

## Мелкозернистый наномодифицированный бетон

*Д.А. Ляшенко, В.А. Перфилов, Л.М. Весова*

*Волгоградский Государственный Технический университет  
Институт Архитектуры и Строительства*

**Аннотация.** В статье приведены результаты экспериментальных исследований. Определено оптимальное время диспергирования воды затворения совместно с нанодобавкой. Также приведены результаты экспериментов по определению влияния углеродных нанотрубок и пластификатора на мелкозернистые бетоны. Для исследуемых составов определены прочностные характеристики. На основе полученных данных определено влияние времени диспергирования, а также влияние совместного применения пластификатора SikaVC 5-500 и углеродных нанотрубок «Таунит-М».

**Ключевые слова:** мелкозернистый бетон, углеродные нанотрубки, ультразвуковое диспергирование, пластификатор.

### **Введение.**

В настоящее время в строительной сфере особое внимание уделяется вопросу применения высокопрочных бетонов. Их применение позволяет снизить массу конструкций без потери прочностных характеристик. Одним из перспективных направлений получения бетонов с повышенной прочностью является применение нанотехнологий. Оно заключается в использовании наномодифицирующих добавок, представляющих собой коллоидные частицы, имеющие хотя бы в одной плоскости размеры  $10^{-10} - 10^{-8}$  м, т.е. нанометровые размеры [1]. Таким образом, нанотехнология заключается в производстве материалов, функционирование которых определяется «наноструктурой», т.е. упорядоченными фрагментами размером от 1 до 100 нм [2].

**Актуальность.** Исследования показывают, что применение нанодобавок приводит к увеличению прочностных характеристик бетонов и, как следствие, к долговечности. Использование наномодификаторов оказывает положительное влияние на структурообразование и физико-механические свойства бетона. Достигается это за счет внедрения углеродных

частиц различных конфигураций в структуру бетона. Эффективность введения таких добавок заключается в том, что углерод имеет значительно большую прочность, чем цементные клинкеры. Следовательно, их введение в структуру бетона приводит к повышению прочности каркаса бетонного камня. В качестве наномодификаторов наибольшее распространение получили углеродные нанотрубки, которые могут иметь различные типы и размеры [3].

### **Теоретическая часть.**

Эффективность применения наноразмерных добавок объясняется характером разрушения бетонных материалов. Процесс разрушения начинается с растрескивания отдельных нанотрещин, которые, объединяясь, образуют микротрещины, а те, в свою очередь, образуют макротрещины [4]. Растрескивание на наноразмерном уровне играет значительную роль в разрушении бетонов. Этот факт способствует использованию наноразмерных добавок для армирования бетонов, что позволит контролировать разрушение материала на наноуровне. Наномодифицированный бетон обладает более высокой прочностью и долговечностью и имеет более плотную микроструктуру, чем традиционный бетон [5].

Технология наномодифицированного бетона заключается в равномерном распределении малого количества добавки по всему объему цементного теста, что ускоряет процесс гидратации. Параллельно новообразования заполняют поры цементного камня, срастаясь в единый каркас совместно с введенными углеродными частицами. Благодаря этому увеличивается прочность цементного камня, улучшается микроструктура и структура зоны контакта «цементный камень – наполнитель». Все это говорит о необходимости более тщательно подходить к выбору технологии введения наномодифицирующих добавок в бетонную смесь.

Одним из самых перспективных направлений применения нанодобавок является армирование бетонов углеродными волокнами [6,7]. Как известно, углерод имеет высокие показатели прочности, модуля упругости и химической стойкости, все эти показатели значительно выше, чем у других армирующих компонентов. В связи с этим применение углеродных волокон приводит к повышению физико-механических свойств бетона.

Повышение прочности бетонов при введении в состав нанотрубок связано не столько с их армирующим эффектом, сколько с направленным регулированием кристаллизационных процессов. Нанотрубки являются своего рода «зародышами» кристаллообразования, благодаря чему образуются вытянутые кристаллы, которые, разрастаясь, переплетаются между собой, образуя пространственную связь, что и дает максимальный армирующий эффект [8].

Однако минусом данной технологии для внедрения в производство является способ введения водной суспензии с нанодобавками. Этот метод требует равномерного распределения микропорций наночастиц в заданной среде, без возможности выпадения углерода в осадок.

