

Наномодифицированная цементная композиция

Дмитрий Александрович Ляшенко, Владимир Александрович Перфилов

Волгоградский государственный технический университет (ВолГТУ); г. Волгоград, Россия

АННОТАЦИЯ

Введение. Приоритетным направлением строительного материаловедения является получение материалов, имеющих повышенные эксплуатационные характеристики. Самый распространенный строительный материал — бетон различного функционального назначения. Развитие строительного комплекса приводит к проектированию все более сложных конструкций, возведение которых требует высокоэффективных бетонов с повышенной эксплуатационной надежностью.

Материалы и методы. Приведены литературные данные по применению различных наномодифицирующих добавок в бетон. Предлагается в качестве комплексной добавки для бетона совместное применение углеродных нанотрубок (УНТ) и пластификатора СП-3, а также введение наномодифицирующей добавки методом ультразвукового диспергирования.

Результаты. Представлены результаты серии испытаний, направленных на изучение влияния комплексной добавки на прочностные характеристики мелкозернистого бетона. Определено повышение прочности при сжатии бетона, модифицированного УНТ. С помощью электронной микроскопии установлено, что использование наноматериалов изменяет структуру бетона на микро- и наноуровне.

Выводы. Исследования при помощи электронного микроскопа показывают наличие модифицированных участков мелкозернистого бетона углеродными нанотрубками. Однако наномодифицирующая добавка распределена не по всему объему смеси, в связи с этим следует учесть дополнительные мероприятия по распределению компонентов смеси. Применение смесителей различного типа может положительно сказаться на диспергировании УНТ.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: наномодифицированный бетон, ультразвуковое диспергирование, углеродные нанотрубки, пластификатор, прочность при сжатии

ДЛЯ ЦИТИРОВАНИЯ: Ляшенко Д.А., Перфилов В.А. Наномодифицированная цементная композиция // Вестник МГСУ. 2024. Т. 19. Вып. 7. С. 1116–1124. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.7.1116-1124

Автор, ответственный за переписку: Дмитрий Александрович Ляшенко, dmitiry.lyashenko@yandex.ru.

Nanomodified cement composition

Dmitry A. Lyashenko, Vladimir A. Perfilov

Volgograd State Technical University (VSTU); Volgograd, Russian Federation

ABSTRACT

Introduction. The focus area of construction materials science is to create materials with better performance characteristics. The most common construction material is concrete that has various purposes. The development of the construction industry leads to the design of increasingly complex structures, whose construction requires high-performance concretes featuring greater reliability.

Materials and methods. Reported research data on using various nano-modifying additives for concrete are presented. Co-using carbon nanotubes (CNT) and plasticizer SP-3, as well as adding the nano-modifying additive by the method of ultrasonic dispersion are proposed as a composite additive for concrete.

Results. The results of a series of tests are presented. The tests were aimed at studying the effect of a composite additive on the strength characteristics of fine-grained concrete. An increase in the compressive strength of concrete modified with CNTs was detected. Electron microscopy was employed to find that the use of nanomaterials changes the structure of concrete at micro- and nano-scale levels.

Conclusions. Electron microscopy studies show the presence of fine-grained concrete areas modified with carbon nanotubes. However, this nano-modifying additive does not spread throughout the entire mixture. Therefore, additional actions should be considered to make the components spread throughout the mixture. The use of different type of mixers can have a positive effect on the dispersion of CNTs.

KEYWORDS: nanomodified concrete, ultrasonic dispersion, carbon nanotubes, plasticizer, compressive strength

FOR CITATION: Lyashenko D.A., Perfilov V.A. Nanomodified cement composition. *Vestnik MGSU* [Monthly Journal on Construction and Architecture]. 2024; 19(7):1116-1124. DOI: 10.22227/1997-0935.2024.7.1116-1124 (rus.).

Corresponding author: Dmitry A. Lyashenko, dmitiry.lyashenko@yandex.ru.

ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день в мире исследуются технологии, направленные на изучение малых молекул атомов. В развитых экономически странах приоритетным направлением является применение нанотехнологий. Актуальность исследований по внедрению нанотехнологий в строительное материаловедение обусловлена «дорожной картой» строительства, которая утверждена учеными всего мира [1] в период до 2025 г. Несмотря на это, область применения нанотехнологий в строительном комплексе еще находится на ранней стадии развития.

Основной строительный материал в мире — бетон и железобетон. В связи с этим в производство бетонных изделий активно внедряются технологии нового поколения. Они заключаются в использовании комплексных модифицирующих добавок различного функционального назначения.

Свойства бетона напрямую определяются его структурой. Раньше в работах рассматривались размеры структуры на макро-, мезо- и микроуровне. В настоящее время все чаще рассматривается наноструктура бетона [2, 3]. Одним из основных материалов наномодификации бетона можно считать углерод.

