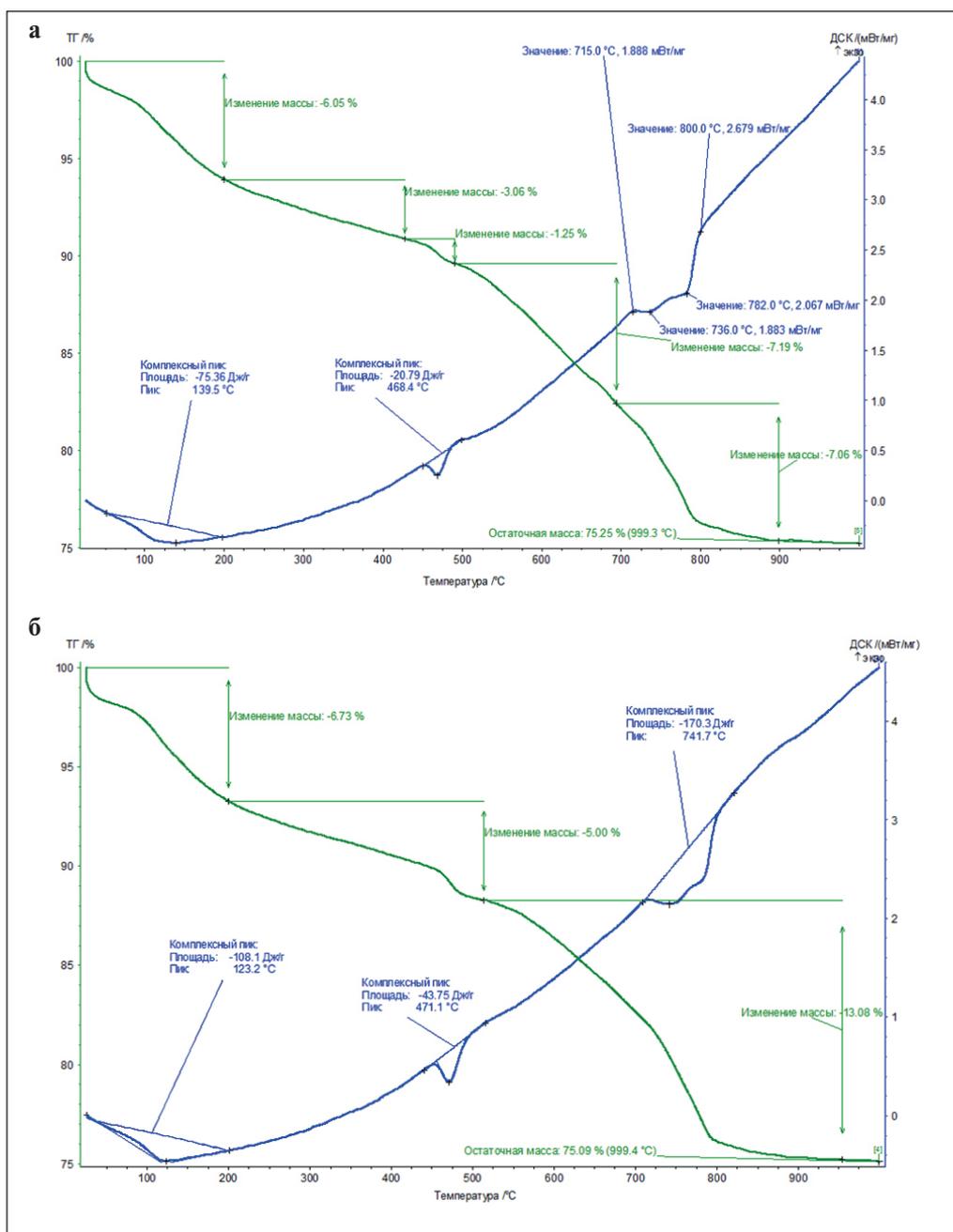


Рис. 6. Термограммы контрольного (а) и модифицированного (б) водной дисперсией УНТ GROS-63 MR (Y)+нано-SiO₂ образцов цементного камня

полученных результатов влияния добавки на формирование структуры цементного камня проведен электронно-микроскопический анализ образцов (рис. 7).

Анализ данных, представленных на снимках, показывает, что введение комплексной добавки в цементную матрицу обеспечивает образование низкоосновных гидросиликатов кальция, стабильных высокоосновных гидросульфалюминатов кальция с разросшейся игольчатой структурой, затягивающей поры.

