

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Объект авторского права
УДК 693.546

САДОВСКАЯ
Елена Александровна

**ТЕХНОЛОГИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА И СВОЙСТВА
МОНОЛИТНОГО ФИБРОБЕТОНА
МНОГОУРОВНЕВОГО АРМИРОВАНИЯ**

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.23.08 – технология и организация строительства

Минск, 2024

Работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете.

Научный руководитель

ЛЕОНОВИЧ Сергей Николаевич,
доктор технических наук, профессор,
заведующий кафедрой «Строительные
материалы и технология строительства»
строительного факультета Белорусского
национального технического университета

Официальные оппоненты:

Данилевский Леонид Николаевич,
доктор технических наук, доцент, главный
научный сотрудник Государственного
предприятия «Институт жилища –
НИПТИС им. Атаева С. С.»;

Бакатович Александр Александрович,
кандидат технических наук, доцент, декан
инженерно-строительного факультета
УО «Полоцкий государственный универ-
ситет имени Евфросинии Полоцкой»

Оппонирующая организация

УО «Брестский государственный техниче-
ский университет»

Защита состоится 17 мая 2024 г. в 11.00 на заседании совета по защите диссертаций Д 02.05.05 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, пр-т Независимости, 65, главный корпус, ауд. 202. Телефон ученого секретаря 8(017) 293-96-73. E-mail: kovsharsn@bntu.by

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан 17 апреля 2024 г.

Ученый секретарь
совета по защите диссертаций,
кандидат технических наук



С. Н. Ковшар

© Садовская Е. А., 2024

© Белорусский национальный
технический университет, 2024

ВВЕДЕНИЕ

Фибробетон – строительный материал, характеризующийся повышенной прочностью на осевое растяжение, растяжение при изгибе, срез и скалывание, что обеспечивает ему повышенную трещиностойкость, ударную вязкость и износоустойчивость. Эти свойства фибробетона предопределяют область его рационального применения при возведении полов промышленных зданий, дорожно-аэродромных покрытий, монолитных железобетонных фундаментных плит и перекрытий, возведение тонкостенных оболочек и других строительных конструкций различного назначения с повышенными требованиями в части трещиностойкости (вязкости разрушения).

Широко известны исследования, отражающие технологию получения и применения в монолитном строительстве фибробетона «моноармирования», т. е. содержащего в составе стальную, композитную, базальтовую или иную фибру. Вместе с тем требует решения задача повышения качественных характеристик фибробетона путем полидисперсного армирования, с использованием как макроармирующей (стальной, композитной), так и ультрадисперсной «фибры», например, в варианте введения в состав бетона трубчатых углеродных наноматериалов (УНТ).

Кроме разработки технологии многоуровневого армирования необходимо исследовать как свойства получаемого материала, так и отработать технологию устройства строительных конструкций с его применением.

Одним из важнейших и не в полной мере решенных проблемных вопросов технологии монолитного фибробетона является достоверная оценка равномерности распределения фибры в объеме отформованной конструкции и, следовательно, однородности структуры и свойств фибробетона, а в этой связи – физико-механических и физико-технических характеристик самой конструкции.

На решение означенных научно-технических задач направлено настоящее диссертационное исследование.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с крупными научными программами (проектами) и темами. Работа содержит результаты исследований автора, полученные при выполнении в БНТУ в 2016–2020 гг. заданий Минобразования РБ и НАН Беларуси по ГБ 16-134 «Разработка основ теории и методологии неразрушающего контроля напряженно-деформированного состояния и прочностных показателей бетона и железобетона на основе сочетания комплекса механико-акустических методов испытаний и методов компьютерного моделирования физико-механических процессов структурообразования» и ГБ 16-138 «Разработка импортозамещающей технологии

устройства высококачественных полов и фундаментных плит из фибробетона на основе инновационной системы контроля качества», что соответствует Перечню приоритетных направлений научных исследований Республики Беларусь на 2016–2020 гг. «Многофункциональные материалы и технологии», утвержденного постановлением Совета Министров Республики Беларусь от 12 марта 2015 г. № 190.

Цель и задачи исследования

Цель исследования – разработать технологию строительства и исследовать свойства тяжелого конструкционного фибробетона многоуровневого армирования.

Задачи исследования:

– обосновать концепцию многоуровневого армирования конструкционного тяжелого бетона, включающую уровень нано-, микроармирования цементного камня трубчатыми углеродными наноматериалами и макроармирования структуры бетона стальной фиброй;

– разработать составы фибробетона с определением рационального содержания стальной фибры и углеродного наноматериала при моноармировании и исследовать свойства фибробетона многоуровневого армирования при сочетании нано-, микроармирования трубчатыми УНМ и макроармирования стальной фиброй;

– разработать методику многопараметрической оценки свойств фибробетона многоуровневого полидисперсного армирования с целью определения прочности, трещиностойкости и деформативности в лабораторных и построечных условиях;

– разработать технологию ведения бетонных работ с приготовлением и применением фибробетона многоуровневого полидисперсного армирования при устройстве монолитных строительных конструкций;

– разработать комплексную методику оценки качества фибробетона в строительных конструкциях и апробировать результаты исследований в производственных условиях.

Объект исследования – конструкционный фибробетон многоуровневого армирования.

Предмет исследования – технология строительства и свойства фибробетона многоуровневого армирования.

Научная новизна результатов диссертационного исследования заключается в новых научных экспериментально обоснованных данных о совместной работе трубчатых наноуглеродных материалов и стальной фибры в тяжелом конструкционном фибробетоне многоуровневого армирования и в разработанной многопараметрической (многофакторной) методике контроля его характеристик, что позволило получить усовершенствованную технологию устройства монолитных конструкций из фибробетона

повышенной трещиностойкости (вязкости разрушения), а на этой основе – долговечности.

Положения, выносимые на защиту:

– экспериментальное обоснование эффективности в фибробетоне многоуровневого армирования взаимодополняющего действия нано-, микроармирующих углеродных нанотрубок, вводимых в состав бетона в количестве $\sim 75 \cdot 10^{(-5)}$ % от массы цемента, и макроармирующего действия стальной фибры в количестве $\sim 1,0$ % от объема фибробетона, проявляющейся в росте его прочности на растяжение при изгибе до 105 %, на осевое растяжение до 77 %, величины прогиба при максимальной нагрузке, а в совокупности обеспечивающей повышенную трещиностойкость и вязкость разрушения фибробетона, как основу эксплуатационной надежности строительных конструкций;

– методику многопараметрической лабораторной оценки прочностных, деформативных, силовых и энергетических параметров, отражающих поведение фибробетона в процессе трещинообразования под действием механических нагрузок, что позволяет установить уровень (величины) соответствующих параметров (факторов) для последующей оценки качества фибробетона в производственных условиях;

– методику комплексной оценки качества фибробетона в построечных условиях, включающую неразрушающие методы контроля за однородностью распределения стальной фибры (методом ультразвуковой томографии), прочность фибробетона (комплексное сочетание ультразвукового и ударного импульсов), в сочетании с контролем физико-механических, деформативных, силовых и энергетических характеристик разрушающим методом по многопараметрической методике, что позволяет с высокой степенью достоверности оценить качественные характеристики фибробетона в устраиваемых и эксплуатируемых строительных конструкциях;

– базовые положения усовершенствованной технологии и организации строительства с применением фибробетона многоуровневого армирования и оценка эффективности результатов диссертационного исследования.

Личный вклад соискателя. Автором самостоятельно получены основные результаты, изложенные в диссертационной работе. Работа выполнена под руководством доктора технических наук, профессора Леоновича С. Н., совместно с которым осуществлялось определение цели и задач исследования, планирование эксперимента, обсуждение и обобщение полученных результатов. Автор принимала непосредственное участие в подготовке и проведении исследований, анализе и интерпретации полученных данных, написании статей.

