

УДК 691.32:620.191.33

**В. А. Перфилов, Д. А. Ляшенко**

*Волгоградский государственный технический университет*

## **ВЛИЯНИЕ СОВМЕСТНОГО ПРИМЕНЕНИЯ НАНОМОДИФИКАТОРОВ И СТАЛЬНОГО ФИБРОВОЛОКНА НА СВОЙСТВА БЕТОНА**

Приведены литературные данные о применении различных видов фиброволокна и их влиянии на эксплуатационные свойства бетона. В рамках работы исследовано влияние комплексного применения наномодифицирующей добавки «Таунит-М», суперпластификатора СП-3 и стальной фибры «Миксарм» диаметром 1 мм и длиной до 54 мм. Установлена зависимость прочностных характеристик бетона от количества вводимой стальной фибры. Установлено улучшение интенсивности набора прочности бетоном в ранние сроки твердения в зависимости от вводимой комплексной наномодифицирующей добавки.

**Ключевые слова:** фибробетон, стальное фиброволокно, углеродные нанотрубки, диспергация, суперпластификатор.

### **Введение**

Проблемы устойчивого развития мирового строительства неразрывно связаны с рациональным использованием современных строительных материалов и повышением их физико-механических характеристик. В последние годы в строительном комплексе имеется тенденция к уменьшению толщины строительных конструкций. Это связано с большой номенклатурой изделий, созданием бетонов повышенной прочности и усложнением инженерных задач при строительстве зданий и сооружений.

Дисперсное армирование бетона различными видами фибры, в отличие от привычного использования арматурных элементов, каркасов и сеток, имеет свои преимущества, отмечаемые многими исследователями [1, 2]. Помимо этого, фибробетон обладает технологическими преимуществами, например, значительным снижением плотности, что позволяет снизить трудозатраты на армирующие работы и уменьшить нагрузки на вертикальную опалубку [3, 4]. Несмотря на это, в отрасли практически отсутствует опыт применения фибробетонов. В первую очередь, это связано с высокой стоимостью стальной фибры.

### **Основная часть**

Фибробетон является гетерогенным материалом, характеризуемый микроструктурой цементного геля, образующегося за счет взаимодействия вяжущего материала и наполнителей.

Применение различных типов волокон определяется их назначением. Использование армирующих волокон различных полимерных материалов для упрочнения при изгибе железобетонных изделий малого сечения подробно исследовались многими авторами [5—7]. В большинстве работ авторы указывают, что бетон, армированный фиброволокнами, обладает высоким показателем прочности при изгибе по сравнению с традиционными бетонами.

#### *Базальтофибробетоны*

Базальтовое фиброволокно повышает прочность и трещиностойкость бетона, улучшая его структуру и предотвращая развитие трещин. Материал

экологичен, т. к. производится из натуральных материалов без химических добавок. При рациональном подборе количества фиброволокна получается однородная и пластичная смесь [8]. Исследования показывают, что базальтовое волокно улучшает адгезию к цементной матрице и снижает усадку, тем самым повышается долговечность бетона. Для улучшения свойств рекомендуется использовать добавки микрокремнезема [9].

#### *Сталефибробетоны*

Стальная фибра повышает несущую способность конструкций, особенно в плитах перекрытий и стенах, испытывающих изгибающие нагрузки [10]. Сталефибробетон экономичен, т. к. уменьшает потребность в арматуре и трудозатраты на ее изготовление. Оптимальное содержание фибры в бетоне составляет 1...2 %, а расстояние между волокнами для достижения максимальной прочности должно быть 6...10 мм. Избыточное содержание фибры может привести к слипанию волокон и снижению прочности материала [11].

#### *Фибробетоны с применением полипропиленовой фибры*

Полипропиленовое волокно используется для улучшения механических свойств бетона, повышения его прочности и долговечности. Этот материал экологически безопасен и устойчив к химическим воздействиям. Полипропиленовые фибробетоны применяются в различных строительных конструкциях, включая дорожные покрытия и элементы зданий [1, 12, 13].