Углеродные нанотрубки (УНТ), понимаемые как набор углеродных структур, которые после синтеза приобретают цилиндрическую форму в нанометровом масштабе, классифицируются как одностенные и многостенные УНТ в зависимости от сформированных цилиндров [4]. Модуль упругости углерода примерно в шесть раз выше, чем у стали, а предел прочности при растяжении на два порядка выше и может достигать примерно 150 ГПа [5]. Благодаря этому можно считать, что УНТ служат идеальным кандидатом для применения в композиционных материалах. Можно считать такую добавку регулятором распространения микротрещин [6]. Нанотрубки в структуре бетона выступают в роли дополнительных центров кристаллизации, их наличие изменяет направление и регулирует скорость физико-химических процессов при твердении бетона, благодаря этому снижается внутреннее напряжение. Таким образом, введение наномодификаторов положительно влияет на процессы структурообразования матрицы, благодаря чему обеспечивается повышение плотности мелкозернистых кристаллогидратных фаз вблизи нанотрубок. Как следствие, механическая прочность бетона повышается [7, 8].

Несмотря на то, что УНТ обладают высокими характеристиками, при введении в цементные композиционные материалы они не всегда гарантируют повышение эксплуатационных характеристик по двум основным ограничениям.

Трудность диспергирования наномодифицирующих добавок состоит, главным образом, в их гидрофобной природе и сильных ван-дер-ваальсовых

силах между ними [9]; слабом межфазном взаимодействии между УНТ и матрицей [10]. Помимо этого, имеется множество работ, направленных на изучение введения наноразмерных добавок путем технологии ультразвукового диспергирования [11, 12].

Основная цель данного исследования — подбор состава и создание мелкозернистого бетона с повышенной прочностью, устойчивого к трещинообразованию путем применения комплексной добавки, включающей УНТ и суперпластификатор.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Эксплуатационные характеристики бетона в значительной степени зависят от следующих факторов: структура материала на микроскопическом уровне, характер сопротивления деформациям, явления теплообмена, а также интенсивность капиллярной проницаемости [13, 14].

Как показывает множество работ, уменьшение размеров частиц материала значительно повышает его характеристики [15]. К примеру, удельная поверхность частиц портландцементного вяжущего составляет приблизительно 3000 см²/г. Благодаря такой удельной поверхности в химическую реакцию вступает примерно четверть объема цементного вяжущего. Для достижения полной гидратации цемента применяется измельчение материалов до максимально возможных малых размеров. Для этого используются так называемые методы активации.

При активации у цементных вяжущих наблюдается повышение степени реакционной способности, помимо уменьшения размеров зерен цемента этот эффект обуславливается повышением концентрации дефектов и образованием новых активных поверхностных центров, что является причиной изменения кристаллической структуры [16, 17]. Применение механоактивации цементов приводит к изменению сорбционных свойств твердых поверхностей благодаря образованию в ней активных центров, которые имеют радикальную природу. Главный недостаток данной технологии — энергозатратность процесса активации. Механическая активация твердых веществ требует передачи большого количества энергии, направленной на деформацию кристаллической решетки материала. В связи с этим установки для механоактивации имеют высокую энергонапряженность. Ударное воздействие служит одним из наиболее эффективных способов передачи энергии для технологии механоактивации, так как такой способ позволяет направить энергию в определенные участки обрабатываемого материала. Для механической активации вяжущих применяются различного вида мельницы [18, 19]. В таких установках рабочим элементом являются мелющие тела, которые могут представлять собой шары, цилиндры или отрезки, изготовленные из твердого, плотного материала. Механизм помола может быть основан на приведении в движение мелющих тел

за счет электродвигателя и сил тяжести, а также за счет магнитного поля.

Однако применение технологии домолла цементного вяжущего — финансово затратно. Поэтому зачастую использование таких методов экономически нецелесообразно для предприятия.

При рассмотрении свойств бетона на уровне частиц от 50 до 100 мкм наблюдается изменение в дисперсной системе (цемент — наполнитель) признаков коллоида в водной среде, также на этом уровне отмечается прекращение броуновского движения частиц и резкое уменьшение количества свободной поверхностной энергии из-за установленного фазового равновесия системы [20].

Другим направлением микромодификации структуры бетона является введение в состав бетонной смеси наномодифицирующих добавок различного типа. Одна из наиболее известных наномодифицирующих добавок — микрокремнезем, получаемый в качестве побочного продукта при производстве металлического кремния и ферросилиция. Коллоидные частицы микрокремнезема имеют размер 10^{-5} – 10^3 м. Нанобетоном называется строительный материал, который включает в своем составе наноразмерные добавки. Известно, что введение в состав бетона незначительного количества наномодифицирующих добавок (частиц с размерами от 1–100 нм) позволяет приобретать новые свойства. Это связано с модифицированием структуры получаемого композиционного материала на наноразрыве.

Наноразмерные частицы присутствуют в хризолитовом асбесте в виде нанотрубок. Возможно, наличие нанотрубок и обеспечивает повышение прочности цементной матрицы при использовании асбеста [21].

