

DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-6-62-72

^{1,*}Хузин А.Ф., ¹Богданов Р.Р., ¹Мавлюбердинов А.Р., ²Сулейманова Л.А.¹Казанский государственный архитектурно-строительный университет²Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*E-mail: airat.khuzin2010@yandex.ru

МОДИФИЦИРОВАННЫЙ ФИБРОБЕТОН ДЛЯ МОНОЛИТНЫХ БАЛОК

Аннотация. Представлены результаты разработки состава фибробетона, модифицированного многослойными углеродными нанотрубками (МУНТ), для применения в монолитных балках. Проведён сравнительный анализ шести составов бетона с различными комбинациями модифицирующих компонентов. Установлено, что комплексное модифицирование бетона стальной фиброй, суперпластификатором «СП-3» (1,5 % от массы цемента) и МУНТ (0,0005 % от массы цемента) обеспечивает повышение прочности при сжатии на 84,4 % и прочности при изгибе в 2,48 раза по сравнению с контрольным составом. Применение разработанного состава позволяет повысить класс прочности конструкций с В27,5 до В50 либо снизить расход стержневой арматуры на 19,2 %. Выявлен синергетический эффект трёхкомпонентной системы модификации, обусловленный снижением водоцементного отношения, уплотнением цементной матрицы на наноуровне и эффективным восприятием растягивающих напряжений фиброй.

Ключевые слова: фибробетон, углеродные нанотрубки, технология устройства, балка, фибра.

Введение. В настоящее время строительство зданий и сооружений, а также уникальных инженерных объектов, испытывающих колоссальные статические и динамические нагрузки, и находящихся зачастую в агрессивной окружающей среде и климатических условиях, не обходится без использования такого широко распространенного материала, как бетон и железобетон [1]. Строительство объектов требует соответствия поставленным срокам строительства, а также учета многократно возрастающих нагрузок на несущие конструкции каркаса. Изгибаемые элементы составляют значительную часть в общей массе железобетонных строительных конструкций, в частности, балочные элементы монолитных покрытий [2]. Высокая трудоемкость армирования балочных элементов обуславливает актуальность поиска решений, позволяющих снизить объем традиционной арматуры. Одним из таких решений является совершенствование состава и технологии приготовления бетона.

Поиск и внедрение новых технологий, актуальных для создания уникальных объектов, впоследствии могут быть адаптированы к массовому строительству, при этом решение проблемы получения высокоэффективных материалов невозможно без применения принципов проектирования и управления структурообразованием на микро- и наноуровне [3].

Эффективным направлением совершенствования бетонов является их дисперсное армирование фиброй. Фибробетон по сравнению с традиционным бетоном имеет повышенные физико-механические показатели: прочность на растяжение и срез, ударную и усталостную прочность, трещиностойкость и вязкость разрушения, водо-

непроницаемость, морозостойкость [4]. Дальнейшее повышение его характеристик, в частности, ускорение набора прочности, возможно за счет применения добавок наноуровня, что потенциально приведет к расширению областей применения данного материала [3].

С технологической точки зрения применение модифицированного фибробетона при устройстве монолитных балок позволяет оптимизировать ряд критически важных операций. За счет повышенной трещиностойкости и ударной вязкости материала появляется возможность сокращения объема традиционного стержневого армирования, что упрощает процесс сборки и вязки арматурных каркасов, снижая трудоемкость и уменьшая риск образования «арматурных сгущений» [4]. Высокая подвижность и удобоукладываемость модифицированной смеси, обеспеченная комплексом добавок, облегчает ее подачу, распределение и уплотнение в сложной опалубочной форме балки, особенно в узлах сопряжения с плитами и колоннами, минимизируя вероятность образования пустот и дефектов.

В организационном плане ключевым преимуществом является значительное ускорение темпов работ. Интенсификация раннего набора прочности позволяет сократить технологические перерывы, в частности, сроки выдерживания бетона в опалубке до последующего распалубливания. Это дает возможность раньше нагружать конструкции и передавать их под последующие работы, оптимизируя общий календарный график проекта. Снижение материалоемкости (расхода арматуры) и трудоемкости основных процессов (армирования, уплотнения) напрямую

влияет на организацию труда на объекте, позволяя перераспределить рабочие ресурсы и сократить общие сроки возведения каркаса здания.

Современные технологии производства цементных материалов направлены на повышение эффективности регулирования структуры и свойств цементного камня. Ключевыми подходами являются модификация состава, в том числе введение комплексных модифицирующих добавок на основе водного раствора глиоксаля и органических кислот, что позволяет направленно воздействовать на гидратацию минералов цемента и кристаллизацию гидратных новообразований. Применение таких добавок, например, композиции полимолочной кислоты и глиоксаля (PLA+GI 0,01), позволяет снизить количество воды затворения на 10 % и повысить прочность цементного камня на 63 % в 28-суточном возрасте по сравнению с контрольным составом [5]. Согласно исследованиям, обработка воды затворения постоянным электрическим током напряжением 110 В позволяет интенсифицировать процессы растворения и гидратации цемента, увеличить содержание гидросиликатов кальция и, как следствие, повысить прочность бетонов. При использовании активированной воды с показателем $pH=11,13$ прочность цементного камня в возрасте 28 сут увеличивается на 13% по сравнению с контрольными образцами, затворенными на питьевой воде [6].

Важную роль играют пластифицирующие добавки, такие как поликарбоксилатные гиперпластификаторы, которые снижают водопотребность и улучшают удобоукладываемость смеси [7–9]. Комплексное применение микрокремнезема (10–30 %) и пластификаторов позволяет сократить расход цемента на 30 % при повышении прочности на 82 % [10]. Перспективным направлением является использование углеродных нанодисперсных систем, структурирующих матрицу вяжущего. Исследования демонстрируют, что введение углеродных нанотрубок (УНТ) в цементные композиты повышает их прочность, трещиностойкость и модуль упругости за счет наноармирования и модификации микроструктуры [11, 12]. Эффективность МУНТ зависит от равномерности диспергирования, которое может быть достигнуто с помощью поверхностно-активных веществ и ультразвуковой обработки [13], а также дисперсное армирование фиброволокнами для повышения трещиностойкости [14–17].