#### *Наномодифицированные бетоны*

Еще одним актуальным направлением является применение наноразмерных добавок для модифицирования структуры бетона на наноуровне. Имеются разработки, показывающие, что при использовании такого материала, как углерод, повышается сопротивляемость бетона к образованию трещин. При однородности структуры образование трещин предотвращается за счет высокой прочности материала. Помимо этого, применение углеродных нанотрубок (УНТ) различных модификаций в количестве от 0,001...0,0001 % по массе вяжущего вещества позволяет повысить прочностные характеристики бетона до 40 % [14]. Рост прочности происходит за счет того, что УНТ провоцируют вокруг себя новообразование и рост кристаллов цементного камня, которые переплетаются между собой, повышая прочность материала. Такой процесс называется дисперсным самоармированием [15].

Основной проблемой данной технологии является способ введения таких добавок. Для этого требуется получение водной суспензии с нанотрубками. Разрабатываются методы равномерного распределения малого количества наноразмерной добавки в воду затворения и дальнейшего смешивания всех компонентов. В случае недостаточного диспергирующего воздействия такие добавки склонны к образованию агрегатов и выпадению в осадок. В целях увеличения диспергирующего воздействия совместно с УНТ применяют пластифицирующие добавки, способствующие увеличению дисперсионной способности материалов.

#### **Экспериментальные исследования**

Проведены лабораторные исследования, направленные на изучение влияния стального фиброволокна совместно с наномодифицирующими добавками на прочностные характеристики бетона.

Введение наноразмерных добавок в данной работе производилось с помощью технологии ультразвуковой диспергации. Согласно литературным

данным, эта технология является оптимальной для введения наномодификаторов.

В рамках исследования применялись следующие материалы: портландцемент марки «Евроцемент» М500; песок с модулем крупности 1,8...2,0; щебень фракций 5...10 мм и 5...20 мм; УНТ «Таунит-М» с внутренним диаметром 8 и внешним 15 нм, длиной 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 анкером; суперпластификатор СП-3 в виде порошка.

Для лабораторных исследований подобраны составы с содержанием Ц : П : Щ = 1 : 2 : 3,85, водоцементным отношением В/Ц = 0,5. Введение УНТ проводилось в количествах от 0,001...0,01 % по массе цемента. Стальная фибра вводилась в количестве до 2 % по массе вяжущего. Концентрация суперпластификатора СП-3 составляла 0,5 % от массы цемента.

УНТ являются нерастворимой добавкой, в связи с этим их введение происходило совместно с суперпластификатором в воде затворения с применением ультразвукового диспергирования с частотой ультразвука 20 кГц в течение 5...7 мин до оптимального диспергирования суспензии. В качестве диспергатора использовался ультразвуковой генератор УЗГ13-0,1/22 (рис. 1).



Рис. 1. Диспергатор УЗГ13-01/22

Сухие компоненты смешивались совместно с фиброволокном, затем вводилась активированная вода затворения. После происходило формование образцов балочек размером 10 × 10 × 400 см. Полученные образцы твердели в естественных условиях при влажности 80...100 %. Для исследования характера набора прочности бетона применялся прибор неразрушающего контроля «Пульсар-1.2» (рис. 2).

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



Рис. 2. «Пульсар-1.2»

Для исследования влияния фиброволокна и УНТ на прочностные характеристики бетона приготовлены образцы с различным содержанием добавок. Ранее определено оптимальное количество применяемой наномодифицирующей добавки [16]. Приготовлены составы с различным содержанием стальной фибры (0,25...2 % по массе цемента) и оптимальным количеством наномодификатора. Характеристики фибробетона с применением УНТ в количестве 0,005 и 0,01 % по массе цемента приведены в табл. 1 и 2 соответственно.

Таблица 1

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

№ обр.	Фибра «Миксарм», % м. ц.	УНТ, % м. ц.	Предел прочности при изгибе (28 сут), МПа	Предел прочности при сжатии, МПа			
				3 сут	7 сут	14 сут	28 сут
1	—	—	6,2	26,4	42,2	46,5	48,5
2	—	0,005	7,6	26,1	49,5	52,5	54,3
3	0,25	0,005	8,5	28,3	49,9	52,1	55,9
4	0,5	0,005	9,6	29,2	51,5	56,5	58,2
5	0,75	0,005	10,2	30,7	52,5	56,9	58,7
6	1,0	0,005	10,9	31,5	54,1	59,8	60,8
7	1,5	0,005	12,6	31,0	58,1	61,8	63,0
8	2,0	0,005	13,0	32,0	58,6	62,5	63,8

Анализ лабораторных данных свидетельствует о положительном влиянии армирования стальной фиброй на наномодифицированный бетон. Наблюдалось повышение прочности как при сжатии, так и при изгибе. Составы 8 с содержанием 0,005 и 0,01 % имели максимальные прочностные характеристики. Увеличение количества фибры свыше 2 % по массе вяжущего экономически нецелесообразно. Следует отметить, что повышение прочности наблюдается при введении наномодификатора, так в составах 2 для обеих концентраций УНТ наблюдается повышение прочности при изгибе и сжатии на 15 %.

