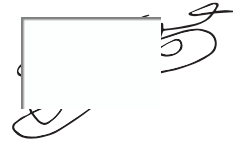


*На правах рукописи*



**КОСТРИКИН Максим Павлович**

**ДИСПЕРСНО АРМИРОВАННЫЕ БЕТОНЫ  
С ПРИМЕНЕНИЕМ СИНТЕТИЧЕСКОЙ  
МАКРОФИБРЫ**

Специальность 2.1.5. Строительные материалы и изделия

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2022

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,  
член-корреспондент РААСН  
**Пухаренко Юрий Владимирович**

Официальные оппоненты: **Хежев Толя Амирович**  
доктор технических наук, профессор  
ФГБОУ ВО «Кабардино-Балкарский государственный университет им. Х.М. Бербекова», институт архитектуры, строительства и дизайна, директор института;

**Смирнова Ольга Михайловна**  
кандидат технических наук, доцент  
ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский горный университет», кафедра строительства горных предприятий и подземных сооружений, доцент;

Ведущая организация: **ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева».**

Защита состоится «09» июня 2022 г. в 12<sup>00</sup> часов на заседании диссертационного совета **24.2.380.04** при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4, зал заседаний диссертационного совета (аудитория 220). Тел./Факс: (812) 316-58-73; E-mail: rector@spbgasu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и на сайте <http://dis.spbgasu.ru/specialty/personal/kostrikin-maksim-pavlovich>

Автореферат разослан «12» апреля 2022 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Конюшков Владимир Викторович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Требования к бетону и железобетону, которые по-прежнему остаются основными конструкционными материалами в строительстве, постоянно повышаются. В связи с этим на их основе всё активнее разрабатываются материалы, как правило, композитной структуры, имеющие улучшенные физико-механические характеристики. К числу таких высококачественных строительных композитов относятся современные фиброармированные бетоны, которые приобретают все большую популярность. Для армирования бетонов применяются металлические и неметаллические волокна разных размеров и формы, в ряду которых синтетическая макрофибра появилась сравнительно недавно и потому является наименее изученной. Тем не менее, такие волокна уже используются при производстве изделий и конструкций в составе фиброармированных бетонов, часто без проведения необходимых для этого подробных исследований. При этом известно, что отдельно взятые виды волокон, избирательно улучшая отдельные характеристики бетона, оказывают незначительное влияние на другие, поэтому дальнейшее развитие методов дисперсного армирования следует направить на комбинирование различных видов фибры, позволяющее совместить их положительные качества в одном композите. Однако, пока вопросам полиармирования уделяется мало внимания, а имеющаяся информация порой свидетельствует о противоречивости получаемых результатов исследований, что снижает объемы применения фиброармированных бетонов. В связи с вышеизложенным становится очевидной актуальность дальнейшей разработки перспективных вариантов дисперсного армирования фибробетонов и изучения их физико-механических, энергетических и деформативных характеристик для повышения технико-экономической эффективности, надежности и эксплуатационной безопасности конструкций зданий и сооружений.

Диссертационные исследования выполнены в соответствии с Планом фундаментальных научных исследований РААСН и Минстроя РФ (раздел 7.4, тема 7.4.7. «Исследование и физико-механическое моделирование процессов деформирования фибробетонов на основе синтетической макрофибры») и при поддержке Комитета по науке и высшей школе Правительства Санкт-Петербурга в виде грантов для студентов и аспирантов вузов, выделенных по итогам конкурсов в 2016, 2017 и 2018 г.г.

**Степень разработанности темы исследования.** В разное время изучением вопросов структурообразования и формирования свойств фибробетонов, разработкой составов, методов расчета и проектирования фиброжелезобетонных конструкций, определением эффективной области их применения занимались многие отечественные и зарубежные учёные. Результаты проведённых теоретических и экспериментальных исследований послужили основой для создания технологии дисперсно армированных бетонов и продолжают оказывать значительное влияние на ее развитие. Так, появившиеся в последние годы новые разновидности дисперсной арматуры (в том числе синтетическая макрофибра) определяют необходимость подробного изучения их особенностей, характера и сте-

пени взаимодействия с бетонной матрицей, влияния на свойства получаемых композитов и определения областей их рационального применения, что является логическим продолжением проведённых ранее исследований.

**Цель исследования** заключается в разработке научно обоснованных технологических решений, обеспечивающих улучшение эксплуатационных свойств бетонов путем армирования низко модульными синтетическими макро- и микроволокнами.

**Задачи исследования:**

- обоснование эффективности использования низко модульных синтетических волокон в составе дисперсно армированных бетонов;
- исследование механизма взаимодействия синтетических волокон с бетонной матрицей под нагрузкой и разработка физико-механической модели деформирования фибробетона, армированного низко модульными синтетическими волокнами;
- определение физико-механических, энергетических и деформативных характеристик фибробетонов, армированных низко модульными синтетическими макро- и микроволокнами, а также их комбинациями;
- разработка составов фибробетонов с использованием низко модульных синтетических волокон, предназначенных для решения конкретных задач, связанных с опытно-промышленной апробацией полученных результатов и их технико-экономической оценкой;
- разработка проектов нормативно-технических документов, регламентирующих применение синтетических волокон в составах фиброармированного бетона при изготовлении изделий и конструкций.

**Объект исследования** – фибробетоны, изготовленные с применением различных видов синтетических волокон.

**Предмет исследования** – составы и свойства бетонов, армированных низко модульными синтетическими макро- и микроволокнами.

**Научная новизна исследования** заключается в достижении следующих конкретных результатов:

1. Установлена роль синтетической макрофибры в формировании свойств и обоснована эффективность ее использования для дисперсного армирования бетона, в том числе в комбинации с другими известными видами низко модульных волокон.
2. Предложена методика определения прочности сцепления низко модульных синтетических волокон с бетонной матрицей, в соответствии с которой с высокой степенью достоверности получены данные о характере и степени взаимодействия таких волокон с цементным камнем в составе фибробетона.
3. Получены новые экспериментальные данные о влиянии низко модульных волокон на свойства цементного бетона и предложена физико-механическая модель деформирования фибробетона, армированного низко модульными синтетическими волокнами, позволяющая прогнозировать его поведение под нагрузкой.

**Теоретическая значимость работы** заключается в определении границ эффективного использования низко модульных синтетических волокон в качестве дисперсной арматуры, характера и степени их взаимодействия с бетонной матрицей и в разработке модели, позволяющей прогнозировать прочность и характеристики трещиностойкости фибробетона под нагрузкой в зависимости от вида, размеров и объемного содержания фибр в составе композита.

**Практическая значимость** заключается в разработке составов фибробетонов с использованием низко модульных синтетических макро волокон, предназначенных для решения конкретных прикладных задач, связанных с получением эффективных строительных изделий и конструкций.

По результатам исследований разработаны «Рекомендации по изготовлению фибробетонных изделий и конструкций с синтетической фиброй производства ООО «Руссеал», которые переданы ООО «Руссеал» для дальнейшего практического использования.

Результаты экспериментальных исследований и теоретические положения, полученные при выполнении диссертационной работы, используются кафедрой технологии строительных материалов и метрологии ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» в учебном процессе при подготовке магистров по направлению «Строительство».