Современные исследования рассматривают бетон как многокомпонентную систему, где сочетание химических добавок, тонкодисперсных наполнителей и технологических приемов позволяет достичь прочности 40–70 МПа, класса по

морозостойкости $F300$ и низкого водопоглощения [18].

Ключевым методом улучшения свойств фибробетонов является формирование структуры цементно-песчаной матрицы с использованием углеродных наномодификаторов, которые способствуют адгезии новообразований. Однако для эффективного усиления нанотрубки должны быть равномерно распределены (диспергированы) в объеме цементной матрицы, поскольку они склонны к агломерации и коагуляции со временем, что значительно снижает положительный эффект от их использования. Ряд исследователей для получения стабильных дисперсий проводили ультразвуковое диспергирование нанотрубок в органических растворителях. Тем не менее, последующее введение таких взвесей в воду затворения негативно влияло на процессы гидратации цемента. В связи с этим, предпочтение в качестве диспергирующих агентов для углеродных наномодификаторов отдается супер- и гиперпластификаторам [19–21].

Введение углеродных нанодобавок снижает трещинообразование и повышает прочность за счет перераспределения нагрузки на МУНТ. Перспективным направлением является их использование в дисперсно-армированных бетонах, включая сталефибробетон [22].

В других исследованиях [23] в сталефибробетон вводят многослойные углеродные нанотрубки (далее МУНТ), предварительно диспергируя цементную суспензию ультразвуком. Комплексные добавки, включающие техническую сажу и МУНТ, ускоряют твердение и снижают расход цемента [24]. Однако из-за многокомпонентности добавок сложно определить вклад именно наночастиц [25].

В ряде работ [23–26] показано, что внедрение модифицированных МУНТ в состав фибробетона позволяет создать материал с принципиально более высокой плотностью и оптимизированной микроструктурой на наноуровне. Это приводит к созданию более прочных, долговечных и трещиностойких балок, способных выдерживать более высокие нагрузки и иметь увеличенный срок службы по сравнению с балками из традиционного фибробетона.

Таким образом, целью данного исследования является разработка состава модифицированного фибробетона на основе углеродных нанотрубок и стальной фибры для применения в монолитных балках, позволяющего получать конструкции с более высокими прочностными показателями.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Подобраны и охарактеризованы сырьевые компоненты композиции, включая наномодификатор и пластифицирующую добавку;

2. Экспериментально исследовано влияние вида и дозировки пластификатора на прочностные характеристики бетона;

3. Определен оптимальный состав модифицированного фибробетона и оценены его основные физико-механические свойства;

4. Проведен сравнительный анализ эффективности предложенного решения с традиционным железобетоном.

Материалы и методы. Для проведения экспериментальных исследований был подобран комплекс материалов, обеспечивающий получение фибробетона с заданными эксплуатационными свойствами. В качестве основного вяжущего использовался портландцемент ЦЕМ II/A-III 32,5Б ГОСТ 31108-2020 производства «Топкинский цемент», типовой минералогический состав клинкера которого включает 65,1 % C_3S (алит), 12,67 % C_2S (белит), 5,75 % C_3A и 12,44 % C_4AF . Выбор цемента обусловлен его принадлежностью к группе универсальных цементов, регламентированные показатели которых (нормальная плотность цементного теста, сроки схватывания, активность) полностью удовлетворяют требованиям для возведения монолитных конструкций в стандартных условиях.

Мелким заполнителем служил кварцевый песок с модулем крупности 1,78, отвечающий требованиям ГОСТ 8736-2014. Его применение позволило достичь высокой плотности цементного камня. В качестве крупного заполнителя применялся гранитный щебень фракции 5–20 мм (ГОСТ 8267-93) с маркой по дробимости М1200, что гарантировало необходимую прочность бетона на сжатие.

Особое внимание уделялось армирующим компонентам. Для дисперсного армирования использовалась стальная волновая фибра «Арм-Микс» длиной 17 мм и диаметром 0,3 мм, обладающая пределом прочности 1100 МПа. Такие параметры фибры обеспечили эффективное перераспределение напряжений в бетонной матрице.

В качестве наномодификатора применялись МУНТ «Graphistrength» с диаметром 8–40 нм и длиной 2–50 мкм, прочность которых в 15–20 раз превышает прочность традиционной стальной арматуры. Ранее проведенные исследования [27] показывают, что наиболее высокие прочностные показатели цементного камня были достигнуты за счет введения МУНТ в количестве 0,0005% от массы цемента.

Для регулирования реологических свойств смеси в состав вводились различные пластифицирующие добавки:

- суперпластификатор «СП-3» (ГК Полипласт) – комплексная добавка для бетонов и строительных растворов с небольшим эффектом замедления схватывания на основе сополимера полиметиленафталинсульфоната и лигносульфоната натрия;

- суперпластификатор «Пласт-С», произведенной ООО «Технохимия» (г. Челябинск) по ТУ 2610-037-02069622-2010 – продукт, получаемый при многостадийном органическом синтезе, представляет собой смесь нафталинформальдегидов, лигносульфонатов и неорганических солей с высоким содержанием высокомолекулярных фракций;

- многофункциональная пластифицирующая добавка «Д-11», разработана в ООО НПП «Ирстройпрогресс» в соответствии с ТУ 574325-005-44628610-2006.

Процесс приготовления фибробетонной смеси осуществлялся в несколько этапов со строгим соблюдением технологических параметров. Первоначально проводилась подготовка МУНТ, включающая их диспергирование в водной среде (с использованием 20–30 % от общего объема воды затворения) под воздействием ультразвука с частотой 40 кГц в течение 15 мин. Эта операция обеспечивала разрушение агломератов нанотрубок и их равномерное распределение в растворе пластификатора.

Приготовление основной смеси выполнялось в лабораторной бетономешалке принудительного действия. Технологический процесс включал последовательную загрузку компонентов: сначала вводилось 50 % расчетного количества воды, затем портландцемент и песок, которые перемешивались в течение 1 мин. После достижения однородной массы добавлялся щебень и оставшаяся часть воды с последующим перемешиванием в течение 2 мин.