Таблица 2

*Характеристики фибробетона с применением УНТ  
 в количестве 0,01 % по массе цемента*

№ обр.	Фибра «Миксарм», % по м. ц.	УНТ, % по м. ц.	Предел прочности при изгибе (28 сут), МПа	Предел прочности при сжатии, МПа			
				3 сут.	7 сут.	14 сут.	28 сут.
1	—	—	5,7	25,2	41,0	46,5	47,8
2	—	0,01	7,9	26,9	50,2	55,5	56,8
3	0,25	0,01	8,1	29,4	51,5	55,1	57,6
4	0,5	0,01	10,3	29,7	52,4	56,5	58,2
5	0,75	0,01	10,8	30,1	53,7	57,9	59,9
6	1,0	0,01	11,7	32,1	55,2	60,8	62,5
7	1,5	0,01	11,1	31,8	56,0	60,8	61,1
8	2,0	0,01	13,6	32,9	58,9	63,5	64,3

На рисунке 3 представлен график, отображающий влияние стальной фибры на прочность бетона при изгибе. Наблюдается увеличение прочности при увеличении содержания фибры. Максимальную прочность имели составы 8, с содержанием 2 % стальной фибры от массы цемента. Увеличение прочности составило более 50 %.

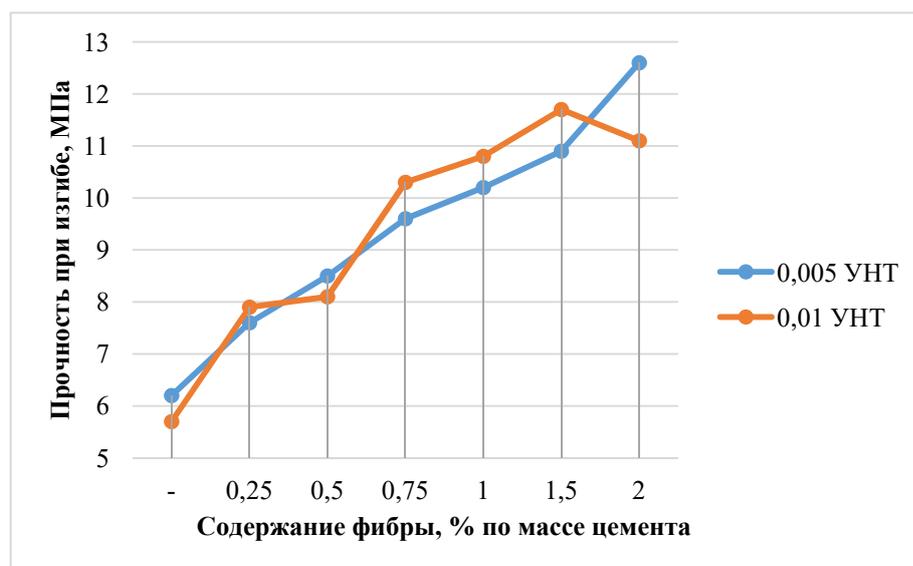


Рис. 3. Влияние содержания фибры на предел прочности при изгибе

На рисунке 4 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 сут). Улучшение прочностных характеристик происходит за счет образования более плотной структуры фибробетона. В ходе экспериментальных исследований установлено, что использование наноразмерных УНТ в составе фибробетонной смеси способствует улучшению реологических свойств смеси и характеристик фибробетона.