Апробация результатов диссертации. Основные положения и результаты научной работы представлялись и докладывались на ежегодных меж-

дунар. науч.-техн. конф.: междунар. науч.-техн. конф. «Технология строительства и реконструкции (TCR-2015)» (Минск, 2015 г.); междунар. науч.-метод. семинар «Перспективные направления инновационного развития строительства и подготовки инженерных кадров» (Гродно, 2016 г.); междунар. науч.-техн. конф. «Инновационная подготовка инженерных кадров на основе европейских стандартов (Еврокодов)» (Минск, 2017 г.); науч.-метод. конф. «Дефекты зданий и сооружений. Усиление строительных конструкций» (С.-Петербург, 2017 г.); междунар. науч.-практич. конф. «Актуальные вопросы и перспективы развития транспортного и строительного комплексов»: материалы IV, (Гомель, 2018 г.); междунар. науч. конф. «Архитектурно-строительный комплекс: проблемы, перспективы, инновации» (Новополоцк, 2018 г.); междунар. академ. чтения «Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения» (Курск, 2018 г.); междунар. науч.-техн. конф. «Проблемы современного строительства» (Минск, 2019 г., 2020 г.); междунар. науч.-техн. конф. «Долговечность, прочность и механика разрушения строительных материалов и конструкций» (Саранск, 2020 г.); междунар. науч.-техн. конф. «Поведение бетонов и железобетонных конструкций при наличии нагрузок и тепловлажностных воздействий различной длительности» (Макеевка, 2020 г.); междунар. академ. чтения «Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения» (Курск, 2021 г.); междунар. науч.-метод. семин. «Перспективные направления инновационного развития строительства и подготовки инженерных кадров» (Брест, 2022 г.); междунар. науч.-техн. конф. «Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии» (Могилев, 2023 г.), засед. Научн. сов. РААСН «Механика разрушения бетона, железобетона и других строительных материалов» (Тамбов, 2023 г.); междунар. науч.-практич. конф. «Технологии, организация и управление в строительстве – 2023» (Москва, 2023 г.); форум ВУЗов инж.-технолог. проф. союзного государства (Минск, 2023 г.).

Опубликование результатов диссертации. Основные положения диссертационной работы отражены в 33 публикациях, в том числе в 9 статьях в изданиях по перечню ВАК, 15 в статьях других журналов и изданий, 8 в статьях и материалах докладов научно-технических конференций, в 1 монографии; получено 2 патента. Общий объем публикаций составляет 6 авторских листов.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, общих выводов, списка использованной литературы и приложений. Общий объем диссертационной работы 142 стр., который включает до 100 страниц машинописного текста, 86 рисунков и 27 таблиц; приложения на 318 стр. Список литературы включает 166 наименований, из которых 40 – авторские работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе диссертации выполнен анализ данных научно-технической литературы, отражающий результаты исследований в области технологии строительства с использованием фибробетона и способов повышения его трещиностойкости.

Научные исследования с дисперсно-армированными бетонами и конструкциями на их основе в России и Беларуси выполнялись научными подразделениями НИИЖБ, ВНИИЖелезобетона, ЦНИИС, МГСУ, РИСИ, БПИ (БНТУ), БелНИИС и др., и в настоящее время наиболее активно продолжаются научными школами профессора, члена-корреспондента РААСН Ю. В. Пухаренко (Санкт-Петербургский ГАСУ), профессора, члена-корреспондента РААСН В. С. Лесовика (Белгородский ГТУ), академика РААСН Е. М. Чернышова (Воронежский ГАСУ), профессора В. В. Тура и доцента И. П. Павловой (БрГТУ), доцента А. А. Бакатовича (ПГУ) и др.

Анализ научно-технической информации по направлению исследований, наряду с успешно решенными в анализируемых источниках задачами, позволил выделить ряд проблемных, нерешенных вопросов технологии монолитного строительства с применением фибробетона. Так требуют совершенствования методы контроля равномерности распределения элементов фибры (в особой мере стальной) в объеме бетона формируемых строительных конструкций с целью повышения степени однородности как свойств самого фибробетона, так и характеристик конструкций.

При очевидной перспективности предложенного рядом исследователей многоуровневого варианта армирования фибробетона с использованием разного сортамента фибры возникает проблема в его реализации, связанная с тем, что высокая деформативность, например, волокон композитной фибры не может предотвратить начальное образование (зарождение) трещин в объеме цементного камня и бетона. Для этой цели необходимы ультрадисперсные волокнообразные фиброэлементы, способные армировать структуру новообразований цементного камня, формирующуюся из кристаллогидратов – продуктов реакций клинкерных минералов цемента с водой затвердения бетона. С учетом типоразмеров кристаллогидратных новообразований (~ 8,0–25,0 нм) и размеров сечений пор в сформированной ими структуре (пор геля), до 4,0–5,0 нм, роль фиброэлементов армирующих такую структуру могут выполнять трубчатые углеродные наноматериалы. Предлагаемый вариант «многоуровневого» армирования (рисунок 1), в котором эффективность стальной фибры, проявляющаяся в блокировке трещинообразования, зараждающегося в наиболее слабых зонах конструкционного тяжелого бетона – зонах контакта цементного камня с зернами заполнителя, крупных капиллярных и контракционных порах, дополнялась бы предотвращением (сдерживанием) трещинообразо-

вания в объеме цементного камня бетона, за счет «встраивающихся» в его структуру углеродных одно- и многослойных трубок. Их характеризуют малые поперечные размеры (однослойные могут быть сечением 0,5–1,0 нм) при значительной (более 1 мкм, т. е. >1000 нм) длине. При этом их совместная со стальной фиброй «работа» под нагрузкой обеспечивается практическим равенством модулей упругости ~200,0 ГПа.

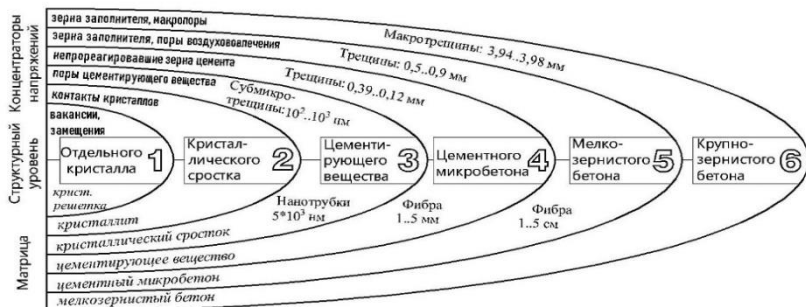


Рисунок 1 – Схема «многоуровневого дисперсного армирования» и армирующие элементы

Исходной предпосылкой диссертационного исследования служит гипотеза, что сочетание эффекта по сдерживанию зарождения трещин в объеме цементного камня за счет нано-, микроармирования структуры при введении в состав трубчатых УНМ и эффекта от макроармирования стальной фиброй, позволит повысить трещиностойкость фибробетона как на стадии его твердения, так и при воздействии механических нагрузок и эксплуатационной среды.

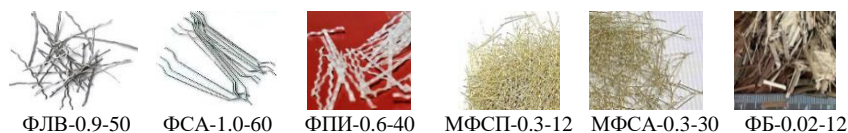
Кроме отмеченного, в анализировавшихся исследованиях только частично решены задачи по оценке характеристик фибробетона монолитных конструкций в части как прочностных, так и деформативных, взаимосвязанных с процессом трещинообразования фибробетона под действием механических нагрузок и условий эксплуатации. Для достоверной оценки качества фибробетона в построечных условиях требуется комплексный подход, включающий оценку равномерности распределения фибры, его прочности и деформативных свойств в сочетании с параметрами, характеризующими трещиностойкость.

По результатам анализа были сформулированы цель и задачи исследований, приведенные в общей характеристике работы.

Во второй главе приведены характеристики материалов, стандартизированные и авторские методики испытаний.

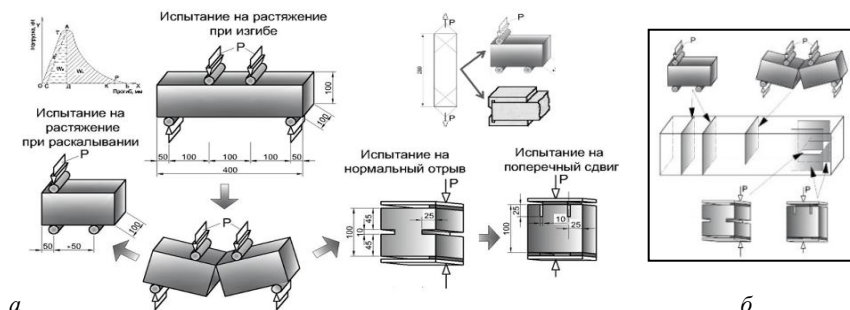
В испытаниях использованы: портландцемент ПЦ500 Д0 (ЦЕМ 42,5Н) белорусских цементных заводов ОАО «Белорусский цементный завод» и ОАО «Красносельскстройматериалы»; песок природный с $M_k = 1,79–2,0$,

$\rho_{п} = 1,54-1,63 \text{ г/см}^3$; щебень фр. 5–10 и 5–20 мм с $\rho_{щ} = 1,38 \text{ г/см}^3$ и $\rho_{щ} = 1,4-1,46 \text{ г/см}^3$, соответственно. Минеральные добавки расширяющая сульфоалюминатная добавка (РСАМ) и микрокремнезем конденсированный МКУ-85. Нанодобавки АРТ-Конкрит (суперпластификатор (СП) поликарбоксилатный сополимер, количество УНТ 0,750 г на 1 кг СП), РуФикс-500Б (суперпластификатор (СП) поликарбоксилатный сополимер, количество УНТ 0,909 г на 1 кг СП), LL+Сп (пластификатор (П) I группы количество УНТ 1,8 г на 1 кг П). В качестве дисперсного армирования использована фибра различная по материалу (стальная, полимерная, базальтовая, полипропиленовая) и по длине (от 12 мм до 60 мм) (рисунок 2).