Помимо этого, нанотрубки содержатся в серпентините. Из данного минерала изготавливают

ремонтно-восстановительные составы. Особое внимание можно уделить фуллероидам (одно- или многослойные нанотрубки).

В качестве наномодифицирующих компонентов применяются различные материалы как природного, так и искусственного происхождения. Можно выделить следующие добавки: нановолокна различных модификаций, сажа, астралены, УНТ, фуллерены, микрокремнезем, минералы, наноразмерные породы и пр. Выбор наномодифицирующих добавок зависит от требуемых параметров, а также технических и функциональных свойств структуры материала. Наибольшее распространение имеют углеродные наномодифицирующие добавки, золи и фуллерены [22].

В данной работе было принято решение об использовании углеродных нанотрубок. Ключевыми параметрами выступили длина УНТ (3–5 мкм), внешний диаметр (10–60 нм) и внутренний диаметр (10–20 нм). Исходя из рассмотренных литературных данных, такие значения являются наиболее эффективными [23–25].

Для проведения лабораторных испытаний использованы материалы: цемент «Евроцемент Экстра» марки М500, песок, суперпластификатор «ПОЛИПЛАСТ СП-3», углеродные нанотрубки серии Таунит-М от производителя ООО «Нано Тех Центр».

Была приготовлена серия из 11 составов мелкозернистого бетона с применением различной концентрации нанотрубок.

Для введения нанотрубок в состав бетона применялся ультразвуковой диспергатор УЗГ13-01/22 (рис. 1).

Ультразвуковой диспергатор является аппаратом, генерирующим ультразвуковую энергию малой мощности. Он предназначен для возбуждения пьезокерамических преобразователей с целью интенсификации обработки хрупких или твердых ма-

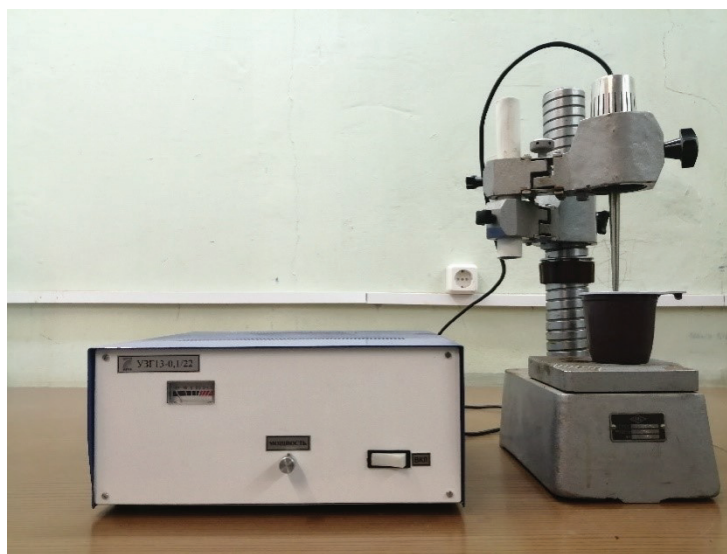


Рис. 1. Ультразвуковой диспергатор УЗГ13-01/22

Fig. 1. Ultrasonic disperser UZG 13-01/22

териалов, шлифования, микросварки, очистки, диспергирования и прочих процессов, требующих наличия ультразвуковых колебаний.

Технология введения нанотрубок имела следующий вид. Исходя из требований по определению оптимального состава бетона выполнены исследования подвижности смеси, согласно которым экспериментально определено значение водоцементного отношения 0,42. В расчетное количество воды вводились УНТ и пластификатор СП-3. Далее в воду погружался рабочий элемент ультразвукового диспергатора и происходила обработка ультразвуком в течение 5 мин. Время обработки также подобрано исходя из заранее проведенных лабораторных исследований. После диспергирования полученную суспензию вводили в заранее подготовленную цементно-песчаную смесь, после чего все компоненты размешивались до получения однородной массы. После этого осуществлялась формовка образцов согласно ГОСТ 30744 с виброуплотнением смеси. На следующий день образцы распалубливались и помещались в емкость с водой для проведения дальнейших исследований. Для каждого образца был установлен предел прочности при сжатии при помощи неразрушающего метода аппаратом Пульсар 1.2 в возрасте 7, 14, 28 сут (рис. 2).

Для изучения структуры получаемого мелкозернистого бетона из полученных образцов-балочек в возрасте 28 сут отобраны пробы для изучения на электронном микроскопе Versa 3D (рис. 3). Для этого производилось измельчение образцов мелкозернистого бетона и просеивание на сите 0,315 мм.