Одной из наиболее эффективных технологий введения нанодобавок является метод ультразвукового диспергирования воды затворения совместно с наномодификатором. Для повышения эффективности ультразвуковой обработки в составы вводят полимерные или поверхностно-активные вещества [9,10]. Эти добавки за счет разряжения воды способствуют более равномерному распределению частиц по всему объему, а также делают полученную суспензию более устойчивой к выпадению в осадок углерода.

### **Результаты экспериментальных исследований.**

В данной работе было произведено две серии испытаний, направленных на исследование влияния введения углеродных нанотрубок в

---

состав цемента. Для этого был произведен подбор состава мелкозернистого бетона с добавкой углеродных нанотрубок (УНТ). В качестве нанодобавки применялись УНТ серии «Таунит-М». Помимо нанотрубок в состав вводился пластификатор SikaVC 5-500, который позволил повысить подвижность смеси и положительно влиял на равномерное распределение нанодобавки по всему объему воды.

Введение УНТ в воду затворения производилось при помощи ультразвукового диспергатора УЗГ13-0.1/22 по следующей технологии. В воду затворения добавлялись пластификатор и нанодобавка в заранее подсчитанном количестве, после чего в емкость с водой погружался штифт ультразвукового диспергатора и производилась обработка ультразвуком продолжительностью 5, 7 и 10 минут. Далее, активированная наномодифицирующей добавкой вода затворения, добавлялась в заранее перемешанную сухую цементно-песчаную смесь, после чего происходило размешивание смеси до требуемой консистенции. Полученная цементно-песчаная смесь загружалась в формы стандартных образцов балочек размером 40x40x160 мм. После распалубки все образцы хранились в естественных условиях в течение 28 суток, по истечению которых для определения пределов прочности производились испытания каждого образца-балочки.

Диспергирование в течение менее 5 минут на данном диспергаторе дает недостаточный эффект, так как визуально наблюдаются агломераты нанотрубок в воде затворения. В связи с этим было принято решение о сравнении характеристик материалов с различным временем диспергирования. Для этого была проведена первая серия испытаний составов, включающих в себя одинаковое количество пластификатора и УНТ, но с разным временем диспергирования, а именно: 5,7,10 минут.

---

Состав имеет следующий вид: Цемент – 500г, песок – 1500г, В/Ц = 0,42 (210 мл), Sika– 0,7% (3,5 г) от массы вяжущего. УНТ – 0,01% (0,005 г) от массы вяжущего. В таблице 1 представлены результаты испытаний полученных образцов.

Результаты испытаний исследуемых образцов. Таблица 1.

	Цемент,г	Песок, г	Вода, г	Sika, г	УНТ, г	Тдисп, м	$R_{изг}$ , МПа	$R_{сж}$ , МПа
№1	500	1500	210	3,5	0,005	5	7,2	38,2
№2	500	1500	210	3,5	0,005	7	6,9	38,5
№3	500	1500	210	3,5	0,005	10	7,2	38,1

Как видно из таблицы 1, полученные результаты прочности при изгибе и сжатии отличаются незначительно. Исходя из этого, можно сделать вывод о том, что максимальный эффект на диспергаторе УЗГ13-0.1/22 достигается уже при 5 минутах ультразвукового перемешивания.

После определения оптимального времени диспергирования, была произведена еще одна серия испытаний для исследования влияния добавки Таунит-М на прочность мелкозернистого бетона. Для сравнения характеристик был приготовлен контрольный состав №1, не включающий добавок. Составы №2 и №3 включают в себя пластификатор, но их различие заключается в способе введения добавки. Во втором составе пластификатор размешивали в воде затворения, в третьем применялся ультразвуковой диспергатор, что позволило снизить количество добавки с 0,6% до 0,5% по массе вяжущего без потери пластичности смеси. Составы №4 и №5 включают в себя как пластификатор, так и нанодобавку, которые совместно вводились в воду затворения при помощи ультразвуковой обработки в течение 5 минут. Нами были приготовлены составы с концентрацией УНТ в

количестве 0,006 и 0,01% от массы цемента. В таблице 2 приведены результаты испытаний второй партии образцов.

Результаты испытаний. Таблица 2.

