

Ляшенко Дмитрий Александрович
аспирант кафедры «Нефтегазовые сооружения»
Волгоградский государственный технический университет
Россия, г. Волгоград

ДИСПЕРСНОЕ АРМИРОВАНИЕ БЕТОНА НА МИКРО- И МАКРОУРОВНЕ

Аннотация: Проведен анализ литературных данных, направленных на применение фибробетонов в различных областях строительства. Особое внимание уделяется разработке композиций фибробетона, модифицированных наноразмерными добавками. В частности, изучается влияние количества углеродных нанотрубок на прочностные стали- и фибробетона. В статье представлены результаты подбора состава бетона с комплексным применением стальной фибры Mixarm диаметром 1 мм и длиной до 54 мм, базальтовой фибры ООО «НПО Вулкан» диаметром 0,2 мм и длиной до 12 мм, а также углеродных нанотрубок «Таунит-М». Согласно полученным данным, совместное использование этих добавок суперпластификатором «Полипласт СП-3» позволяет увеличить прочность при сжатии на 35% и изгибе в 2,5 раза.

Ключевые слова: фибробетон, стальная фибра, базальтовая фибра, углеродные нанотрубки, суперпластификатор

Abstract: This article analyzes literature data on the use of fiber-reinforced concrete in various construction applications. Particular attention is paid to the development of fiber-reinforced concrete compositions modified with nanoscale additives. Specifically, the effect of carbon nanotube content on the strength of steel and fiber-reinforced concrete is studied. The article presents the results of selecting a concrete composition using a combination of Mixarm steel fibers with a diameter of 1 mm and a length of up to 54 mm, basalt fibers from NPO Vulkan LLC with a diameter of 0.2 mm and a length of up to 12 mm, and Taunit-M carbon nanotubes. According to the data obtained, the combined use of these additives

with the Polyplast SP-3 superplasticizer increases compressive strength by 35% and flexural strength by 2.5 times.

Keywords: fiber-reinforced concrete, steel fibers, basalt fibers, carbon nanotubes, superplasticizer

Повторить все на английском языке!

Если ваша статья написана на другом языке, например, немецком или украинском, информация о статье на английском также должна быть.

Введение. В современном строительном материаловедении наблюдается устойчивая тенденция к разработке инновационных технологических решений и совершенствованию существующих методов производства строительных изделий и материалов. Особое внимание в этой области уделяется оптимизации эксплуатационных характеристик материалов. Это позволяет существенно повысить качество и долговечности строительных конструкций, а также снизить стоимость строительства благодаря минимизации объёма строительно-монтажных работ. Одним из направлений бетонов с повышенными эксплуатационными свойствами является фибробетон, который демонстрирует ряд технологических преимуществ, среди которых особо следует выделить. Тем не менее масштабное промышленное внедрение фибробетона пока ограничено, причём основной сдерживающий фактор — высокая стоимость фибры [1].

Для решения этой проблемы перспективным направлением является использование различных модификаций нанодобавок для получения высокофункционального и высокопрочного фибробетона. Это позволит расширить область применения фибробетона в строительстве и сделать его более доступным [2].

Теоретическая часть

В современном строительном материаловедении одним из ключевых направлений повышения прочностных характеристик бетона при изгибе и растяжении является применение методов дисперсного армирования. Особую перспективу демонстрирует использование наномодифицирующих добавок, в частности — углеродных нанотрубок (УНТ). УНТ обладают комплексом уникальных физико-механических свойств, включая высокую прочность и химическую стойкость. Их введение в бетонную матрицу способствует улучшению общих механических характеристик материала и уменьшению количества наноразмерных д [3, 4]. Это снижает количество наноразмерных трещин, которые впоследствии могут образовывать крупные трещины. Оптимальное количество УНТ в бетонной смеси составляет от 0,001 до 0,01 % от массы вяжущего [5].

Сталефибробетон, представляющий собой разновидность дисперсно-армированного бетона с равномерно распределёнными в цементной матрице стальными волокнами, обеспечивает повышение прочности при изгибе и растяжении, одновременно снижая потребность в традиционном стержневом армировании. Этот материал находит применение при усилении несущих конструкций — плит перекрытий и стеновых элементов, подверженных значительным изгибающим нагрузкам. Однако его использование сопряжено с определёнными технологическими ограничениями. В частности, в процессе перемешивания наблюдается склонность волокон к агрегации, приводящая к формированию дефектов типа «ежей», а также снижение прочностных показателей при нарушении оптимального расстояния между волокнами. Исследования показывают, что при межволоконном расстоянии 6–10 мм достигается повышение прочности в 2,5 раза. В то же время превышение концентрации волокон свыше 3 % от объёма смеси ведёт к ухудшению прочностных характеристик вследствие недостаточного сцепления волокон с матрицей и нарушения плотности укладки [6].

Базальтофибробетон демонстрирует значительный потенциал в улучшении прочностных параметров бетона благодаря армированию микроструктуры на макроуровне, предотвращению инициации трещин и повышению трещиностойкости материала. Важнейшим преимуществом данного материала является его экологическая безопасность: сырьём для производства базальтового волокна служат природные минералы, что обеспечивает соответствие современным требованиям экологической чистоты и безопасности для здоровья человека и окружающей среды [7]. При оптимальной дозировке фибры на стадии смешивания формируется гомогенная смесь с высокой пластичностью. Микроструктурные исследования выявили образование новых фаз в зоне контакта цементного камня и базальтовых волокон [7], а в процессе твердения базальтовое волокно активно заполняет микротрещины, препятствуя их дальнейшему развитию.