ФЛВ-0.9-50 – фибра стальная из листа волнистая; ФСА-1.0-60 – фибра стальная проволочная с анкерами; ФПИ-0.6-40 – фибра полимерная волнистая; МФСП-0.3-12 – микрофибра стальная проволочная прямая; МФСА-0.3-30 – микрофибра стальная проволочная анкерная; ФБ-0.02-12 – фибра базальтовая
Рисунок 2 – Фибра

Предложена авторская, разработанная в диссертационном исследовании методика для определения трещиностойкости фибробетона, базирующаяся на совокупности его традиционных прочностных и деформативных характеристик ($f_c, f_{ax}, f_{fb}, f_{sp}$), в сочетании с многопараметрической оценкой вязкости разрушения фибробетона на всех этапах деформирования и трещинообразования, осуществляемой на одном и том же образце, с определением параметров: $K_{IC}, K_{IIC}, l_{кр}, J, W, E, \phi$ (рисунок 3), из серии не менее 3-х образцов.



а – многопараметрическая оценка параметров по образцам призм 100x100x400 мм, 70x70x280 мм; б – контроль распределения фибры

Рисунок 3

Для разработки предлагаемой методики и основ технологии строительства с применением бетона многоуровневого армирования сформирована программа экспериментальных исследований опытных образцов фибробетона диапазоне по прочности на сжатие от 36 МПа до 80 МПа (классы C25/30–C50/60), по удобоукладываемости смеси – пластичные и самоуплотняющиеся, литые, по морозостойкости марок от F100 до F500. Разработано более 30 рецептов фибробетонных составов (таблица 1), что соответствовало испытаниям более 760 образцов различной формы и размеров (таблица 2).

Таблица 1 – Составы сырьевых смесей используемых в главе 3

№ состава	Обозначение состава	Цемент	Щебень		Песок	Хим. добавка кг (% от массы цемента)	тв. УНТ, % от масс.дем.	В/Ц	Фибра		Удобоукладываемость смеси				
			5-20	5-10					количество	обозначение	OK / PK, см	Марка			
			кг										m _ф , кг (μ _ф , %)		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13			
1	A														
2	A-Ф1	400	1020	–	820	3,2 (0,8 %)	АРТ-Конкрет Р	0,00060 %	0,4	–	–	20-22 / –			
3	A-Ф2								0,39	80 (1 %)	ФЛВ-0.9-50	5 / –	П2		
4	A-Ф3								0,39	80 (1 %)	ФСА-1.0-60	13 / –	П3		
5	B								0,39	3,5 (0,4 %)	ФПИ-0.6-40	19 / –	П4		
6	B-Ф1	445	1035	–	820	2,22 (0,5 %)		АРТ-Конкрет Р	0,00038 %	0,4	–	–	22-24 / –		
7	B-Ф2									0,38	80 (1 %)	ФЛВ-0.9-50	12 / –	П2	
8	B-Ф3									0,4	80 (1 %)	ФСА-1.0-60	20 / –	П4-П5	
9	B									0,4	3,5 (0,4 %)	ФПИ-0.6-40	22 / –	П5	
10	B-Ф1	460	–	880	950	2,3 (0,5 %)			АРТ-Конкрет Р	0,00038 %	0,4	–	–	– / 53	
11	B-Ф2										0,36	80 (1 %)	ФЛВ-0.9-50	20 / 33	П4 / P1
12	B-Ф3										0,32	80 (1 %)	ФСА-1.0-60	– / 47	P3-P4
13	Г										0,44	3,5 (0,4 %)	ФПИ-0.6-40	– / 50	P4
14	Г-Ф1	485 140/ 245	–	825	800	4,56 (0,94 %)	АРТ-Конкрет Р			0,00060 %	0,44	–	–	– / 64	
15	Г-Ф2										0,44	80 (1 %)	ФЛВ-0.9-50	– / 54	P4
16	Г-Ф3										0,42	80 (1 %)	ФСА-1.0-60	– / 60	P6
17	Д										0,4	3,5 (0,4 %)	ФПИ-0.6-40	– / 62	P6
18	Д-Ф4	400	1020	–	800	1,7 (0,4 %)		Руфикс-500Б		0,00032 %	0,39	–	–	22 / –	
19	Д-Ф8										0,39	2/20/20 0,07 %/0,25 % /0,25 %	ФБ-0.02-12/ МФСП-0.3-12/ ФСА-1.0-60	6 / –	П2
20	Ж										0,39	1/20/20 0,11 %/0,25 % /0,25 %	ФП-0.02-12/ МФСА-0.3-30/ ФСА-1.0-60	–	–
21	Ж-Ф4										0,36	–	–	22 / –	
22	Ж-Ф8	445	1035	–	820	4,0 (0,9 %)			Руфикс-500Б	0,00067 %	0,36	2/20/20 0,07 %/0,25 % /0,25 %	ФБ-0.02-12/ МФСП-0.3-12/ ФСА-1.0-60	6 / –	П3
23	И										0,36	1/20/20 0,11 %/0,25 % /0,25 %	ФП-0.02-12/ МФСА-0.3-30/ ФСА-1.0-60	–	–
24	И-Ф4										0,39	–	–	– / 70	
25	И-Ф8										0,39	2/20/20 0,07 %/0,25 % /0,25 %	ФБ-0.02-12/ МФСП-0.3-12/ ФСА-1.0-60	–	П2

Окончание таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7		8	9	10	11	12	13
26	К	485 140/245	-	825	800	5,82 (1,0 %)	РуФрис-500Б	0,00077 %	0,39	-	-	- / 72	
27	К-Ф4								2/20/20 (0,07 %/0,25 % /0,25 %)	ФБ-0.02-12/ МФСП-0.3-12/ ФСА-1.0-60			П2
28	К-Ф8								1/20/20 (0,11 %/0,25 % /0,25 %)	ФП-0.02-12/ МФСА-0.3-30/ ФСА-1.0-60			-
29	С	425	1070	-	750	2,4 (0,5 %)	Рела- мике	-	0,4	-	-	15 / -	П3
30	М	425	1070	-	750	2,4 (0,5 %)	Рела- мике	-	0,4	-	-	15 / -	П3
31	С	350	1110	-	750	5,6 (1,6 %)	LL	-	-	-	-	-	-
32	S _{NC}	350	1110	-	750	5,6 (1,6 %)	LL+Сп	0,0028 %	-	-	-	-	-
33	Л	350	1040	-	760	3,5 (1,0 %)	Рела- мике	-	-	-	-	21 / -	П5

¹Расширяющая сульфалоюминатная добавка (РСАМ);

²Микрокремнезем конденсированный (МКУ)

Исследования проводились в строительной лаборатории Представительства акционерного общества Инжиниринговая компания «АСЭ» (Российская Федерация) в Республике Беларусь, которая соответствует критериям Национальной системы аккредитации Республики Беларусь и аккредитована на соответствие требованиям СТБ ИСО/МЭК 17025-200, и НИЛ ПГС НИПИ БНТУ на аттестованном оборудовании.

В третьей главе изложены результаты экспериментальных исследований технологических, прочностных, структурных, эксплуатационных и деформационных свойств фибробетона многоуровневого армирования с целевым предназначением устройства строительных конструкций требуемой высокой трещиностойкости.

При разработке составов фибробетона многоуровневого армирования с оценкой его свойств на начальном этапе исследованы эффективность вариантов «моноармирования», с введением в состав углеродного наноматериала (УНТ) и стальной фибры. Для сравнения эффективности в ряде экспериментов отдельно использовали композитную (полипропиленовую) фибру. На основании анализа оптимальных (рациональных) расходов (содержание) трубчатых углеродных наноматериалов и стальной фибры, исследовали технологические свойства фибробетонных смесей, физико-механические свойства затвердевшего фибробетона многоуровневого армирования.