Данный микроскоп имеет кратность до 120 000, что позволяет исследовать структуру материала на наноуровне. Помимо этого, прибор имеет возможность проведения энергодисперсного рентгеновского анализа. Данный метод анализа твердых веществ основан на пропускании пучка электронов через исследуемый материал, атомы которого возбуждаются, испуская характерное для всех химических веществ рентгеновское излучение. Исследуя спектр таких из-



Рис. 2. Ультразвуковой прибор Пульсар 1.2

Fig. 2. Ultrasonic instrument Pulsar 1.2



Рис. 3. Электронный микроскоп Versa 3D

Fig. 3. Electron microscope Versa 3D

лучений, можно выполнить качественный и количественный анализ состава вещества.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Проведена серия испытаний образцов мелкозернистого бетона различного состава (табл. 1). Для изучения влияния наномодифицирующей добавки в состав бетона вводились УНТ в количестве от 0,001 до 0,01 % по массе вяжущего. Контрольные образцы были приготовлены из состава без включения нанодобавки.

Для всех составов был определен предел прочности при сжатии с помощью неразрушающего метода в возрасте 7, 14 и 28 сут (табл. 2).

Обнаружено, что при минимальном значении вводимых УНТ прочность мелкозернистого бетона повышается на 10,5 %. Максимальный прирост прочности имел состав С-11, с увеличением на 15,8 %. Однако схожие показатели были у состава С-6, прочность которого возросла на 14,4 %. Из-за незначительной разницы значений можно сделать вывод, что введение УНТ в количестве 0,005–0,01 % имеет одинаковый эффект.

Следует отметить, что прирост прочности наблюдается уже на 7 сут. Для состава С-11 он составил 15,5 %. Повышение прочностных характеристик на ранних сроках твердения бетонов положительно влияет на производственные процессы.

На рис. 4 наблюдается положительное изменение характера набора прочности бетона. Об-

Табл. 1. Исследуемые составы

Table 1. Investigated compositions

Состав Composition	Цемент, г Cement, g	Песок, г Sand, g	Вода, г Water, g	СП-3, г Plasticizer SP-3	УНТ, % по массе Ц Carbon nanotubes, mass %
C-1	500	1500	210	3,5	–
C-2	500	1500	210	3,5	0,001
C-3	500	1500	210	3,5	0,002
C-4	500	1500	210	3,5	0,003
C-5	500	1500	210	3,5	0,004
C-6	500	1500	210	3,5	0,005
C-7	500	1500	210	3,5	0,006
C-8	500	1500	210	3,5	0,007
C-9	500	1500	210	3,5	0,008
C-10	500	1500	210	3,5	0,009
C-11	500	1500	210	3,5	0,01

Табл. 2. Прочностные характеристики мелкозернистого бетона

Table 2. Strength characteristics of fine-grained concrete

Состав Composition	$R_{сж}$ 7 сут, МПа R_{comp} 7 days, MPa	$R_{сж}$ 14 сут, МПа R_{comp} 14 days, MPa	$R_{сж}$ 28 сут, МПа R_{comp} 28 days, MPa
C-1	36,4	39	40,8
C-2	39,2	40,9	45,6
C-3	40	40,9	43,7
C-4	39,8	42,6	47,1
C-5	41,2	42,8	45,9
C-6	41,9	43,7	47,7
C-7	41,5	44,6	46,8
C-8	41,8	44	47,7
C-9	41,1	43,5	47,3
C-10	40,9	43,5	47,2
C-11	43,1	44,4	48,5