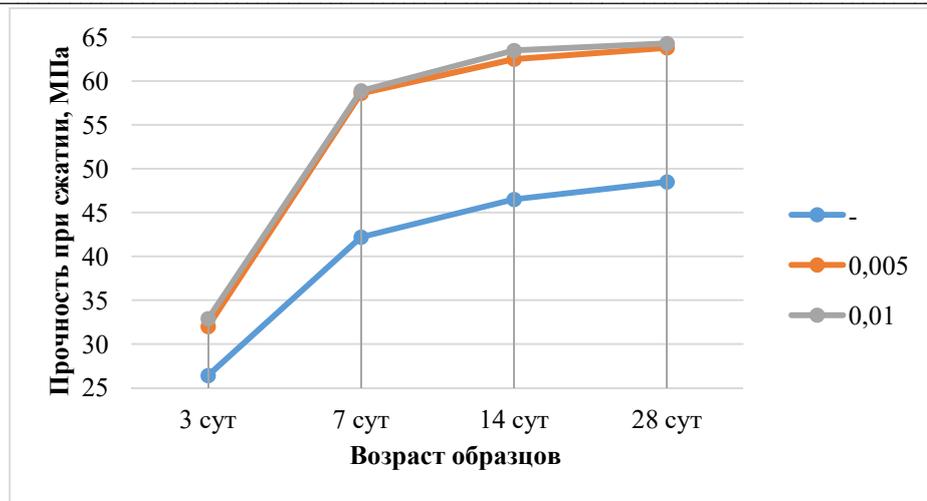


Рис. 4. График интенсивности набора прочности бетона

### Выводы

В процессе исследования рассмотрено воздействие стальной фибры и наномодификаторов на характеристики сталефибробетонов, а также подобран оптимальный состав с совместным применением стальной фибры, УНТ и суперпластификатора.

Исследования показали, что комплексная добавка СП-3 в сочетании с УНТ «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.

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

Введение в фибробетонную смесь комплексной добавки, содержащей стальную фибру «Миксарм» и наномодифицирующую добавку, значительно повышает прочность бетона, в т. ч. в ранние сроки твердения. Это достигается благодаря оптимизации структурообразования и улучшению физико-механических свойств материала, а также за счет улучшения структуры материала на наноуровне.

### Благодарности

Авторы выражают благодарность кафедре строительных материалов и специальных технологий ВолгГТУ ИАиС за предоставление лабораторного оборудования УЗГ13-0,1/22 для проведения исследований.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Влияние различных видов фибры на физико-механические свойства центрифугированного бетона / Е. М. Щербань, С. А. Стельмах, М. П. Нажуев, А. С. Насевич, В. Е. Гераськина, А. У. Пошев // Вестник Евразийской науки. 2018. № 6. 10 с.

2. *Seydibeyoglu M. O., Mohanty A. K., Misra M.* Fiber technology for fiber-reinforced composites. A volume in Woodhead Publishing Series in Composites Science and Engineering // Woodhead Publishing. Cambridge, 2017. 336 p. DOI: 10.1016/C2015-0-05497-1.
3. *Sadovskaya E. A., Leonovich S. N.* Optimization of Composition of Nanofiber Concrete in Terms of Fracture Toughness by Matrix Modification // *Nauka i Tehnika = Science and Technique*. 2021. Vol. 21. Iss. 6. Pp. 499—503. DOI: 10.21122/2227-1031-2022-21-6-499-503.
4. *Sedykh S. A.* Fiber-reinforced concrete - prospects for modern construction // *Colloquium journal*. 2023. No. 14(173). С. 9—13.
5. *Kazhimkanuly D., Chernavin V.* Experimental study on physical-mechanical characteristics of steel fiber reinforced concrete with worn rope fibers // *Technobius*. 2023. Vol. 3. Iss. 1. 5 p. DOI: 10.54355/tbus/3.1.2023.0035.
6. *Hajmohammadian Baghba M., Hashemi S. A. H., Kalbasi Anaraki K., Hashemi E. S.* Influence of polypropylene-fiber on the mechanical properties of self-compacting-concrete with recycled aggregates // *Magazine of Civil Engineering*. 2020. Vol. 99. Iss. 7. Art. 9905. 14 p.
7. *Баженов В. К., Черволицева М. А.* Применение модифицированной базальтовой микрофибры в бетоне // *Вестник Московского информационно-технологического университета — Московского архитектурно-строительного института*. 2018. № 3. С. 21—26.
8. *Abed F., Alhafiz A. R.* Effect of basalt fibers on the flexural behavior of concrete beams reinforced with BFRP bars // *Composite Structures*. 2019. Vol. 215. Pp. 23—34. DOI: 10.1016/j.compstruct.2019.02.050.
9. *Singh S. K., Kirthika S., Maruthupandian S.* Durability Studies on Basalt Fibre Reinforced Concrete // *Indian Concrete Journal*. 2018. Vol. 92. Iss. 4. Pp. 45—55.
10. *Do Thi My Dung, Lam Thanh Quang Khai.* Design parameters of steel fiber concrete beams // *Magazine of Civil Engineering* 2021. Vol. 2. Iss. 102. Art. 10207. 14 p.
11. *Khan L. U., Gul A., Khan K., Akbar S. I.* Mechanical Properties of Steel-Fiber-Reinforced Concrete // *ICEC 2022 MDPI*. 2022. 6 p. DOI: 10.3390/engproc2022022006.
12. *Dehong W., Yanzhong J., Hao Sh., Libin X.* Mechanical properties of high performance concrete reinforced with basalt fiber and polypropylene fiber // *Construction and Building Materials*. 2019. Vol. 197. Pp. 464—473.
13. *Ushakov V. V.* Report on the research work “Study of frost resistance of road fiber cements” // *Progress center llc. Moscow*, 2016. P. 10.
14. *Zhdanok S. A., Leonovich S. N., Polonina E. N.* Synergetic Effect of SiO<sub>2</sub> Nanoparticles and Carbon Nanotubes on Concrete Properties // *Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*. 2022. Vol. 66. Iss. 1. Pp. 109—112. DOI: 10.29235/1561-8323-2022-66-1-109-112.
15. *Physicomechanical Characteristics of Concrete Modified by a Nanostructured Carbon-Based Plasticizing Admixture / S. A. Zhdanok, E. N. Polonina, S. N. Leonovich, B. M. Khroustalev, E. A. Koleda // Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. 2019. Vol. 92. Iss. 1. Pp. 12—18. DOI: 10.1007/s10891-019-01902/.
16. *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/.