На заключительном этапе в готовую смесь вводился предварительно подготовленный раствор МУНТ с пластификатором, после чего осуществлялось постепенное добавление стальной фибры в три приема с интервалом 30 с. Такой подход обеспечивал равномерное распределение фибры по всему объему смеси без образования комков.

Для оценки свойств полученных материалов применялся комплекс методов испытаний, дифференцированный по этапам исследования.

На первом этапе (исследование цементно-песчаных растворов) прочностные характеристики определялись на образцах-балочках размером 40×40×160 мм в соответствии с ГОСТ 310.4-

81. Испытание на изгиб проводилось по трёхточечной схеме нагружения, после чего половинки балочек испытывались на сжатие.

На втором этапе (исследование тяжёлого бетона) прочность при сжатии определялась на образцах-кубах размером $100 \times 100 \times 100$ мм по ГОСТ 10180-2012. Прочность на растяжение при изгибе определялась на образцах-балках размером $100 \times 100 \times 400$ мм по ГОСТ 10180-2012 при нагружении сосредоточенными силами в третях пролёта (расстояние между опорами – 300 мм, расстояние между силами – 100 мм). Скорость нагружения составляла $0,05 \pm 0,01$ МПа/с.

Для каждого состава изготавливалось не менее трёх образцов-близнецов. Образцы твердели в нормальных условиях (температура 20 ± 2 °С, относительная влажность не менее 95 %) и испытывались в проектном возрасте 28 суток. Статистическая обработка результатов выполнялась в соответствии с требованиями ГОСТ 10180-2012 с исключением выбросов.

Технологические свойства смеси контролировались путем измерения подвижности по величине осадки конуса (10–12 см) и температуры (поддерживалась в диапазоне 18–22 °С).

Все испытания проводились в соответствии с действующими нормативными документами с привлечением аккредитованной строительной лаборатории. Полученные данные подвергались статистической обработке для обеспечения достоверности результатов.

Основная часть.

Для комплексного изучения влияния пластифицирующих добавок на свойства цементных композитов работа была разделена на два этапа. На первом этапе исследования проводились на цементно-песчаных растворах, что позволило исключить влияние крупного заполнителя и с высокой точностью оценить эффективность модификаторов в структурообразовании цементного камня. На втором этапе исследования были перенесены на тяжелый бетон с целью верификации полученных результатов в условиях, максимально приближенных к реальной практике применения.

Результаты исследований зависимости физико-технических характеристик раствора от вида и дозировки добавок представлены в сводной таблице 1.

Таблица 1

Зависимость физико-технических характеристик цементно-песчаного раствора от процентного содержания пластифицирующих добавок

№ состава	Пластификатор	Дозировка, % от массы цемента	В/Ц*	Предел прочности, МПа в возрасте 28 суток	
				при изгибе	при сжатии
1	–	0,0	0,51	2,7	34,9
2	СП-3	0,25	0,49	4,1	49,0
3		0,3	0,49	5,2	55,0
4		0,35	0,48	5,4	56,3
5		0,5	0,47	5,9	63,5
6		0,75	0,45	4,3	63,0
7		1,0	0,43	5,6	58,1
8	Пласт-С	0,6	0,47	4,5	50,8
9		1,3	0,45	5,5	57,2
10		2,0	0,44	4,8	52,0
11	Д-11	0,7	0,46	4,3	51,5
12		1,1	0,45	5,7	58,9
13		1,5	0,43	5,6	57,8

* - водоцементное отношение

Анализ данных таблицы 1 показывает, что все исследуемые добавки существенно повышают прочностные характеристики раствора по сравнению с контрольным образцом. Для каждой добавки выявлена своя оптимальная дозировка, при которой достигаются максимальные показатели прочности. Для «СП-3» максимальная прочность при сжатии (63,5 МПа) и изгибе (5,9 МПа) наблюдается при дозировке 0,5 %. Дальнейшее увеличение количества добавки приводит к неко-

торому снижению прочности. Для «Пласт-С» оптимальный эффект достигается при дозировке 1,3 %, при которой прочность при сжатии составляет 57,2 МПа, а при изгибе – 5,5 МПа. Добавка «Д-11» демонстрирует пик эффективности при дозировке 1,1 %, обеспечивая прочность при сжатии 58,9 МПа и при изгибе 5,7 МПа. Наибольший абсолютный прирост прочности при сжатии среди всех исследованных композиций обеспечила добавка «СП-3» в дозировке 0,5 %.

Экспериментальные исследования влияния вида и дозировки пластифицирующих добавок на предел прочности бетона при сжатии проводили на составе бетона с содержанием (на 1 м³): портландцемента – 390 кг, крупного заполнителя (гранитный щебень фракции 5–20 мм) – 1200 кг,

мелкого заполнителя (мелкозернистый природный кварцевый песок $M_k = 1,78$) – 750 кг. Результаты представлены в табл. 2. Процентное содержание пластифицирующей добавки увеличено для обеспечения удобоукладываемости смеси с крупным заполнителем, компенсации адсорбции добавки на поверхности заполнителей.

Таблица 2

Предел прочности при сжатии бетонов с пластифицирующими добавками

№ состава	Пластификатор		В/Ц	Средний предел прочности при сжатии, МПа в возрасте, сут		
	Наименование	% от массы цемента		3	7	28
1	-	-	0,51	21,2	27,4	36
2	Пласт-С	0,6	0,47	30,8	36	42,5
3		1,3	0,45	29	39,6	45
4		2,0	0,44	20,3	34,8	42,4
5	Пластификатор Д-11	0,7	0,46	24,4	36,3	44,8
6		1,1	0,45	20,4	35,4	46,3
7		1,5	0,43	22,3	40	50
8	СП-3	1,1	0,43	26,6	37,5	43
9		1,5	0,42	32,8	41,1	53
10		1,9	0,42	27,9	32,5	46,3

Как видно из данных, представленных в табл. 2, присутствие пластификаторов в бетоне снижает водопотребность смеси на 7,8–17,6% в отличие от состава с отсутствием добавок при условии сохранения равноподвижности. Установлено, что наибольшим водоредуцирующим эффектом обладает добавка «СП-3» (составы № 8, 9, 10). При введении добавки СП-3 в количестве 1,1 % от массы цемента (состав №8) увеличение прочности составляет около 20 %, а при дозировке 1,9% (состав №10) – около 29 %. При этом если добавка СП-3 будет составлять 1,5 % (состав № 9), то полученный состав способен иметь прочность при сжатии 53 МПа в возрасте 28 сут, что означает повышение на 47 % в сравнении с бездобавочным составом.