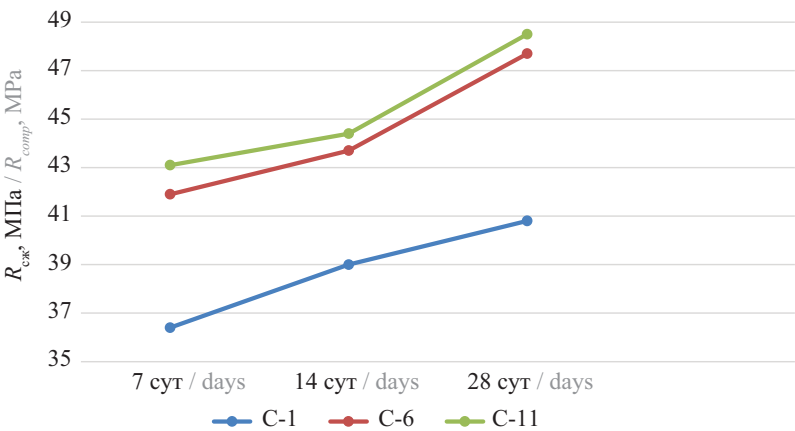


Рис. 4. Характер набора прочности мелкозернистого бетона

Fig. 4. Character of strength gain in fine-grained concrete

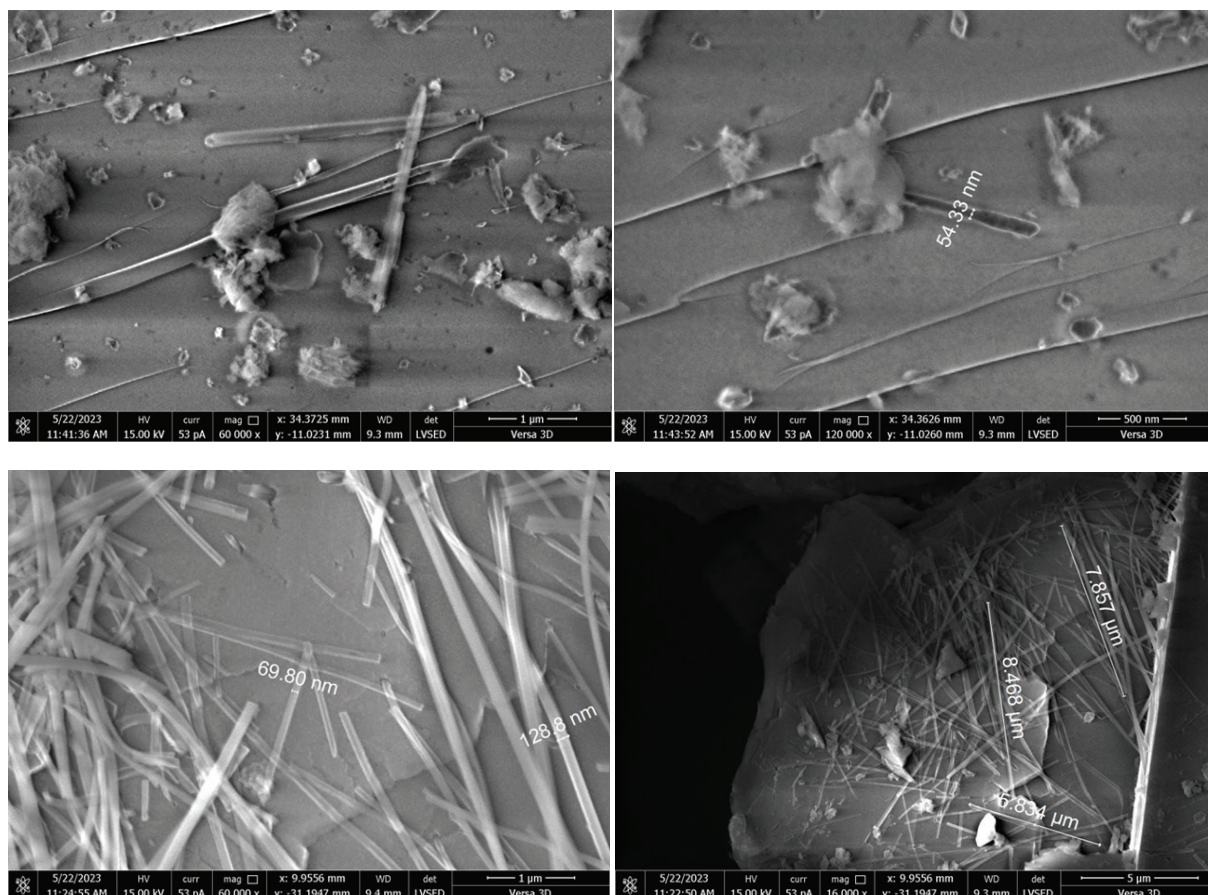


Рис. 5. Микрофотографии наномодифицированного бетона различного увеличения

Fig. 5. Microphotographs of nanomodified concrete at different magnifications

разцы наномодифицированного бетона к 28 сут имели большую интенсивность набора прочности, чем у контрольного состава.

Для понимания принципа механизма влияния УНТ на свойства бетона изучена структура исследуемых образцов (рис. 5).

На представленных микрофотографиях отмечаются включения УНТ. Об этом свидетельствуют показатели размеров игольчатых включений. Нанотрубки в среднем имеют внешний диаметр до 100 нм, в то время как средняя длина составляет 6,5 мкм.

Углеродные нанотрубки, зафиксированные на микрофотографиях, обладают стабильным значением диаметра по всей длине волокон, что обеспечивает оптимальные условия роста новообразований цементного камня. Это связано с тем, что в процессе твердения модифицированного бетона на включениях УНТ происходит образование и срастание кристаллов цементного вяжущего. В то время как ровная поверхность УНТ способствует процессу образования каркасной структуры будущей матрицы.

На нанотрубках присутствуют частицы новообразований, что свидетельствует о модифицировании структуры мелкозернистого бетона.

Структура модифицированного материала имеет плотную компоновку частиц, благодаря чему происходит повышение прочностных характеристик.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментально доказано, что оптимальное количество вводимых УНТ составляет 0,005 % по массе вяжущего вещества. Так как при повышении концентрации наномодифицирующей добавки (свыше 0,005 %) отмечается незначительное увеличение прочности.

Введение малого количества нанодобавки (0,0001–0,001 % по массе вяжущего) производится путем активации воды затворения при помощи ультразвукового диспергирования, способствующего более равномерному распределению нанотрубок по всему объему смеси. В процессе твердения вяжущего на поверхности и внутри нанотрубок образуются кристаллообразные соединения новообразований цементного камня, способствующие пространственному армированию структуры мелкозернистого бетона на наноуровне.