	Цемент, г	Песок, г	Вода, г	Sika, г	Расплав конуса, мм	УНТ, г	$R_{изг}$ , МПа	$R_{сж}$ , МПа
№1	500	1500	240	-	105	-	5,5	27,4
№2	500	1500	210	3	107	-	5,7	34,7
№3	500	1500	210	2,5	106	-	6,2	35,3
№4	500	1500	210	2,5	108	0,003	6,6	38,7
№5	500	1500	210	2,5	106	0,005	7,7	41

Результаты показывают, что применение технологии ультразвукового диспергирования позволяет повысить пластифицирующий эффект добавки Sika, так как состав №3 при меньшем количестве добавки имеет схожие прочностные характеристики с составом №2. Если же сравнивать его с контрольным образцом, то можно увидеть, что повысились пределы прочности при изгибе и сжатии на 11 и 22% соответственно. Наибольшее увеличение прочности наблюдается при совместном использовании пластификатора и нанотрубок. Так, пределы прочности состава №5 показали увеличение прочности при изгибе на 28% и при сжатии на 33% в сравнении с первым составом. Для большей наглядности ниже приведены графики пределов прочности исследуемых образцов.

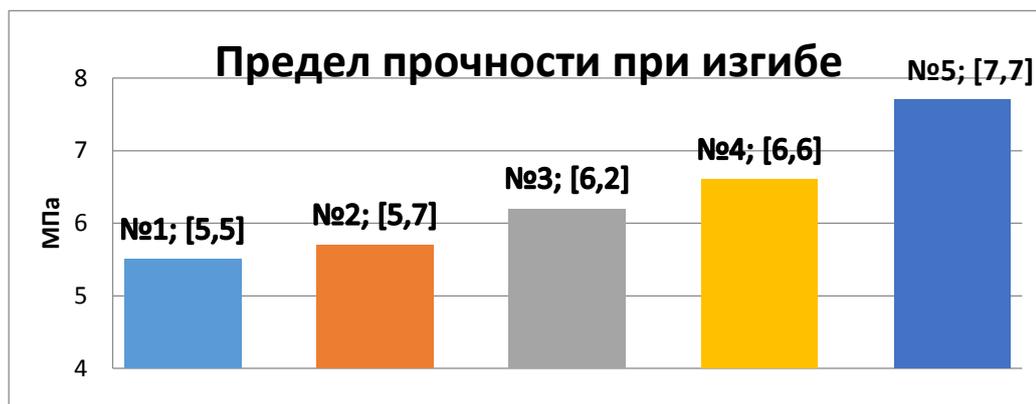


График 1. Значения пределов прочности при изгибе

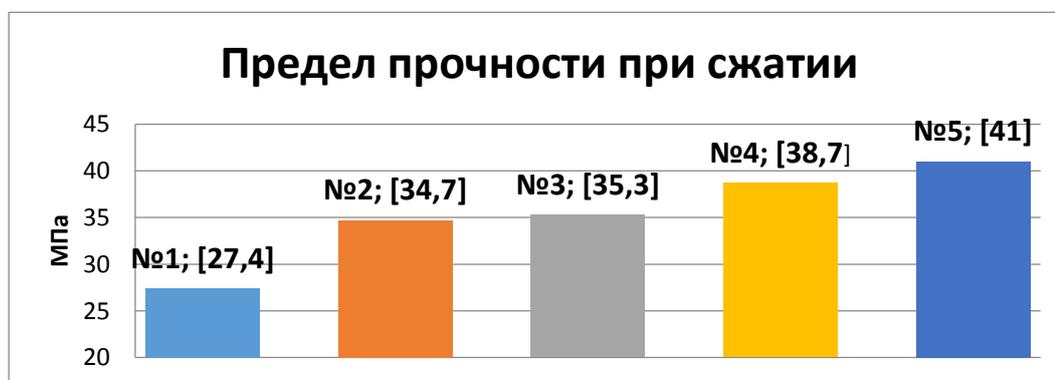


График 2. Значения пределов прочности при сжатии.

Исходя из полученных экспериментальных данных, видно, что увеличение количества нанотрубок положительно влияет на прочностные характеристики бетона. В связи с этим требуется проведение дальнейших испытаний с увеличением количества наноразмерной добавки Таунти-М больше чем 0,01% от массы цемента, для определения оптимального состава.

Нами уже были произведены исследования составов с применением УНТ и пластификатора СП-3 [11]. Повышение содержания углеродных нанотрубок также положительно влияло на прочностные характеристики, что говорит об их эффективности.

**Выводы.** В результате проведенных испытаний было выявлено, что оптимальное время диспергирования суспензии с нанотрубками равно 5 минутам. Обнаружен положительный эффект ультразвуковой обработки на влияние пластификатора Sica VC-5-500. Применение данной технологии

позволило сократить количество пластификатора при сохранении пластичности смеси и прочностных характеристик мелкозернистого бетона.