Ключевой фактор эффективности работы стальной фибры – это качество ее анкеровки в цементном камне. Гладкие фибры, удерживающиеся лишь за счет адгезии, легко выдергиваются, в то время как фибры с анкерными зацепами (крючки, волнистость) или сложным профилем создают мощное механическое зацепление (рис. 1) [4]. Это зацепление позволяет им после появления трещин пластически деформироваться, «сшивая» ее берега и придавая бетону высокую трещиностойкость и способность воспринимать нагрузки даже после разрушения. Микроструктурные исследования с использованием сканирующей электронной микроскопии раскрыли механизм действия МУНТ в цементной матрице [12,

13]. Нанотрубки формируют трехмерную сеть, которая выполняет сразу несколько важных функций. Во-первых, МУНТ выступали центрами кристаллизации, значительно ускоряя процесс гидратации цемента. Во-вторых, способствовали уплотнению структуры, уменьшая средний размер пор на 25–30 %. Также, их введение повышает адгезию между стальной фиброй и цементным камнем, создавая более прочный композитный материал.

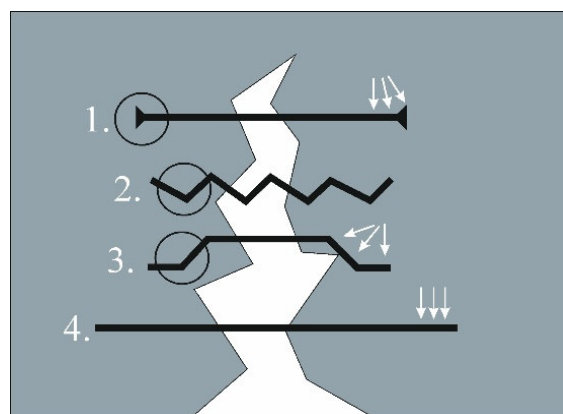


Рис. 1. Схема анкеровки стальных фибр различных форм в цементном камне: 1 – фибра с конусовидными концами; 2 – волновая фибра; 3 – фибра с загнутыми концами; 4 – прямая фибра: кружки – механизмы анкеровки фибры; стрелки – поверхности сцепления

Для комплексной оценки влияния модифицирующих добавок на прочностные характери-

стики бетона была разработана программа сравнительных испытаний, результаты которой представлены в таблице 3. Исследование охватывает шесть составов, систематизированных по двум ключевым факторам: типу химической модификации (без добавок, «СП-3», комплексная добавка «СП-3 + МУНТ») и наличию дисперсного

армирования стальной фиброй. Поскольку целью работы является оптимизация свойств фибробетона для изгибаемых конструкций, особое внимание уделено показателю прочности при изгибе, который является определяющим критерием эффективности дисперсного армирования.

Таблица 3

Сравнительные показатели прочности бетонных составов

№ состава	Пластификатор и модификатор	Дозировка, % от массы цемента	Расход стальной фибры, кг/м ³	В/Ц	Средний предел прочности при сжатии, МПа в возрасте, 28 сут	Средний предел прочности при изгибе, МПа в возрасте, 28 сут
1	–	–	–	0,51	36,0	4,68
9 (из табл. 2)	СП-3	1,5	–	0,42	53,0	6,89
11	СП-3 + МУНТ	1,5 + 0,0005	–	0,40	61,5	7,99
12	–	–	35	0,51	38,9	6,79
13	СП-3	1,5	35	0,42	57,2	9,99
14	СП-3 + МУНТ	1,5 + 0,0005	35	0,4	66,4	11,59

Анализ результатов испытаний наглядно демонстрирует существенное преимущество комплексного модифицирования, особенно при оценке прочности на изгиб – ключевого показателя для изгибаемых элементов.

Введение стальной фибры в контрольный состав (№12) обеспечило прирост прочности при изгибе на 45,1 % (с 4,68 до 6,79 МПа). При этом прирост прочности при сжатии составил лишь 8,1 %, что характерно для механизма работы фибры, ориентированного преимущественно на восприятие растягивающих напряжений. Введение многослойных углеродных нанотрубок совместно с суперпластификатором «СП-3» привело к дальнейшему снижению водопотребности смеси, что подтверждается уменьшением водоцементного отношения с 0,42 до 0,40. Максимальный эффект достигнут в составе №14: прочность при сжатии составила 66,4 МПа (прирост 84,4 % относительно контроля), а прочность при изгибе достигла 11,59 МПа, что в 2,48 раза превышает контрольное значение.

Сравнение составов №13 и №14, отличающихся только наличием МУНТ, показывает, что добавление нанотрубок обеспечивает прирост прочности при изгибе на 16 % (с 9,99 до 11,59 МПа). Этот синергетический эффект объясняется комбинированным действием компонентов: суперпластификатор обеспечивает плотную упаковку частиц и снижение В/Ц; нанотрубки, выступая центрами кристаллизации, уплотняют цементную матрицу на наноуровне; стальная фибра воспринимает растягивающие напряжения и тормозит развитие макротрещин. Таким образом,

трёхкомпонентная система модификации позволяет вывести прочностные характеристики фибробетона на качественно новый уровень, соответствующий классу прочности В50.