Совместное введение УНТ и пластификатора в состав мелкозернистого бетона позволяет повысить прочность на 15 %. Помимо этого, наблюдается прирост прочности уже на ранних сроках твердения бетонной смеси, а также повышение интенсивно-

сти набора прочности в течение 28 сут. Повышение прочности объясняется дискретным армированием цементной матрицы.

Исследования при помощи электронного микроскопа показывают наличие модифицированных участков мелкозернистого бетона углеродными на-

нотрубками. Однако наномодифицирующая добавка распределена не по всему объему смеси, в связи с этим следует учесть дополнительные мероприятия по распределению компонентов смеси. Применение смесителей различного типа может положительно сказаться на диспергировании УНТ.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Ashwini R.M., Potharaju M., Srinivas V., Kana-ka Durga S., Rathnamala G.V., Paudel A. Compressive and flexural strength of concrete with different nano-materials : a critical review // Journal of Nanomaterials. 2023. Vol. 2023. Pp. 1–15. DOI: 10.1155/2023/1004597
2. Паламарчук А.А., Шишакина О.А., Кочуров Д.В., Аракеян А.Г. Полимерные бетоны — перспективные строительные материалы // Международный студенческий научный вестник. 2018. № 6. С. 105. EDN YRRQLZ.
3. Фахратов М.А., Евдокимов В.О., Бородин А.С. Перспективы применения наноструктурированного бетона в строительстве // Инженерный вестник Дона. 2018. № 3 (50). С. 124. EDN MIVHBZ.
4. Енджиевская И.Г., Демина А.В., Енджиевский А.С., Дубровская С.Д. Оценка взаимодействия добавок в бетоне // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. 2022. Т. 24. № 3. С. 128–137. DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-3-128-137. EDN WWWUVS.
5. Ali Askari K.O., Singh V.P., Dalezios N.R., Crusberg T.C. Polymer concrete // International Journal of Hydrology. 2018. Vol. 2. Issue 5. DOI: 10.15406/ijh.2018.02.00135
6. 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. EDN UFODNHQ.
7. Dahlan A.S. Impact of nanotechnology on high performance cement and concrete // Journal of Molecular Structure. 2021. Vol. 1223. P. 128896. DOI: 10.1016/j.molstruc.2020.128896
8. Bhatta D.P., Singla S., Garg R. Microstructural and strength parameters of Nano-SiO₂ based cement composites // Materials Today: Proceedings. 2021. Vol. 46. Pp. 6743–6747. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.04.276
9. Пименов А.И., Ибрагимов Р.А., Изотов В.С. Влияние углеродных нанотрубок и способа их введения на свойства цементных композиций // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2014. № 6 (666). С. 26–30. EDN SXHLNH.
10. Пономарев А.Н. Высококачественные бетоны. Анализ возможностей и практика использования методов нанотехнологии // Инженерно-строительный журнал. 2009. № 6 (8). С. 25–33. EDN NBMZNP.
11. Самченко С.В., Земскова О.В., Козлова И.В. Стабилизация дисперсий углеродных нанотрубок при ультразвуковой обработке // Техника и технология силикатов. 2014. Т. 21. № 3. С. 14–18. EDN SNAVPH.
12. 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 A Scientific Internet-Journal. 2022. Vol. 14. Issue 6. Pp. 481–492. DOI: 10.15828/2075-8545-2022-14-6-481-492
13. Галиновский А.Л., Моисеев В.А., Проваторов А.С., Осипков А.С., Яковлев Г.И. Разработка ультраструйной технологии получения суспензий с углеродными нанотрубками // Упрочняющие технологии и покрытия. 2016. № 11 (143). С. 37–43. EDN WVKSGP.
14. Моница Т.А., Антонов И.И. Современные материалы и технологии в прототипировании. Нанотехнологии и наноматериалы // Декоративное искусство и предметно-пространственная среда. Вестник РГХПУ им. С.Г. Строганова. 2021. № 2–2. С. 20–28. EDN RPZZMQ.
15. Андреев А.В., Давыдова Н.Н., Буренина О.Н., Петухова Е.С. Улучшение качества мелкозернистого бетона путем механоактивации цемента // Научный журнал КубГАУ. 2013. № 94. С. 451–460. EDN RUYCNX.
16. Ибрагимов Р.А., Королев Е.В. Интенсификация процессов гидратации при механоактивации вяжущего // Фундаментальные основы строительного материаловедения : сб. докл. Междунар. онлайн-конгресса. 2017. С. 806–808. EDN YLPFNJ.
17. Пименов С.И., Ибрагимов Р.А. Влияние механохимической активации цементной суспензии на физико-технические свойства цементных композиций // Фундаментальные основы строительного материаловедения : сб. докл. Междунар. онлайн-конгресса. 2017. С. 797–805. EDN MCDMRK.
18. Ляшенко Д.А., Перфилов В.А., Весова Л.М. Мелкозернистый наномодифицированный бетон // Инженерный вестник Дона. 2022. № 10 (94). С. 369–378. EDN NKKAXY.
19. Ляшенко Д.А., Перфилов В.А., Лукьянича С.В., Лушиногин В.В. Разработка состава наномодифицированного цемента // Инженерный вестник Дона. 2022. № 5 (89). С. 393–402. EDN AZQKTA.