© Перфилов В. А., Ляшенко Д. А., 2025

Поступила в редакцию  
19.03.2025

Ссылка для цитирования:

*Перфилов В. А., Ляшенко Д. А.* Влияние совместного применения наномодификаторов и стального фиброволокна на свойства бетона // *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: Строительство и архитектура*. 2025. Вып. 2(99). С. 51—58. DOI: 10.35211/18154360\_2025\_2\_51.

Об авторах:

**Перфилов Владимир Александрович** — д-р техн. наук, проф., зав. каф. морских нефтегазовых сооружений, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). 400074, Российская Федерация, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; vladimirperfilov@mail.ru

**Ляшенко Дмитрий Александрович** — аспирант каф. морских нефтегазовых сооружений, Волгоградский государственный технический университет (ВолгГТУ). 400074, Российская Федерация, г. Волгоград, ул. Академическая, 1; dmitiry.lyashenko@yandex.ru

**Vladimir A. Perfilov, Dmitry A. Lyashenko**

**Volgograd State Technical University**

**THE EFFECT OF THE COMBINED USE OF NANOMODIFIERS  
AND STEEL FIBER ON THE PROPERTIES OF CONCRETE**

The article provides literature data on the use of various types of fiber and their effect on the performance properties of concrete. The work investigated the effect of the combined use of the nanomodifying additive TAUNIT-M, superplasticizer SP-3 and steel fiber MIXARM with a diameter of 1 mm and a length of up to 54 mm. The dependence of the strength characteristics of concrete on the amount of injected steel fiber has been established. An improvement in the intensity of concrete strength gain in the early stages of hardening has been established, depending on the complex nanomodifying additive being introduced.

**Key words:** fiber-reinforced concrete, steel fiber, carbon nanotubes, dispersion, superplasticizer.

*For citation:*

Perfilov V. A., Lyashenko D. A. [The effect of the combined use of nanomodifiers and steel fiber on the properties of concrete]. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo arhitekturno-stroitel'nogo universiteta. Seriya: Stroitel'stvo i arhitektura* [Bulletin of Volgograd State University of Architecture and Civil Engineering. Series: Civil Engineering and Architecture], 2025, iss. 2, pp. 51—58. DOI: 10.35211/18154360\_2025\_2\_51.

*About authors:*

**Vladimir A. Perfilov** — Doctor of Engineering Sciences, Professor, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; vladimirperfilov@mail.ru

**Dmitry A. Lyashenko** — Postgraduate student, Volgograd State Technical University (VSTU). 1, Akademicheskaya st., Volgograd, 400074, Russian Federation; dmitry.lyashenko@yandex.ru