Экономический эффект от применения разработанного фибробетона был количественно оценен путём сравнительного расчёта требуемого продольного армирования для железобетонного ригеля постоянного сечения (220×450 мм). Расчёт выполнен согласно действующим нормам проектирования по сечениям, нормальным к продольной оси, для двух вариантов: базового – с бетоном класса В27,5 и модифицированного – с фибробетоном класса В50, дисперсно-армированным стальной фиброй и модифицированным комплексной добавкой «СП-3 + МУНТ». Приняты арматура класса А400 ($R_s=350$ МПа) и рабочая высота сечения $h_0=185$ мм.

В результате для модифицированной балки требуемая площадь растянутой арматуры в пролёте снизилась с 982 мм² (2Ø25 мм) до 628,3 мм² (2Ø20 мм). Общий расход арматуры в балке сократился со 130,3 кг до 105,34 кг, что составляет экономии ~19,2 %. Дополнительным преимуществом является повышение прочности при изгибе в 2,48 раза, что обеспечивает повышенную трещиностойкость конструкции и увеличение её долговечности.

Повышение класса прочности с В27,5 до В50 позволяет увеличить несущую способность балок при тех же габаритах или сократить размеры сечения при сохранении нагрузки. Альтернативным направлением использования разработки может быть достижение требуемого класса

B27,5 при снижении расхода цемента, что является темой дальнейших исследований.

Экономический эффект достигается за счёт снижения расхода стержневой арматуры на 19,2 % и повышения эксплуатационной надёжности конструкции. Дополнительные затраты на модификаторы частично компенсируются этой экономией, а также сокращением сроков строительства благодаря ускоренному набору прочности.

Внедрение предложенного состава в производство потребует применения стандартных мер по обеспечению качества: поддержание заданной подвижности, контроль температуры и соблюдение времени жизнеспособности бетонной смеси. Технология укладки предусматривает нанесение смеси слоями толщиной 30–40 см с обязательным использованием глубинных вибраторов. Темп укладки необходимо поддерживать на уровне 6 м³/ч. Система ухода за бетоном включает регулярное увлажнение в течение 7 суток, контроль температуры твердения и распалубку при достижении 70 % проектной прочности.

Выводы

1. Разработан состав фибробетона, модифицированного комплексной добавкой «СП-3 + МУНТ» и дисперсно-армированного стальной фиброй, позволяющий повысить класс прочности конструкций с B27,5 до B50 при одновременном снижении расхода стержневой арматуры на 19,2 %.

2. Установлено, что введение 0,0005 % многослойных углеродных нанотрубок от массы цемента в комплексе с суперпластификатором «СП-3» (1,5 %) и стальной фиброй (35 кг/м³) обеспечивает достижение прочности на сжатие 66,4 МПа и прочности на изгиб 11,59 МПа в 28-суточном возрасте, что соответственно на 84,4 % и в 2,48 раза выше показателей бездобавочного состава.

3. Выявлен синергетический эффект трёхкомпонентной системы модификации: суперпластификатор обеспечивает снижение В/Ц с 0,51 до 0,40 и плотную упаковку частиц; углеродные нанотрубки уплотняют цементную матрицу на наноуровне, выступая центрами кристаллизации; стальная фибра воспринимает растягивающие напряжения и тормозит развитие макротрещин.

4. Показано, что применение разработанного фибробетона в монолитных балках сечением 450×220 мм позволяет снизить требуемую площадь растянутой арматуры с 982 мм² до 616 мм², сократив общий расход арматуры со 130,3 кг до 105,34 кг на элемент. Дополнительным преимуществом является повышенная трещиностойкость конструкции за счёт увеличения прочности при изгибе в 2,48 раза.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Alhamad O., Eid W. Reinforced concrete problems and solutions: a literature review // Journal of Construction Materials. 2020. Vol. 2. No. 1. DOI: 10.36756/jcm.v2.1.1.
2. Мирсаяпов И.Т., Хорьков Е.В., Минзянов Р.И. Исследование сцепления арматуры периодического профиля с бетоном в условиях действующего объекта // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2024. № 4 (70). С. 95–104. DOI: 10.48612/NewsKSUAE/70.9.
3. Матус Е.П. Влияние нанодобавок на физико-механические свойства дисперсно-армированного бетона // Современное строительство и архитектура. 2018. № 1 (09). С. 5–9. DOI: 10.18454/mca.2018.09.4.
4. Пухаренко Ю.В., Пантелеев Д.А., Жаворонков М.И. Оценка эффективности дисперсного армирования бетонов по показателям прочности и трещиностойкости // Вестник СиБАДИ. 2022. Т. 19, № 5. С. 752–761. DOI: 10.26518/2071-7296-2022-19-5-752-761.
5. Кудяков А.И., Симакова А.С., Стешенко А.Б. Цементные композиции с комплексными модифицирующими добавками на основе водного раствора глиоксаля // Вестник СиБАДИ. 2021. Т. 18, № 6(82). С. 760–771. DOI: 10.26518/2071-7296-2021-18-6-760-771;
6. Бектемирова М.А., Исмаилова Н.Т. Исследование прочностных характеристик бетона затворенных на активированной воде // Наука, инновации и технологии. 2023. № 1. С. 125–134. DOI: 10.33942/sit.nes013.
7. Добшиц Л.М., Анисимов С.Н., Смирнов А.О., Лешканов А.Ю., Анисимова А.А. Прочность жестких бетонных смесей с поликарбоксилатными пластификаторами // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. 2020. № 4. С. 6–13. DOI: 10.25686/2542-114X.2020.1.6.
8. Кайс Х.А., Богданов Р.Р., Морозова Н.Н., Мавлюбердинов А.Р., Сулейманова Л.А. Влияние суперпластифицирующих добавок на основе эфира поликарбоксилата на технологические и физико-технические свойства гипсоцементно-пуццоланового вяжущего // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2024. № 8. С. 20–28. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-8-20-28.
9. Чумаков В.И., Исаков К.Л., Вафин Т.Ф., Кузнецова Г.В., Морозова Н.Н. Влияние суперпластификатора на реологические свойства ячеистобетонной смеси с сохранением эффекта пенообразования // Полимеры в строительстве: научный интернет-журнал. 2023. № 1(11). С. 58–65. DOI: 10.15828/2071-7296-2023-11-1-58-65;

10. Батяновский Э.И., Гуриненко Н.С. Бетон с полифункциональной кремнеземсодержащей добавкой. Минск: БНТУ, 2021. 195 с.