Полученные экспериментальные данные говорят о положительном эффекте совместного введения пластификатора и углеродных нанотрубок «Таунит-М». Увеличение количества нанотрубок приводит к повышению прочности, однако для определения оптимального состава требуется проведение дальнейших испытаний с повышением количества УНТ свыше 0,01% по массе вяжущего вещества.

### Литература

1. Толмачев С.Н., Беличенко Е.А. Применение углеродных коллоидных наночастиц в мелкозернистых цементных бетонах // ХНАУД. 2014. 152 с.
2. Третьяков Ю.Д. Нанотехнологии. Азбука для всех // М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 368 с.
3. Кудрявцев П.Г., Фиговский О.Л. Нанокompозитные органоминеральные гибридные материалы // Инженерный вестник Дона. 2014. №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2022/7609](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2022/7609)
4. Hawreen, A., Bogas, J.A. &Kurda, R. Mechanical Characterization of Concrete Reinforced with Different Types of Carbon Nanotubes. Arab J SciEng 2019. Vol 44. pp. 8361–8376.
5. Shah S.P., Konsta-Gdoutos M.S., Metaxa Z.S., Mondal P. Nanoscale modification of cementitious materials. Nanotechnology in Construction 3. 2009. pp. 125-130.
6. Варшавский В. Углеродные волокна – эффективный наполнитель композиционных материалов в строительстве // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2010. № 6. С. 12-13.



7. Фахратов М.А., Евдокимов В.О., Бородин А.С. Перспективы применения наноструктурированного бетона в строительстве // Инженерный вестник Дона. 2018. №3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2018/5127](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2018/5127).
8. Баженов Ю.М. Королев Е.В. Технико-экономические основы практической нанотехнологии в строительном материаловедении // Региональная архитектура и строительство. № 2(5). 2008. С. 3–9.
9. Ваучский М.Н. Нанобетон: мифы и реальность // Стройпрофиль. 2007. № 8 (62). С. 50-51.
10. Леонтьева А.И., Утробин Н.П., Орехов В.С., Дьячкова Т.П. Продукты органического синтеза XXI века и технологии их производства с использованием наноматериалов: В кн. «Фундаментальная наука – Центральной России». Тамбов, 2007. С. 344–346.
11. Ляшенко Д.А., Перфилов В.А., Лукьяница С.В., Лупиногин В.В. Разработка состава наномодифицированного цемента // Инженерный вестник Дона. 2022. №5. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2022/7609](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2022/7609).

### References

1. Tolmachev S.N., Belichenko E.A. Primenenie uglerodny`x kolloidny`x nanochasticz v melkozernisty`x cementny`x betonax [Application of carbon colloidal nanoparticles in fine-grained cement concretes] XNAUD. 2014. 152 P.
2. Tret`yakov Yu.D. Nanotexnologii. Azbuka dlya vsex [Nanotechnology. ABC for everyone] M.: FIZMATLIT, 2008. 368 P.
3. Kudryavtsev P.G., Figovskii O.L. Inzhenernyi vestnik Dona. 2014. №2. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2022/7609](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2022/7609)
4. Hawreen, A., Bogas, J.A. &Kurda, R. Mechanical Characterization of Concrete Reinforced with Different Types of Carbon Nanotubes. Arab J SciEng 2019. Vol 44. pp. 8361–8376



5. Shah S.P., Konsta-Gdoutos M.S., Metaxa Z.S., Mondal P. Nanoscale modification of cementitious materials. *Nanotechnology in Construction* 3. 2009. pp. 125-130.
6. Varshavskij V. *Stroitel`ny'e materialy`, oborudovanie, texnologii XXI veka*. 2010. № 6. pp. 12-13.
7. Faxratov M.A., Evdokimov V.O., Borodin A.S. *Inzhenernyj vestnik Dona*. 2018. №3. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2018/5127](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2018/5127).
8. Bazhenov Yu.M. Korolev E.V. *Regional`naya arxitektura i stroitel`stvo*. № 2(5). 2008. pp. 3 – 9.
9. Vauchskij M.N. *Strojprofil`*. 2007. № 8 (62). pp. 50-51
10. Leont`eva A.I., Utrobin N.P., Orexov V.S., D`yachkova T.P. *Fundamental`naya nauka – Central`noj Rossii. Tambov*, 2007. pp. 344–346.
11. Lyashenko D.A., Perfilov V.A., Luk`yanicza S.V., Lupinogin V.V. *Inzhenernyj vestnik Dona*. 2022. №5. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2022/7609](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2022/7609)