

Влияние введения углеродных нанотрубок на свойства бетонных композиций

Д.А. Ляшенко

Волгоградский государственный технический университет

Аннотация: В рамках работы исследовано влияние комплексного применения наномодифицирующей добавки «Таунит-М», суперпластификатора СП-3 и стальной фибры «Миксарм» с диаметром 1 мм и длиной до 54 мм. Установлена зависимость количества вводимой стальной фибры на прочностные характеристики бетона. Приведены данные по устойчивости суспензии воды затворения с наномодификатором. Определено улучшение интенсивности набора прочности бетона в ранние сроки твердения от вводимой комплексной наномодифицирующей добавки.

Ключевые слова: Бетон, углеродные нанотрубки, ультразвуковое диспергирование, стальная фибра, устойчивость суспензии, суперпластификатор.

Введение

Современное строительное материаловедение направлено на получение новых или улучшение имеющихся технологий материалов, связанных с повышением основных эксплуатационных свойств, что позволит значительно повысить качество и долговечность конструкций. Это позволит снизить стоимость на их затраты, за счет уменьшения количества строительно-монтажных работ и уменьшения материалоемкости строительных конструкций [1-3]. Одним из перспективных направлений для решения проблем в данной области является применение наномодифицирующих добавок для бетонов, в том числе фибробетонов с добавлением углеродных наноразмерных трубок [4-6]. В последние годы в строительном комплексе имеется направленность к уменьшению толщины строительных конструкций. Это связано с большой номенклатурой изделий, созданием бетонов повышенной прочности и усложнением инженерных задач при строительстве зданий и сооружений.

Основная часть

Бетоны обладают низкой прочностью на растяжение при изгибе в сравнении с прочностью при сжатии. При восприятии таких нагрузок бетоны склонны к трещинообразованию. Для армирования бетонов могут применяться различные виды фибр, а также углеродные нанотрубки, в качестве наноармирующих центров кристаллизации [7,8]. Благодаря введению наномодификаторов снижается распространение трещин на наноуровне. Множество исследований указывают о повышении прочности наномодифицированных бетонов на 15-20% [9-11].

Таким образом, одними из актуальных исследований являются вопросы определения оптимального технологического процесса, способного обеспечить максимальные прочностные характеристики сталефибробетона.

Экспериментальная часть

В рамках исследования применялись следующие материалы: портландцемент марки «Евроцемент» М500, песок с модулем крупности 1,8–2,0, щебень фракции 5-10 мм и 5-20 мм, углеродные нанотрубки «Таунит-М» с внутренним диаметром 8 и внешним 15 нм, длина нанотрубок не более 2 мкм, стальная фибра «Миксарм» с диаметром до 1 мм и длиной до 54 мм, основное преимущество такой фибры является высокий коэффициент удерживания в бетоне (95%), который достигается за счет конусообразных анкеров, суперпластификатор СП-3 в виде порошка.

Применение наномодифицирующей добавки

Для оценки влияния наномодификаторов на прочность бетона использовались цемент, кварцевый песок, суперпластификатор СП-3 и УНТ Таунит-М. Были приготовлены контрольные составы и смеси с добавлением пластификатора и УНТ в различной концентрации. Введение наномодификатора производилось с помощью ультразвукового

диспергирования на приборе: УЗГ13 0,1/22 с частотой ультразвука 22 кГц. Образцы выдерживались 28 суток и испытывались на прочность.

Технология приготовления имела следующий вид:

В воду затворения вводилось расчетное количество УНТ, а также суперпластификатор. Далее рабочий орган УЗГ13 0,1/22 погружался в емкость с водой, где происходила ее активация ультразвуком в течение 5 минут. В ходе работы аппарата, за счет высокой частоты ультразвука и кавитационных сил, углеродные высокодисперсные агломераты разбиваются и равномерно распределяются по всему объему воды затворения. Параллельно сухие компоненты размешивали для дальнейшего смешивания бетонной смеси и формовки образцов-балочек. Результаты полученной серии исследований представлены в таблице 1.

Таблица 1

Прочность образцов в возрасте 28 суток.