Таким образом, базальтовая фибра оказывает комплексное влияние на структуру бетона — как на макроуровне за счёт дисперсного армирования, так и на микроструктурном уровне. Для целенаправленного регулирования эксплуатационных свойств композита целесообразно сочетать дисперсное армирование с применением химических модификаторов, позволяющих тонко настраивать характеристики материала в соответствии с требованиями конкретных строительных задач.

Экспериментальная часть

В рамках настоящего исследования осуществлён комплекс лабораторных экспериментов, нацеленных на изучение синергетического эффекта от совместного применения фиброволокон и

наномодифицирующих добавок в составе бетонной смеси. Особое внимание уделено анализу влияния данных компонентов на прочностные показатели материала.

Для равномерного распределения наномодификаторов в бетонной матрице применялась технология ультразвуковой диспергации. Согласно данным научно-технической литературы, данный метод признан наиболее эффективным способом введения наноразмерных добавок в бетонные композиции, обеспечивающим их гомогенное распределение без агрегации частиц.

В работе использовались следующие материалы: портландцемент марки «Евроцемент» М500, песок с модулем крупности 1,8–2,0, щебень фракций 5–10 мм и 5–20 мм, углеродные нанотрубки «Таунит-М» с диаметром 8 нм и внешним диаметром 15 нм, длиной не более 2 мкм, стальная фибра «Миксарм» диаметром до 1 мм и длиной до 54 мм, базальтовая фибра ООО «НПО Вулкан», а также суперпластификатор СП-3. Были разработаны составы с соотношением цемента, песка и щебня Ц:П:Щ = 1:2:3,85 и водоцементным отношением В/Ц = 0,5. Углеродные нанотрубки вводились в количестве от 0,001% до 0,01% от массы цемента, стальная фибра — до 2% по массе вяжущего, базальтовая фибра до 2% по массе вяжущего, концентрация суперпластификатора СП-3 составляла 0,5% по массе цемента.

Результаты лабораторных исследований представлены в таблицах 1 и 2.

Таблица 1

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

№	Фибра «Миксарм», % по м. ц.	Предел прочности при изгибе	Предел прочности при сжатии, МПа			
			3 сут.	7 сут.	14 сут.	28 сут.

		(28сут), МПа				
1	-	6,2	26,3	41,9	46,6	48,1
2	0,25	8,5	27,9	50,0	51,0	55,2
3	0,5	9,6	28,6	51,2	56,4	57,8
4	0,75	10,6	30,1	51,7	56,3	58,2
5	1,0	10,7	31,3	53,8	59,3	60,2
6	1,5	12,1	30,7	57,8	61,2	62,8
7	2,0	12,8	31,9	58,2	62,3	63,8

Таблица 2

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

№	Фибра ООО «НПО Вулкан», % по м. ц.	Предел прочности при изгибе (28сут), МПа	Предел прочности при сжатии, МПа			
			3 сут.	7 сут.	14 сут.	28 сут.
1	-	5,2	21,2	32,1	38,0	40,4
2	0,25	8,3	22,1	35,2	39,2	41,4
3	0,5	8,5	25,2	37,6	39,9	43,2
4	0,75	9,0	28,14	36,1	45,8	50,2
5	1,0	11,1	30,2	37,8	47,2	51,8
6	1,5	11,7	30,2	38,2	45,7	52,8
7	2,0	11,7	30,7	37,1	45,1	49,5

Анализ лабораторных данных показывает, что прочность материала увеличивается как при сжатии, так и при изгибе. Наивысшие показатели прочности зафиксированы для составов 7. Дальнейшее увеличение доли

волокон свыше 2% от массы связующего является экономически нецелесообразным.

Следует отметить, что введение наномодификатора также способствует повышению прочности бетона в ранние сроки твердения. Наблюдается увеличение прочности на изгиб и сжатие на 20% для сталефибробетона и на 17% для базальтофибробетона уже на 7 сутки твердения. С увеличением содержания фибры прочность материала возрастает. Максимальные значения прочности достигнуты для составов 7 с 2% стальной фибры от массы цемента, что соответствует увеличению прочности более чем на 36% для сталефибробетона и 25% для базальтофибробетона. Прочность при изгибе для сталефибробетона увеличилась в 2,5 раза, в то время как для базальтофибробетона в 2,2 раза.

Таким образом, результаты лабораторных исследований подтверждают положительное влияние армирования стальными волокнами на наномодифицированный бетон, приводя к увеличению прочности как при сжатии, так и при изгибе. Оптимальное содержание волокна составляет от 1 до 2% от массы цемента, дальнейшее увеличение экономически нецелесообразно.

Использованные источники:

1. Kazhimkanuly, D., Chernavin, V. Experimental study on physical-mechanical characteristics of steel fiber reinforced concrete with worn rope fibers // Technobius. – 2023. – Vol. 3(1). – 5 p. doi: 10.54355/tbus/3.1.2023.0035

2. 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.

3. 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.

4. 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.

5. 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(6). – Pp. 499–503. doi: 10.21122/2227-1031-2022-21-6-499-503

6. Седых С.А. Фибробетон перспективы современного строительства // Colloquium-journal. – 2023. – № 14(173). – С. 16-21.

7. Фахратов М.А., Евдокимов В.О., Бородин А.С. Перспективы применения наноструктурированного бетона в строительстве // Инженерный вестник Дона. – 2018. – №3. – 124 с. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n3y2018/5127