Усовершенствована комплексная многопараметрическая методика испытаний образцов на прочностные, деформативные, силовые и энергетические характеристики свойств фибробетона.

Таблица 2 – Результаты испытаний фибробетона с многоуровневым армированием

Образец	100x100x100			70x70x280			100x100x400			
Состав	Прочность на сжатие			Прочность на растяжение					ККИН	
				Осевое		Раскол		Изгиб		
	МПа	Класс		МПа					МПа \sqrt{m}	
	f_c	по СНБ	по СНиП	$f_{c(70)}$	f_{ax}	$f_{sp(70)}$	f_{sp}	f_{fl}	K_{Ic}	K_{IIc}
	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
А	60,6	C35/45	B45	41,44	1,74	2,75	1,98	2,7	0,68	2,51
А-Ф1	54,0	C32/40	B40	48,64	2,51	4,56	3,45	5,5	3,23	4,07
А-Ф2	65,0	C40/50	B50	40,94	2,17	3,93	3,22	5,6	2,60	3,72
А-Ф3	68,2	C40/50	B50	40,98	1,64	2,68	1,98	4,8	0,97	4,33
Б	61,9	C35/45	B45	44,46	1,87	2,26	2,35	3,9	1,05	3,06
Б-Ф1	62,0	C35/45	B45	47,55	2,35	5,61	2,93	4,9	1,28	4,05
Б-Ф2	64,4	C35/45	B45	46,16	2,56	4,88	3,21	5,8	2,24	5,66
Б-Ф3	67,3	C40/50	B50	42,62	1,73	2,11	2,19	4,5	0,99	4,86
В	39,5	C25/30	B30	28,53	1,61	2,04	1,81	3,1	0,82	1,25
В-Ф1	37,9	C22/27.5	B25	34,83	1,99	3,40	3,28	4,9	2,05	3,44
В-Ф2	32,3	C18/22.5	B20	32,00	1,87	2,79	2,45	4,8	1,32	4,50
В-Ф3	42,6	C25/30	B30	25,12	1,46	1,83	1,48	3,2	0,69	2,79
Г	72,3	C45/55	B55	70,98	2,24	3,90	3,14	6,9	1,23	3,90
Г-Ф1	66,0	C40/50	B50	75,17	3,98	6,14	4,66	7,1	1,61	7,53
Г-Ф2	70,1	C40/50	B50	77,89	3,96	6,84	5,34	7,6	1,97	7,16
Г-Ф3	81,0	C50/60	B60	69,38	3,03	4,06	3,17	5,9	1,37	4,94
Д	36,1	C20/25	B25	38,97	2,02	1,94	1,68	3,8	1,33	2,75
Д-Ф4	39,4	C25/30	B30	44,77	2,67	4,01	2,32	4,2	1,94	4,18
Д-Ф8	37,3	C20/25	B25	40,31	2,49	3,56	2,06	–	–	–
Ж	54,6	C32/40	B40	55,84	2,37	2,80	2,53	4,5	1,08	3,02
Ж-Ф4	63,5	C35/45	B45	62,12	2,53	3,97	3,17	5,2	1,47	4,97
Ж-Ф8	59,5	C32/40	B40	66,05	2,68	5,56	4,44	–	–	–
И	63,3	C35/45	B45	48,97	1,89	2,69	2,63	4,7	1,66	4,28
И-Ф4	61,0	C35/45	B45	54,45	2,91	5,67	3,43	5,0	2,05	5,11
И-Ф8	65,4	C35/45	B45	58,10	2,74	5,83	3,53	–	–	–
К	81,1	C50/60	B60	63,51	2,60	3,49	3,21	7,1	1,69	4,06
К-Ф4	81,9	C50/60	B60	64,11	2,71	5,10	4,12	10,0	2,14	5,01
К-Ф8	80,5	C50/60	B60	63,54	2,95	5,80	4,69	–	–	–

Путем математической обработки (рисунок 4) получена зависимость для расчета прочности фибробетона на растяжение при раскалывании (как важнейшей прочностной характеристики при оценке трещиностойкости фибробетона) от объемной концентрации металлической фибры:

$$f_{sp} = k_f \cdot 123 \cdot \mu_{fv} + f_{sp}^c, \text{ МПа}, \quad (1)$$

где μ_{fv} – объемная концентрация фибры, %; f_{sp}^c – прочность на растяжение при раскалывании бетонной матрицы, МПа; k_f – корректирующий коэффициент в зависимости от типа фибры: 0,6 для фибры ФЛВ-0.9-50;

1,3 для фибры ФСА-1.0-60; 2 для фибры МФСА-0.3-30; 0,5 для фибры МФСП-0.3-12.

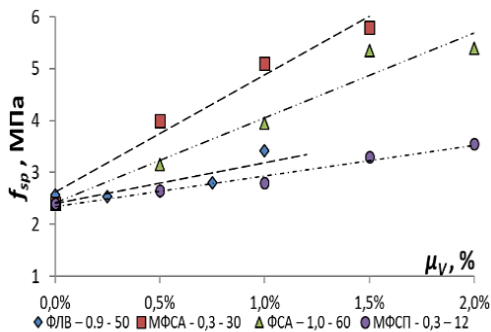


Рисунок 4 – Прочность на растяжение при раскалывании фибробетона с металлической фиброй

Определение удельных энергозатрат на квазистатическое разрушение проводилось согласно стандартизированной методике (ГОСТ 29167-21) на образцах-призмах 100x100x400 мм с надрезом в средней трети пролета с регистрацией графика «нагрузка-прогиб» (рисунки 5–6, таблица 3). Выявлены, во-первых, закономерность изменений значений прогиба образцов к началу трещинообразования

(старта магистральной трещины); во-вторых, уровень этих параметров к моменту статического разрушения и, в-третьих, закономерности развития трещин и деформаций образцов фибробетона в зависимости от степени армирования стальной и нанокуглеродной фибры. В совокупности с прочностными характеристиками фибробетона многоуровневого армирования эти данные составляют базовые положения предложенной многопараметрической методики оценки его качества, включая и ее осуществление в построечных условиях.

Экспериментально установлено, что энергия на сдвигание магистральной трещины (сумма упругой энергии и энергии микротрещинообразования), графически отражаемая площадью под кривой (рисунок 6), значительно увеличивается при многоуровневом армировании (таблица 3).



Рисунок 5 – Испытание образцов-призм с надрезом

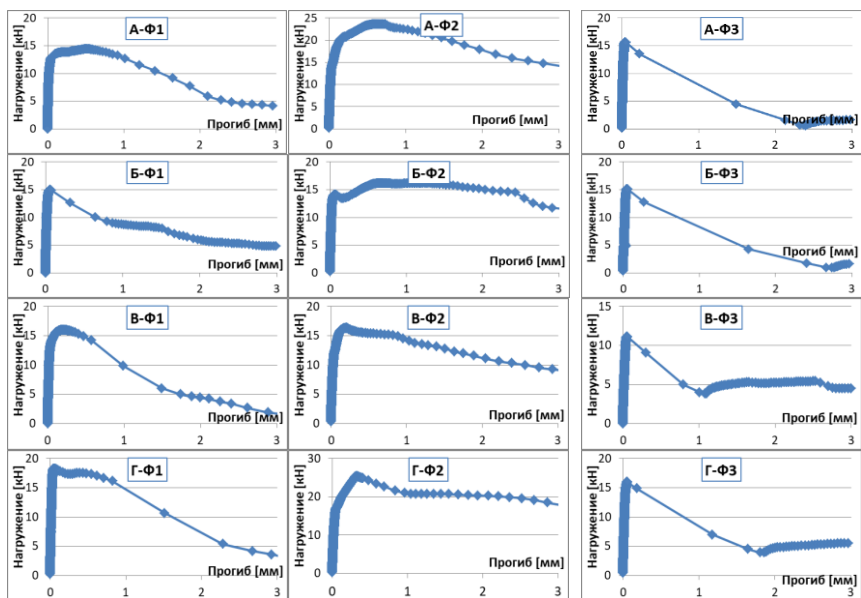


Рисунок 6 – Диаграммы деформирования образцов фибробетона с многоуровневым армированием

Таблица 3 – Энергетические параметры разрушения фибробетона с модифицированной УНТ бетонной матрицей