**Методология и методы исследования.** Теоретические и экспериментальные исследования проведены с учетом результатов, полученных ведущими учеными Российской Федерации, а также зарубежными специалистами, в области дисперсно армированных бетонов. В процессе исследования применялись методы, установленные действующими нормативно-техническими документами, а также оригинальные методы, разработанные в СПбГАСУ.

**Положения, выносимые на защиту:**

– обоснование роли низко модульных синтетических микро- и макро волокон в формировании структуры и свойств фибробетона и целесообразности их использования в составе композита;

– результаты исследования механизма взаимодействия синтетических волокон с бетонной матрицей под нагрузкой и разработка методики определения прочности сцепления армирующих волокон с бетонной матрицей;

– разработка физико-механической модели деформирования фибробетона, армированного низко модульными синтетическими волокнами и результаты прогнозирования его прочности и трещиностойкости с применением предложенной модели;

– обоснование границ эффективности дисперсного моно- и полиармирования бетона низко модульными синтетическими макро- и микро волокнами на основе экспериментальных данных о прочности, трещиностойкости, показателях долговечности и эксплуатационной надежности фибробетонов, полученных на их основе;

– составы фибробетонов с использованием низко модульных синтетических волокон для получения строительных изделий и конструкций с улучшенными технико-экономическими показателями.

**Область исследования** соответствует требованиям паспорта научной специальности ВАК: 2.1.5. (05.23.05) Строительные материалы и изделия, а именно пункту 6. Создание теоретических основ получения строительных композитов гидратационного твердения и композиционных вяжущих веществ и бетонов.

**Степень достоверности и апробация результатов.**

Достоверность диссертационной работы обеспечивается применением общепринятых гипотез и допущений, апробированных методик проведения испытаний с использованием метрологически поверенного лабораторного оборудования, удовлетворительным согласием результатов экспериментальных и теоретических исследований, а также их повторяемостью.

Основные положения диссертационной работы обсуждались и одобрены на международных («Композиционные материалы и конструкции в современном строительстве» FIBROMIX-2018 и FIBROMIX-2019); «Современные материалы и передовые производственные технологии СМПТ-2019»; «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении ISMTMTE-2020»), I Всероссийской («Строительное материаловедение: настоящее и будущее», 2020 г.) а также 5-ти научных конференциях профессорско-преподавательского состава, аспирантов и молодых ученых СПбГАСУ.

**Публикации.** Материалы диссертации опубликованы в 13 печатных изданиях общим объемом 8,46 п.л., лично автором – 4,62 п.л., из них 4 в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов, утвержденный ВАК РФ.

**Личный вклад автора.** Автором самостоятельно сформулирована цель работы, определены задачи для ее достижения и сформулирована научная гипотеза, выполнен аналитический обзор технической литературы по теме диссертации, комплекс теоретических и экспериментальных исследований, разработаны рекомендации для последующей реализации полученных результатов в производственных условиях, подготовлены публикации с изложением основных результатов исследования.

**Структура и объём диссертационной работы.**

Диссертация состоит из введения, 5 глав с выводами по каждой из них, общих выводов, списка использованной литературы и приложений. Работа представлена на 191 странице, содержит 41 рисунок, 24 таблицы, список литературы содержит 136 наименований.

*Во введении* сформулирована проблема и обоснована актуальность проводимых исследований, представлены цель и задачи, научная и практическая значимость.

*В первой главе* приведён анализ литературных данных по теме диссертации, рассмотрено современное состояние науки о фибробетонах, новые дости-

жения, а также некоторые противоречивые результаты исследований в области бетонов, армированных низкомолекулярными синтетическими волокнами.

*Во второй главе* приводится характеристика материалов, оборудования и методов испытаний, использованных в диссертационном исследовании. Подробно описываются методики определения характеристики сцепления волокон с матрицей, показателей трещиностойкости фибробетона при статическом нагружении и водонепроницаемости.

*В третьей главе* представлен анализ механизма взаимодействия синтетических волокон с матрицей под нагрузкой и теоретическая модель деформирования и разрушения фибробетонов, армированных низкомолекулярными волокнами, а также результаты расчетов, выполненные в соответствии с предложенной моделью, в сравнении с экспериментальными данными.

*В четвертой главе* приводятся результаты физико-механических испытаний бетонов и фибробетонов, армированных синтетическими макро- и микро-волокнами в отдельности и их комбинациями в составе дисперсно армированных композитов.

*В пятой главе* приведены составы фибробетонов, разработанные с учётом полученных в диссертации результатов, с обоснованием эффективности применения низкомолекулярных синтетических волокон при производстве аэродромных плит покрытия.

*В заключении* изложены основные итоги выполненного исследования и сделаны предложения о возможных направлениях его продолжения.

## **ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ДИССЕРТАЦИИ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ**

### **1. Обоснование роли низкомолекулярных синтетических микро- и макро-волокон в формировании структуры и свойств фибробетона и целесообразности их использования в составе композита**

Степень улучшения структуры и свойств фибробетона и, следовательно, эффективность дисперсного армирования, в первую очередь зависят от вида применяемых волокон (фибр), которые по отношению к тяжелому бетону могут быть высоко- и низкомолекулярными. При этом, эффективность высокомолекулярных волокон неоднократно доказана многолетними исследованиями, опытом практической работы и, главным образом, проявляется в повышении прочности и трещиностойкости бетона под нагрузкой. Не менее убедительными представляются результаты, указывающие на положительное влияние низкомолекулярных синтетических (чаще всего полипропиленовых) волокон на структуру и некоторые важнейшие характеристики бетонов. Показано, что при введении в достаточном количестве в смеси формируется пространственный каркас из этих волокон, окружённых плотным и прочным слоем гидратных новообразований, образующих контактные зоны. Структурное единство фибры, контакт-

ных зон и бетонной матрицы приводит к улучшению поровой структуры бетона, увеличению его стойкости и долговечности. Так, в некоторых литературных источниках заявляется о возможности двукратного повышения водонепроницаемости (с  $W8$  до  $W16$ ) и увеличения морозостойкости (с  $F400$  до  $F600$ ) бетона при его армировании 1,2 кг/м<sup>3</sup> полипропиленовой микрофибры диаметром 18 мкм. Отмечается позитивный вклад синтетических волокон в сдерживание возможного трещинообразования от усадки в процессе твердения бетона и последующей эксплуатации конструкций. Авторы многих работ отмечают, что использование синтетических волокон в определенной концентрации (1...3% об) оказывает положительное влияние на ударостойкость цементных композитов и позволяет получить материал, не уступающий по этой характеристике сталефибробетону. Помимо этого, возникают эффекты, свойственные только синтетическим волокнам и подчеркивающие их индивидуальность. Так, армирование синтетическими микроволокнами позволяет повысить стойкость бетонов к действию высоких температур и снижает риск взрывного разрушения конструкций, что повышает их эксплуатационную надежность и безопасность при пожаре. Согласно существующему мнению, синтетическая микрофибра, выгорая при сравнительно низких температурах, образует систему открытых пор и капилляров, через которые вода свободно выходит в виде пара, не создавая давления, приводящего к взрывному разрушению.

Развивая данные положения с учетом полученных теоретических и экспериментальных данных, следует отметить, что синтетическая фибра, взаимодействуя с цементной составляющей, «выполняет важную структурообразующую роль в бетоне и служит в качестве подложки для формирования контактных зон повышенной плотности и прочности на границе раздела фаз». При достаточном насыщении она образует «пространственный фиброцементный каркас», благодаря высокой степени дисперсности и непрерывности которого «создается энергетический барьер на пути распространения трещин в композите при эксплуатационных нагрузках».

Вместе с тем, на фоне приведенных выше положительных результатов исследований, до сих пор не получен однозначный ответ о характере и степени влияния низко модульных синтетических волокон на прочностные характеристики цементных композитов. Так, во многих публикациях, относящихся к 80-90 годам, отмечается снижение прочностных характеристик бетона при армировании такими волокнами на 5...15%. В более поздних работах отечественные и зарубежные исследователи, ограничивая расход синтетических микроволокон в мелкозернистой матрице 4 кг/м<sup>3</sup>, заявляют, что «предел прочности при сжатии повысился до 32% и предел прочности при изгибе до 64%». Однако в исследованиях, результаты которых опубликованы в последние несколько лет, вновь наблюдаются противоречия: то отмечается увеличение прочностных показателей бетона на синтетической микрофibre, то наоборот – их уменьшение. В частности, указывается, что «применение полипропиленовой фибры увеличивает прочность при изгибе примерно в 2 раза, при этом прочность при сжатии снижает-



ся на 9...19 %.» Таким образом, следует признать, что вопрос о положительном или отрицательном влиянии синтетических микроволокон на прочность бетона требует дальнейшего и более подробного рассмотрения.

Устойчивый интерес к фибровому армированию во всем мире послужил основой для разработки и начала производства синтетических макроволокон (синтетической макрофибры), которые отличаются увеличенными, по сравнению с микрофibrрой, размерами (диаметр их достигает нескольких миллиметров, длина – десятков миллиметров), а также различным характером поверхности и формой поперечного сечения. С появлением данной разновидности фибры ситуация с влиянием низко модульных волокон на прочность цементного бетона стала еще более запутанной. Информация об опыте применения синтетических макроволокон достаточно немногочисленна и представлена, в основном, зарубежными источниками, а выводы, сделанные по результатам этих исследований, по-прежнему противоречивы, как и в случае использования микроволокон.

Таким образом, несмотря на значительный объем проведенных исследований, вопросы применения низко модульных синтетических волокон изучены недостаточно, а описанные в научно-технической литературе результаты имеют множество противоречий, не позволяющих составить четкого представления о целесообразности их использования. Очевидно, требуется продолжение исследований, в ходе которых особое внимание следует уделить характеру и степени взаимодействия синтетических волокон с бетонной матрицей под нагрузкой и другими воздействиями, что в свою очередь позволит сформулировать предложения по повышению эффективности их применения в качестве дисперсной арматуры.

### ***Научная гипотеза***

Получение высококачественных фибробетонов и улучшение эксплуатационных свойств изделий и конструкций при армировании низко модульными синтетическими микро- и макро волокнами обеспечивается созданием плотного и прочного контакта с бетонной матрицей и возможностью его регулирования на соответствующем структурном уровне при использовании указанных волокон в отдельности, а также комплексным (суммарным) эффектом при их комбинировании в оптимальных количествах в составе дисперсного полиармирования.

## **2. Определение механизма и степени взаимодействия синтетических микро- и макроволокон с бетонной матрицей под нагрузкой**

Как и при традиционном армировании, упрочнение волокнами предполагает передачу усилий от утратившей несущую способность бетонной матрицы волокнам посредством касательных напряжений, действующих по поверхности раздела. Очевидно, для повышения прочности получаемого композита по сравнению с исходным бетоном необходимо, чтобы собственная прочность волокон также была достаточно высокой. При этом, для реализации потенциальных возможностей фибрового армирования необходимо обеспечить совмест-

ную работу волокон и матрицы путем создания надлежащего сцепления на границе раздела фаз.

Промышленно выпускаемые синтетические волокна отличаются большим разнообразием размеров, форм поверхности и поперечного сечения, что обусловлено стремлением производителей к повышению прочности сцепления их с бетоном, величина которой существенно ниже, чем у волокон, изготовленных из других материалов, например, стальных. Кроме того, отличительным признаком синтетической фибры является низкий, по сравнению с обычным бетоном, модуль упругости, от которого, как известно, во многом зависит его трещиностойкость. Следует ожидать, что характер и степень взаимодействия синтетических макро- и микроволокон с бетонной матрицей и, соответственно, свойства получаемого фибробетона будут отличаться от других известных вариантов фиброармированных цементных композитов.

Для детального изучения поведения фибробетона, армированного синтетическими волокнами, под нагрузкой проведены экспериментальные исследования, в которых были использованы три популярных вида низко модульной фибры (рис. 1): макро волокна периодического профиля *Durus S500*, макро волокна с гладкой поверхностью *Strofiber* и микроволокна *Fibrin XT*.

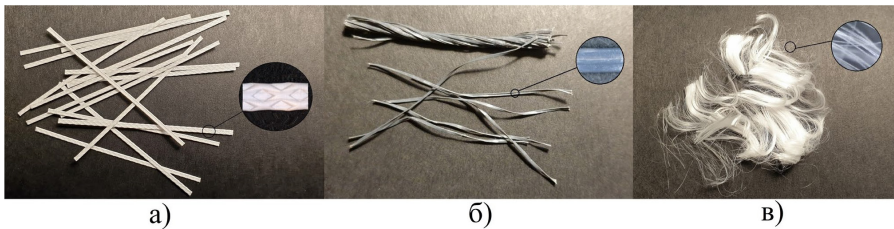


Рис. 1 – Используемые в исследовании волокна:

а) *Durus S500* б) *Strofiber*; в) *Fibrin XT*

По результатам испытания на изгиб изготовленных фиброармированных образцов построены диаграммы деформирования под нагрузкой, которые, независимо от применяемой фибры, имеют подобный вид, представленный на рис. 2.

На рисунке видно, что диаграмма включает четыре характерных участка, обозначенных соответствующими отрезками *OT*, *TC*, *KF* и *FD*. При этом, точка *T* ограничивает зону упругих деформаций, в пределах которой прилагаемую нагрузку в основном воспринимает матрица, а низко модульные волокна, выполняя роль маложестких включений, препятствуют движению дислокаций и образованию микротрещин. Участок *TC* характеризует упругопластическое состояние материала, и точка *C* представляет собой некий перколяционный порог, при достижении которого заканчивается процесс образования и слияния микротрещин и происходит практически мгновенная передача усилий от разрушенной матрицы армирующим волокнам. Таким образом, точка *K* определяет уровень напряжений в момент начала движения магистральной трещины (момент равновесия внутренних и внешних сил). Точка *F* соответствует максимальному значению

деформаций, при котором нарушается сцепление, и армирующие волокна начинают вытягиваться из матрицы, а процесс разрушения приобретает необратимый характер. Точка *D* определяет величину максимального прогиба образца в момент разрушения (конец испытания).

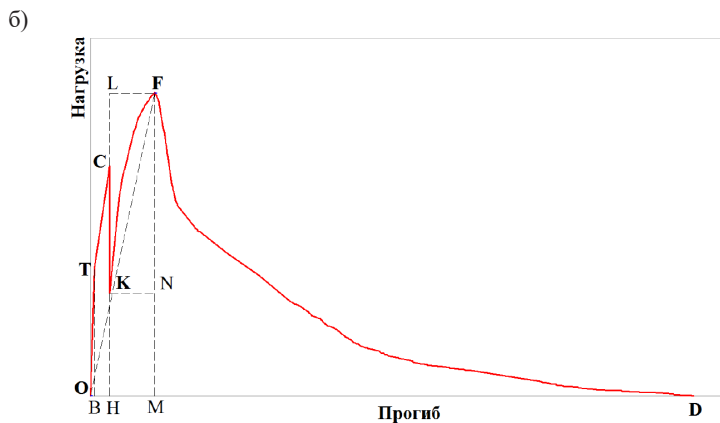
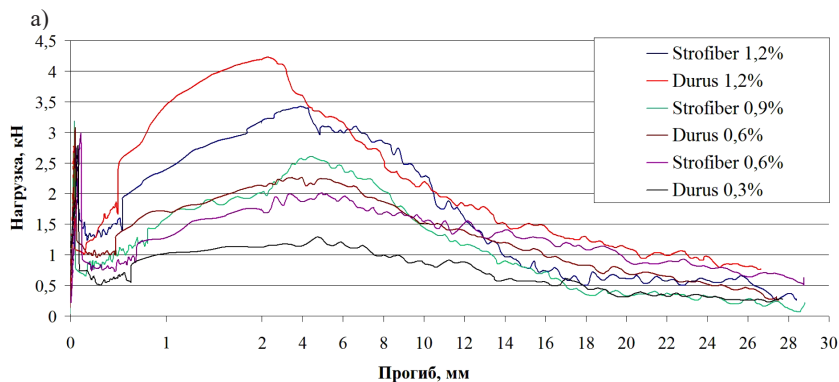


Рис. 2 – Полные диаграммы деформирования образцов, армированных синтетическими волокнами:

а) построенные по результатам испытаний; б) обобщенный вид

Следует отметить, что положение точки *T* на графике практически не меняется, так как определяется свойствами исходного бетона и почти не зависит от параметров дисперсного армирования низко модульными синтетическими волокнами. Другие характерные точки диаграммы (*C*, *K*, *F* и *D*) могут смещаться друг относительно друга в зависимости от вида, свойств и объемной концентрации применяемых волокон, в результате варьирования которых прочность фибробетона может оказаться ниже, равной или даже выше прочности исходного бетона, как показано на рис. 2. Такому повышению прочности композита способствует и изменение свойств бетонной матрицы в процессе нагружения, в частности,

уменьшение модуля деформации, который в какой-то момент становится равным или даже ниже модуля упругости армирующих волокон. Однако, следует понимать, что в данном случае мы имеем прочность материала с трещинами.

Что касается собственно трещин, то их возникновение под нагрузкой практически всецело зависит от свойств и состояния бетонной матрицы, а вот развитие этого процесса (вязкость разрушения) во многом определяется параметрами армирования. Согласно выполненным исследованиям, разрушение фибробетона, армированного синтетическими волокнами, начинается с разрыва элементарных связей и микротрещинообразования в матрице, продолжается при ее совместной работе с волокнами до образования магистральной трещины и нарушения сцепления в зоне контакта и заканчивается длительным и энергетически затратным периодом вытягивания волокон из бетона. Таким образом, вклад синтетических волокон в улучшение механических свойств цементного бетона заключается в повышении вязкости разрушения композита, которая главным образом определяется прочностью сцепления синтетической фибры с бетоном.

Различные виды армирующих волокон по-разному взаимодействуют с бетонной матрицей. Сцепление фибры с бетонной матрицей в композите «является результатом комбинированного проявления адгезионного взаимодействия, сил трения и механического зацепления в зоне контакта волокон и цементного камня. Вклад каждого из этих факторов в величину сцепления может быть различным и зависит от состава, структуры и свойств матрицы, вида волокон и их характеристик». Для оценки эффективности синтетических волокон в качестве дисперсной арматуры в диссертационном исследовании разработана упрощенная методика определения величины сцепления фибр с матрицей, которая является результатом продолжения работ, проводимых в данном направлении в СПбГАСУ в последние несколько лет.

Метод является расчётно-экспериментальным и позволяет с высокой точностью определять величину сцепления армирующих волокон с цементной матрицей. Сущность метода заключается в нахождении опытным путем такого минимального процента армирования, до которого эффект от введения волокон носит нерегулярный характер в связи с их случайным попаданием (непопаданием) в рабочее сечение образца при испытании, но после которого наблюдается устойчивый рост прочности композита. Согласно предлагаемой методике, в качестве исходной смеси используется цементное тесто нормальной густоты. При этом армированные и неармированные образцы получают из одного замеса, который делят на две части: из одной формуют цементные призмы, а в другую перед формованием добавляют волокна, как правило, в пределах 0,5–1,0 % по объему. По результатам испытаний строят графики, по которым определяют положение точки, соответствующей сформулированному выше условию, и рассчитывают величину сцепления волокон с матрицей.

В качестве примера использования предлагаемой методики определена величина сцепления с цементным камнем синтетической макрофибры *Durus S500*. В соответствии с предлагаемой методикой:

1. Из цементного теста нормальной плотности изготовили образцы-призмы размером  $70 \times 70 \times 280$  мм, которые после твердения в нормальных условиях в течение 28 суток испытали на растяжение при изгибе.

2. По результатам испытаний построили два графика:

– полные диаграммы деформирования цементных и фиброцементных образцов под нагрузкой (рис. 3);

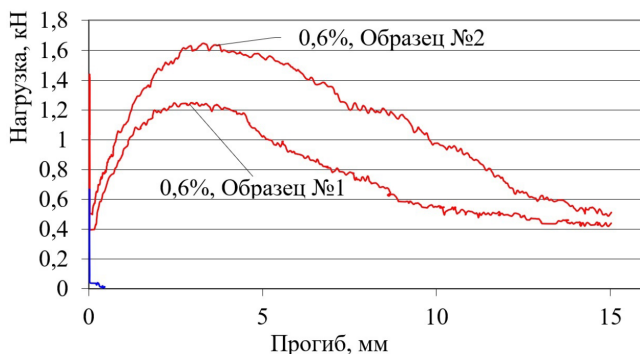


Рис. 3 – Диаграммы деформирования цементного камня и фиброцемента, армированного волокнами *Durus S500* (красные линии);

– графики, отражающие влияние концентрации волокон на величину нагрузки в момент образования трещин (синяя линия) и в момент разрушения (рис. 4).

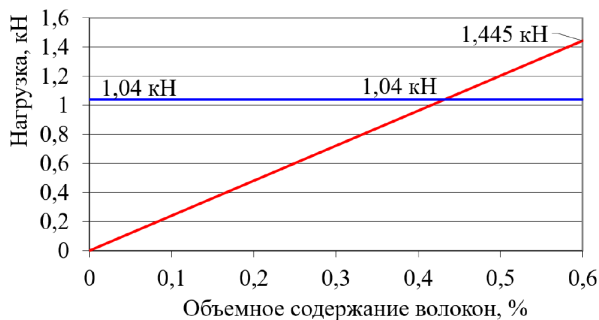


Рис. 4 – Нагрузки, воспринимаемые матрицей и волокнами в момент разрушения

3. Пересечение линий на рис. 4 определило координаты точки, соответствующей минимально необходимому количеству волокон для проявления ими армирующего эффекта.

4. Рассчитали характеристику сцепления армирующих волокон с матрицей по формуле

$$(\varphi\tau) = \frac{3Pl_o d}{4l_f \mu_f b h^2} \quad (1)$$

где:  $b$  и  $h$  – ширина и высота образца, м;  $l_o$  – расстояние между точками приложения нагрузки (база испытаний), м;  $P$  – нагрузка, кН;  $l_f$  – длина фибры, м;  $\mu_f$  – объемная доля фибры в точке пересечения;  $d$  – эквивалентный диаметр фибры, м;  $(\varphi)$  – «комплексный коэффициент, не требующий расшифровки при выполнении расчетов».

5. Выполнив перечисленные действия, получили величину сцепления синтетических макроволокон *Durus S500* с цементным камнем, равную 4,77 МПа.

Таким образом, изменяя состав исходного бетона и параметры армирования, варьируя размерами волокон и их объемным насыщением, можно управлять прочностью и вязкостью разрушения фибробетона.

### **3. Физико-механическая модель деформирования фибробетона, армированного низко модульными синтетическими волокнами**

Для теоретической оценки эффективности синтетических волокон в диссертационном исследовании предложена модель, полученная в результате анализа приведенных выше данных и позволяющая прогнозировать характеристики фибробетона до проведения экспериментальных исследований и, таким образом, направленно осуществлять выбор вариантов армирования.

Моделирование поведения фибробетона под нагрузкой включает определение координат ключевых точек на диаграмме деформирования (рис. 2), дополнительные построения и расчет силовых и энергетических характеристик трещиностойкости. Для построения диаграмм деформирования образцов с низко модульной фиброй, предложены теоретические зависимости, позволяющие определить местоположение точек  $T$ ,  $C$ ,  $K$ ,  $F$  и  $D$  (табл. 1).

Детальное рассмотрение экспериментальных диаграмм деформирования, полученных по результатам испытания фибробетонных образцов с разным содержанием синтетической фибры различных типоразмеров позволило сделать вывод о возможности определения координаты точки  $K$  путем геометрических построений. Для этого нужно из начала координат провести прямую через точку  $F$ , а из точки  $C$  восстановить перпендикуляр к горизонтальной оси. Пересечение этих линий укажет положение на диаграмме точки  $K$ .

В предложенных зависимостях можно выделить аргументы, определяющие свойства волокон: длина, диаметр, модуль упругости, объемное содержание в композите и прочность их сцепления с матрицей. Большинство из перечисленных величин представляют собой справочные данные, исключение составляет прочность сцепления волокон с матрицей, для определения которой можно использовать специальную расчетно-экспериментальную методику, разработанную в процессе проведения настоящего исследования.

По полученным таким образом диаграммам (рис. 5) рассчитываются значения характеристик трещиностойкости фибробетонов с использованием известных методов, в том числе изложенных в ГОСТ 29167 «Методы определения характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении» (табл. 2).

Таблица 1. Теоретические зависимости для определения координат ключевых точек на диаграмме деформирования

Точка на диаграмме	Координаты точки на диаграмме «нагрузка – прогиб»	
	нагрузка	прогиб
<i>T</i>	$P_T = \frac{f_T 48 E_{fb} I}{l_o^3} \quad (2)$ <p>где, <math>P_T</math> – нагрузка, действующая на образец; <math>f_T</math> – прогиб, соответствующий точке <math>T</math>; <math>I</math> – момент инерции; <math>l_o</math> – база образца (расстояние между опорами), <math>E_{fb}</math> – модуль упругости фибробетона, рассчитанный по правилу смесей:</p> $E_{fb} = \mu_b E_b + \varphi \mu_f E_f \quad (3)$ <p>где, <math>E_b</math> и <math>E_f</math> – модули упругости бетона (матрицы) и фибры; <math>\mu_b</math> и <math>\mu_f</math> – объемные доли бетона и фибры в составе композита. <math>\varphi</math> – экспериментальный комплексный коэффициент</p>	Принимается равным прогибу неармированного образца (0,03–0,04мм)
<i>C</i>	$P_C = \frac{2bh^2 R_{mb}}{3l_o}, \quad (4)$ <p>где: <math>R_{mb}</math> – прочность модифицированной матрицы:</p> $R_{fb} = 3,5 R_{кз} \mu_f + R_{fb} (1 - 4,5 \mu_f), \quad (5)$ <p>где: <math>R_b</math> и <math>R_{кз}</math> – прочность исходного бетона и контактной зоны на границе раздела «волокно-матрица»</p>	$f_C = \frac{P_C l_o^3}{48 E_{fb}^1 I}, \quad (6)$ <p>где: <math>E_{fb}^1</math> – модуль деформации фибробетона</p> $E_{fb}^1 = \nu_f E_{fb}, \quad (7)$ <p>где, <math>\nu_f</math> – коэффициент упругопластичности в момент, предшествующий разрушению матрицы и принимаемый для бетонов с низко модульными волокнами равным 0,8–0,9</p>
<i>F</i>	$P_F = \frac{2bh^2 R_{fb}}{3l_o}, \quad (8)$ <p>где: <math>R_{fb}</math> – прочность фибробетона, обеспеченная вытягиванием волокон из матрицы:</p> $R_{fb} = \frac{2(\varphi\tau)l_f\mu_f}{d} \quad (9)$	Определяется по формуле, аналогичной (6) с учётом нагрузки $P_F$ и коэффициента упругопластичности ( $\nu_f$ )
<i>D</i>	Нагрузка равна нулю, так как точка $D$ показывает окончание диаграммы (разрушение образца)	$f_D = 2 \frac{W_{fb}}{P_F} + f_F, \quad (10)$

Таблица 1. Окончание

Точка на диаграмме	Координаты точки на диаграмме «нагрузка – прогиб»	
	нагрузка	прогиб
$D$	где: $W_{fb}$ – энергозатраты на вытягивание волокон из матрицы: $W_{fb} = \frac{l_f^2(\varphi\tau)bh\mu_f}{6d} \quad (11)$	

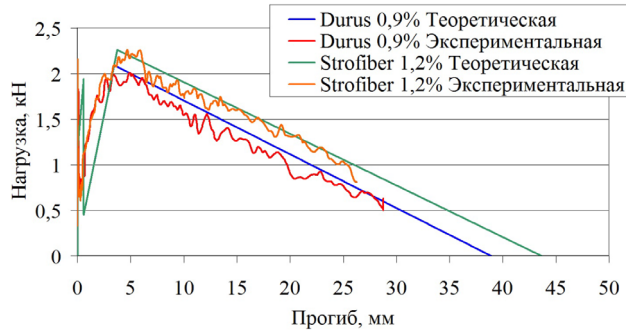


Рис. 5 – Экспериментальные и теоретические диаграммы для двух видов синтетических макроволокон

Таблица 2. Расчетные и экспериментальные характеристики трещиностойкости фибробетонов

№ п/п	Вид волокон	Процент армирования по объему	Характеристики трещиностойкости			
			$G_i^*$ , Дж/м <sup>2</sup>	$G_f^*$ , Дж/м <sup>2</sup>	$K_c^*$ , МПа·м <sup>0,5</sup>	$E$ , МПа×10 <sup>3</sup>
1	Бетон без волокон	0	28,3	226	0,91	29,8
2	Макрофибра Durus S500	0,3 – 1,2	28,0 – 27,0	1126 – 8633	0,91 – 1,14	29,8 – 38,2
			25,3 – 26,1	1932 – 8142	1,10 – 1,07	30,1 – 31,2
3	Макрофибра Strofiber	0,3 – 0,9	20,9 – 23,8	1126 – 3231	0,86 – 1,14	34,1 – 36,5
			24,9 – 25,9	958 – 4451	1,10 – 1,07	30,6 – 32,1

Примечания:

–  $G_i^*$  – условные удельные энергозатраты на статическое разрушение до момента начала движения магистральной трещины;  $G_f^*$  – условные удельные эффективные энергозатраты на статическое разрушение;  $K_c^*$  – условный критический коэффициент интенсивности напряжений;  $E$  – модуль упругости;

– значения характеристик в числителе – экспериментальные, в знаменателе – расчетные.



Сравнение численных значений полученных характеристик, при всех наблюдаемых расхождениях, позволяет сделать вывод о принципиальном совпадении теоретических и экспериментальных данных, что доказывает справедливость принятых допущений и подходов при моделировании поведения фибробетона с синтетическими волокнами под нагрузкой.

#### 4. Исследование прочности, трещиностойкости, показателей долговечности и эксплуатационной надежности фибробетонов, моно- и полиармированных низкомодульными синтетическими микро- и макроволокнами

В ходе выполнения диссертационного исследования произведены сравнительные испытания физико-механических характеристик обычных и мелкозернистых бетонов, армированных низкомодульными синтетическими волокнами. В табл. 3 представлены результаты испытаний образцов крупнозернистого бетона класса В25, армированного синтетическими волокнами разных видов в оптимальных количествах.

Таблица 3. Результаты испытаний прочности, трещиностойкости и показателей долговечности бетонов класса В25, армированных синтетическими волокнами

№ п/п	Показатели	Значение показателей при использовании волокон			
		Бетон без волокон	Микрофибра <i>Fibrin XT</i> (0,2% об)	Макрофибра <i>Durus S500</i> (0,9 % об)	Макрофибра <i>Strofiber</i> (0,6 % об)
1	$\rho_{cp}$ , кг/м <sup>3</sup>	2346	2368	2379	2350
2	$R_{сж}$ , МПа	33,9	36,9	40,7	38,4
3	$R_{изг}$ , МПа	4,63	4,62	8,41	6,65
4	$G_i^*$ , Дж/м <sup>2</sup>	28,3	32,1	27,4	23,1
5	$G_f^*$ , Дж/м <sup>2</sup>	226	254	8633	2587
6	$K_c^*$ , МПа·м <sup>0,5</sup>	0,91	0,87	1,14	1,01
7	$E$ , МПа×10 <sup>3</sup>	29,8	24,7	38,2	34,1
8	Морозостойкость, число циклов	220	340	350	300
9	Марка по водонепроницаемости	<i>W8</i>	<i>W14</i>	<i>W10</i>	<i>W10</i>
10	Истираемость, г/см <sup>2</sup>	0,77	0,56	0,47	0,68

Из таблицы следует, что армирование обычного бетона низкомодульными синтетическими макроволокнами периодического профиля позволяет повысить его прочность на сжатие до 22% и на изгиб до 1,8 раз. На 80% может быть увеличено число циклов замораживания и оттаивания, которые способен выдержать фибробетон, а водонепроницаемость может быть улучшена на одну марку (с *W8* до *W10*). Использование таких макроволокон способствует снижению истираемости на 64% по сравнению с неармированным бетоном того же состава.

ва. Очевидно, такое улучшение свойств исходного бетона является следствием формирования прочного сцепления волокон с матрицей на границе раздела фаз.

Следует отметить, что еще большее влияние на водонепроницаемость бетона оказывает армирование синтетической микрофиброй, увеличивая данную характеристику практически вдвое (с *W8* до *W14*), что косвенно свидетельствует о ее положительной роли в формировании структуры цементного композита благодаря высокой степени дисперсности армирования.

Для одновременной реализации отмеченных преимуществ макро- и микроволокон, было принято решение о составлении из них единых комбинаций с учетом концентраций, показавших наибольшую эффективность при использовании этих волокон в отдельности (табл. 4). При использовании подобных комбинаций волокон в оптимальных количествах, можно получить композит, сочетающий в себе как повышенные прочностные характеристики, свойственные бетонам, армированным макрофиброй, так и высокие показатели долговечности, которые приобретают бетоны, армированные синтетическими микроволокнами.

Таблица 4. Физико-механические характеристики образцов, полиармированных синтетическими волокнами

№ п/п	Вид волокон	Характеристики					
		$\rho_{\text{ср}}^{\text{с}}$ , кг/м <sup>3</sup>	$R_{\text{сж}}^{\text{с}}$ , МПа	$R_{\text{изг}}^{\text{с}}$ , МПа	Водонепр-ть, марка	Морозост-ть, число циклов	Истир-ть, см <sup>2</sup> /г
1	<i>Durus S500</i> (0,9% об) <i>Fibrin XT</i> (0,1% об)	2365	41,3	8,83	<i>W12</i>	330	0,51
2	<i>Durus S500</i> (0,9% об) <i>Fibrin XT</i> (0,2% об)	2341	41,0	9,03	<i>W14</i>	355	0,51
3	<i>Durus S500</i> (1,2% об) <i>Fibrin XT</i> (0,1% об)	2381	42,6	11,3	<i>W14</i>	360	0,46
4	<i>Durus S500</i> (1,2% об) <i>Fibrin XT</i> (0,2% об)	2372	41,3	9,11	<i>W12</i>	375	0,44

Из приведенных данных следует, что полиармирование бетона низкомолекулярными волокнами является перспективным направлением улучшения качества цементного бетона. Наиболее эффективными в данном случае следует считать составы №№ 2 и 3, содержащие 0,9% макроволокон и 0,2% микроволокон, а также 1,2% макроволокон и 0,1% микроволокон соответственно. Данные составы близки по своим характеристикам и показали повышение прочности на изгиб относительно контрольного состава в 1,9 и 2,4 раз соответственно, повышение водонепроницаемости на 3 марки (от *W8* до *W14*), морозостойкости – на 64%, стойкости к истирающим воздействиям – на 59%.

Важный раздел диссертационного исследования составляют вопросы влияния синтетических волокон на огнестойкость бетона и пожарную безопасность строительных конструкций. Характерной особенностью разрушения бетона (в особенности, работающего в условиях повышенной влажности) при нагревании до

высоких температур является так называемое «взрывное» разрушение. Причиной этого является переход воды, содержащейся в порах и капиллярах, в газообразное состояние с увеличением в объёме до 1700 раз и, соответственно, с резким повышением давления водяного пара до 7...12 атм, что вызывает растягивающие напряжения в бетоне, значительно превышающие предел его прочности. Одним из способов противодействия взрывному разрушению бетона отечественные и зарубежные специалисты считают применение фибрового армирования. Согласно существующему мнению, синтетическая микрофибра, выгорая при сравнительно низких температурах, образует систему открытых пор и капилляров, через которые вода свободно выходит в виде пара, не создавая давления, приводящего к взрывному разрушению. Однако, существующие методики не дают возможности произвести количественную оценку данного эффекта, позволяя лишь визуально оценить степень повреждения конструкций или определить снижение их несущей способности. Учитывая это, в диссертации предложен способ, суть которого заключается в сравнительной оценке проницаемости бетонов и фибробетонов, прошедших высокотемпературную обработку. Изменение проницаемости может служить характеристикой состояния структуры фибробетонов после выгорания волокон и образования системы сообщающихся пор, через которые при пожаре будет выходить вода в виде пара. Проницаемость образцов оценивалась по величине коэффициента фильтрации, показывающего количество воды, прошедшей через образец за определённое время при фиксированном давлении при помощи лабораторной установки *Matest C430*.

В табл. 5 представлены результаты испытания водопроницаемости бетонных и фибробетонных образцов по коэффициенту фильтрации.

Таблица 5. Влияние температуры нагревания на проницаемость фибробетона

Объемный процент армирования	Коэффициент фильтрации ( $K_f$ , см/с) после нагрева до температуры			
	20°C	200°C	400°C	600°C
Бетон без волокон	$1,80 \cdot 10^{-13}$	$1,46 \cdot 10^{-9}$	$5,49 \cdot 10^{-9}$	—*
0,1	$1,96 \cdot 10^{-14}$	$5,84 \cdot 10^{-9}$	$5,19 \cdot 10^{-7}$	$1,83 \cdot 10^{-6}$
0,3	$1,50 \cdot 10^{-12}$	$1,35 \cdot 10^{-8}$	$2,46 \cdot 10^{-6}$	$5,70 \cdot 10^{-6}$
0,5	$1,80 \cdot 10^{-12}$	$5,87 \cdot 10^{-8}$	$1,09 \cdot 10^{-6}$	$8,32 \cdot 10^{-6}$
0,7	$3,65 \cdot 10^{-12}$	$1,41 \cdot 10^{-7}$	$1,94 \cdot 10^{-6}$	$1,37 \cdot 10^{-5}$
0,9	$1,36 \cdot 10^{-7}$	$1,05 \cdot 10^{-7}$	$2,81 \cdot 10^{-6}$	$1,07 \cdot 10^{-5}$

\* *Примечание:* Образцы разрушились и не подлежат испытанию.

Анализ полученных данных показывает, что, несмотря на уменьшение водопроницаемости образцов после нагревания до 200°C, составы с 0,1% и 0,3% волокон сохраняют способность сопротивляться проникновению воды, практически, наравне с неармированным бетоном, и в этом случае следует ожидать значительного сопротивления выходу воды из толщи конструкции при пожаре. Однако, ни один из образцов, армированных синтетической микрофиброй, не показал при-

знаков взрывного разрушения в процессе нагрева, что свидетельствует о положительной роли дисперсного армирования для снижения вероятности взрывного разрушения композита. Очевидно, упрочняющее действие волокон при нагревании в указанном интервале температур усиливается по мере накопления в бетонной матрице микротрещин и других дефектов, в результате чего ее модуль деформации значительно понижается и в какой-то момент может оказаться даже ниже модуля упругости синтетической фибры, которая начинает работать как упрочнитель.

Из таблицы также следует, что после выдержки при температуре 400°C имеет место дальнейшее повышение проницаемости всех без исключения образцов, что является следствием полного выгорания полимерных волокон и появления на их месте сетки сквозных пор, капилляров и других дефектов, пронизывающих образец по всему объёму. Таким образом, гипотеза о значительном снижении риска возникновения взрывного разрушения конструкций при пожаре при использовании синтетических микроволокон подтверждается.

Выдержка образцов при 600°C приводит к практически полному разупрочнению композита вне зависимости от вида и расхода волокон. Обработанные при данной температуре образцы имеют значительное число дефектов и не способны сопротивляться фильтрации воды даже при минимальном давлении (0,2–0,3 МПа). В качестве положительного момента, связанного с дисперсным армированием, следует указать некоторую «наследственность» влияния волокон, которая, при определенном насыщении, выражается в большей сохранности структуры бетонной матрицы и остаточной прочности, что, в свою очередь, способствует сохранению целостности строительных конструкций и повышению их безопасности при пожаре.

### **5. Составы фибробетонов с использованием низко модульных синтетических волокон и технико-экономическая оценка строительных изделий и конструкций на их основе**

На основании проведённых исследований разработаны составы тяжелого фибробетона, армированного синтетическими волокнами с улучшенными физико-механическими характеристиками (табл. 6) и произведена оценка их эффективности при использовании в аэродромных плитах покрытий ПАГ-20.

Таблица 6. Составы фибробетона, разработанные по результатам исследований

Материал	Расход материалов на плиту ПАГ-20, кг		
	Бетон без фибры	Моноармированный фибробетон	Полиармированный фибробетон
1	2	3	4
Цемент	864	712	708
Песок	1452	1618	1608
Щебень	3000	2146	2134
Вода	388	361	361

Таблица 6. Окончание

1	2	3	4
Добавка-пластификатор нано-модифицированная	5,18	4,27	4,25
Стальная арматура (прутки, сетки)	197,1	101,5	101,5
Макрофибра	–	14,57	14,48
Микрофибра	–	–	3,32

Расчёты плиты по прогибам показали, что в случае использования синтетической макрофибры периодического профиля в количестве 0,8% можно отказаться от армирующих сеток и снизить толщину плиты с 200 мм до 170 мм с сохранением требуемых характеристик. Использование полидисперсно армированного фибробетона позволяет снизить толщину плиты до 170 мм и одновременно увеличить характеристики долговечности конструкции: морозостойкость на 64%, водонепроницаемость на 3 марки, стойкость к истиранию на 59%, что приводит к увеличению межремонтного периода и снижению затрат в период эксплуатации. Экономическая оценка проведённых изменений показала, что при армировании плиты синтетическими макроволоконками только материальные затраты снижаются на 1601 рубль, а при использовании комбинации макро- и микроволокон на 998 рублей на одно изделие.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### Итоги выполненного исследования

1. Определена роль низкомолекулярных синтетических волокон в формировании структуры и свойств фибробетона и обоснована целесообразность их использования в составе композита. Показано, что введение микрофибры в оптимальных количествах приводит к улучшению поровой структуры бетона, увеличению его стойкости и долговечности, снижает риск возникновения взрывного разрушения конструкций при пожаре, а макрофибра способствует повышению прочности и структурной целостности композита под нагрузкой.

2. Установлено, что разрушение фибробетона, армированного синтетическими волокнами, начинается с разрыва элементарных связей и микротрещинообразования в матрице, продолжается при ее совместной работе с волокнами до образования магистральной трещины и нарушения сцепления в зоне контакта и заканчивается длительным и энергетически затратным периодом вытягивания волокон из бетона. Таким образом, вклад синтетических волокон в улучшение механических свойств цементного бетона заключается в повышении вязкости разрушения композита, которая главным образом определяется прочностью сцепления синтетической фибры с бетоном.

3. Предложен расчётно-экспериментальный метод, позволяющий с высокой точностью определять величину сцепления армирующих волокон с цементной матрицей.

4. Предложена модель деформирования под нагрузкой и теоретические зависимости, позволяющие прогнозировать характеристики фибробетона до проведения экспериментальных исследований и, таким образом, направленно осуществлять выбор вариантов армирования.

5. В результате экспериментальных исследований определены границы эффективного насыщения бетона синтетическими волокнами, которые для микрофибры составляют 0,1 – 0,2%, а для макрофибры 0,9 – 1,2% по объему. Показано, что комбинирование в единой структуре микро- и макроволокон в указанных количествах приводит к получению суммарного эффекта, который заключается в одновременном повышении прочности и показателей долговечности.

6. Разработаны варианты составов тяжелого фибробетона, армированного синтетическими волокнами, с улучшенными физико-механическими характеристиками и произведена оценка их эффективности при использовании в аэродромных плитах покрытий ПАГ-20 с положительным результатом.

7. Разработаны и переданы для практического использования «Рекомендации по изготовлению фибробетонных изделий и конструкций с синтетической фиброй производства ООО «Руссеал».

#### **Направления дальнейших исследований:**

– совершенствование технологии, позволяющей увеличить объемное содержание синтетической фибры в бетоне, с целью дальнейшего улучшения его функциональных свойств;

– разработка вариантов дисперсного полиармирования бетона с использованием сочетания синтетической макрофибры с высокомодульными микроволоконками.

## **ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ**

### **Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:**

1. **Кострикин М. П.** Характер и степень взаимодействия синтетической макрофибры с цементным камнем / М.П. Кострикин, // Вестник гражданских инженеров – 2018. – №4 (69). – С. 116 – 120. (0,625 п.л.)

2. Пухаренко Ю. В. Стойкость фибробетона к высокотемпературному воздействию / Ю. В. Пухаренко, **М. П. Кострикин** // Строительство и реконструкция – 2020. – №2 (88). – С. 96 – 106. (1,25/0,625 п.л.)

3. **Кострикин М. П.** Эффективность дисперсного полиармирования бетона низко-модульными волокнами / М. П. Кострикин, // Вестник гражданских инженеров – 2021. – №2 (85). – С. 128 – 133. (0,75 п.л.)

4. Пухаренко Ю. В. Эффективность использования низко-модульных синтетических волокон в составе аэродромных плит / Ю. В. Пухаренко, Д. А. Ахметов, В. И. Морозов, **М. П. Кострикин** // ALITinform: Цемент. Бетон. Сухие Смеси. – 2021. – №3 (64). – С. 42 – 52. (1,375/0,34 п.л.)

### **Публикации в других изданиях:**

5. Пантелеев, Д. А. Свойства полиармированного фибробетона / Д. А. Пантелеев, **М. П. Кострикин** // Актуальные проблемы строительства: Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов, молодых ученых и докторантов – 2013. – С. 164 – 166. (0,174/0,087 п.л.)

6. **Кострикин М. П.** Разработка вариантов армирования бетона различными видами фибр и их комбинациями / М. П. Кострикин, Д. А. Пантелеев // Актуальные проблемы строительства: Международная научно-практическая конференция студентов, аспирантов, молодых ученых и докторантов. – 2014. – С. 206 – 210. (0,29/0,145 п.л.)

7. **Кострикин, М. П.** Повышение эффективности дисперсного армирования путём комбинирования высоко- и низкомодульных волокон / М. П. Кострикин // Актуальные проблемы строительства: материалы 69-й научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы современного строительства»: в 3-х ч. – 2016. – Ч.2. – С. 301 – 305. (0,35 п.л.)

8. **Кострикин, М. П.** Влияние дисперсного армирования на долговечность цементных бетонов для дорожного строительства / М. П. Кострикин // Актуальные проблемы строительства: материалы 70-й Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов, молодых ученых и докторантов «Актуальные проблемы современного строительства»: В 3-х ч. – 2017. – Ч. 1. – С. 102 – 106. (0,29 п.л.)

9. **Кострикин М. П.** Исследование степени взаимодействия синтетической макрофибры с цементным камнем / М. П. Кострикин, Д. О. Попов // Актуальные проблемы современного строительства: материалы 71-й Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы современного строительства»: в 3-х ч. – 2018. – Ч. 2. – С. 36 – 40. (0,29/0,145 п.л.)

10. **Кострикин М. П.** К вопросу о влиянии высоких температур на прочностные характеристики фибробетона / М. П. Кострикин // Архитектура – Строительство – Транспорт: материалы 74-й научной конференции профессорско-преподавательского состава и аспирантов университета. В 2-х ч. – 2018. – Ч. 1. – С. 116 – 120. (0,58 п.л.)

11. Пухаренко Ю. В. Физико-механическое моделирование процессов деформирования и разрушения цементного композита, армированного синтетической макрофиброй / **М. П. Кострикин**, Ю. В. Пухаренко // Современные материалы и передовые производственные технологии (СМПТТ-2019). Тезисы докладов международной научной конференции. – 2019. С. 37 – 38. (0,24/0,12 п.л.)

12. Pukharenko Yu. V. Modelling the behavior of fiber-reinforced concrete with low-modulus fibers under load (Моделирование поведения фибробетонов с низкомодульными волокнами под нагрузкой) / Yu. V. Pukharenko, D. A. Panteleev, M. I. Zhavoronkov, **М. П. Kostrikin**, Said Mujtaba Eshanzada // «MATEC Web of Conferences» 329, 04002 (2020), ICMTMTE 2020 (1,125/0,28 п.л.)

13. Пухаренко Ю. В. Совершенствование метода определения величины сцепления армирующих волокон с матрицей в фибробетоне / Ю. В. Пухаренко, Д. А. Пантелеев, М. И. Жаворонков, **М. П. Кострикин** / Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли российской федерации в 2020 году: Сб. науч. тр. РААСН в 2 томах. – М.: Издательство АСВ. 2021. Т. 2. С. 208–216. (1,12/0,28 п.л.)

---

Компьютерная верстка *В. С. Весниной*

Подписано к печати 29.03.2022. Формат 60×84 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бум. офсетная.

Усл. печ. л. 1,3. Тираж 120 экз. Заказ 24.

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет.  
190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4.

Отпечатано на МФУ. 198095, Санкт-Петербург, ул. Розенштейна, д. 32, лит. А.