11. Zhdanok S.A., Polonina E.N., Sadovskaya E.A., Leonovich S.N. Fracture toughness of carbon nanotubes modified cement based materials // Vestnik of Brest State Technical University. 2021. No. 3. Pp. 48–53. DOI: 10.36773/1818-1112-2021-126-3-48-53.

12. Ибрагимов Р.А., Потапова Л.И., Королев Е.В. Исследование структурообразования активированного наномодифицированного цементного камня методом ИК-спектроскопии // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2021. № 3 (57). С. 41–49.

13. Петрова А.К., Королев Г.М., Тиагу Ф., Файков П.П. Влияние дисперсионной среды и режима ультразвуковой обработки на характеристики суспензий с многослойными углеродными нанотрубками // Успехи в химии и химической технологии. 2023. Т. 37, № 13 (275). С. 124–127.

14. Сизяков И.Д. Трещиностойкость бетона со стеклопластиковой и стальной фиброй // Инженерный вестник Дона. 2024. № 5 (113). С. 379–387. URL: <https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2024/9201> (дата обращения: 09.10.2025).

15. Ляхевич Г. Д., Гречухин В. А., Ляхевич А. Г., Рожанцев С. Ю. Теоретические аспекты, экспериментальные исследования и эффективность армирования бетона органическими волокнами // Наука и техника. 2020. Т. 19, № 3. С. 215–223. DOI: 10.21122/2227-1031-2020-19-3-215-223.

16. Баженов Ю.М., Демьянова В.С., Калашников В.И. Модифицированные высококачественные бетоны. М.: АСВ, 2006. 368 с.

17. Смирнов А.А. Эффективность использования супер- и гиперпластификаторов в технологии цементного производства // Цемент и его применение. 2023. № 4. С. 78–82.

18. Окольников Г.Э., Белов А.П., Слинкова Е.В. Анализ свойств различных видов фибробетонов // Системные технологии. 2018. № 26. С. 206–210.

19. Тараканов О.В. Химические добавки в растворы и бетоны: монография. Пенза: ПГУАС, 2016. 156 с.

20. Lin W., Liu G.L., Wang J.X., Yang Z.H., Zhang G.Y. Effect of functionalized carbon nanotube on cement mortar: From experiment to DFT research // Modern Physics Letters B. 2024. Vol. 38, no. 35. Art. No. 2450277. DOI: 10.1142/S0217984924502774.

21. Садовская Е.А., Леонович С.Н. Прочность, деформативность и трещиностойкость фибробетона с матрицей, модифицированной углеродными нанотрубками. Минск: БНТУ, 2024. 174 с.

22. Mansoori H., Behbahani H.P., Alih S.C. The Combined Effect of Steel Fibres and High-Range Carbon Nanotubes on Properties of High-Strength Concrete // Magazine of Concrete Research. 2022. Vol. 74, № 24. Pp. 1270–1279. DOI: 10.1680/jmacr.21.00184.

23. Ebrahim A., Kandasamy S. The effect of using multi-walled carbon nanotubes on the mechanical properties of concrete: a review // Innovative Infrastructure Solutions. 2023. Vol. 8(9). 251. DOI: 10.1007/s41062-023-01219-1.

24. Wang J., Dong S., Pang S. D., Zhou C., Han B. Pore structure characteristics of concrete composites with surface-modified carbon nanotubes // Cement and Concrete Composites. 2022. Vol. 128. 104453. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2022.104453.

25. Hou M., Zhang D., Li V.C. Material processing, microstructure, and composite properties of low carbon engineered cementitious composites (ECC) // Cement and Concrete Composites. 2022. Vol. 134. 104790. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2022.104790.

26. Liu X., Wang G., Yu J., Liu R., Lyu K., Zuo Ju., Shah S.P. Stress-sensitivity of carbon nanotube-grafted-carbon fiber incorporated cement-based composites // Journal of Building Engineering. 2023. Vol. 64. P. 105589. DOI: 10.1016/j.job.2022.105589.

27. Габидуллин М.Г., Хузин А.Ф., Рахимов Р.З., Ткачев А.Г., Михалева З.А., Толчков Ю.Н. Ультразвуковая обработка – эффективный метод диспергирования углеродных нанотрубок в объеме строительного композита // Строительные материалы. 2013. № 3. С. 57–59.

Информация об авторах

Хузин Айрат Фаритович, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии строительного производства. E-mail: airat-khuzin2010@yandex.ru. Казанский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 420043, Казань, ул. Зеленая, д. 1.

Богданов Руслан Равильевич, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии строительного производства. E-mail: bogdanov.r.r@yandex.ru. Казанский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 420043, Казань, ул. Зеленая, д. 1.

Мавлюбердинов Азат Рашидович, кандидат технических наук, доцент кафедры технологии строительного производства. E-mail: mazatr73@mail.ru. Казанский государственный архитектурно-строительный университет. Россия, 420043, Казань, ул. Зеленая, д. 1.

Сулейманова Людмила Александровна, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой строительства и городского хозяйства. E-mail: ludmilasuleimanova@yandex.ru. Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Поступила 14.10.2025 г.