20. Usherenko S., Figovsky O. Superdeep penetration as the new physical tool for creation of composite materials // *Advanced Materials Research*. 2008. Vol. 47–50. Pp. 395–402. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.47-50.395

21. Figovsky O., Shapovalov L. New nonisocyanate polyurethane coatings // *China Coatings Journal (CCJ)*. 2006. Issue 2. Pp. 49–58.

22. Kudryavtsev B., Figovsky O., Egorova E. The use of nanotechnology in production of bioactive paints and coatings // *J. Scientific Israel-Technological Advantages*. 2003. Vol. 15. Pp. 209–215.

23. Строкова В.В., Череватова А.В., Павленко Н.В., Мирошников Е.В., Шаповалов Н.А. Оценка

эффективности применения наноструктурированного вяжущего при получении легковесных ячеистых композитов // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2011. № 4. С. 48–51. EDN OXVZTH.

24. Жерновский И.В., Осадчая М.С., Череватова А.В., Строкова В.В. Алюмосиликатное наноструктурированное вяжущее на основе гранитного сырья // *Строительные материалы*. 2014. № 1–2. С. 38–41. EDN QCDQDD.

25. Шестаков Н.И., Урханова Л.А., Буянтуев С.Л., Семенов А.П., Смирнягина Н.Н. Асфальтобетон с использованием углеродных наномодификаторов // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова*. 2015. № 6. С. 21–24. EDN ULFTKT.

Поступила в редакцию 8 октября 2023 г.

Принята в доработанном виде 11 апреля 2024 г.

Одобрена для публикации 11 апреля 2024 г.

ОБ АВТОРАХ: Дмитрий Александрович Ляшенко — аспирант; Институт архитектуры и строительства; Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ); 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, д. 1; РИНЦ ID: 1054316, ORCID: 0009-0002-6688-0293; dmitiry.lyashenko@yandex.ru;

Владимир Александрович Перфилов — доктор технических наук, профессор; Институт архитектуры и строительства; Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ); 400074, г. Волгоград, ул. Академическая, д. 1; РИНЦ ID: 406728, Scopus: 56966537200, ORCID: 0000-0001-9196-7572; vladimirperfilov@mail.ru.

Вклад авторов:

Ляшенко Д.А. — написание исходного текста, итоговые выводы.

Перфилов В.А. — научное руководство, концепция исследования, развитие методологии, доработка текста, итоговые выводы.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

REFERENCES

1. Ashwini R.M., Potharaju M., Srinivas V., Kanka Durga S., Rathnamala G.V., Paudel A. Compressive and flexural strength of concrete with different nanomaterials : a critical review. *Journal of Nanomaterials*. 2023; 2023:1-15. DOI: 10.1155/2023/1004597

2. Palamarchuk A.A., Shishakina O.A., Kochurov D.V., Arakelyan A.G. Polymeric concretes — perspective construction materials. *International Student Scientific Bulletin*. 2018; 6:105. EDN YRRQLZ. (rus.).

3. Fakhratov M.A., Evdokimov V.O., Borodin A.S. Prospects for the use of nanostructured concrete in construction. *Engineering journal of Don*. 2018; 3(50):124. EDN MIVHBZ. (rus.).

4. Endzhievskaya I.G., Demina A.V., Endzhievskii A.S., Dubrovskaya S.D. Evaluation of additive interaction in concrete. *Journal of Construction and Architecture*. 2022; 24(3):128-137. DOI: 10.31675/1607-1859-2022-24-3-128-137. EDN WWWUVS. (rus.).

5. Ali Askari K.O., Singh V.P., Dalezios N.R., Cruseberg T.C. Polymer concrete. *International Journal of Hydrology*. 2018; 2(5). DOI: 10.15406/ijh.2018.02.00135

6. Moiseeva V.I., Pirogova Ya.V., Tyumencev M.E., Pan'kov P.A. Nanotechnologies in the field of production of building materials. *Innovations and investments*. 2019; 11:293-297. EDN UFODHQ. (rus.).

7. Dahlan A.S. Impact of nanotechnology on high performance cement and concrete. *Journal of Molecular Structure*. 2021; 1223:128896. DOI: 10.1016/j.molstruc.2020.128896

8. Bhatta D.P., Singla S., Garg R. Microstructural and strength parameters of Nano-SiO₂ based cement composites. *Materials Today: Proceedings*. 2021; 46:6743-6747. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.04.276

9. Pimenov A.I., Ibragimov R.A., Izotov V.S. Influence carbon nanotubes and methods of administration on properties of cement compositions. *News of Higher Educational Institutions. Construction*. 2014; 6(666):26-30. EDN SXHLNH. (rus.).