Составы	УНТ, % по массе цемента	Предел прочности при сжатии, МПа
1	-	44
2	0,005	51,9
3	0,006	52,7
4	0,007	51,8
5	0,008	52,1
6	0,009	52,8
7	0,01	53,2

Согласно полученным данным можно сделать вывод, что введение УНТ в состав бетона позволяет повысить прочность на 20%. Исходя из того, что прочность образцов с содержанием 0,005-0,01% УНТ по массе цемента практически равнозначны, оптимальное содержание добавки составляет 0,005%.

Устойчивость суспензии

Для оценки устойчивости введения УНТ в воду затворения производилось исследование с помощью фотоколориметрии на приборе ФК-3.

В основу метода положено свойство окрашенных растворов поглощать проходящий через него свет определенной длины волны. Снижение интенсивности света при прохождении его через раствор тем больше, чем интенсивнее окрашен раствор. При оседании твердых частиц УНТ происходит уменьшение окрашенности воды затворения. В ходе исследования оценивалась интенсивность проходящего света через раствор. Показания снимались при отстаивании полученных образцов от момента приготовления до 120 минут. Результаты полученных данных приведены в таблице 2.

Таблица 2

Устойчивость суспензии воды затворения с УНТ.

Образец	0 мин	20 мин	40 мин	60 мин	80 мин	100 мин	120 мин
Интенсивность проходящего света Т, % Вода+УНТ	53,5	60	59	59	57	77,5	79
Интенсивность проходящего света Т, % Вода+УНТ+СП-3	10	10,2	10,5	11	11,3	12	15

Из полученных результатов видно, что оптимальное время применения активированной воды затворения после введения УНТ с помощью ультразвукового диспергирования с частотой 20 кГц составляет 80 минут, с применением пластификатора время увеличивается до 100 минут. Последующее отстаивание приводит к увеличению интенсивности прохождения света более чем на 50% в обоих случаях (таблица 2).

Сталефибробетон модифицированный нанодобавками

Заключительным этапом данной работы был подбор состава фибробетона модифицированного наноразмерными добавками. Для лабораторных исследований были подобраны составы с содержанием Ц:П:Щ = 1:2:3,85, водоцементным отношением В/Ц = 0,5. Введение углеродных нанотрубок, согласно полученным ранее данным производилось в количестве 0,005 % по массе цемента. Стальная фибра вводилась в пределах до 2% по массе вяжущего. Концентрация суперпластификатора СП-3 составляла 0,5% от массы цемента.

Была определена прочность при сжатии в возрасте 3,7,14 и 28 суток. По окончании сроков твердения образцы испытывались на прессах для определения прочности при изгибе.

Таблица 3

Характеристики фибробетона с применением УНТ в количестве 0,005 % по массе цемента

№	Фибра «Миксарм», % по м. ц.	Унт, % по м. ц.	Предел прочности при изгибе (28сут), МПа	Предел прочности при сжатии, МПа			
				3 сут.	7 сут.	14 сут.	28 сут.
1	-	-	6,3	26,9	42,7	46,5	48,5
2	-	0,005	7,7	26,6	50,0	52,5	54,3
3	0,25	0,005	8,6	28,8	51,	52,1	55,9
4	0,5	0,005	9,7	29,7	51,5	56,5	58,2
5	0,75	0,005	10,3	31,2	53,0	56,9	58,7
6	1,0	0,005	10,9	32,0	54,6	59,8	60,8
7	1,5	0,005	12,7	31,5	58,6	61,8	63,0
8	2,0	0,005	13,1	32,5	59,2	62,5	63,8

Анализ лабораторных данных свидетельствует, о положительном влиянии армирования стальной фибры на наномодифицированный бетон. Наблюдается повышение прочности как при сжатии, так и при изгибе. Состав 8 имел максимальные прочностные характеристики. Увеличение количества

фибры свыше 2% по массе вяжущего экономически нецелесообразно. Таким образом установлено что оптимальное количество фибры находится в пределах от 1 до 2% по массе цемента.