© Хузин А.Ф., Богданов Р.Р., Мавлюбердинов А.Р., Сулейманова Л.А., 2026

^{1,*} *Khuzin A.F.*, ¹ *Bogdanov R.R.*, ¹ *Mavlyuberdinov A.R.*, ² *Suleymanova L.A.*

¹ *Kazan State University of Architecture and Engineering*

² *Belgorod State Technological University named after. V.G. Shukhov*

*E-mail: *airat-khuzin2010@yandex.ru*

MODIFIED FIBER-REINFORCED CONCRETE FOR MONOLITHIC BEAMS

Abstract. *The results of developing a fiber-reinforced concrete composition modified with multi-walled carbon nanotubes (MWCNTs) for application in monolithic beams are presented. A comparative analysis of six concrete compositions with various combinations of modifying components was conducted. It was established that the complex modification of concrete with steel fiber, superplasticizer "Polyplast SP-3" (1.5 % by cement weight), and MWCNTs (0.0005 % by cement weight) provides an increase in compressive strength by 84.4 % and flexural strength by 2.48 times compared to the control composition. The application of the developed composition allows increasing the strength class of structures from B27.5 to B50 or reducing the consumption of bar reinforcement by 19.2 %. A synergistic effect of the three-component modification system was revealed, attributed to the reduction of water-cement ratio, densification of the cement matrix at the nanoscale, and effective absorption of tensile stresses by the fiber.*

Keywords: *fiber-reinforced concrete, carbon nanotubes, construction technology, beam, fiber*

REFERENCES

1. Alhamad O., Eid W. Reinforced concrete problems and solutions: a literature review // Journal of Construction Materials. 2020. Vol. 2. No. 1. DOI: 10.36756/jcm.v2.1.1.
2. Mirsayapov I.T., Khorkov E.V., Minzyanov R.I. Investigation of the adhesion of periodic profile reinforcement to concrete in the conditions of an operating facility [Issledovanie scepneniya armatury periodicheskogo profilja s betonom v uslovijah dejstvujushhego ob'ekta]. News Kazan State University of Architecture and Engineering. 2024. No. 4 (70). Pp. 95–104. 26. DOI: 10.48612/NewsKSUA/70.9/ (rus)
3. Matus E.P. Influence of nano-additives on the physical and mechanical properties of dispersedly reinforced concrete [Vlijanie nanodobavok na fiziko-mehaničeskie svojstva dispersno-armirovanogo betona]. Modern construction and architecture. 2018. No. 1 (09). Pp. 5–9. DOI: 10.18454/mca.2018.09.4. (rus)
4. Pukharencov Yu.V., Panteleev D.A., Zhavoronkov M.I. Evaluation of the efficiency of dispersed reinforcement of concretes by indicators of strength and crack resistance [Ocenka jeffektivnosti dispersnogo armirovanija betonov po pokazateljam prochnosti i treshhinostojkosti]. SibADI Bulletin. 2022. Vol. 19, No. 5. P. 752–761. DOI: 10.26518/2071-7296-2022-19-5-752-761. (rus)
5. Kudyakov A.I., Simakova A.S., Steshenko A.B. Cement compositions with complex modifying

additives based on an aqueous glyoxal solution [Cementnye kompozicii s kompleksnymi modifizirujushimi dobavkami na osnove vodnogo rastvora glioksalia]. SibADI Bulletin. 2021. Vol. 18, No. 6(82). Pp. 760–771. DOI: 10.26518/2071-7296-2021-18-6-760-771 (rus)

6. Bektemirova M.A., Ismailova N.T. Study of the strength characteristics of concrete mixed with activated water [Issledovanie prochnostnyh harakteristik betona zatvorennyh na aktivirovannoj vode] Science, innovation and technology. 2023. No. 1. Pp. 125–134. DOI: 10.33942/sit.nes013. (rus)

7. Dobshits L.M., Anisimov S.N., Smirnov A.O., Leshkanov A.Yu., Anisimova A.A. Strength of low-slump concrete mix with polycarboxylate plasticizers [Prochnost' zhestkih betonnyh smesej s polikarboksilatnymi plastifikatorami]. Bulletin of the Volga State Technological University. Series: Materials. Constructions. Technologies. 2020. no. 4. Pp. 6–13. DOI: 10.25686/2542-114X.2020.1.6. (rus)

8. Kais H.A., Bogdanov R.R., Morozova N.N., Mavlyuberdinov A.R., Suleymanova L.A. Influence of superplasticizing additives based on polycarboxylate ether on the technological and physical-technical properties of gypsum-cement-pozzolanic binder [Vlijanie superplastificirujushhih dobavok na osnove jefira polikarboksilata na tehnologičeskie i fiziko-tehnicheskie svojstva gipsocementno-pucolanovogo vjazhushhego]. Bulletin of the Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov. 2024. No. 8. Pp. 20–28. DOI: 10.34031/2071-7318-2024-9-8-20-28. (rus)