Состав	статическое разрушение			до момента начала движения магистральной трещины		
	энерго-затраты	удельные энерго-затраты	прогиб при макс. нагрузке	энерго-затраты	удельные энергозатраты	прогиб до начала движения трещины
	Дж	$G_i, \text{Дж/м}^2$	$V_f, \text{мм}$	Дж	$G_m, \text{Дж/м}^2$	$V_e, \text{мм}$
А-Ф1	6,75	851,66	0,501	0,49	61,57	0,05
А-Ф2	15,37	1940,51	0,731	0,43	53,76	0,185
А-Ф3	0,53	66,97	0,671	0,14	17,19	0,02
Б-Ф1	0,69	85,84	0,2	0,21	26,56	0,028
Б-Ф2	17,09	2158,15	0,671	0,65	82,28	0,06
Б-Ф3	0,56	71,12	0,055	0,30	37,59	0,037
В-Ф1	0,70	87,78	0,671	0,73	91,75	0,065
В-Ф2	2,71	342,23	0,2	0,44	55,12	0,051
В-Ф3	0,36	45,83	0,051	0,17	21,04	0,032
Г-Ф1	0,65	79,10	0,051	0,45	54,79	0,04
Г-Ф2	6,47	817,26	0,325	0,55	68,85	0,05
Г-Ф3	0,65	81,65	0,055	0,40	49,98	0,042

Установлено, что при наличии на диаграмме зоны квазиупрочнения после появления первой трещины деформации не концентрируются в одной этой трещине. Материал сохраняет способность распределять трещины по длине растянутой зоны образца, при этом трещины характеризуются очень малым раскрытием. Этот эффект обеспечивается тем, что распределенная по всему объему фибра при достаточном модуле упругости ее материала (а в нашем случае – при практически одинаковом модуле упругости трубок «УНТ» и стальной фибры, проявляющих эффекты нано-, микро- и макро-армирования), прочности и заделке в матрицу практически полностью воспринимает растяжение бетона-матрицы в полости зародившейся трещины, не позволяя ей резко раскрыться.

В четвертой главе сформулированы основные положения технологии и организации ведения бетонных работ с применением фибробетона многоуровневого армирования в варианте монолитного строительства.

Определено, что наиболее эффективен вариант приготовления такого бетона по двухстадийной технологии с введением в его состав углеродной нанопроволоки в виде УНТ, содержащихся в составе комплексной химической добавки в бетон, либо приобъектно, либо централизованно на 1-й стадии, и при введении на 2-ой стадии стальной фибры на строительной площадке перед укладкой фибробетона в конструкцию. Такое технологическое решение связано с установленными в процессе исследований (снижением) формуемости фибробетонной смеси после введения стальной фибры, включая высокоподвижные и литые смеси марок П4–П5, а также РК4–РК6. Принципиальная технологическая схема приготовления смеси бетона-матрицы расчетного состава приведена на рисунке 7.

Особенностью этой схемы приготовления конструкционного тяжелого бетона является введение на 1-й стадии содержащей углеродный наноматериал (УНТ) химической добавки. Ее введение рекомендуется производить с частью (~25–30 %) воды затворения в конце процесса смешивания всех твердофазных компонентов с оставшейся частью (70–75 %) воды на замес бетоносмесителя. Допускается введение добавки со всем объемом воды затворения.

На второй стадии приготовления фибробетона многоуровневого армирования в его состав вводится стальная фибра. В варианте приобъектного приготовления фибробетона на развертываемых БСУ вначале (рисунок 7) готовится бетонная смесь расчетного состава бетона-матрицы, а затем при непрерывном перемешивании дозируется и вводится фибра. Для равномерного распределения стальной фибры в объеме бетона ее подача осуществляется с использованием специальных дозирующих устройств (рисунок 8).

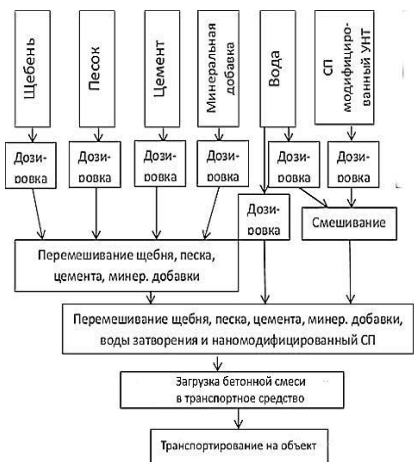
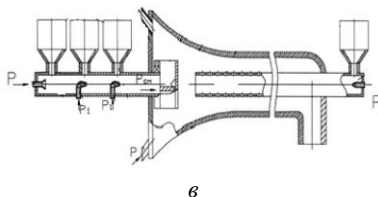
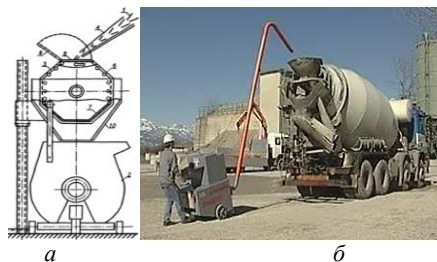
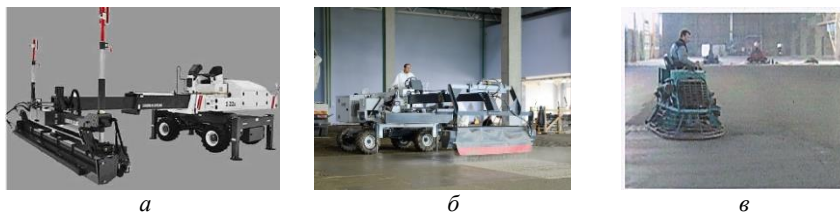


Рисунок 7 – Принципиальная технологическая схема приготовления бетонной смеси-матрицы с углеродным наноматериалом



а – дозатор с барабаном с зубьями; б – дозирование с помощью фибродува; в – противоточный пневмосмеситель
Рисунок 8 – Устройства дозирования фибры

Для фибробетона многоуровневого армирования в организацию и технологию ведения бетонных работ вводится несколько современных технологических операций, в сравнении с обычным сталефибробетоном. Традиционная укладка бетона реализуется с использованием направляющих и виброреек или жидких маяков. Этот процесс требует больших трудозатрат, при этом поддерживать высокое качество выполненных работ затруднительно. В нашем технологическом регламенте эта проблема решается с использованием новых машин, оснащенных лазерными устройствами контроля и наведения рабочего органа машины для укладки, выравнивания и уплотнения бетонной смеси (рисунок 9).



а – бетоноукладчик модель S-22E Laser Screed; б – машина CTC-11M Топпинг Spreader для нанесения топпинга; в – затирка поверхности пола бетоноотделочной машиной

Рисунок 9 – Машины для ведения работ

В пятой главе на основании результатов исследований предложена и апробирована в производственных условиях авторская методика многопараметрической оценки качества фибробетона монолитных строительных конструкций. В дополнение к совокупности лабораторных испытаний производится оценка свойств фибробетона в конструкции.

Для ее реализации разработан алгоритм, который отражает последовательность выполнения работ и оценки качества фибробетонной конструкции в построечных условиях (или в процессе эксплуатации), из четырех взаимно дополняющих этапов (рисунок 10).

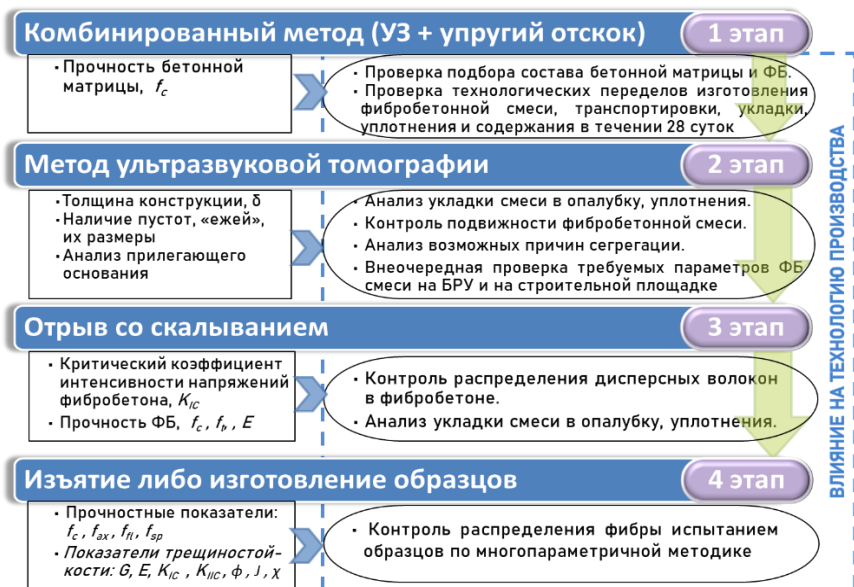


Рисунок 10 – Алгоритм контроля качества фибробетона в конструкции

При реализации предложенной методики последовательным выполнением этапов № 1, № 2 и № 3 осуществляется выборочный или сплошной (по мере надобности) контроль за равномерностью бетона-матрицы и его физико-механических свойств неразрушающими методами контроля, которые на этапе № 4 сопоставляются с данными разрушающих методов лабораторных испытаний, полученных на предварительном этапе, либо (по мере необходимости) на образцах, изъятых из конструкции.