Увеличение прочности составило более 30%. Повышение прочности до 30% в сравнении с образцами без применения стальной фибры можно объяснить комплексным воздействием добавки УНТ и стальной фибры. Так нанотрубки обеспечивают армирующий эффект на макроуровне, в то время как стальная фибра армирует бетон на микроуровне.

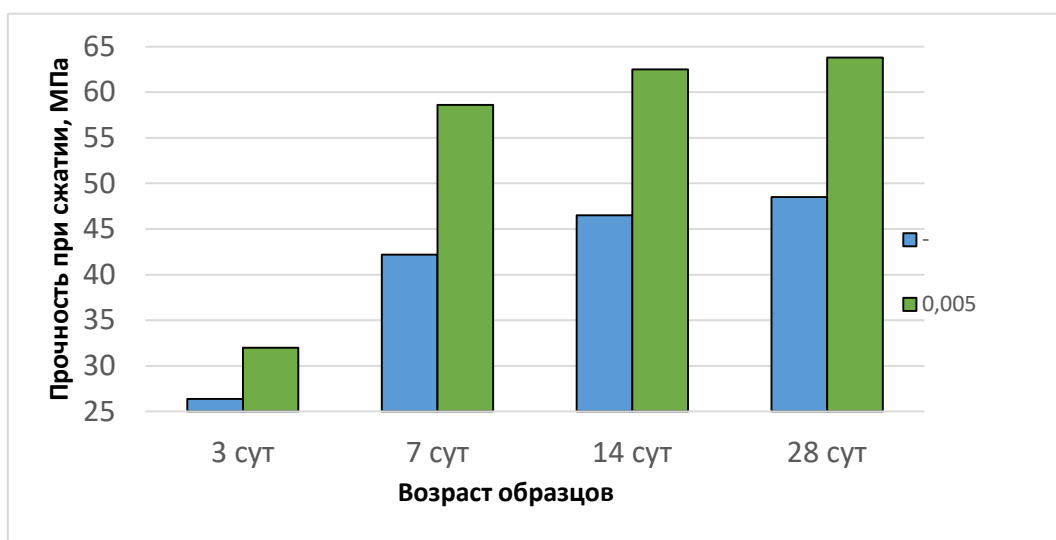


Рис. 1. – График интенсивности набора прочности бетона

На рисунке 1 показан график скорости набора прочности при сжатии исследуемых составов. Видно, что контрольные составы без применения УНТ имели меньшую интенсивность набора прочности в малые сроки твердения (от 3 до 7 суток). Улучшение прочностных характеристик происходит за счет образования более плотной структуры фибробетона.

Выводы

Исследования показали, что комплексная добавка СП-3 в сочетании с углеродными нанотрубками «Таунит-М» обеспечивают значительное увеличение прочности бетона по сравнению с контрольными образцами. При

этом каждая из этих добавок, примененная отдельно, также демонстрирует положительные результаты, но их совместное использование дает наибольший эффект.

Была подобрана технология введения нанодобавки в бетонную смесь с помощью ультразвукового диспергирования. Также была изучена устойчивость суспензии активированной воды затворения. Так оптимальное время использования полученной с помощью диспергирования воды затворения совместно с УНТ и пластификатором составляет 100 минут.

Оптимальное объемное содержание стальной фибры «Миксарм» составляет от 1% до 2.0%. При этом наилучшие результаты по прочности достигаются при 2,0%, а увеличение данного показателя отрицательно влияет на экономическую целесообразность применения данной добавки. При этом стальная фибра обеспечивают увеличение прочности как на изгибе, так и в меньшей степени при сжатии.

Литература

1. Щербань Е.М., Стельмах С.А., Нажуев М.П., Насевич А.С., Гераськина В.Е., Пошев А.У. Влияние различных видов фибры на физико-механические свойства центрифугированного бетона // Вестник Евразийской науки. 2018. №6. 10 с.
2. Седых С.А. Фибробетон перспективы современного строительства // Colloquium-journal. 2023. № 14(173). С. 16-21.
3. Ляшенко Д.А., Соколов П.Э., Перфилов В.А. Вспученный фиброгипсовый материал // Инженерный вестник Дона. 2021. № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2021/6924.
4. Баженов В.К., Червонцева М.А. Применение модифицированной базальтовой микрофибры в бетоне // Вестник Московского информационно-технологического университета – Московского архитектурно-строительного института. 2018. №3. С. 21-26.