10. Ponomarev A.N. High-quality concrete. Analysis of the possibilities and practice of using nanotechnology methods. *Magazine of Civil Engineering*. 2009; 6(8):25-33. EDN NBMZNP. (rus.).

11. Samchenko S.V., Zemskova O.V., Kozlova I.V. Stabilization of dispersions of carbon nanotubes by ultrasonic treatment. *Technique and Technology of Silicates*. 2014; 21(3):14-18. EDN SNAVPH. (rus.).
12. 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 a Scientific Internet-Journal*. 2022; 14(6):481-492. DOI: 10.15828/2075-8545-2022-14-6-481-492
13. Galinovskiy A.L., Moiseev V.A., Osipkov A.S., Provatorov A.S., Yakovlev G.I. Development of ultrajet technology of receiving suspensions with carbon nanotubes. *Strengthening Technologies and Coatings*. 2016; 11(143):37-43. EDN WXSXGP. (rus.).
14. Monina T.A., Antonov I.I. Modern materials and technologies in prototyping. Nanotechnology and nanomaterials. Decorative Art and Environment. *Gerald of the RGHPU*. 2021; 2-2:20-28. EDN RPZZMQ. (rus.).
15. Andreeva A.V., Davydova N.N., Burenina O.N., Petukhova E.S. Improvement of quality of fine-grained concrete with cement mechanical activation. *Scientific Journal of KubGAU*. 2013; 94:451-460. EDN RUYCNX. (rus.).
16. Ibragimov R.A., Korolev E.V. Intensification of hydration processes during mechanical activation of the binder. *Fundamental principles of construction materials science : collection of reports of the International Online Congress*. 2017; 806-808. EDN YLPFNJ. (rus.).
17. Pimenov S.I., Ibragimov R.A. The effect of mechanochemical activation of cement suspension on the physical and technical properties of cement compositions. *Fundamental principles of construction materials science : collection of reports of the International Online Congress*. 2017; 797-805. EDN MCDMRK. (rus.).
18. Lyashenko D.A., Perfilov V.A., Vesova L.M. Fine-grained nanomodified concrete. *Engineering Journal of Don*. 2022; 10(94):369-378. EDN NKKAXY. (rus.).
19. Lyashenko D.A., Perfilov V.A., Lukyanitsa S.V., Lupinogin V.V. Expanded fiber gypsum material. *Engineering Journal of Don*. 2022; 5(89):393-402. EDN AZQKTA. (rus.).
20. Usherenko S., Figovsky O. Superdeep penetration as the new physical tool for creation of composite materials. *Advanced Materials Research*. 2008; 47-50:395-402. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.47-50.395
21. Figovsky O., Shapovalov L. New nonisocyanate polyurethane coatings. *China Coatings Journal (CCJ)*. 2006; 2:49-58.
22. Kudryavtsev B., Figovsky O., Egorova E. The use of nanotechnology in production of bioactive paints and coatings. *J. Scientific Israel-Technological Advantages*. 2003; 15:209-215.
23. Strokova V.V., Cherevatova A.V., Pavlenko N.V., Miroshnikov E.V., Shapovalov N.A. Evaluation of the effectiveness of the use of nanostructured binder in the production of lightweight cellular composites. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2011; 4:48-51. EDN OXVZTH. (rus.).
24. Zhernovskij I.V., Osadchaya M.S., Cherevatova A.V., Strokova V.V. Aluminosilicate nanostructured binder based on granite raw materials. *Construction Materials*. 2014; 1-2:38-41. EDN QCDQDD. (rus.).
25. Shestakov N.I., Urkhanova L.A., Buyantuev S.L., Semenov A.P., Smirnyagina N.N. Asphalt concrete using carbon nanomodifiers. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*. 2015; 6:21-24. EDN ULFTKT. (rus.).

Received October 8, 2023.

Adopted in revised form on April 11, 2024.

Approved for publication on April 11, 2024.

BIONOTES: **Dmitry A. Lyashenko** — postgraduate student, Institute of Architecture and Construction; **Volgograd State Technical University (VSTU)**; 1 Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; ID RSCI: 1054316, ORCID: 0009-0002-6688-0293; dmitry.lyashenko@yandex.ru;

Vladimir A. Perfilov — Doctor of Technical Sciences, Professor; Institute of Architecture and Construction; **Volgograd State Technical University (VSTU)**; 1 Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; ID RSCI: 406728, Scopus: 56966537200, ORCID: 0000-0001-9196-7572; vladimirperfilov@mail.ru.

Contribution of the author:

Dmitry A. Lyashenko — writing the source text, final conclusions.

Vladimir A. Perfilov — scientific guidance, research concept, development of methodology, revision of the text, final conclusions.

The authors declare that there is no conflict of interest.