Эффективность предложенной многопараметрической методики оценки качества фибробетона многоуровневого армирования подтверждена в производственных и лабораторных условиях.

В рамках осуществления производственной апробации результатов исследований для использованной предложенной методики разработаны два стандарта предприятия: «Оценка качества фибробетонных конструкций на строительной площадке» и «Многопараметричная оценка трещиностойкости (вязкости разрушения) и прочностных параметров фибробетона в лабораторных условиях» для строительной организации ООО «ТапасПлюс», г. Минск. Предназначенный для использования строительной отраслью Беларуси стандарт предприятия: «Технологический регламент на устройство нанофибробетонных полов», включает основные положения контроля качества фибробетона многоуровневого армирования и технологию ведения бетонных работ с его применением.

Апробация результатов диссертационного исследования при строительстве Белорусской АЭС в г. Островец и на объектах многопрофильного производства мебели в г. Сморгонь подтвердила их техническую эффективность. В частности, при оценке качественных характеристик полов промышленного здания в г. Сморгони по предлагаемой методике установлено практически полное соответствие фактических характеристик фибробетона многоуровневого армирования предварительно полученным в лабораторных условиях.

Подтверждена удельная экономическая эффективность фибробетона многоуровневого армирования с учетом роста эксплуатационной пригодности и срока бездефектной эксплуатации устроенных полов (покрытий) при росте объемов строительства по разработанной в диссертации технологии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Развита научно-практические основы и усовершенствованы технологии монолитного строительства с применением фибробетона многоуровневого армирования за счет комплексного применения нано-, микроармирующих цементный камень углеродных нанотрубок (УНТ) в сочетании с макроармирующим эффектом от введенной в бетон стальной фибры [1–27].

2. Теоретически и экспериментально обоснована эффективность совместной, взаимодополняющей «работы» в фибробетоне под нагрузкой углеродных нанотрубок и стальной фибры, ввиду практического равенства их модулей упругости, и установлено рациональное соотношение их в фибробетоне, при содержании УНТ $\sim 75 \cdot 10^{(-5)}$ % от массы цемента и стальной фибры $\sim 1,0$ % от объема бетона ($V/C \approx 0,4$), что в совокупности не изменяет прочность на сжатие, но обеспечивает повышение прочности на

растяжение при изгибе до 105 %, растяжение при раскалывании до 77 %, прогиба при максимальной нагрузке и значительный рост параметров (K_{IC} , K_{IIc} , J , ϕ , G , и др.), характеризующих возрастающую трещиностойкость фибробетона и его эксплуатационную пригодность и долговечность [1–8; 11–19; 25–27].

3. Разработана и экспериментально обоснована методика многопараметрической (многофакторной) оценки в лабораторных условиях свойств фибробетона многоуровневого армирования с определением механических (прочность на сжатие, изгиб, осевое растяжение), деформативных (модуля упругости, контролируемого прогиба, трещинообразования), энергетических (W , G) и силовых (K_{IC} , K_{IIc} , K_I^{GI}) параметров для обеспечения высокой степени достоверности характеристик фибробетона как в устраиваемых (возводимых) строительных конструкциях, так и в процессе их эксплуатации [1; 7; 9; 21; 24; 32; 33].

4. Разработаны базовые положения технологии бетонных работ с использованием фибробетона многоуровневого армирования, при двухстадийном приготовлении бетонной смеси с введением углеродных нанотрубок на первой стадии, при последующем (2-я стадия приготовления) введении стальной фибры в бетон непосредственно перед укладкой, принимая во внимание закономерности снижения формуемости (удобноукладываемости) фибробетонной смеси со стальной фиброй. Подобран и оптимизирован комплект современного высоко-производительного оборудования для бетонных работ [1; 28; 30; 31].

5. Разработана комплексная методика оценки качества фибробетона многоуровневого армирования в построечных условиях, комбинируя методы разрушающего (многопараметрическая оценка) и неразрушающего контроля за однородностью распределения стальной фибры (методом томографии) и прочности фибробетона (комплексным методом ультразвукового и ударного импульсов), что в совокупности позволяет оценить характеристики фибробетона возводимых и эксплуатируемых строительных конструкций [1; 9; 20; 22; 23; 29].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Экспериментально-практические результаты диссертационного исследования рекомендуется использовать: при приготовлении фибробетона многоуровневого армирования различного назначения с повышенными характеристиками трещиностойкости, вязкости разрушения и деформативности; при устройстве монолитных конструкций полов и иных покрытий повышенной эксплуатационной надежности; при устройстве (возведении) тонкостенных строительных конструкций с повышенными требованиями в части прочности на разные виды растяжения; для других строительных работ с применением фибробетона.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Монография

1. Прогнозирование долговечности железобетонных конструкций при комбинированном воздействии карбонизации и хлоридной агрессии и их восстановление / С. Н. Леонович, Е. Н. Полонина, Е. А. Садовская, Е. Е. Шалый ; под общ. ред. С. Н. Леоновича. – Минск : БНТУ, 2021. – 353 с.

Статьи в рецензируемых научных журналах

2. Повышение прочности бетона пластифицирующей добавкой на основе наноструктурированного углерода / С. А. Жданок, Е. Н. Полонина, С. Н. Леонович, Б. М. Хрусталева, Е. А. Коледа (Е. А. Садовская) // Строительные материалы. – 2018. – № 6. – С. 67–72.

3. Критический коэффициент интенсивности напряжений при поперечном сдвиге для нанофибробетона / Е. А. Садовская, Е. Н. Полонина, С. Н. Леонович, С. А. Жданок, В. В. Потапов // Строительные материалы. 2021. № 9. – С. 41–46.

4. Fracture toughness of carbon nanotubes modified cement based materials / S. A. Zhdanok, E. N. Polonina, E. A. Sadovskaya, S. N. Leonovich // Vestnik of Brest State Technical University. – 2021. – № 3 (126). – P. 48–53.

5. Садовская, Е. А. Оптимизация состава нанофибробетона по вязкости разрушения модификацией матрицы / Е. А. Садовская, С. Н. Леонович // Наука и техника. – 2022. – Т. 21, № 6. – С. 499–503.

6. Sadovskaya E. A. Comparative analysis of the calculation of the stress intensity factor from the results of equilibrium and non-equilibrium tests / E. A. Sadovskaya, S. N. Leonovich // Vestnik of Brest State Technical University. – 2022. – № 3 (129). – P. 12–15.

7. Leonovich, S. N. Nanofiber Concrete: Multi-Level Reinforcement = Нанофибробетон: многоуровневое армирование / S. N. Leonovich, E. A. Sadovskaya // Science and Technique. – 2022. – № 5. – P. 392–396.

8. Прочность и трещиностойкость цементных композитов при многоуровневом армировании / С. А. Жданок, С. Н. Леонович, Е. А. Садовская, Е. А. Полонина // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2023. – Т. 67, № 4. – С. 340–344.

9. Leonovich, S. N. Multi-Parameter Methodology for Assessing Quality Indicators of Nanomodified Fiber-Reinforced Concrete for Construction Site = Многопараметрическая методика оценки показателей качества наномодифицированного фибробетона для строительной площадки / S. N. Leonovich, E. A. Sadovskaya, A. A. Koleda // Наука и техника. – 2023. – № 5. – С. 397–404.

10. Садовская, Е. А. Практическая апробация многопараметричной методики оценки качества фибробетона на строительной площадке / Е. А. Садовская, С. Н. Леонович, Н. А. Будревич // Вестник Полоцкого государственного университета. – Серия F. Строительство. Прикладные науки. – 2022. – № 8. – С. 32–37.

Статьи в других изданиях

11. Влияние пластифицирующей добавки, содержащей углеродный наноматериал, на свойства самоуплотняющегося бетона / С. А. Жданок, Е. Н. Полонина, С. Н. Леонович, Е. А. Коледа (Е. А. Садовская) // Вестник гражданских инженеров. – 2018. – № 6 (71). – С. 76–85.