5. Dehong Wang, Yanzhong Ju, Hao Shen, Libin Xu. Mechanical properties of high performance concrete reinforced with basalt fiber and polypropylene fiber // Construction and Building Materials. 2019. Vol. 197. Pp. 464–473.

6. Ляшенко Д.А., Перфилов В.А., Весова Л.М. Мелкозернистый наномодифицированный бетон // Инженерный вестник Дона. 2022. № 10. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2022/7928.

7. Ляшенко Д.А., Перфилов В.А. Наномодифицированная цементная композиция // Вестник МГСУ. 2024. № 19(7). С. 1116-1124. Doi: 10.22227/1997-0935.2024.7.1116-1124.

8. Zhdanok, S. A., Leonovich S. N., Polonina E. N. Synergetic Effect of SiO₂ Nanoparticles and Carbon Nanotubes on Concrete Properties // Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus. 2022. Vol. 66(1). Pp. 109–112. Doi: 10.29235/1561-8323-2022-66-1-109-112.

9. Яковлев Г.И., Гинчицкая Ю.Н., Кизиневич О., Кизиневич В., Гордина А.Ф. Влияние дисперсий многослойных углеродных нанотрубок на физико-механические характеристики и структуру строительной керамики // Строительные материалы. 2016. № 8. С. 25–29.

10. Яковлев Г.И., Федорова Г.Д., Полянских И.С. Высокопрочный бетон с дисперсными добавками // Промышленное и гражданское строительство. 2017. № 2. С. 35–42.

11. 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.

References

1. Shherban` E.M., Stel`max S.A., Nazhnev M.P., Nasevich A.S., Geras`kina V.E., Poshev A.U. Vestnik Evrazijskoj nauki. 2018. №6. P 10.
2. Sedy`x S.A. Colloquium-journal. 2023. № 14(173). pp. 16-21.

3. Lyashenko D.A., Sokolov P.E., Perfilov V.A. Inzhenernyj vestnik Dona. 2021. № 4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2021/6924.
4. Bazhenov V.K., & Chervonceva M.A. Vestnik Moskovskogo informacionno-texnologicheskogo universiteta Moskovskogo arxitekturno-stroitel'nogo instituta. 2018. №3. pp. 21-26.
5. Dehong Wang, Yanzhong Ju, Hao Shen, Libin Xu. Mechanical properties of high performance concrete reinforced with basalt fiber and polypropylene fiber. Construction and Building Materials. 2019. Vol. 197. Pp. 464–473.
6. Lyashenko D.A., Perfilov V.A., Vesova L.M. Inzhenernyj vestnik Dona. 2022. № 10. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n10y2022/7928.
7. Lyashenko D.A., Perfilov V.A. Vestnik MGSU. 2024. № 19(7). pp. 1116-1124. Doi:10.22227/1997-0935.2024.7.1116-1124
8. Zhdanok, S. A., Leonovich S. N., Polonina E. N. Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus. 2022. Vol. 66(1). pp. 109–112. Doi: 10.29235/1561-8323-2022-66-1-109-112.
9. Yakovlev G.I., Ginchiczkaya Yu.N., Kizinevich O., Kizinevich V., Gordina A.F. Stroitel'ny'e materialy. 2016. № 8. pp. 25–29.
10. Yakovlev G.I., Fedorova G.D., Polyanskix I.S. Promyshlennoe i grazhdanskoe stroitel'stvo. 2017. № 2. pp. 35–42.
11. Pimenov A.I., Ibragimov R.A., Izotov V.S. Izvestiya vysshix uchebnykh zavedenij. Stroitel'stvo. 2014. № 6 (666). pp. 26–30.

Дата поступления: 14.07.2025

Дата публикации: 25.08.2025