9. Chumakov V.I., Iskhakov K.L., Vafin T.F., Kuznetsova G.V., Morozova N.N. Influence of a superplasticizer on the rheological properties of aerated concrete mixture while maintaining the effect of full expansion [Vliyanie superplastifikatora na reologicheskie svoystva jacheistobetonnoj smesi s sohraneniem jeffekta polnocennogo vspuchivaniya]. *Polymers in construction: a scientific online magazine*. 2023. No. 1(11). Pp. 58–65. DOI: 10.15828/2071-7296-2023-11-1-58-65 (rus)
10. Batyanovskiy E.I., Concrete with a multi-functional silica-containing additive [Beton s polifunkcional'noj kremnezemsoderzhashhej dobavkoj]. Minsk, BNTU, 2021. 195 p. (rus)
11. Zhdanok S.A., Polonina E.N., Sadovskaya E.A., Leonovich S.N. Fracture toughness of carbon nanotubes modified cement based materials. *Vestnik of Brest State Technical University*. 2021. No. 3. Pp. 48–53. DOI: 10.36773/1818-1112-2021-126-3-48-53.
12. Ibragimov R.A., Potapova L.I., Korolev E.V. Investigation of the structure formation of activated nanomodified cement stone by IR spectroscopy [Issledovanie strukturoobrazovaniya aktivirovannogo nanomodificirovannogo cementnogo kamnja metodom IK-spektroskopii]. *News Kazan State University of Architecture and Engineering*. 2021. No. 3 (57). Pp. 41–49. (rus)
13. Petrova A.K., Korolev G.M., Tiagu F., Faikov P.P. Influence of the dispersion medium and ultrasonic treatment mode on the characteristics of suspensions with multi-walled carbon nanotubes [Vliyanie dispersionnoj sredy i rezhima ul'trazvukovoj obrabotki na harakteristiki suspenzij s mnogoslojnymi uglerodnymi nanotrubkami]. *Advances in chemistry and chemical technology*. 2023. Vol. 37. No. 13 (275). Pp. 124–127. (rus)
14. Sizyakov I.D. Crack resistance of concrete with fiberglass and steel fiber [Treshhinostojkost' betona so stekloplastikovoj i stal'noj fibroj]. *Engineering Bulletin of the Don*. 2024. no. 5 (113). P. 379–387. URL: <https://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n5y2024/9201> (reference date: 09.10.2025) (rus)
15. Lyakhovich G.D., Grechukhin V.A., Lyakhovich A.G., Rozhantsev S.Yu. Theoretical aspects, experimental research and efficiency of concrete reinforcement with organic fibers [Teoreticheskie aspekty, jeksperimental'nye issledovaniya i jeffektivnost' armirovaniya betona organicheskimi voloknami]. *Science and technology*. 2020. Vol. 19, no. 3. Pp. 215–223. DOI: 10.21122/2227-1031-2020-19-3-215-223. (rus)
16. Bazhenov Yu.M., Dem'yanova V.S., Kalashnikov V.I. Modified high-quality concrete [Modificirovannye vysokokachestvennye betony]. Moscow, ASV, 2006. 368 p. (rus)
17. Smirnov A.A. The effectiveness of using super- and hyperplasticizers in cement production technology [Jefferktivnost' ispol'zovaniya super- i giperplastifikatorov v tehnologii cementnogo proizvodstva]. *Cement and its application*. 2023. no. 4. P. 78–82. (rus)
18. Okol'nikova G.E., Belov A.P., Slinkova E.V. Analysis of the properties of various types of fiber-reinforced concrete [Analiz svoystv razlichnyh vidov fibrobetonov]. *System technologies*. 2018. No. 26. 206–210. (rus)
19. Tarakanov O.V. Chemical additives for mortars and concrete: monograph [Himicheskie dobavki v rastvory i betony]. Penza, PGUAS, 2016. 156 p. (rus)
20. Lin W., Liu G.L., Wang J.X., Yang Z.H., Zhang G.Y. Effect of functionalized carbon nanotube on cement mortar: From experiment to DFT research. *Modern Physics Letters B*. 2024. Vol. 38, no. 35. 2450277. DOI: 10.1142/S0217984924502774.
21. Sadovskaya E.A., Leonovich S.N. Strength, deformability and crack resistance of fiber concrete with a matrix modified by carbon nanotubes [Prochnost', deformativnost' i treshhinostojkost' fibrobetona s matricej, modificirovannoj uglerodnymi nanotrubkami]. Minsk, BNTU, 2024. 174 p. (rus)
22. Mansoori H., Behbahani H. P., Alih S. C. The Combined Effect of Steel Fibres and High-Range Carbon Nanotubes on Properties of High-Strength Concrete. *Magazine of Concrete Research*. 2022. Vol. 74, № 24. Pp. 1270–1279. DOI: 10.1680/jmacr.21.00184.
23. Ebrahim A., Kandasamy S. The effect of using multi-walled carbon nanotubes on the mechanical properties of concrete: a review. *Innovative Infrastructure Solutions*. 2023. Vol. 8, No. 9. 251. DOI: 10.1007/s41062-023-01219-1.
24. Wang J., Dong S., Pang S. D., Zhou C., Han B. Pore structure characteristics of concrete composites with surface-modified carbon nanotubes. *Cement and Concrete Composites*. 2022. Vol. 128. 104453. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2022.104453.
25. Hou M., Zhang D., Li V.C. Material processing, microstructure, and composite properties of low carbon engineered cementitious composites (ECC). *Cement and Concrete Composites*. 2022. Vol. 134. 104790. DOI: 10.1016/j.cemconcomp.2022.104790.
26. Liu X., Wang G., Yu J., Liu R., Lyu K., Zuo Ju., Shah S.P. Stress-sensitivity of carbon nanotube-grafted-carbon fiber incorporated cement-based composites. *Journal of Building Engineering*. 2023. Vol. 64. 105589. DOI: 10.1016/j.jobe.2022.105589.
27. Gabidullin M.G., Khuzin A.F., Rakhimov R.Z., Tkachev A.G., Mikhaleva Z.A., Tolchikov Yu.N. Ultrasonic treatment is an effective method for dispersing carbon nanotubes in the volume of a

building composite [Ul'trazvukovaja obrabotka – jeffektivnyj metod dispergirovanija uglerodnyh nanotrubok v obeme stroitel'nogo kompozita]. Building materials. 2013. No. 3. Pp. 57–59. (rus)

Information about the authors

Khuzin, Airat F. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Construction Technology. E-mail: airat-khuzin2010@yandex.ru. Kazan State University of Architecture and Civil Engineering. Russia, 420043, Kazan, Zelenaya st., 1.

Bogdanov, Ruslan R. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Construction Technology. E-mail: bogdanov.rr@yandex.ru. Kazan State University of Architecture and Civil Engineering. Russia, 420043, Kazan, Zelenaya st., 1.

Mavlyuberdinov, Azat R. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Construction Technology. E-mail: mazatr73@mail.ru. Kazan State University of Architecture and Civil Engineering. Russia, 420043, Kazan, Zelenaya st., 1.

Suleymanova, Lyudmila A. Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Construction and Urban Economy. E-mail: ludmilasuleimanova@yandex.ru. Belgorod State Technological University named after. V.G. Shukhova. Russia, 308012, Belgorod, Kostyukova st., 46.

Received 14.10.2025

Для цитирования:

Хузин А.Ф., Богданов Р.Р., Мавлюбердинов А.Р., Сулейманова Л.А. Модифицированный фибробетон для монолитных балок // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. 2026. № 6. С. 62–72. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-6-62-72

For citation:

Khuzin A.F., Bogdanov R.R., Mavlyuberdinov A.R., Suleymanova L.A. Modified fiber-reinforced concrete for monolithic beams. Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov. 2026. No. 6. Pp. 62–72. DOI: 10.34031/2071-7318-2026-11-6-62-72