12. Полонина, Е. Н. Физико-механические характеристики нанобетона / Е. Н. Полонина, С. Н. Леонович, Е. А. Коледа (Е. А. Садовская) // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. – Владивосток. – 2018. – № 4 (37). – С. 100–111.

13. Садовская, Е. А. Закономерности для прочности фибробетона при испытании на сжатие кубов и цилиндров / Е. А. Садовская, С. Н. Леонович, Н. А. Будревич // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. – 2021. – № 2 (47). – С. 100–106.

14. Cement-Based Materials Modified with Nanoscale Additives / E. N. Polonina, S. N. Leonovich, B. M. Khroustalev, E. A. Sadovskaya, N. A. Budrevich // Science and Technique. – 2021. – Vol. 20. – No 3. – P. 189–194.

15. Коледа, Е. А. Результаты испытаний нанофибробетона на растяжение с комплексным фибровым армированием / Е. А. Коледа (Е. А. Садовская), С. Н. Леонович, С. А. Жданок // Вестник Поволжского государственного технологического университета. – Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. – 2018. – № 2. – С. 16–23.

16. Физико-механические свойства бетона средней прочности модифицированного углеродной наноструктурированной добавкой / Е. А. Коледа (Е. А. Садовская), С. Н. Леонович, С. А. Жданок, Е. Н. Полонина, Н. А. Будревич // Вестник Поволжского государственного технологического университета. – Серия: Материалы. Конструкции. Технологии. – 2018. – № 2. – С. 24–34.

17. Influence of the Nanostructured-Carbon-Based Plasticizing Admixture in a Self-compacting Concrete Mix on its Technological Properties / S. A. Zhdanok, E. N. Polonina, S. N. Leonovich, B. M. Khroustalev, E. A. Koleda (E. A. Sadovskaya) // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2019. – Vol. 92, No. 2. – P. 376–382.

18. 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 (E. A. Sadovskaya) // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2019. – Vol. 92, No. 1. – P. 12–18.

19. Tensile Strength of Nanofibrous Concrete / E. A. Sadovskaya, S. N. Leonovich, S. A. Zhdanok, E. N. Polonina, // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2020. – Vol. 93, No. 4. – P. 1015–1019.

20. Садовская, Е. А. Многопараметричная методика оценки показателей качества нанофибробетона для строительной площадки/ Е. А. Садовская, С. Н. Леонович, Н. А. Будревич // Бетон и железобетон. 2021. № 4 (606). – С. 20–28.

21. Садовская, Е. А. Расчет коэффициента интенсивности напряжения при нормальном отрыве по прочности на растяжение при изгибе / Е. А. Садовская, С. Н. Леонович // Вестник полоцкого государственного университета. Серия F. Строительство. Прикладные науки. – 2022. – № 8. – С. 27–31.

22. Коледа, Е. А. Неразрушающий контроль качества фибробетонных конструкций как компонент системы мониторинга рисков при эксплуатации производственного объекта / Е. А. Коледа (Е. А. Садовская), С. Н. Леонович // Системные технологии. – 2016. – № 2 (19). – С. 85–95.

23. Способ контроля качества сталефибробетона по коэффициенту интенсивности напряжений при нормальном отрыве / Е. А. Садовская, С.Н. Леонович, Е.Н. Полонина, Н.А. Будревич // Современное промышленное и гражданское строительство. – 2021. – Т. 17, № 2. – С. 85–92.

24. Садовская, Е. А. Коэффициенты перехода для нанофибробетона / Е. А. Садовская, С. Н. Леонович // Бетон и железобетон. – 2022. – № 3 (611). – С. 41–48.

25. Fracture Toughness of Nanofiber-Reinforced Concrete on Normal Separation and In-Plane Shear / E. A. Sadovskaya, E. N. Polonina, S. N. Leonovich, S. A. Zhdanok, V. V. Potapov // Journal of Engineering Physics and Thermophysics. – 2022. – Vol. 95, No. 4. – P. 945–952.

Статьи в материалах конференций, семинаров, симпозиумов

26. Коледа, Е. А. Анализ физико-механических характеристик сталефибробетона / Е. А. Коледа (Е. А. Садовская), С. Н. Леонович, А. В. Латыш // Перспективные направления инновационного развития строительства и подготовки инженерных кадров : материалы XX междунар. науч.-метод. семинара (Гродно, 17–19 февр. 2016 г.) / М-во

образования Респ. Беларусь, ГрГУ им. Я. Купалы ; редкол.: В. Г. Барсуков (гл. ред.) [и др.]. – Гродно : ГрГУ, 2016. – С. 248–253.

27. Садовская, Е. А. Расчет коэффициента интенсивности напряжения при нормальном отрыве по энергии разрушения фибробетона с матрицей, модифицированной нанотрубками / Е. А. Садовская, С. Н. Леонович // *Материалы, оборудование и ресурсосберегающие технологии : Материалы Междунар. науч.-техн. конф., Могилев, 20–21 апреля 2023 года.* – Могилев: Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования «Белорусско-Российский университет», 2023. – С. 296–297.

28. Фибробетонные промышленные полы: дефекты, технология и система контроля качества / Е. А. Коледа (Е. А. Садовская), С. Н. Леонович, А. В. Латыш, Е. Н. Грушевская // *Технология строительства и реконструкции : TCR-2015 : сборник докладов Междунар. науч.-техн. конф. / Белорусский национальный технический университет и Национальная академия наук Беларуси ; под ред. Б. М. Хрусталева и С. Н. Леонович.* – Минск : БНТУ, 2017. – С. 275–281.

29. Коледа, Е. А. Характеристики трещиностойкости фибробетона как определяющий фактор качества / Е. А. Коледа (Е. А. Садовская), С. Н. Леонович // *Технология строительства и реконструкции : TCR-2015 : сборник докладов Междунар. науч.-техн. конф. / Белорусский национальный технический университет и Национальная академия наук Беларуси ; под ред. Б. М. Хрусталева и С. Н. Леонович.* – Минск : БНТУ, 2017. – С. 282–287.

30. Коледа, Е. А. Влияние фибры на удобоукладываемость бетонной смеси / Е. А. Коледа (Е. А. Садовская), С. Н. Леонович // *Актуальные вопросы и перспективы развития транспортного и строительного комплексов : материалы IV Междунар. науч.-техн. конф., Гомель, 11–12 октября 2018 г. : в 2 ч. / под общ. ред. Ю. И. Кулаженко.* – Гомель : БелГУТ, 2018. – Ч. 2. – С. 89–92.

31. Коледа, Е. А. Технология устройства бездефектных фибробетонных полов: параметры качества / Е. А. Коледа (Е. А. Садовская), С. Н. Леонович // *Безопасность строительного фонда России. Проблемы и решения : материалы Междунар. академических чтений, Курск, 23 ноября 2018 г.* – Курск : Курск. гос. ун-т, 2018. – С. 224–229.

32. Садовская, Е. А. Многоуровневая структура бетона: анализ и классификация уровней организации структуры конгломератных строительных композитов / Е. А. Садовская, Е. Н. Полонина, С. Н. Леонович // *Проблемы современного строительства : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 28 мая 2019 г. / Белорусский*

национальный технический университет; редкол.: В. Ф. Зверев, С. М. Коледа. – Минск : БНТУ, 2019. – С. 285–297.

33. Садовская, Е. А. Вязкость разрушения нанофибробетона с фиброй из листовой стали на разрывной машине / Е. А. Садовская, С. Н. Леонович, Н. А. Будревич // Проблемы современного строительства : материалы Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 28 мая 2020 г. / редкол.: В. Ф. Зверев, С. М. Коледа. – Минск : БНТУ, 2020. – С.265–272.

Патенты

34. Бетонная смесь для изготовления материалов и конструкций : пат. 23332 / С. Н. Леонович, Е. Н. Полонина, Е. А. Садовская. заявитель БНТУ. – Опубл. 28.02.2021.

35. Способ определения критического коэффициента интенсивности напряжений сталефибробетона : пат. 22544 / С. Н. Леонович, Д. Ю. Снежков, Е. А. Коледа (Е. А. Садовская), заявитель БНТУ. – Опубл. 2019.06.30

36. Самоуплотняющаяся фибробетонная смесь : заявка на изобретение №20230285 / Е. А. Садовская, С. Н. Леонович, заявитель БНТУ. – 03.11.2023.

Производственно-практические издания

37. Многопараметрическая оценка трещиностойкости (вязкости разрушения) и прочностных параметров фибробетона в лабораторных условиях : стандарт предприятия СП-3-2021. – Минск : ООО «Тапас плюс», 2021. – 61 с.