Известно, что одним из свойств, присущих композиционным материалам, является полимасштабность. Это свойство позволяет условно рассматривать любой композиционный строительный материал как многослойное образование на микро-, мезо- и макроуровнях взаимодействия. Процессы, протекающие на каждом масштабном уровне, могут характеризоваться как высокой степенью автономности, так и взаимосвязанностью, подчиняясь одной цели – обеспечению требуемых эксплуатационных

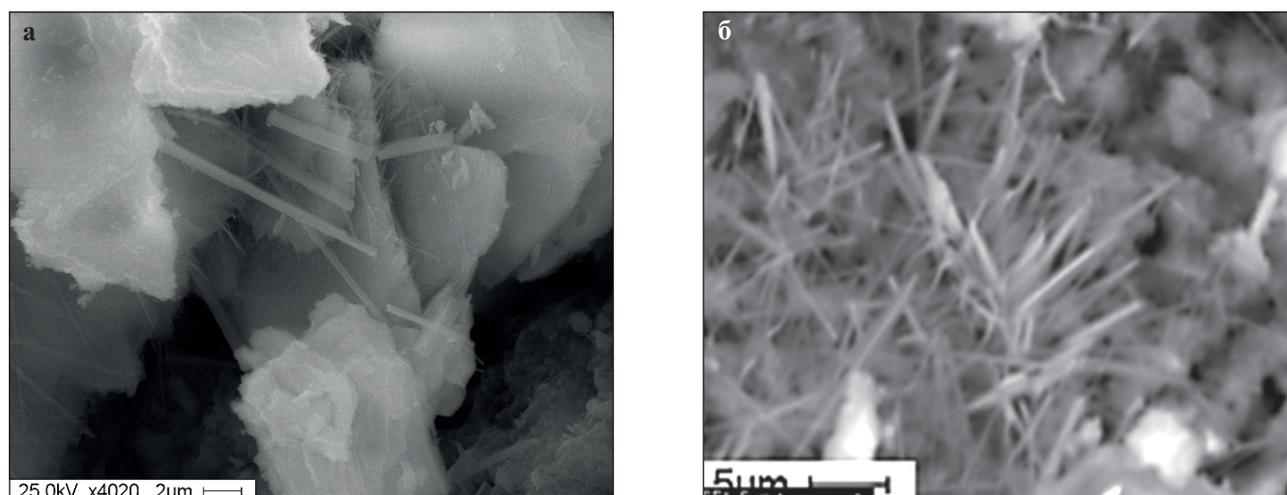


Рис. 7. Электронно-микроскопический снимок контрольного образца цементного камня (а) (x4020) и модифицированного образца с добавкой GROS-63 MR (Y) + nano-SiO₂ (б) (x4000)

характеристик. Современная синергетика включает и другие принципы, применение которых в строительном материаловедении изучено недостаточно. Для изучения влияния комплексных добавок с УНТ и нано проводились исследования по оценке их влияния на свойства бетонных смесей.

Состав бетона был рассчитан методом межзерновой пустотности [21, 22]. Соотношение Ц:П (Щ) – 1:3,63. Все добавки вводились в процентах от массы цемента. Оптимальные процентные соотношения добавок были определены ранее. Добавка nano-SiO₂ предварительно перемешивалась с портландцементом и вводилась с сухими составляющими смеси. Водные дисперсии углеродных нанотрубок вводились в бетонную смесь с водой затворения. Испытания проводились в соответствии с ГОСТ 26633-2015 «Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия». Морозостойкость определялась в соответствии с ГОСТ 10060-2012 «Бетоны. Методы определения морозостойкости. Общие требования. Тяжелые, мелкозернистые,

легкие и плотные силикатные бетоны». Водонепроницаемость и открытая пористость по ГОСТ 12730.5 на приборе для определения воздухопроницаемости – АГАМА-2Р.

Физико-механические характеристики контрольного мелкозернистого бетона и модифицированного добавками определялись в проектном возрасте твердения. В табл. 5 представлены физико-механические характеристики бетона.

Анализ данных, приведенных в табл., показал, что все используемые в работе добавки повышают реологические и эксплуатационные свойства бетонных смесей. Составы 2 и 4 существенно повышают марку по морозостойкости до 600 и 800 соответственно, что объясняется составом пластифицирующей добавки F-10. Прочность бетона в проектном возрасте твердения повышается на 19% (состав 2) и на 44% (состав 4) в сравнении с контрольным составом. Прочность при сжатии для составов 3 и 5 возрастает до 47 и 69% в сравнении с контрольным образцом. Подвижность бетонных смесей повышается

Таблица 5

Определение физико-механических свойств бетона

№	Состав	В/Ц	Прочность при сжатии (28 сут.), МПа	Водонепроницаемость, W	Морозостойкость, F	ОК, см
1	Контрольный	0,42	36	W8	200	9
2	Ц+F-10 Build (Y)	0,4	43	W8	600	13
3	Ц+GROS-63 MR (Y)	0,37	53	W8	400	15
4	Ц+F-10 Build (Y) + nanoSiO ₂	0,37	52	W10	800	16
5	Ц+GROS-63 MR (Y) + nanoSiO ₂	0,36	61	W12	600	18

при введении всех используемых добавок. Наличие в бетонной смеси комплексной добавки играет роль микроармирования, снижает водопотребность, и увеличивает подвижность, углеродные нанотрубки и нано-SiO₂ начинают работать на наноуровне, и при взаимодействии с частицами цемента происходит образование низкоосновных гидросиликатов кальция, повышающих физико-механические характеристики затвердевшего бетона.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные в работе результаты исследований показали возможность получения полифункциональных добавок, включающих разные по составу и способу производства наноконпоненты, но проявляющих синергетический эффект.

Экспериментально установлен наиболее эффективный способ распределения наночастиц УНТ в водной среде и цементной матрице, заключающийся

в высокоскоростном перемешивании в бисерной мельнице УНТ с водным раствором пластификатора в течение 2 часов с последующей ультразвуковой обработкой (УЗДН-2Т) в течение 2 часов.

Показано, что эффективность взаимодействия УНТ, водных дисперсий пластификаторов и нано-SiO₂ зависит от состава ПАВ. Пластификаторы на основе эфиров поликарбоксилатов лучше взаимодействуют с УНТ и нано-SiO₂. Их эффективность подтверждается результатами физико-химических исследований, улучшением реологических характеристик бетонных смесей с комплексными добавками и повышением эксплуатационных характеристик затвердевшего бетона. Введение комплексных добавок позволяет направленно активизировать гидратационные процессы, влиять на структуру цементного камня и бетона, фазовый состав и его пористость за счет увеличения степени гидратации основных клинкерных минералов и формирования более стабильных гидратных фаз.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Береговой В.А., Снадин Е.В., Иноземцев А.С., Пилипенко А.С. Высокофункциональные бетоны для станкостроения с применением нано- и микромасштабных сырьевых компонентов // Нанотехнологии в строительстве. 2023. Т. 15, № 3. С. 200–210. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-3-200-210>. – EDN: HGZWR.
2. Ильина В.Н., Ильин С.В., Гафарова В.А., Кузеев И.Р. Влияние наноуглеродных наполнителей на свойства композиционных материалов // Нанотехнологии в строительстве. 2023. Т. 15, № 3. С. 228–237. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2023-15-3-228-237>. – EDN: DMAYTS.
3. Drexler K.E., Peterson C., Pergamit G. *Unbounding the future: the nanotechnology revolution*. New York: William Morrow; 1991.
4. Scrivener K.L. Nanotechnology and cementitious materials. In: Bittnar Z, Bartos PJM, Nemecek J, Smilauer V, Zeman J, editors. *Nanotechnology in construction: proceedings of the NICOM3 (3rd international symposium on nanotechnology in construction)*. Prague: Czech Republic; 2009: 37–42.
5. Chong K.P., Garboczi E.J. Smart and designer structural material systems. *Prog Struct Mat Eng*. 2002;4:417–30.
6. Garboczi E.J., Bentz D.P. Modelling of the microstructure and transport properties of concrete. *Construct Build Mater*. 1996;10(5):293–300.
7. Сахаров Г.П. О краткосрочной перспективе нанотехнологий в производстве строительных материалов и изделий // Технологии бетонов. 2009. № 4. Ч.1. С. 65–67.
8. Баженов Ю.М., Королев Е.В. Нанотехнология и наномодифицирование в строительном материаловедении. За рубежом и отечественный опыт // Вестник БГТУ им. В. Г. Шухова. 2007. № 2. С. 16–19.
9. Калашников В.И., Ерофеев В.Т., Мороз М.Н. [и др.] Наногидросиликатные технологии в производстве бетонов // Строительные материалы. 2014. № 5. С. 88–91.
10. Космачев П.В., Власов В.А., Копаница Н.О., Скрипникова Н.К., Демьяненко О.В. Композиционные материалы на основе цемента с нанодисперсным диоксидом кремния // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2017. № 4. С. 139–146.
11. Копаница Н.О., Саркисов Ю.С., Демьяненко О.В., Горшкова А.В. Цементные композиции, модифицированные комбинированными нанодисперсными добавками // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2017. № 4. С. 101–106.
12. Моделирование структурного состояния аморфного таркосила / Ю.А. Абзаев, Н.О. Копаница, В.А. Клименов, Ю.С. Саркисов, Н.П. Горленко, О.В. Демьяненко, А.П. Завьялов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2015. № 3 (50). С. 121–133.
13. Kopanitsa N.O., Demyanenko O.V., Kulikova A.A., Samchenko S.V., Kozlova I.V., Lukyanova N.A. Influence of Activation Methods on the Structural and Technological Characteristics of Nanomodified Cement Compositions. *Nanotechnologies in Construction*. 2022;14(6):481–492. <https://doi.org/10.15828/2075-8545-2022-14-6-481-492>. – EDN: PFYSQZ.

14. Urukhanova LA, Lkhasaranov SA, Bardakhanov SP. *Build Mater.* 2014;852–55.
15. Scrivener KL, Kirkpatrick RJ. Innovation in use and research on cementitious material. *Cem Concr Res.* 2008;38(2):128–36.
16. Получение нанопорошков испарением исходных веществ на ускорителе электронов при атмосферном давлении / С.П. Бардаханов, А.И. Корчагин, Н.К. Куксанов, А.В. Лаврухин, Р.А. Салимов, С.Н. Фадеев, В.В. Черепков // Доклады Академии Наук. 2006. Т. 409. № 3. С. 320–323.
17. Космачев П.В. Получение наноразмерного диоксида кремния плазменно-дуговым методом из высококремнезёмистого природного сырья: диссертация канд. техн. наук: 01.04.07. Томск, 2018. 141 с.
18. Kim H., Lee S., Moon H. Strength properties and durability aspects of high strength concrete using Korean metakaolin. *Construction and Building Materials Journal.* 2007;1:128 p.
19. Ji T. Preliminary study on the water permeability and microstructure of concrete incorporating nano-SiO₂. *Cem Concr Res.* 2005;35:1943–1947.
20. Sanchez F., Zhang L., Ince C. *Multi-scale performance and durability of carbon nanofiber/cement composites.* In: Bittnar Z., Bartos PJM, Nemecek J, editors. Nanotechnology in construction: proceedings of the NICOM3 (3rd international symposium on nanotechnology in construction). Prague: Czech Republic; 2009.
21. Кудяков А.И., Смирнов А.Г., Петров Г.Г., Душенин Н.П. Проектирование и использование заполнителя с оптимальной межзерновой пустотностью в бетоне // Изв. вузов. Строительство и архитектура. 1987. № 7. С. 135–138.
22. Кудяков А.И., Симакова А.С., Кондратенко В.А., Стешенко А.Б., Латыпов А.Д. Влияние органических добавок на свойства цементного теста и камня // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2018. Т. 20. № 6. С. 138–147.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Копаница Наталья Олеговна – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры строительных материалов и технологий, Томский государственный архитектурно-строительный университет, Томск, Россия, kopanitsa@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-0991-8550>

Демьяненко Ольга Викторовна – кандидат технических наук, доцент кафедры металлических и деревянных конструкций, Томский государственный архитектурно-строительный университет, Томск, Россия, demyanenko.olga.v@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0003-0391-808X>

Куликова Анжелика Андреевна – аспирант кафедры строительных материалов и технологий, Томский государственный архитектурно-строительный университет, Томск, Россия, lika.panda.19@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-6723-0084>

Бурьянов Александр Фёдорович – доктор технических наук, доцент, консультант кафедры строительного материаловедения, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия, rga-service@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3331-9443>

Лукьянова Надежда Алексеевна – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительного материаловедения, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия, galcevanadezda@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-2014-6739>

Соловьев Вадим Геннадьевич – кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры строительного материаловедения, Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия, s_vadim_g@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-9446-0689>

ВКЛАД АВТОРОВ

Копаница Н.О. – научное руководство; постановка целей и задач исследования; разработка методологии исследований; анализ результатов исследований.

Демьяненко О.В. – литературный обзор; проведение экспериментальной части исследования; обработка результатов; написание исходного текста.

Куликова А.А. – проведение экспериментальной части исследования; обработка результатов; графическое и табличное оформление результатов.

Бурьянов А.Ф. – разработка методологии исследований; анализ результатов исследований; формирование итоговых выводов.

Лукьянова Н.А. – литературный обзор; обработка и интерпретация результатов исследований; доработка текста.

Соловьев В.Г. – проведение экспериментальной части исследования; обработка и интерпретация результатов исследований.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 01.09.2023; одобрена после рецензирования 03.10.2023; принята к публикации 06.10.2023.