38. Оценка качества фибробетонных конструкций на строительной площадке : стандарт предприятия СП-2-2021. – Минск : ООО «Тапас плюс», 2021. – 52 с.

39. Технологический регламент на устройство нанофибробетонных полов : стандарт предприятия СП-1-2021. – Минск : ООО «Тапас плюс», 2021. – 34 с.

Технические нормативные правовые акты

40. Бетоны. Методы определения характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении : ГОСТ 29167-21. – Введ. 01.09.2022. – М. : НИИЖБ им. А. А. Гвоздева АО НИЦ «Строительство», 2022. – 20 с.

РЕЗЮМЭ

Садоўская Алена Аляксандраўна

ТЭХНАЛОГІЯ БУДАЎНІЦТВА І ЎЛАСЦІВАСЦІ МАНАЛІТНАГА ФІБРАБЕТОНА ШМАТУЗРОЎНЕВАГА АРМАВАННЯ

Ключавыя словы: фібра, нанавуглярод, бетонная сумесь, фібрабетон, расколінаустойлівасць, кладка, кантроль якасці, тэхналогія.

Мэта працы: распрацаваць тэхналогію будаўніцтва з ужываннем цяжкага канструкцыйнага фібрабетону шматузроўневага армавання.

Распрацаваны навукова-практычныя асновы ўдасканаленай тэхналогіі маналітнага будаўніцтва з ужываннем фібрабетону шматузроўневага арміравання, што забяспечваецца за кошт комплекснага прымянення нана-, мікраарміруючых структуру цэментавага каменю вугляродных нанатрубак (УНТ) у спалучэнні з макроармуючым эфектам ад уведзенай у бетон сталёвай фібры. Устаноўлены рацыянальныя суадносіны іх у фібрабэтоне, якое адпавядае зместу УНТ парадку 0,00075 % ад вагі цэменту і сталёвай фібры ~1,0 % ад аб'ёму бетону, што ў сукупнасці забяспечвае павышэнне трываласці на расцяжэнне пры выгіне да 105 %, восевае расцяжэнне 77 %, велічыні прагіну пры максімальнай нагрузцы і значны рост параметраў расколінаўстойлівасці (K_{IC} , K_{IIS} , K_{IIS} , J , ϕ , G і інш.).

Распрацаваны асноўныя палажэнні арганізацыі тэхналагічнага працэсу вядзення працы з ужываннем фібрабетону шматузроўневага армавання на прыкладзе прылады падлог будынкаў прамысловага, ці іншага прызначэння з пад-борам камплекта адпаведнага сучаснага абсталявання, які забяспечвае якаснае вядзенне працы, а на гэтай выснаве – якасць канструкцыі падлогі, альбо іншых пакрыццяў.

Прапанавана апрабаваная ў вытворчых умовах аўтарская методыка шматпараметрычнай (шматфактарнай) ацэнкі якасці фібрабетону маналітных будаўнічых канструкцый, якая ўключае сукупнасць лабараторных выпрабаванняў, у спалучэнні з ацэнкай уласцівасцяў фібрабетону ў канструкцыі.

Эксперыментальна-практычныя вынікі дысертацыйных даследаванняў рэкамендуецца выкарыстоўваць пры падрыхтоўцы фібрабетону шматузроўневага армавання рознага прызначэння з павышанымі характарыстыкамі расколіна-ўстойлівасці, глейкасці разбурэння і дэфарматыўнасці; пры прыладзе маналітных канструкцый падлог і іншых пакрыццяў падвышанай эксплуатацыйнай надзейнасці; пры прыладзе (узвядзенні) танкасценных будаўнічых канструкцый з павышанымі патрабаваннямі ў частцы трываласці на розныя віды расцяжэння.

РЕЗЮМЕ

Садовская Елена Александровна

ТЕХНОЛОГИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА И СВОЙСТВА МОНОЛИТНОГО ФИБРОБЕТОНА МНОГОУРОВНЕВОГО АРМИРОВАНИЯ

Ключевые слова: фибра, наноуглерод, бетонная смесь, фибробетон, трещиностойкость, укладка, контроль качества, технология.

Цель исследования: разработать технологию строительства с применением тяжелого конструкционного фибробетона многоуровневого армирования.

Разработаны научно-практические основы усовершенствованной технологии монолитного строительства с применением фибробетона многоуровневого армирования, обеспечиваемого за счет комплексного применения нано-, микроармирующих структуру цементного камня углеродных нанотрубок (УНТ) в сочетании с макроармирующим эффектом от введенной в бетон стальной фибры. Установлено рациональное соотношение их в фибробетоне, соответствующее содержанию УНТ порядка 0,00075 % от массы цемента и стальной фибры ~1,0 % от объема бетона, что в совокупности обеспечивает повышение прочности на растяжение при изгибе до 105 %, осевое растяжение при раскалывании до 77 %, величины прогиба при максимальной нагрузке и значительный рост параметров трещиностойкости (K_{IC} , K_{IIIC} , K_{IIIIC} , J , ϕ , G и др.).

Разработаны основные положения организации технологического процесса ведения бетонных работ с применением фибробетона многоуровневого армирования на примере устройства полов зданий промышленного или иного назначения с подбором комплекта соответствующего современного оборудования, обеспечивающего качественное ведение работ, а на этой основе – качество конструкции пола, либо устраиваемых покрытий.

Предложена и апробирована в производственных условиях авторская методика многопараметрической (многофакторной) оценки качества фибробетона монолитных строительных конструкций, включающая совокупность лабораторных испытаний, в сочетании с оценкой свойств фибробетона в конструкции.

Экспериментально-практические результаты диссертационных исследований рекомендуется использовать при приготовлении фибробетона многоуровневого армирования различного назначения с повышенными характеристиками трещиностойкости, вязкости разрушения и деформативности; при устройстве монолитных конструкций полов и иных покрытий повышенной эксплуатационной надежности; при устройстве (возведении) тонкостенных строительных конструкций с повышенными требованиями в части прочности на разные виды растяжения.

SUMMARY

Sadoyskaya Alena

CONSTRUCTION TECHNOLOGY AND PROPERTIES OF MONOLITHIC FIBER CONCRETE WITH MULTILEVEL REINFORCEMENT

Key words: fiber, nanocarbon, concrete mixture, fiber-reinforced concrete, crack resistance, laying, quality control, technology.

Purpose of the study: to develop a construction technology using heavy structural fiber-reinforced concrete with multi-level reinforcement.

Scientific and practical foundations have been developed for an improved technology of monolithic construction using fiber-reinforced concrete with multi-level reinforcement, provided through the integrated use of nano-, micro-reinforcing the structure of the cement stone, carbon nanotubes (CNTs), in combination with the macro-reinforcing effect of steel fiber introduced into the concrete.

A rational ratio of them in fiber-reinforced concrete has been established, corresponding to a CNT content of about 0.00075 % of the mass of cement and steel fiber of ~1.0 % of the volume of concrete, which together provides an increase in tensile strength during bending up to 105 %, axial tensile during splitting up to 77 %, the deflection value at maximum load and a multiple increase in crack resistance parameters (K_{IC} , K_{IIC} , K_{IIIC} , J , ϕ , G etc.).

The main provisions for organizing the technological process of conducting concrete work using fiber-reinforced concrete with multi-level reinforcement have been developed using the example of installing floors in buildings for industrial or other purposes with the selection of a set of appropriate modern equipment that ensures high-quality work, and on this basis - the quality of the floor structure or construction coatings.

The author's method of multiparametric (multifactorial) assessment of the quality of fiber-reinforced concrete of monolithic building structures, including a set of laboratory tests, in combination with an assessment of the properties of fiber-reinforced concrete in a structure, was proposed and tested in production conditions.

It is recommended to use the experimental and practical results of dissertation research in the preparation of fiber-reinforced concrete for multi-level reinforcement for various purposes with increased characteristics of crack resistance, fracture toughness and deformability; when installing monolithic structures of floors and other coatings of increased operational reliability; when installing (constructing) thin-walled building structures with increased requirements in terms of strength for different types of tension.



Научное издание

САДОВСКАЯ
Елена Александровна

**ТЕХНОЛОГИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА И СВОЙСТВА
МОНОЛИТНОГО ФИБРОБЕТОНА
МНОГОУРОВНЕВОГО АРМИРОВАНИЯ**

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.23.08 – технология и организация строительства

Подписано в печать 15.04.2024. Формат 60×84 ¹/₁₆. Бумага офсетная. Цифровая печать.

Усл. печ. л. 1,63. Уч.-изд. л. 1,54. Тираж 100. Заказ 255.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск.