

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ  
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
АРХИТЕКТУРНО-СТРОИТЕЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

*На правах рукописи*

**Кострикин Максим Павлович**

**ДИСПЕРСНО АРМИРОВАННЫЕ БЕТОНЫ С  
ПРИМЕНЕНИЕМ СИНТЕТИЧЕСКОЙ МАКРОФИБРЫ**

**Специальность 2.1.5. Строительные материалы и изделия**

Диссертация  
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук, профессор,  
член-корреспондент РААСН  
Ю.В. Пухаренко

Санкт-Петербург – 2022

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

ВВЕДЕНИЕ.....	5
<b>1. ЭФФЕКТИВНОСТЬ АРМИРОВАНИЯ БЕТОНОВ НИЗКОМОДУЛЬНЫМИ СИНТЕТИЧЕСКИМИ ВОЛОКНАМИ. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ.....</b>	<b>13</b>
1.1. Основные теоретические и практические результаты в области фиброармированных бетонов.....	16
1.1.1 Теоретические представления о фибробетоне как о композиционном материале.....	16
1.1.2. Виды и рациональные области применения армирующих волокон.	18
1.1.3. Современные разработки в области дисперсно армированных бетонов.....	25
1.2 Эффективность и перспективы применения полимерной микро- и макрофибры в цементном бетоне.....	27
Выводы по первой главе.....	38
<b>2. ХАРАКТЕРИСТИКА МАТЕРИАЛОВ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.....</b>	<b>41</b>
2.1. Материалы для проведения экспериментальных исследований и лабораторное оборудование.....	41
2.1.1. Сырьевые материалы.....	41
2.1.2. Применяемое оборудование.....	44
2.2. Технология изготовления образцов.....	47
2.3. Методы исследований.....	48
2.3.1. Стандартные методы исследований.....	48
2.3.2. Определение величины сцепления синтетических волокон с матрицей.....	49
2.3.3. Определение показателей трещиностойкости фибробетона при статическом нагружении.....	65
2.3.4. Определение водонепроницаемости.....	67

Выводы по второй главе.....	67
3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПРОЧНОСТИ И ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ БЕТОНОВ, АРМИРОВАННЫХ НИЗКОМОДУЛЬНЫМИ СИНТЕТИЧЕСКИМИ ВОЛОКНАМИ.....	69
3.1. Роль армирующих волокон в процессе формирования структуры и свойств фибробетона с позиций механики разрушения.....	70
3.2. Теоретическая модель деформирования фибробетона с низкомодульными волокнами.....	70
3.3. Построение расчетных диаграмм деформирования образцов, армированных низкомолекулярной синтетической макрофиброй. Прогнозирование прочности и трещиностойкости фибробетона с применением предложенной модели.....	85
Выводы по третьей главе.....	89
4. ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФИБРОБЕТОНОВ, АРМИРОВАННЫХ СИНТЕТИЧЕСКИМИ ВОЛОКНАМИ.....	91
4.1. Прочность и трещиностойкость.....	91
4.1.1. Влияние микро- и макроволокон на прочностные характеристики фибробетонов.....	91
4.1.2. Характеристики трещиностойкости фибробетонов, армированных микро- и макроволоконными.....	95
4.1.3. Оценка совпадения численных значений характеристик трещиностойкости фибробетонов, полученных расчетным и экспериментальным путем.....	102
4.2. Показатели долговечности и эксплуатационной безопасности фибробетонов, армированных микро- и макроволоконными.....	104
4.3. Стойкость фибробетонов при действии высоких температур.....	108
4.4. Исследование характеристик полиармированных фибробетонов.....	115
Выводы по четвёртой главе.....	119

5. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ АРМИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ СИНТЕТИЧЕСКИМИ ВОЛОКНАМИ С УЧЕТОМ ПОЛУЧЕННЫХ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ.....	121
5.1. Оценка эффективности применения синтетических макроволокон в конструкции плит ПАГ .....	122
5.1.1. Конструкция и характеристики плиты ПАГ-20.....	122
5.1.2. Расчёт состава фибробетона по графо-аналитическому методу.....	127
5.1.3. Расчёт плиты ПАГ-20.....	132
5.2. Техничко-экономическая оценка предлагаемых изменений.....	137
Выводы по пятой главе.....	140
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	141
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	143
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	159

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность темы диссертации.** 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 Баженов Ю.М., Жаворонков М.И., Коротких Д.Н., Курбатов Л.Г., Леонович С.Н., Лобанов И.А., Морозов В.И., Пантелеев Д.А., Пухаренко Ю.В., Рабинович Ф.Н., Смирнова О.М., Талантова К.В., Чернышов Е.М., *H. Bolat, M.J. Hasan, Kui He, R. Salvador, Seung Hun Park, Y. Wang* и др. 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 степени 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 низкомодульных 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 низкомодульными синтетическими волокнами;
- определение физико-механических, энергетических и деформативных характеристик фибробетонов, армированных низкомодульными синтетическими макро- и микроволокнами, а также их комбинациями;
- разработка составов фибробетонов с использованием низкомодульных 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 низкомодульными 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 низкомодульных волокон.

2. Предложена методика определения прочности сцепления низкомодульных 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 низкомодульных волокон на свойства цементного бетона и предложена физико-механическая модель деформирования фибробетона, армированного низкомодульными синтетическими волокнами, позволяющая прогнозировать его поведение под нагрузкой.

**Теоретическая значимость работы** заключается в определении границ эффективного использования низкомодульных 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 низкомодульных синтетических макроволокон, 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 низкомодульных синтетических микро- и макроволокон 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 низкомодульными синтетическими волокнами и результаты прогнозирования его прочности и трещиностойкости с применением предложенной модели;

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

– составы фибробетонов с использованием низкомодульных 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 обсуждены и одобрены на следующих научных и научно-практических конференциях: I и II международные конференции «Композиционные материалы и конструкции в современном строительстве» *FIBROMIX* (10–12 октября 2018 г., 16–18 октября 2019 г., СПбГАСУ); 71-ая научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых учёных «Актуальные проблемы строительства» (04–06 апреля 2018 г., СПбГАСУ); 74-ая и 75-ая научные конференции профессорско-преподавательского состава и аспирантов университета «Архитектура – Строительство – Транспорт» (3–5 октября 2018 г. и 19–20 ноября 2019 г., СПбГАСУ); Современные материалы и передовые производственные технологии (СМППТ-2019) (25–28 июня 2019 г., СПбПУ); I Всероссийская научная конференция «Строительное материаловедение: настоящее и будущее», посвящённая 90-летию выдающегося учёного-материаловеда, академика РААСН Юрия Михайловича Баженова (1–2 октября 2020 г., Москва,); Международная научно-техническая конференция «Современные направления и перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении 2020» (*ICMTMTE 2020*) (7–11 сентября 2020 г., Севастополь).

### **Публикации.**

Материалы диссертации опубликованы в 13 печатных изданиях общим объёмом 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 достижения, а также некоторые противоречивые результаты исследований в области бетонов, армированных низко модульными 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 низко модульными 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 микроволокнами в отдельности и их комбинациями в составе дисперсно полиармированных композитов.

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

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

## **1. ЭФФЕКТИВНОСТЬ АРМИРОВАНИЯ БЕТОНОВ НИЗКОМОДУЛЬНЫМИ СИНТЕТИЧЕСКИМИ ВОЛОКНАМИ. ЦЕЛЬ И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ**

На протяжении длительного времени бетон и железобетон остаются основными конструкционными материалами, применяющимися при возведении зданий и сооружений различного функционального назначения. К их преимуществам следует отнести их высокую прочность и достаточно высокую долговечность в нормальных условиях эксплуатации, широкий спектр применяемых технологий изготовления, дающий возможность выбрать оптимальный с технико-экономической точки зрения способ производства, возможность изготовления изделий и конструкций различных форм и размеров. Однако за всё время эксплуатации бетонных и железобетонных изделий приходилось мириться с недостатками этих материалов: низкой прочностью бетона на растяжение, что компенсировалось применением стальной стержневой арматуры, но неизбежно приводило к увеличению сечения, а, следовательно, и массы конструкции при обеспечении необходимой толщины защитного слоя; высокой хрупкостью бетонных конструкций, увеличивающейся с ростом прочности бетона, и их низкой трещиностойкостью; недостаточной долговечностью в суровых условиях эксплуатации, в особенности при сочетанных воздействиях нескольких неблагоприятных условий и др. Это свидетельствует о том, что традиционные бетон и железобетон на данный момент находятся на пределе своих функциональных возможностей, а в некоторых областях применения исчерпали их, и перестают в полной мере удовлетворять возросшим потребностям современного строительства. Поэтому разработка на их основе новых материалов, имеющих повышенные показатели качества, является одной из первостепенных задач, стоящей перед современным строительным материаловедением.

Одним из таких материалов нового поколения, демонстрирующий уникальные свойства, но в то же время с технологической точки зрения близкий к бетону и железобетону, является фибробетон. В общем случае фибробетоном называют «композиционный материал, состоящий из цементной (плотной или поризованной, с наполнителем или без него) матрицы с равномерным или заданным распределением по ее объему ориентированных или хаотично расположенных дискретных волокон (фибр) различного происхождения.» [112]

Развитие технологии фиброармированных строительных композитов в последние десятилетия значительно ускорилось, что явилось следствием как увеличения номенклатуры разрабатываемых и серийно выпускаемых видов армирующих волокон, так и новейшими задачами, поставленными перед строительным материаловедением. В строительстве помимо фибробетонов применяются различные виды композиционных материалов, такие как стеклопластики (в виде стеклопластиковой арматуры, отделочных материалов, стеклохолстов, текстолиты), многослойные конструкции (металлопластики, сэндвич-панели), материалы на древесной основе на органических и неорганических связующих (фанера, арболит). Преимуществом фибробетонов относительно вышеперечисленных материалов является большая вариативность свойств и универсальность применения. В зависимости от состава бетона-матрицы фибробетоны могут применяться как для изготовления несущих конструкций, так и в качестве конструкционно-теплоизоляционных и теплоизоляционных материалов.

Последними тенденциями в развитии строительных технологий являются: увеличение применимости сухих строительных смесей различного функционального назначения, использование тонкостенных конструкций и облегчённых несущих конструкций, применение побочных продуктов промышленности для производства строительных материалов, освоение подземного пространства, активное строительство уникальных зданий и сооружений, зданий повышенной этажности и большепролётных

конструкций, увеличение густоты армирования, применение самоуплотняющихся бетонных смесей и высокопрочных бетонов.

Во всех вышеперечисленных технологиях дисперсное армирование может решить одну или несколько определённых задач. Исследования показали, что волокна одного типа пригодны для улучшения только определённых характеристик. Известно [6, 13, 21, 45, 50, 66, 87, 112, 113], что одним из важнейших свойств, отмеченных при использовании фибрового армирования, является увеличение прочностных характеристик композита, в первую очередь – прочность на растяжение. Важным свойством фибробетонов, в особенности армированных высокомодульными волокнами, является их повышенная трещиностойкость – способность материала сопротивляться возникновению и развитию трещин. Вместе с повышением вязкости разрушения это позволяет значительно повысить безопасность эксплуатации конструкций, армированных волокнами [51, 52, 70, 71, 80, 85, 90]. Известно, что с повышением прочности бетон разрушается более хрупко. Одним из самых эффективных способов борьбы с этим негативным явлением является применение дисперсной арматуры, повышающей вязкость разрушения полученного композиционного материала. В случае использования комбинированного армирования – традиционной стержневой арматурой совместно с фиброй, а в некоторых случаях вообще без стержневой арматуры, возможно уменьшить рабочее сечение конструктивных элементов при сохранении несущей способности. Это позволяет снизить общую массу конструкций всего здания, сократить расходы на устройство фундаментов, на традиционную арматуру и грузоподъёмные машины, а в конечном итоге – значительно снизить себестоимость строительства.

Низкомодульные синтетические волокна значительно увеличивают долговечность бетона. Использование таких волокон приводит к увеличению морозостойкости, водонепроницаемости, ударной вязкости, стойкости к истирающему воздействию, однако их вклад в увеличение прочностных

характеристик в сравнении с высокомодульными волокнами зачастую невелик. Использование синтетических волокон способствует снижению усадочных деформаций в цементном камне. Данное свойство особенно ярко проявляется при использовании волокон в поризованных матрицах – в частности, использование синтетических микроволокон для армирования пенобетона способствует значительному снижению усадочных деформаций при одновременном увеличении прочностных характеристик, что приводит к значительному улучшению качества пенобетонных изделий [129].

## **1.1 Основные теоретические и практические результаты в области фиброармированных бетонов**

### **1.1.1 Теоретические представления о фибробетоне как о композиционном материале**

Композиционные материалы представляют собой гетерогенные полиструктурные капиллярно-пористые системы, имеющие сложную многоуровневую организацию типа «структура в структуре» [93]. Ю.В. Пухаренко предложена концепция, согласно которой структура фибробетона как композиционного материала на каждом структурном уровне представляет собой дисперсионную среду, то есть бетонную матрицу, вид и состав которой могут быть различными в зависимости от используемых сырьевых материалов и функционального назначения, в объёме которой равномерно распределена дисперсная фаза – армирующие волокна различного типоразмера, причём дисперсионная среда и дисперсная фаза взаимодействуют между собой в зоне контакта между волокном и матрицей, образуя третью компоненту композита – контактную зону, свойства которой уникальны и отличаются от свойств исходного бетона [93, 103].

Согласно [40], к типовым структурам композиционных материалов «условно можно отнести ориентированные материалы, армированные



прямолинейными волокнами (рис. 1.1, а); композиты, армированные тканями (рис. 1.1, б); материалы, хаотически армированные непрерывными (рис. 1.1, в) или дискретными (рис. 1.1, г) волокнами; пространственно армированные системы (рис. 1.1, д)».

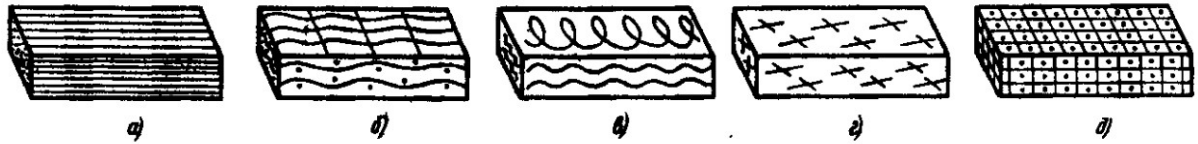


Рисунок 1.1 – Типовые структуры композитов

Фибробетоны относятся к «материалам, хаотически армированным дискретными волокнами».

«Термодинамически структура дисперсно армированного бетона формируется за счет стремления фаз к равновесию путем снижения их внутренней поверхностной энергии» [93]. Исследования процессов структурообразования при твердении цементных систем в присутствии волокон и без них показали, что поверхность фибры является центром образования кристаллов цементных новообразований. На поверхности волокон ранее, чем в остальной системе, начинает образовываться плотный и прочный слой цементных новообразований, что обеспечивается высокой энергией взаимосвязи частиц внутри системы, позволяя судить о них как о самостоятельных элементах структуры композита, взаимодействующих с дисперсионной средой через поверхность раздела фаз. При малых концентрациях армирующих волокон в бетоне они отдалены друг от друга на значительное расстояние, и вклад контактных зон, образовавшихся вокруг отдельно «плавающих» волокон, в прочность композита невелик – его характеристики, в основном, находятся на уровне неармированного бетона-матрицы. При дальнейшем насыщении композита волокнами при достижении определённого процента армирования частицы настолько сближаются друг с другом, что контактные зоны матрицы вокруг них

сливаются друг с другом, образуя фиброцементный каркас, плотность и прочность которого выше, чем у матричного материала. После прохождения данной перколяционной точки с увеличением объёма волокон в композите растут его физико-механические характеристики, достигая максимальных значений при приближении к пределу насыщения, после чего ввиду образования дефектной структуры с большим количеством пустот и дефицитом матричного материала, количества которого не хватает для обволакивания всей поверхности волокон, физико-механические характеристики композита начинают снижаться. [73]

Вклад каждого из составляющих может быть описан уравнением (1.1), представляющим из себя модифицированное Ю.В. Пухаренко «правило смеси».

$$R_{фб} = \varphi \tau 2 \left( \frac{l}{d} \right) \mu + 3,5 R_{кз} \mu + (1 - 4,5 \mu) R_б \quad (1.1)$$

где:

$R_{фб}$  – прочность фибробетона;

$\tau$  – величина сцепления армирующих волокон с цементным камнем;

$l/d$  – относительная длина волокна;

$\mu$  – коэффициент объемного армирования;

$R_б$  – прочность исходного бетона;

$\varphi$  – комплексный коэффициент, учитывающий эффект “фибра-фибра” взаимодействия, ориентацию волокон и вероятность пересечения ими расчетной плоскости, а также однородность и степень дефектности фибр.

$R_{кз}$  – прочность контактной зоны. [93]

### 1.1.2 Виды и рациональные области применения армирующих волокон

Описанная выше схема структурообразования справедлива для всех видов волокон вне зависимости от материала и типоразмера. К настоящему

моменту номенклатура армирующих волокон достаточно велика, и возможно произвести их классификацию по следующим признакам:

- по модулю упругости волокна на высокомодульные (стальные, базальтовые, асбестовые др) и низкомодульные (вискозные, полипропиленовые и др.);
- по происхождению на природные (асбестовые, базальтовые, целлюлозные и др.) и искусственные (вискозные, полиамидные и др.);
- по основному материалу на металлические (в большинстве случаев стальные) и неметаллические (минеральные или синтетические). [52, 87, 93]

Классификация по модулю упругости является основной при выборе армирующих волокон, исходя из условий работы фибробетонной конструкции. (рис. 1.2)



Рисунок 1.2 – Области эффективного использования армирующих волокон [93]

Основными требованиями, предъявляемыми к армирующим волокнам для их промышленного применения, являются их «химическая стойкость к щелочной среде бетонов, а также достаточный объем выпуска для удовлетворения потребностей производства изделий из фибробетонов» [52, 87, 93]

Многочисленные исследования, в том числе и проведённые автором, позволяют составить представление об областях наиболее эффективного использования различных волокон.

Среди высокомодульных волокон на данный момент наиболее изученными остаются металлические волокна, зачастую стальные, проволочные (гладкие или профилированные), токарные, фрезерные и др. Сфера их применения достаточно обширна. Исследования показали [21, 37, 87, 88, 92, 99, 103], что при их использовании возможно достичь повышения прочности на изгиб до 2...3 раз. Другим важным преимуществом стальных проволочных волокон является повышение трещиностойкости композита, а также вязкости его разрушения [50, 70, 72, 87, 99]. Эти качества позволили использовать стальные волокна в несущих конструкциях с зонным дисперсным армированием (плитах покрытий и перекрытий, балках, колоннах). Отдельно следует отметить положительное влияние стальных волокон на стойкость бетона к истирающему воздействию [43, 75].

Армирование стальными волокнами оказывает благоприятное воздействие на ударостойкость композита. Исследования показали, что использование стальных волокон в количестве 1,5...3,0 % привело к увеличению ударостойкости в 7...10 раз [47, 89, 108]. Первоначально это свойство использовалось при изготовлении сборных железобетонных свай с фибробетонными оголовками. Сваи с бетонными оголовками не удавалось полностью погрузить в грунт ввиду разрушения оголовков, чего удалось избежать армированием оголовков стальными фибрами [99]. Одновременно с этим, принимая во внимание сложность грунтов в г. Санкт-Петербурге, целесообразно проводить дисперсное армирование не только оголовков забивных свай, но и остальной их длины. Это связано с тем, что сваи в грунте, в особенности на границе различных грунтов, имеющих различную плотность и способных к подвижке, подвергаются воздействию изгибающих нагрузок, а также срезу. В процессе погружения зачастую происходит отклонение сваи от вертикального положения с возникновением

эксцентриситета прилагаемой нагрузки, в связи с чем свая начинает работать в нештатных условиях, часто – за пределами допустимой нагрузки [136].

Кроме свай, повышенная ударостойкость фибробетонов со стальной фиброй важна при изготовлении дорожных и аэродромных покрытий, станин оборудования, фундаментов, плит трамвайных путей [99].

Близкие характеристики ударостойкости можно достичь также применением низкомодульных синтетических волокон. Установлено, что при концентрации армирующих волокон в объеме тяжелого бетона в пределах  $\mu = 1...3\%$  применение низкомодульных полимерных волокон обеспечивает получение композита, «не уступающего по ударостойкости сталефибробетону и при этом более экономичного» [27, 90, 93, 115].

Благодаря использованию дисперсного армирования стало возможным изготавливать тонкостенные конструкции с повышенными характеристиками прочности и долговечности. В современном строительстве наиболее применимы фибробетонные оболочки, несъемная опалубка, элементы навесного вентилируемого фасада. [99, 105] Несъемная опалубка, перегородки, требуют высоких показателей по прочности на растяжение при изгибе, во-первых, для обеспечения прочности в процессе монтажа, во-вторых, для восприятия нагрузок после бетонирования основной конструкции.

К тонкостенным конструкциям также можно отнести канализационные безнапорные и низконапорные трубы, кольца смотровых колодцев. Использование фибробетона позволило «уменьшить толщину стенок, отказаться от арматурного каркаса и избавиться от проблем с его правильной установкой, а также повысить прочность и трещиностойкость, позволив уменьшить количество некондиционных изделий, в том числе разрушающихся в процессе разгрузки путём сбрасывания с кузова грузовых автомобилей» [136]. В СПбГАСУ разработана «вибрационная технология сталефибробетонных безнапорных труб и низконапорных труб методом центрифугирования» [99]. При этом предложена новая схема формования

центрифугированных труб, исключая смещение фибр и обеспечивающая равномерное их распределение по сечению изделия. Результаты исследований были апробированы на ПО «Вологдатяжстрой» при выпуске опытной партии труб диаметром 500 мм, длиной 5000 мм и толщиной стенок 30 мм. Армирование производилось фиброй из проволоки диаметром 0,5 мм в количестве 1% от объема бетона (рис. 5–6). Анализ результатов исследований показал, что «по сравнению с типовыми железобетонными трубами несущая способность сталефибробетонных труб безнапорных и низконапорных выше в 2 и 1,5 раза соответственно. НИИЖБ разработаны рабочие чертежи безнапорных сталефибробетонных труб диаметром 1000 и 1200 мм и длиной 3500 мм, с уменьшенной на 10–15 % толщиной стенок. При технической помощи НИИЖБ организовано опытное производство сталефибробетонных труб методом радиального прессования на ПО «Липецкстройиндустрия» [93, 99].

Новым видом металлических волокон, разработанным в последние годы, является аморфнометаллическая фибра [52, 71, 87, 104]. Данный вид волокон позволяет значительно повысить прочностные показатели композита, однако использование аморфнометаллических волокон не способствует увеличению вязкости разрушения. Известно [87], что бетон с применением аморфнометаллической фибры использовался при изготовлении наземных топливных резервуаров автозаправочных комплексов. В данном составе удалось достичь класса по прочности В50, с прочностью на растяжение при изгибе не менее 20 МПа [104].

Среди минеральных волокон в строительстве наиболее часто используются хризотилловые, базальтовые и стеклянные. Хризотилловые волокна имеют модуль упругости около 70 000 МПа и сравнимые со стальными величины прочности на растяжение. Применением этих волокон можно повысить прочностные характеристики композита, морозостойкость, непроницаемость, а также его стойкость к воздействию высоких температур

[112, 113]. Хризотилловые волокна обычно применяются при изготовлении кровельных мелкоштучных и крупноразмерных листовых материалов.

Фибра из базальта и стекла используется чаще всего в качестве технологической арматуры, позволяющей провести модификацию реологических и технологических характеристик бетонных смесей, а также для снижения усадочных деформаций. При реставрации Смольного собора к 300-летию г. Санкт-Петербурга из фибробетона, армированного комбинацией волокон из нержавеющей стали и щелочестойкого стекла, были изготовлены элементы декора – кронштейны – методом пневмонабрызга, [105] что позволило получить изделия сложной формы, отличающиеся небольшим весом, но высокими физико-механическими характеристиками. Особенностью стеклянных и базальтовых волокон является их нестойкость к щелочной среде бетона, что приводит к растворению фибры в изделиях через определённый промежуток времени. [28, 59] В связи с этим, необходимо использовать волокна из щелочестойких видов стекла. При использовании других вяжущих в нейтральной или кислой среде волокна сохраняют свои прочностные характеристики, что позволяет использовать их, к примеру, в фиброгипсовых изделиях [133].

Низкомодульные синтетические волокна приводят к сравнительно небольшому увеличению прочностных характеристик при их использовании для армирования тяжёлых и мелкозернистых бетонов. В среднем, при добавлении 0,1...0,4% синтетических микроволокон прочность на сжатие увеличивается в пределах 35%, а прочность на изгиб – на 70% [14, 26, 27, 36, 53, 60, 71]. Для улучшения механических характеристик наиболее эффективным является использование низкомодульных синтетических волокон в легких [129] и, в особенности, ячеистых бетонах, модуль упругости которых в 2...5 раз меньше по сравнению с данным типом фибр [93].

Однако следует учесть значительный вклад низкомодульных синтетических волокон в увеличение показателей долговечности

фибробетонных изделий. Исследования показали, что армирование композита 2-3 кг синтетических микроволокон на 1м<sup>3</sup> бетонной смеси позволяет повысить водонепроницаемость бетона на 2-3 марки [42, 53, 67, 115], что позволяет использовать такие фибробетоны в гидротехнических сооружениях, при строительстве подземных сооружений при повышенном уровне грунтовых вод, что особенно важно для возведения зданий и сооружений в сложных гидрогеологических условиях Санкт-Петербурга. Результаты исследований также показывают, что низко модульные синтетические волокна при том же проценте армирования способны увеличить морозостойкость композита на 1-2 марки [5, 25, 53, 67].

Ю.В. Пухаренко разработан состав фибробетона, армированного синтетическими волокнами, предназначенный для изготовления сборных декоративных элементов и изделий малых архитектурных форм с применением немедленной распалубки. Он отличается тем, что при средней плотности 1300...1400 кг/м<sup>3</sup> легкий фибробетон характеризуется пределом прочности при сжатии до 35...40 МПа, маркой по морозостойкости до F300...F400 и маркой по водонепроницаемости до W10...W16. Композит с указанными характеристиками успешно применяется для производства легких, прочных и долговечных облицовочной плитки и декоративного камня, а также может быть использован в монолитном варианте при выполнении реставрационных работ. [100, 105]

Одним из новых видов волокон, требующим всестороннего изучения, являются синтетически макроволокнами. На данный момент различными компаниями выпускается несколько разновидностей этих волокон (*Barchip*, *Concrix*, *Durus*, *Strofiber* и др), однако сведения о результатах их использования для армирования бетонов в литературе практически отсутствуют, а доступные научные статьи зачастую носят обзорный характер или же отражают результаты испытаний без глубокого анализа процессов взаимодействия макроволокон с бетонной матрицей. Между тем, уже на основании результатов собственных исследований [67, 73] и литературного



обзора [8, 38, 55, 119, 123] можно сделать вывод о применимости этого типа волокон в торкрет-бетонах и сборных тьюбингах при устройстве тоннельной обделки, конструкциях дорожных одежд и в промышленных полах, а также в конструкциях, требующих повышенной ударостойкости.

### **1.1.3 Современные разработки в области дисперсно армированных бетонов**

В последние годы были разработаны некоторые инновационные технологии и материалы, имеющие уникальные характеристики. Ведущие позиции среди них занимают различные виды фибробетонов.

В работах [21, 24, 30] описываются результаты разработок сверхвысокопрочного самоуплотняющегося фибробетона (*Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete*). Особенностью таких бетонов являются высокая подвижность, выходящая за рамки марок по осадке конуса и определяемая по диаметру его расплыва (удаётся достичь диаметра лепёшки 70-75 см) и очень высокая прочность (класс бетона по прочности от В100 и выше), что достигается комплексом мер – применением высокомарочных цементов, суперпластифицирующих добавок на основе поликарбоксилатов или полиариллов, тонкодисперсных минеральных наполнителей, рационального гранулометрического состава заполнителей. Однако, как уже было упомянуто выше, с повышением прочности возрастает и хрупкость бетона, что выражается во взрывном характере разрушения при достижении предельного состояния [78, 80, 83]. Для придания бетону вязкого характера разрушения, повышения его трещиностойкости и прочности на растяжение и изгиб целесообразно применение высокомодульных волокон. Результатом такого подхода является повышение прочности на растяжение при изгибе более, чем в два раза. В общем случае, применение сверхвысокопрочных самоуплотняющихся бетонных смесей позволяет повысить несущую способность конструкций, работающих в экстремальных

условиях, в условиях динамического и ударного нагружения, в уникальных зданиях и сооружениях; приводит к повышению экономической эффективности строительства за счёт повышения производительности бетонных работ при использовании высокоподвижных смесей и отказа от части арматурных работ; даёт возможность получать высококачественные изделия в густоармированных конструкциях, уменьшать сечения конструкций из тяжёлого бетона, заменяя их лёгкими пространственными фибробетонными конструкциями, снижать общую массу здания и, соответственно, применять менее массивные фундаменты и несущие конструкции нижних этажей.

В Пензенском государственном университете архитектуры и строительства и Белгородском государственном технологическом университете им. В.Г. Шухова разработаны составы дисперсно армированных реакционно-порошковых бетонов [56]. Данные виды бетонов являются высокопрочными многокомпонентными системами, в основе которых лежит смесь цемента, тонкомолотых активных минеральных добавок (микрокремнезём, метакаолин) и тонкозернистого кварцевого песка (фракции 0,1-0,6 мм), при затворении которых обязательно использование суперпластифицирующих добавок. Исследования показали, что «применение реакционно-порошковых бетонов позволяет достичь прочности на сжатие до 140-150 МПа, и прочности на изгиб до 16 МПа» [56]. Введение высокомодульных армирующих волокон увеличивает прочность на сжатие вплоть до 170 МПа, а на изгиб – до 22 МПа. Долговечность таких бетонов также весьма высока. Установлено, что морозостойкость порошковых бетонов может превышать 100 циклов, а их водонепроницаемость зачастую превышает возможности испытательного оборудования. Такие бетоны, в состав которых может входить до 6-7, а иногда и больше, компонентов, и обладающие уникальными характеристиками, имеют ограниченную применимость в строительстве ввиду чрезвычайно высокой стоимости, однако при возведении уникальных зданий и сооружений, требующих

повышенных физико-механических характеристик, реакционно-порошковые фибробетоны могут оправдать высокие первоначальные затраты за счёт снижения эксплуатационных расходов.

Ввиду того, что определённые виды волокон оказывают влияние только на отдельные характеристики бетона, дальнейшим развитием технологии дисперсно армированных бетонов является совмещение различных видов волокон в одном композите [41, 87, 102]. Так, при армировании бетона комбинацией стальных проволочных волокон с аморфнометаллическими, проведённом авторами работ [86, 87, 92] удалось получить бетон, имеющий прочность на растяжение при изгибе, превышающую 20 МПа, что характерно для аморфнометаллической фибры, и вязкий характер разрушения, придаваемый бетону проволочными волокнами. При совмещении высоко- и низко модульных волокон получается композит, отличающийся одновременно высокими показателями прочности и долговечности [32, 70, 72, 73, 74, 86, 102]. В дальнейшем создание композита с управляемыми свойствами возможно только при использовании полидисперсного армирования.

## **1.2 Эффективность и перспективы применения полимерной микро- и макрофибры в цементном бетоне**

Работы над армированием бетона низко модульными синтетическими волокнами начались в конце 60-х г.г. параллельно за рубежом и в СССР [22, 26, 27, 47, 67, 74, 77, 98, 112], когда в ходе развития химической промышленности начали появляться новые виды полимерных материалов, и изделия из пластических масс стали использоваться в различных областях народного хозяйства. Синтетические волокна были призваны заменить собой волокна из органических материалов природного происхождения (джутовые, сизалевые, целлюлозные, кокосовые и другие), отличающиеся высокой водопотребностью и низкой долговечностью, что ограничивало их

применение в качестве армирующего материала. Среди разновидностей синтетических полимеров, использовавшихся для изготовления фибры, следует упомянуть нейлон, полиэтилен, полиамиды, вискозу и полипропилен. Наиболее часто именно полипропиленовые волокна имеются в виду, когда речь идёт о синтетических волокнах. Среди достоинств полипропилена как материала для изготовления волокон с целью использования в бетонах следует отметить их высокую химическую стойкость, более высокие в сравнении с другими полимерами адгезию к цементному камню прочность, долговечность и низкую стоимость [113, 115, 127].

Следует отметить, что до сих пор не получен однозначный ответ о характере и степени влияния низко модульных синтетических волокон на прочностные характеристики композитов. Во многих работах раннего периода исследований отмечается, что использование этого вида волокон ведёт к снижению прочности бетона как на изгиб, так и на сжатие. Так, в статьях, относящихся к 80-90 годам указывается на снижение прочностных характеристик на 5...15% в зависимости от вида полимера и расхода волокон [6, 26, 27]. Однако следует учесть, что, вероятно, эти исследования проводились с оглядкой на результаты, достигнутые при изучении сталефибробетонов, и дозировки синтетических волокон были близки к тем, которые были приняты при использовании стальных волокон (3-5% по объёму). При таких насыщениях матрицы волокнами, имеющими значительно меньшие геометрические размеры, чем стальные, явно прослеживается эффект переармирования, когда количество фибры превышает некоторый индивидуальный для каждого вида предел, при котором количества растворной части становится недостаточно для обмазки всех волокон, и в фиброцементном каркасе образуются зоны, не скреплённые цементным камнем, и которые при разрушении ослабляют сечение конструкции. В более поздних работах отечественные и зарубежные исследователи приходят к ограничению расхода синтетических

микроволокон. Так, в работе [60] авторы останавливаются на расходе микроволокон  $4 \text{ кг/м}^3$  (на мелкозернистой матрице), при этом заявляют, что «предел прочности при сжатии повысился до 32% и предел прочности при изгибе до 64%». Авторы работы [130] признают насыщение матрицы с крупным заполнителем, равное  $2 \text{ кг/м}^3$  наиболее эффективным среди испытанных составов по совокупности характеристик. В современных иностранных источниках также ограничивается верхний предел насыщения бетона синтетическими микроволокнами [5, 10, 20]. Однако и в исследованиях, результаты которых опубликованы в последние несколько лет, наблюдаются противоречия: В работах [26, 34, 36, 122] отмечается увеличение прочностных показателей, но авторы статей [31, 53, 61] заявляют об обратном; В статье [29] отмечается, что «применение полипропиленовой фибры увеличивает прочность при изгибе примерно в 2 раза, при этом прочность при сжатии снижается на 9...19 %» Таким образом, следует признать, что вопрос о положительном либо отрицательном влиянии синтетических микроволокон на прочность требует дальнейшего рассмотрения.

В отличие от неопределённости при анализе прочностных характеристик, многие исследователи сходятся во мнении относительно положительного влияния синтетических волокон на долговечность фибробетонов [5, 25, 67, 125, 131, 135]. Как было описано выше, введение волокон в бетонную смесь создаёт пространственный каркас из волокон, окружённых контактной зоной между волокном и матрицей, имеющей повышенную плотность и прочность, и одновременно улучшает поровую структуру бетона. Одновременное действие этих факторов приводит к увеличению долговечности фибробетонов. Авторы работ [54, 125] заявляют о возможности двукратного повышения водонепроницаемости (с W8 на неармированном бетоне до W16 на бетоне, армированном  $1,2 \text{ кг}$  микрофибры) и увеличения морозостойкости с F400 до F600 при близком расходе волокон, что подтверждается результатами исследований,

произведённых автором [67] В то же время, в работах практически не затрагивается вопрос характера влияния микроволокон на стойкость фибробетонов к истирающему воздействию, однако в работах [10, 34] указывается на снижение истираемости в среднем до полутора раз относительно неармированных составов.

Авторы многих работ отмечают, что использование синтетических волокон при определённых расходах ( $\mu=1...3\%$ ) оказывают положительное влияние на ударостойкость композитов, позволяя получить материал, не уступающий по этой характеристике сталефибробетону. [61, 90, 111, 128] Ф.Н. Рабинович объясняет это тем, что "работа, которую необходимо затратить для полного разрушения композиции, значительно возрастает за счёт, главным образом, сил трения, которые необходимо преодолеть при выдёргивании волокон в процессе разрушения материала" [113]. Исследования показали, что «степень повышения сопротивления ударным и другим динамическим воздействиям определяется геометрическими параметрами используемых волокон, их объёмного содержания, вида и состава матрицы, а также от технологии изготовления изделий» [61, 90, 111, 128]. При этом установлено, что, как и при рассмотрении прочностных характеристик композитов, эффективность армирования зависит от соотношения модулей упругости волокон и матрицы – одновременно волокна могут быть низко модульными относительно матрицы из тяжёлого бетона и высоко модульными по отношению к ячеистым бетонам, и степень влияния волокон на свойства композитов при одинаковых процентах армирования будет различной. Ю.В. Пухаренко в процессе исследований доказал этот факт так: «введение в состав мелкозернистого бетона капроновых фибр с модулем упругости  $E_{\epsilon}=4650$  МПа в количестве 1...2% по объёму приводит к увеличению ударостойкости матричного материала в 2...5 раз, в то время как в ячеистом бетоне, по отношению к которому капроновые волокна являются высоко модульными, повышение

сопротивляемости продольному удару при том же уровне армирования может достигать 10 раз.» [90, 93]

После нескольких разрушительных пожаров в зарубежных тоннелях (к примеру, пожар в тоннеле под г. Монблан на границе Франции и Италии в 1999 году) активизировалась разработка составов дисперсно армированных бетонов для устройства тоннельной обделки [8, 38, 55, 119, 121, 123, 136]. Результатом стало создание дисперсно армированного бетона с использованием микросинтетической фибры, который может применяться как для сборных конструкций (тубингов), так и создания обделки методом набрызга (торкрет-бетон).

Вопросами огнестойкости строительных конструкций в разное время занимались М.Я. Ройтман, Н.А. Стрельчук, В.П. Бушев, В.А. Пчелинцев, В.М. Ройтман и др. Для конструкций, изготовленных из различных материалов, установлены возможные условия развития пожара, произведена классификация зданий и сооружений по пожарной опасности, определены критерии нормирования и разработаны методики расчёта огнестойкости конструкций в зависимости от их вида.

Наиболее частым способом повышения огнестойкости строительных конструкций является устройство барьерной изоляции из негорючих материалов, например, керамических, минераловатных или хризотилцементных экранов, а также нанесение вспучивающихся покрытий на основе вермикулита или перлита, создающих на обогреваемой поверхности воздушный зазор [39, 116, 117]. Однако подобные варианты изоляции не всегда возможны, и в этих случаях уместна модификация основного конструкционного материала – бетона с целью повышения его собственной огнестойкости.

В.П. Бушевым отмечаются особенности поведения бетона в условиях пожара, в том числе склонность к взрывному разрушению. «Во время пожаров или при испытаниях на огнестойкость через 10–15 мин после начала воздействия огня на конструкцию бетон может взрывообразно разрушаться,

откалываясь от обогреваемой поверхности пластинами... <...> Куски отслаивающегося бетона отлетают при этом с хлопками на расстояние до 10–15 м. Такое разрушение происходит непрерывно на всей поверхности, которая подвергается воздействию огня, и приводит к быстрому уменьшению сечения конструктивного элемента» [39]. Высвободившаяся вода мгновенно переходит в пар и расширяется, тем самым вызывая «отстрелы» кусков поверхностного слоя бетона и ослабляя конструкции, оголяя рабочую стержневую арматуру, теряющую свои прочностные свойства под воздействием высокой температуры [69, 82, 136]. Причиной такого разрушения является переход воды, содержащейся в порах и капиллярах, в газообразное состояние с увеличением в объёме до 1700 раз [44] и, соответственно, с резким повышением давления водяного пара до 7...12 атм, вызывающего в бетоне растягивающие напряжения, значительно превышающие предел его прочности [83]. Отмечается, что склонность к взрывному разрушению практически не зависит от класса бетона по прочности или вида заполнителей и в большей степени определяется его средней плотностью и влажностью: «При влажности бетона выше 5% он разрушался почти во всех случаях, при влажности 3,5–5% разрушение не было характерным или оно было местным (поверхностным), и лишь при влажности менее 3% взрывы не наблюдались» [39]. Такой вид разрушения является характерным для конструкций, возраст которых составляет 1 – 2 года, поскольку часто примерно к этому сроку эксплуатации в естественно-воздушных условиях влажность бетона приближается к равновесной в пределах 2% [76]. Однако, встречаются ситуации, требующие особого внимания. Например, подземные сооружения Санкт-Петербурга, построенные на обводнённых грунтах, имеют влажность, которая зачастую превышает относительно безопасные с точки зрения взрывного разрушения 3%.

Одним из способов противодействия взрывному разрушению бетона вследствие резкого испарения из него воды и повышения огнестойкости в



целом отечественные и зарубежные учёные 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 [12, 14, 15, 19, 20, 46, 76, 78].

Для понимания целесообразно привести данные из технической литературы о процессах, последовательно протекающих в бетоне при нагревании [69, 80, 83]. Вода в бетоне находится в трёх состояниях: свободном, физически и химически связанном. При температуре около 60°C сила взаимодействия между молекулами свободной воды в порах и капиллярах цементного камня и заполнителей становится настолько малой, что не препятствует её переходу в газообразное состояние. Дальнейшее нагревание до температуры кипения приводит к постепенному удалению свободной воды из приповерхностного слоя, одновременно отмечается некоторое снижение прочности материала. Дальнейшее нагревание до 150 – 200°C сопровождается расширением цементного камня и уплотнением структуры, что приводит к некоторому увеличению прочности бетона на сжатие и изгиб относительно первоначального состояния [80]. При нагревании бетона до температуры 200-250°C может наблюдаться более значительное увеличение прочности бетона, что связано с так называемым явлением «самозапаривания», при котором при повышенной влажности и давлении внутри материала происходят реакции, характерные для автоклавной обработки: кремнезём заполнителя взаимодействует с гидратом окиси кальция с образованием тобермаритоподобных соединений. Дальнейшее нагревание до температур 300°C и выше сопровождается появлением дефектов на границах раздела между цементным камнем и заполнителем, что обусловлено испарением физически связанной воды из пор геля, размер которых составляет 10 – 20 Å, и из которых очень трудно удалить воду при меньших температурах. Прочность бетона начинает

снижаться. Третья категория воды – химически связанная с клинкерными минералами – начинает испаряться при температурах 500°C и выше в результате реакции дегидратации. При этом прочность бетона уменьшается в среднем на 20%. Дальнейшее нагревание до 600 – 800°C приводит к декарбонизации соединений кальция и значительному снижению прочности материала. При температуре выше 800°C происходит практически полное разупрочнение структуры (до уровня 15 – 20% от первоначальной величины) вследствие разложения минералов, слагающих зёрна заполнителей [83].

Исследователи огнестойкости бетона отмечают, что «взрыв бетона происходил при влажности более 5% и температуре 160-260°C, что соответствует максимальному давлению пара внутри бетона 7–20 атм» [39]. Согласно данным производителей синтетических волокон, температура плавления полипропиленовой фибры составляет 165°C. Таким образом, идея применения выгорающей дисперсной арматуры представляется весьма плодотворной. Именно в указанном интервале температур должна возникать система сообщающихся пор и капилляров, благодаря которой расширяющаяся вода испаряется из бетона, не встречая сопротивления.

В последние годы в разных странах в производство запущены синтетические макроволокна, такие как *Barchip*, *Concrix*, *Fibrofor*, *Durus*, *Strofiber* и др. Такие волокна отличаются значительно большими, нежели у микроволокон, размерами (диаметр их доходит до нескольких миллиметров, длина – до десятков миллиметров), а также различной формой поверхности (волокна с гладкой поверхностью практически не используются, и для повышения адгезии к цементному камню в процессе производства на волокна наносится микрорельеф). Информация об опыте применения синтетических макроволокон достаточно немногочисленна, и представлена, в основном, зарубежными источниками [6, 8, 17, 18], а выводы, сделанные по результатам исследований, имеют такие же серьёзные противоречия, как и в случае микроволокон.

Сами макроволокна имеют различные характеристики – прочностные, геометрические, упругопластические и т.д., и различные источники приводят разный характер разрушения такого рода фибробетонов, В статьях [18, 36] после образования магистральной трещины величина нагрузки, перераспределённой на волокна, уменьшается до четверти от разрушающей, в то время как в работах [11, 91, 124, 126]. а также по результатам исследований, проведённых автором [67, 73], отмечается, что после перераспределения нагрузки с матрицы на волокна нагрузка возрастает, и может даже превысить нагрузку, необходимую для разрушения матрицы. Соответственно, в различных источниках представлены противоположные точки зрения на обеспечение характеристик прочности и долговечности.

Отечественные и зарубежные учёные сходятся во мнении относительно влияния синтетической макрофибры на ударостойкость фибробетонов [23] и полагают, что она может сравниться с таковой у сталефибробетонов.

Несмотря на то, что полученные в ходе стандартных испытаний показатели не дают полного представления о фактической долговечности бетонов, армированных синтетическими волокнами, а также самих синтетических волокон, судить о которой можно лишь после длительных натурных испытаний, влияние щелочной среды бетона на долговечность полимерных материалов можно промоделировать и сделать вывод об их химической стойкости. Так, проводившееся в работе [18] сравнение макроволокон из полиэтилена и полипропилена, на которых воздействовали щелочами в таких же концентрациях, как и в бетоне, показало, что полиэтилен разлагается при воздействии щелочей с образованием осадка, а потеря его массы составила 68%, при этом полипропилен показал потерю массы в 0,73%, что позволяет судить об его высокой стойкости к щелочам и сделать вывод о достаточной долговечности полипропиленовой фибры для сохранения свойств в течение всего срока службы здания или сооружения.

Наиболее часто синтетические макроволокна применяются при изготовлении тоннельной обделки методом пневмонабрызга (торкрет-

бетоны) [119, 133] и при устройстве полов [34], однако очевидно, что область их применения может быть расширена при соответствующем научно-техническом обосновании.

Общеизвестно, что одним из условий работы железобетона является высокая адгезия стали к бетону, что, очевидно, прослеживается и в сталефибробетонах. Однако между полимерными материалами и бетоном силы адгезионного взаимодействия не столь велики, что ведёт к выдёргиванию гладких полимерных волокон из композита. Для увеличения взаимодействия между матрицей и фиброй производители вынуждены производить дополнительные технологические операции. Увеличение сцепления синтетических микроволокон чаще всего обеспечивается за счёт обработки волокон гидрофобно-адгезионных замасливателей [53] или создание шероховатой поверхности (что, однако, усложняет технологический процесс и применяется реже). Улучшение взаимодействия макроволокон с бетонной матрицей обеспечивается только деформационными методами. Так, макроволокна *Durus* имеют микрорельеф на поверхности, на волокнах *Concrix* нанесены поперечные насечки, фибра *Strofiber* имеет шероховатую поверхность, а волокна *Barchip* – волновой профиль.

Во многом недостаточная величина сцепления синтетических волокон с матрицей определяет вязкий характер разрушения – касательные напряжения, возникающие на границе раздела фаз при разрушении, меньше, чем нормальные напряжения в волокнах, и полностью прочностные свойства волокон зачастую не используются. Одним из перспективных направлений исследований является разработка мер по повышению сцепления волокон с матрицей, что будет способствовать увеличению прочностных показателей фибробетонов, армированных такими видами волокон.

Следует учесть, что упругопластические свойства фибробетонов определяются соотношением модулей упругости матрицы и фибры. При этом различные матрицы и даже одинаковые матрицы в разном возрасте имеют различный модуль упругости. Например, пенобетонная матрица имеет

модуль упругости в среднем около 3000 МПа [113, 129]. В этом случае низко модульные по отношению к тяжёлому бетону синтетические волокна с модулем упругости 3500 – 8000 МПа становятся высоко модульными по отношению к матрице. Бетонная смесь и тяжёлый бетон в раннем возрасте также имеют низкий модуль упругости, и этот недостаток могут компенсировать синтетические волокна, работающие как высоко модульные, работая в данном случае как технологическая арматура. Армирование низко модульными волокнами приводит к повышению связности смеси, препятствует деформированию под собственным весом и при случайных воздействиях. Такой эффект используется при формовании изделий методом безопалубочного формования или изделий с немедленной распалубкой. При дальнейшем наборе прочности модуль упругости бетона превышает модуль упругости фибры, и вклад волокон в обеспечение прочностных характеристик композита снижается.

Таким образом, к синтетическим волокнам можно предъявить следующие требования:

- Для обеспечения вязкого характера разрушения прочность волокна на растяжение должна превышать прочность сцепления с матрицей, при этом быть выше прочности бетона на растяжение.

- Высокая химическая стойкость к щелочной среде бетона, солям.

- Температура стеклования (температура, при которой полимер при охлаждении переходит из высокоэластического или вязкотекучего в стеклообразное состояние), позволяющая эксплуатировать фибробетонные конструкции во всём диапазоне отрицательных температур

- Температура плавления и воспламенения, превышающая предельно допустимую для фибробетонной конструкции температуру эксплуатации

- Волокна должны иметь достаточное сцепление с бетонной матрицей, для чего поверхность фибры должна иметь шероховатую поверхность или быть обработана веществами, увеличивающими прочность сцепления.

## Выводы по первой главе

Анализ данных, приведенных в технической литературе, а также полученных при проведении собственных предварительных экспериментов позволяет сформулировать следующие основные выводы и результаты первого этапа диссертационного исследования:

1. Бетон как конструкционный материал обладает рядом преимуществ, однако имеет и значительные недостатки, среди которых на первом месте находится низкая прочность на растяжение и малая трещиностойкость. Скомпенсировать эти недостатки, а также получить материал, обладающий новыми уникальными свойствами можно при помощи дисперсного армирования. Фибробетон – это высокоэффективный композиционный строительный материал со сложной полиструктурной организацией.

2. Несмотря на достаточно большое количество исследований, посвящённых армированию бетона волокнами, эффективность применения низкомодульных синтетических волокон изучена недостаточно, а описанные в научно-технической литературе результаты исследований имеют множество противоречий, не позволяющих составить чёткой картины об областях эффективного использования такого вида волокон.

3. Одним из новых видов фибры являются синтетические макроволокна, ввиду чего они остаются достаточно малоизученными, и их применение в строительных конструкциях ограничено. Несмотря на это, получаемые результаты свидетельствуют о перспективности этого вида фибры при одиночном либо полидисперсном армировании.

4. Эффективным методом, позволяющим получать композиционные материалы с заданными свойствами является применение комбинированного полидисперсного армирования волокнами различных видов. Однако вопросы полиармирования фибробетонов синтетическими волокнами на данный момент изучены недостаточно, и имеющаяся информация отрывочна, а результаты имеют серьёзные противоречия.

На основе проведенного анализа литературы и по результатам предварительных исследований можно сформулировать цель и задачи диссертационного исследования, а также научную гипотезу.

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

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи:**

- 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 микро- и макро волокнами, 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.

**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. ХАРАКТЕРИСТИКА МАТЕРИАЛОВ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

### 2.1 Материалы для проведения экспериментальных исследований и лабораторное оборудование

#### 2.1.1 Сырьевые материалы

При выполнении экспериментальной части исследований использовались следующие сырьевые материалы:

##### 2.1.1.1 Портландцемент

Для изготовления образцов в качестве вяжущего вещества использовался портландцемент класса ЦЕМ I 42,5 Н производства сланцевского цементного завода «Цесла». Характеристики цемента представлены в Таблице 2.1.

Таблица 2.1. Характеристики цемента

Портландцемент ЦЕМ I 42,5 Н ДП (ЖИ) ОАО «Цесла»	Удельная поверхность (Блейн), м <sup>2</sup> /кг	Начало схватывания, мин	Нормальная густота цементного теста, %	Предел прочности при изгибе в возрасте 2 суток, МПа	Предел прочности на сжатие в возрасте 2 суток, МПа	Предел прочности при изгибе в возрасте 28 суток, МПа	Предел прочности на сжатие в возрасте 28 суток, МПа
Показатель	349	215	25,2	4,6	24,3	8,12	52,48

Минералогический состав портландцементного клинкера, приведённый в документе о качестве на цемент, представлен в таблице 2.2.

Таблица 2.2. Характеристики клинкера

$C_3S$	$C_3A$	$C_4AF + C_3A$
62,4	6,4	17,7

### 2.1.1.2 Заполнители

В качестве мелкого заполнителя использовался кварцевый песок, гранулометрический состав которого представлен в таблице 2.3 и на рис. 2.1.

Таблица 2.3. Гранулометрический состав песка

№ сита	5	2,5	1,25	0,63	0,315	0,16	<0,16
Частные остатки, %	0	3,5	11,08	30,75	41,72	3,42	9,530
Полные остатки, %	0	3,5	14,58	45,33	87,05	90,47	100

Модуль крупности  $M_k=2,4$

Насыпная плотность песка 1457 кг/м<sup>3</sup>

В качестве крупного заполнителя применялся щебень гранитный фракции 5-20 месторождения ЛСР-Гаврилово. Гранулометрический состав щебня представлен в таблице 2.4

Таблица 2.4. Гранулометрический состав щебня

№ сита	25,0	20,0	12,5	5,0	2,5	<2,5
Частные остатки, %	0	5,8	60,2	33,1	0,2	0,9
Полные остатки, %	0	5,8	66,0	99,1	99,3	100

Насыпная плотность щебня 1353 кг/м<sup>3</sup>

Пылеватые и глинистые частицы отсутствуют

Содержание пластинчатых и игловатых зёрен 18,2%

### 2.1.1.3 Дисперсная арматура

Для дисперсного армирования бетонов применялись низко модульные синтетические макро- и микроволокна.

Макроволокна:

– *Adfil Durus S500*

– *Strofiber*

Микроволокна:

– *Adfil Fibrin XT*

Геометрические и физико-механические характеристики волокон, использованных в диссертационном исследовании, взятые из технической документации, предоставленной производителями, приведены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Технические характеристики применяемых волокон

Характеристика	Значение		
	<i>Durus S500</i>	<i>Strofiber</i>	<i>Fibrin XT</i>
Наименование волокна			
Вид волокна	Макроволокно периодического профиля	Макроволокно гладкое	Микроволокно
Материал	Модифицированный полипропилен	Полипропилен	Модифицированный полипропилен
Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	922	910	905
Длина, мм	48	54	19
Эквивалентный диаметр, мм	0,7	0,69	0,022
l/d	69	782	864
Прочность на растяжение, МПа	417	620-670	380
Удлинение при разрыве, %	–	260-170	–
Химическая стойкость	Высокая	Высокая	Высокая
Температура плавления, °С	165	160	165
Температура воспламенения, °С	> 360	320	> 360
Модуль упругости, МПа	5740	16000 – 17000	До 4500
Электропроводность	Отсутствует	Отсутствует	Отсутствует

Изображения волокон приведены на рисунке 2.1



Рисунок 2.1 – Используемые в исследовании волокна: а) *Durus S500* б) *Strofiber*; в) *Fibrin XT*

#### 2.1.1.4. Пластифицирующая добавка

Для регулирования подвижности бетонных смесей применялся наномодифицированный суперпластификатор на основе эфиров поликарбоксилатов Макромер П-163. Технические характеристики пластификатора приведены в таблице 2.6.

Таблица 2.6. Характеристики пластификатора

Наименование	Химическая основа	Цвет	Физическое состояние	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Содержание сухих веществ, %
Макромер П-163	Эфир поликарбоксилатов	Тёмно-жёлтый	Жидкость	1,1	35

#### 2.1.2 Применяемое оборудование

В ходе проведения экспериментальной части диссертационного исследования для изготовления и испытания образцов применялось следующее лабораторное оборудование:

##### 2.1.2.1 Оборудование для изготовления образцов

Дозирование сырьевых материалов осуществлялось на электронных весах МК-32.2-А20 с верхним пределом нагружения 32 кг. Дискретность измерения 5 г. Для взвешивания волокон и пластифицирующей добавки применялись весы ВЛТЭ-2100 с максимальной нагрузкой 1,2 кг и с точностью до 0,01 г.

Перемешивание бетонных и фибробетонных смесей осуществлялось в двухвальном четырёхлопастном лабораторном смесителе СЛ-ЦБ-10. Уплотнение бетонных образцов осуществлялось на лабораторной виброплощадке СМЖ-435А. Уплотнённые образцы помещались в камеру ускоренного твердения КУП-1А, выдерживались в течение суток в нормальных условиях, после чего проводился цикл тепловлажностной

обработки при температуре 80 °С. По окончании цикла тепловлажностной обработки образцы извлекались из пропарочной камеры, распалубливались и отправлялись на складирование в шкаф нормального твердения Matest, позволяющий в автоматическом режиме поддерживать нормальные условия для набора бетоном прочности.

### *2.1.2.2 Оборудование для испытания образцов*

Прочность бетона на сжатие определялась на гидравлическом прессе *Matest C040*. Для определения прочности на растяжение при изгибе, а также деформативных и силовых характеристик разрушения образцов, на кафедре Технологии строительных материалов и метрологии СПбГАСУ разработана и изготовлена экспериментальная установка, позволяющая с высокой точностью определять величины напряжений в бетонных образцах и соответствующие им значения перемещений и в реальном времени строить диаграммы зависимости прогибов образца от прилагаемых нагрузок. Экспериментальная установка состоит из электромеханического нагружающего устройства с тензодатчиком для контроля нагрузки и датчиками перемещения, а также специально разработанного программного комплекса, используемого для управления процессами нагружения и контроля корректности проводимого эксперимента [49, 52, 97]. Изображения установки в процессе проведения испытания приведено на рис. 2.2.

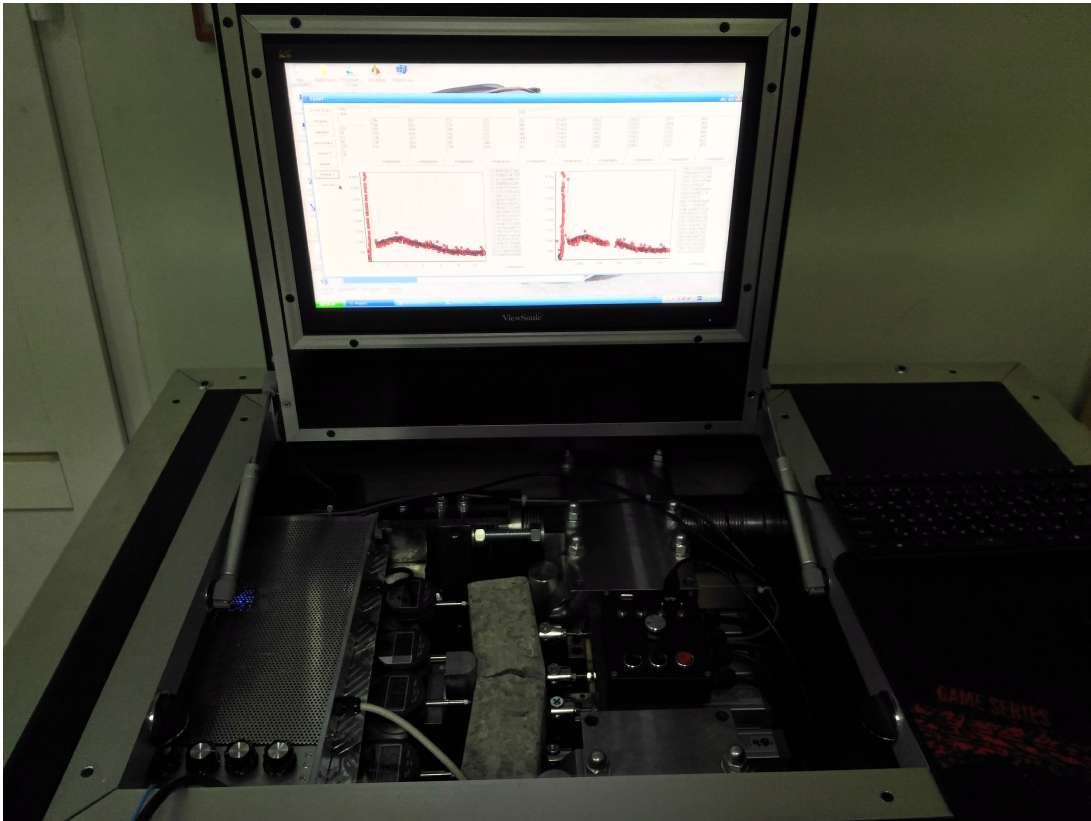


Рисунок 2.2 – Экспериментальная установка, разработка СПБГАСУ

Определение водонепроницаемости бетонов осуществлялось на установке с четырьмя камерами *Matest C430*, работающей по методу коэффициента фильтрации (рис. 2.3)



Рисунок 2.3 – Установка *Matest C430*

Морозостойкость образцов определялась по ускоренному дилатометрическому методу в соответствии с ГОСТ 10060.3-95. Данный метод подразумевает однократное замораживание водонасыщенных образцов, помещённых в камеру, заполненную керосином и оснащённую датчиком уровня. Присвоение бетону марки по морозостойкости осуществляется по величине дифференциальных объёмных деформаций образца в момент замерзания воды в порах.

Величина истираемости определялась на лабораторном круге истирания Бёме *Matest C129* в соответствии с ГОСТ 13087.

## 2.2. Технология изготовления образцов

Для определения физико-механических характеристик фибробетонных образцов использовалась матрица с крупным заполнителем класса по прочности В25 и подвижностью П4, состав которой приведён в табл. 2.7.

Таблица 2.7. Состав бетонной матрицы

Цемент	340 кг
Песок	800 кг
Щебень	1040 кг
Вода	140 л
Добавка-пластификатор	1,36 кг

Приготовление смесей осуществлялось в лабораторном двухвальном бетоносмесителе принудительного действия СЛ-ЦБ-10. Загрузка сырьевых компонентов осуществлялась в следующей последовательности: сначала в чашу смесителя засыпались крупный и мелкий заполнители и в течение 1 минуты перемешивались без добавления воды, затем засыпался цемент, и смесь перемешивалась в течение 1 минуты. После перемешивания осуществлялся контроль равномерности перемешивания, после чего смесь затворялась водой с растворённой в ней пластифицирующей добавкой и перемешивалась в течение 1 минуты. В случае неармированных составов

производился периодический контроль равномерности перемешивания в течение последующих трёх минут, в то время как в случае фибробетонных составов производилось постепенное введение волокон (в два-три приёма в зависимости от их количества) с периодическим перемешиванием на протяжении 3 минут. Из приготовленной смеси производилось формование образцов, которые затем уплотнялись на виброплощадке в течение 60 секунд.

Изготовленные образцы в течение суток выдерживались в нормально-влажностных условиях для прохождения реакций схватывания и набора бетоном первоначальной прочности, после чего подвергались тепловлажностной обработке в лабораторной пропарочной камере по следующему режиму: Нагрев до температуры 80°C в течение 1,5 часов, изотермическая выдержка в течение 6 часов и остывание в закрытой камере в течение 15 часов. Поскольку прочность бетона непосредственно после тепловлажностной обработки составляет 50...70% от проектной, для дальнейшего набора прочности образцы выдерживались в шкафу нормального твердения в течение 14 суток.

Для определения величины сцепления волокон с матрицей технология изготовления образцов не отличалась, за исключением того, что в качестве матрицы использовалось цементное тесто нормальной густоты, а образцы после набора первоначальной прочности твердели, будучи погружёнными в воду.

## **2.3. Методы исследований**

### **2.3.1 Стандартные методы исследований**

В ходе выполнения диссертационной работы использовались стандартные методы испытаний, закреплённые в нормативно-технической документации, а также оригинальные методики, разработанные в СПбГАСУ.



Определение прочности образцов на сжатие и растяжение при изгибе производилось в соответствии с ГОСТ 10180 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам».

Для определения энергетических и силовых параметров использовался ГОСТ 29167 «Методы определения характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении»

Морозостойкость образцов оценивалась по ускоренной методике, изложенной в ГОСТ 10060.3-95

Определение истираемости образцов осуществлялось в соответствии с методикой ГОСТ «Бетоны. Методы определения истираемости»

### **2.3.2 Определение величины сцепления синтетических волокон с матрицей**

#### *2.3.2.1 Адаптация существующей методики для низко модульных волокон*

Различные виды армирующих волокон по-разному взаимодействуют с бетонной матрицей. Сцепление фибры с бетонной матрицей композита «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, материала, из которого изготовлены волокна и их геометрических характеристик» [73, 93, 97]. Известно [28, 71, 87, 103], что различные виды волокон по-разному работают в бетонной матрице. Хрупкий характер разрушения, аналогичный разрушению неармированного бетона, будет наблюдаться при максимальных напряжениях внутри волокон, превышающих предел их прочности, приводящих к разрыву фибры. С другой стороны, нарушение связи между волокном и бетонной матрицей приводит к вязкому разрушению фибробетона, сопровождаясь вытягиванием волокон из

композита. «Величина сцепления, в свою очередь, зависит от площади боковой поверхности фибры, контактирующей с цементным камнем в бетоне, и значит, от ее формы и размеров.» [97] Зачастую, прочность сцепления волокна оказывается недостаточной для её надёжной анкеровки в матрице, вследствие чего волокна вытягиваются из неё. Энергия, затрачиваемая на разрушение образца, расходуется на преодоление сил трения на границе раздела, и оказывается значительно меньшей, чем энергия, необходимая для разрушения самого волокна. Для повышения степени анкеровки волокна в матрице применяются различные технологические приёмы на этапе производства: создание анкеров на концах или волнового профиля для стальных проволочных волокон, увеличение боковой поверхности путём создания переменного профиля для фибр как из металла, так и синтетических. Проводя мероприятия по увеличению взаимодействия фибры с матрицей, возможно увеличить прочностные характеристики дисперсно армированного бетона.

В СПбГАСУ на протяжении нескольких лет проводятся исследования процессов взаимодействия волокон с цементной матрицей [50, 52, 75, 87, 97]. Результатом этих исследований стал расчетно-экспериментальный метод, в котором, в отличие от прямого выдёргивания волокна из бетона, учитываются расположение и ориентация фибр в образце, характер и условия их работы в матрице. Суть методики определения характеристики сцепления (фт) заключается в «нахождении опытным путем такого минимального процента армирования бетона, до которого вводимые волокна практически не проявляют армирующего эффекта, но после которого наблюдается устойчивый рост прочности композита» [97].

Испытания проводятся на цементном тесте нормальной густоты. Первоначально в смесителе изготавливается цементное тесто, из которого отбирается часть для формования двух неармированных образцов-призм размерами 70x70x280 мм. Затем оставшаяся часть смеси делится на несколько частей, в каждую из которых вводится определённое количество

волокон [73]. Точкой отсчёта назначен состав, армированный 0,1% фибры, после чего последовательно в каждом из составов объёмное содержание волокон увеличивается с шагом 0,1%, и из каждого состава формуется образцы-призмы. Величина предельного насыщения цементной матрицы волокнами, определяется экспериментально в соответствии с возможностью обеспечения технологичности фиброцементной смеси.

Твердение образцов осуществляется в нормальных условиях в течение 28 суток, после чего при помощи режущего инструмента на образцах производится формирование начальных надразов. Подготовленные образцы подвергаются испытанию на растяжение при изгибе в соответствии с требованиями ГОСТ 29167 [73, 97]. По полученным результатам строится график в координатах «Прочность – расход волокон» (рис. 2.4)

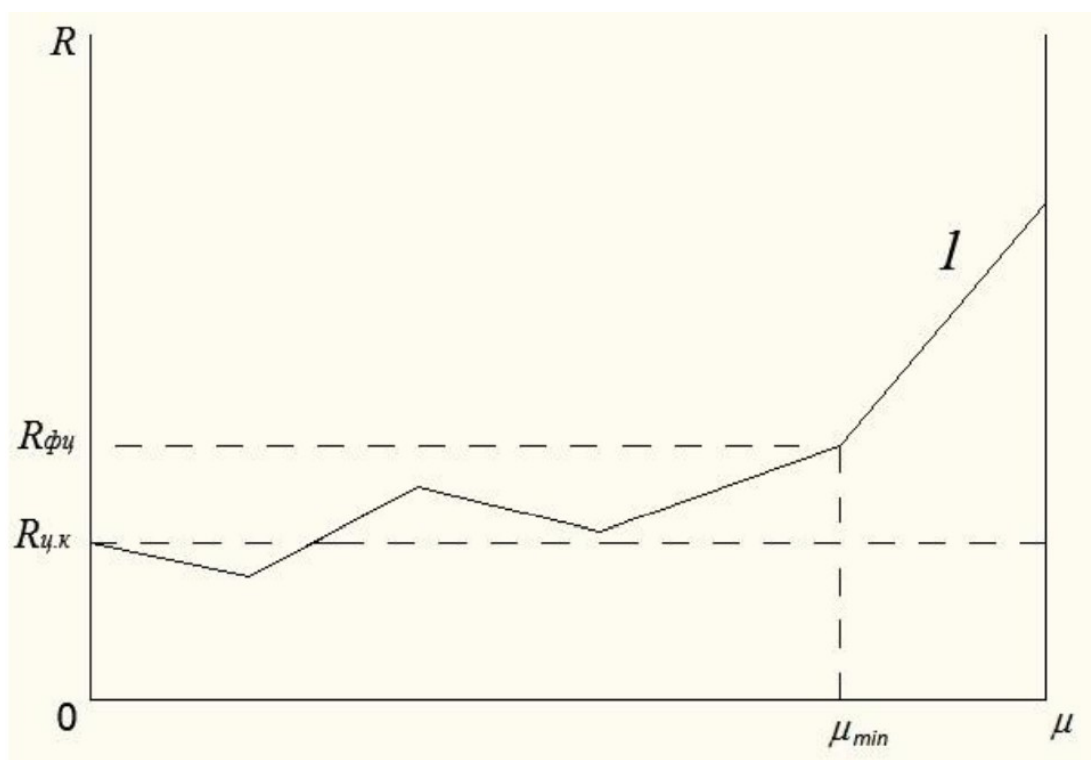


Рисунок 2.4 – Пример построения графика влияния коэффициента армирования на прочность фиброцемента

В данном методе расчёт величины сцепления ( $\varphi_t$ ) осуществляется по формуле (2.1):

$$(\varphi\tau) = \frac{R_{\text{фц}} - 3,5R_{\text{кз}}\mu_f^{\text{min}} - (1 - 4,5\mu_f^{\text{min}})R_{\text{ц.к}}}{2\frac{l_f}{d}\mu_f^{\text{min}}}, \quad (2.1)$$

где:  $R_{\text{фц}}$  – прочность фиброцемента, численно равная прочности композита при  $\mu_{\text{min}}$ ;  $R_{\text{кз}}$  – прочность контактной зоны;  $R_{\text{ц.к}}$  – прочность цементного камня, равная прочности неармированного образца;  $\mu_f^{\text{min}}$  – минимальный процент армирования, определённый по результатам испытаний;  $l_f$  – длина фибры;  $d$  – эквивалентный диаметр фибры;  $(\varphi)$  – «комплексный коэффициент, не требующий расшифровки при выполнении расчетов по уравнению прочности фибробетона.» [73, 93, 97, 103]

С развитием технологии фибробетонов с низко модульными волокнами появилась необходимость в адаптации разработанной методики к особенностям работы таких волокон в цементной матрице.

Приведенная выше методика разрабатывалась для фибробетонов, армированных высоко модульными волокнами, связь между расходом которых и прочностью фибробетона на растяжение при изгибе подчиняется зависимости, представленной на рис. 2.5.



Рисунок 2.5 – Характер изменения прочности фибробетона в зависимости от объемного содержания высоко модульной фибры [97]

По графику на рисунке 2.5 видно, что в начале диаграммы наблюдается горизонтальный участок, который характеризует такой низкий расход волокон, что они не влияют на прочность, поскольку волокна не попадают в рабочее сечение образца. Затем, прочность начинает повышаться по мере увеличения расхода волокон. Это повышение прочности объясняется увеличением числа волокон настолько, что они начинают попадать в рабочее сечение образца и воспринимать нагрузку, находящуюся в прямой зависимости от объёмного содержания волокон. После этого прочность откликается на расход волокон с большей интенсивностью, поскольку всё большую значимость приобретает фактор уплотнения и упрочнения цементного камня вблизи поверхности волокон. Затем, при дальнейшем увеличении содержания волокон, наблюдается недостаток матричной составляющей, расслоение композита, приводящее к снижению прочности.

В отличие от высокомодульных волокон, характер влияния низко модульных выглядит иначе, поскольку их влияние на прочностные характеристики композитов значительно меньше в сравнении с высокомодульными, что представлено на рис. 2.6.

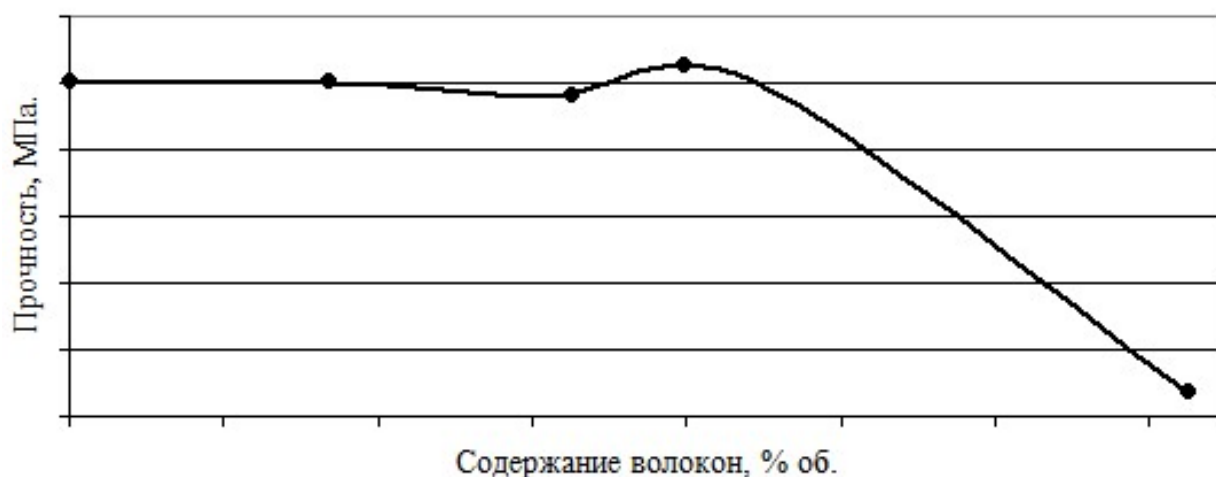


Рисунок 2.6 – Характер изменения прочности фибробетона в зависимости от объёмного содержания низко модульной фибры [73]

Из графика видно, что при малых расходах волокон они не оказывают влияния на прочность, поскольку их количество в композите невелико, и они

практически не попадают в зону развития трещины. При повышении расхода волокон наблюдается некоторое снижение прочности. Волокна снижают прочность фибробетона, поскольку занимают некоторую площадь рабочего сечения образца, но не упрочняют его. При последующем увеличении расхода волокон снижение прочности компенсируется, и она может несколько повыситься, что обуславливается уплотнением и упрочнением структуры цементного камня вблизи поверхности волокон. Далее, так же, как и в случае применения высокомодульной фибры, происходит снижение прочности из-за расслоения композита и недостатка матричной составляющей.

Применение формулы (2.1) для определения характеристики прочности сцепления низко модульных волокон с матрицей может оказаться затруднительным из-за невозможности точного определения координат перколяционной точки на диаграмме зависимости прочности фибробетона от расхода волокон. Таким образом, особую актуальность приобрело развитие методов определения прочности сцепления с матрицей применительно именно к низко модульным волокнам.

Результатом исследований [73, 107] стала методика определения величины сцепления синтетических волокон с матрицей, являющаяся развитием методики для высоко модульной фибры, основанной на применении «правила смесей», не отличающаяся с точки зрения изготовления, подготовки и испытания образцов, но имеющая иной порядок обработки получаемых экспериментальных данных.

Первоначально для отработки методики производилось исследование взаимодействия синтетических микроволокон с цементной матрицей. На основании данных, полученных в процессе испытания образцов на растяжение при изгибе, были построены диаграммы разрушения фиброцементных образцов, изготовленных с применением микроволокон *Fibrin*, представленные на рисунке 2.7.

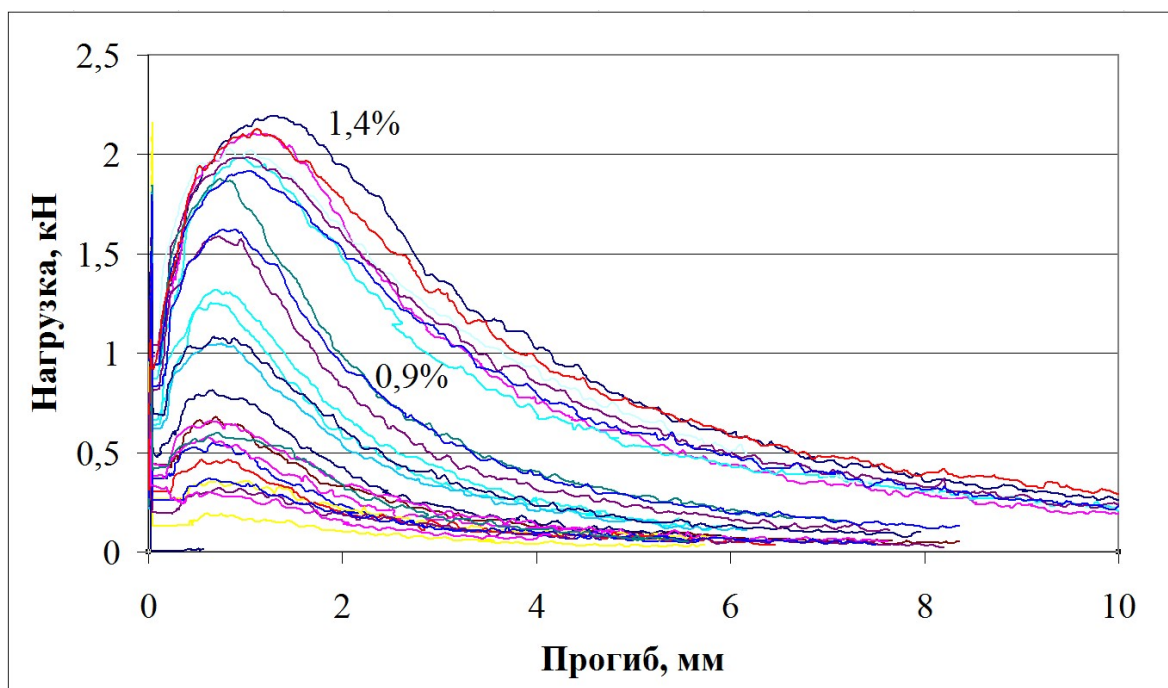


Рисунок 2.7 – Диаграммы деформирования фибробетонных образцов, изготовленных с применением синтетической микрофибры

Обращает на себя внимание характер разрушения композита. На всех диаграммах, вне зависимости от расхода волокон, имеются две вершины. Первая вершина, расположенная вблизи вертикальной оси диаграммы, характеризует работу фибробетона на этапе упругого деформирования и соответствует максимальной нагрузке, которую способна выдерживать матрица. Вторая вершина характеризует работу материала с трещиной, и отражает предельную нагрузку, воспринимаемую волокнами после образования магистральной трещины.

Результаты определения прочности фибробетона на растяжение при изгибе приведены в табл. 2.8.

Таблица 2.8 Результаты определения прочности на растяжение при изгибе образцов, изготовленных с применением микрофибры

Объемное содержание волокон, %, об.	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,8	0,9	1	1,1	1,2	1,4
Прочность на растяжение при изгибе, МПа	3,8	4,4	3,8	3,7	4,2	4,1	4,5	4,1	4,6	5,3	5,6	5,2	5,9

В графическом виде зависимость между расходом микроволокон и прочностью фибробетонных образцов на растяжение при изгибе представлена на рис. 2.8.

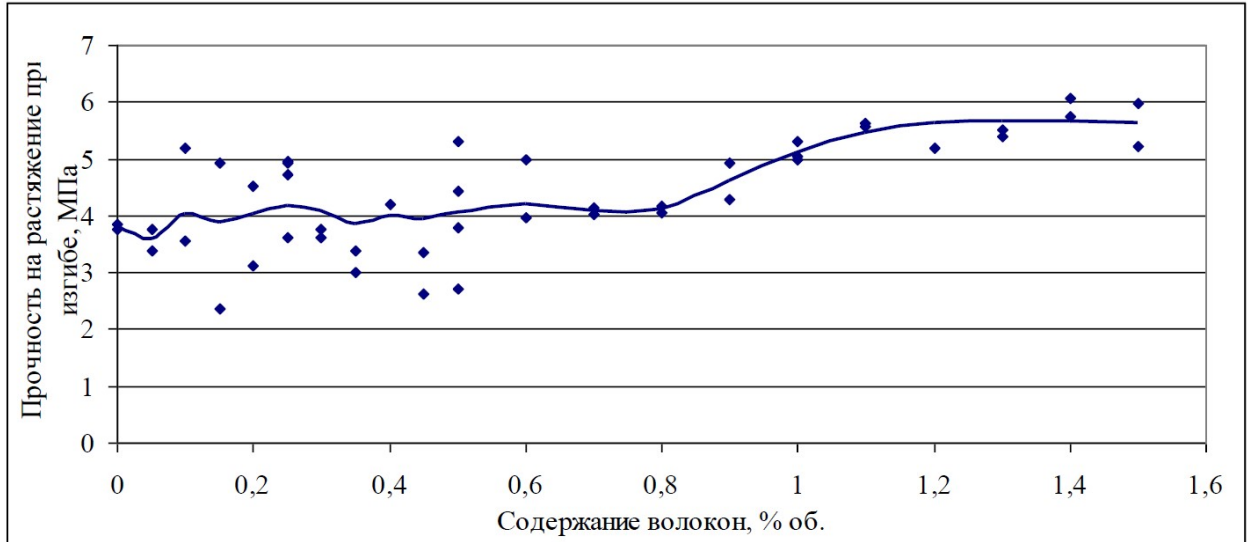


Рисунок 2.8 – Связь расхода микроволокон и прочности фибробетона на растяжение при изгибе

Полученный сводный график даёт слабое представление о характере влияния микроволокон на прочность фибробетона, в особенности при малых величинах насыщения. Для дальнейшего анализа требуется разложить полученный график на два отдельных, характеризующих различные участки экспериментальных диаграмм.

Можно построить график зависимости нагрузок, разрушающих матрицу, то есть нагрузок, соответствующих первому пику диаграмм, от расходов волокон, как показано на рисунке 2.9.



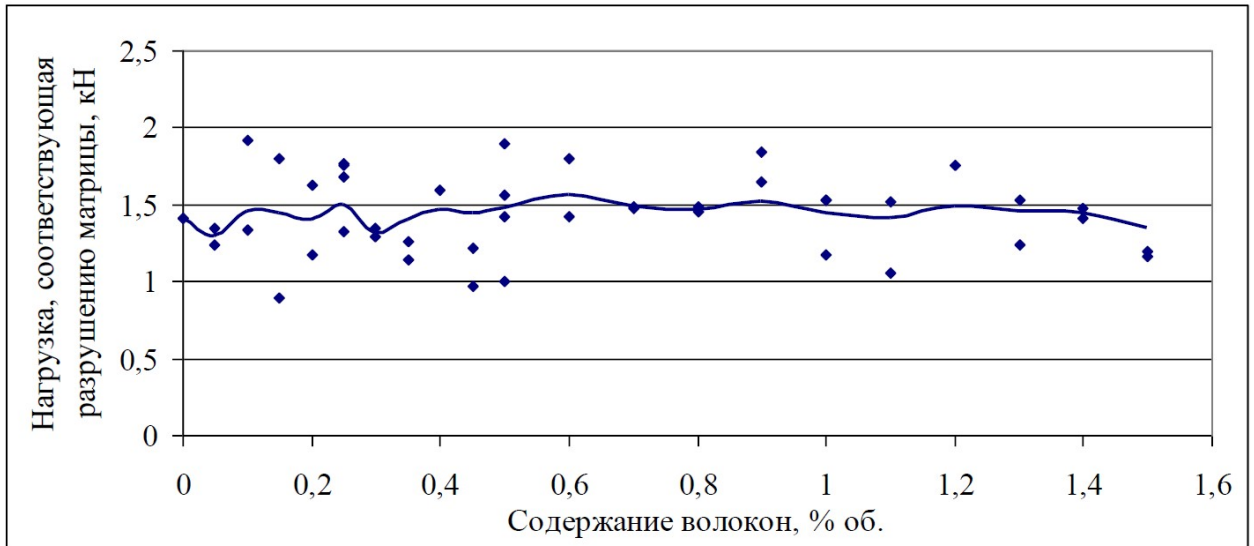


Рисунок 2.9 – Связь прочности матрицы и расхода синтетических микроволокон

По рисунку 2.9 видно, что нагрузка, при котором исчерпывается прочность матрицы, остается неизменной, вне зависимости от расхода волокон. Можно построить аналогичный график для описания влияния расхода волокон на величину нагрузки во втором пике диаграмм разрушения фиброцемента (рис. 2.10).

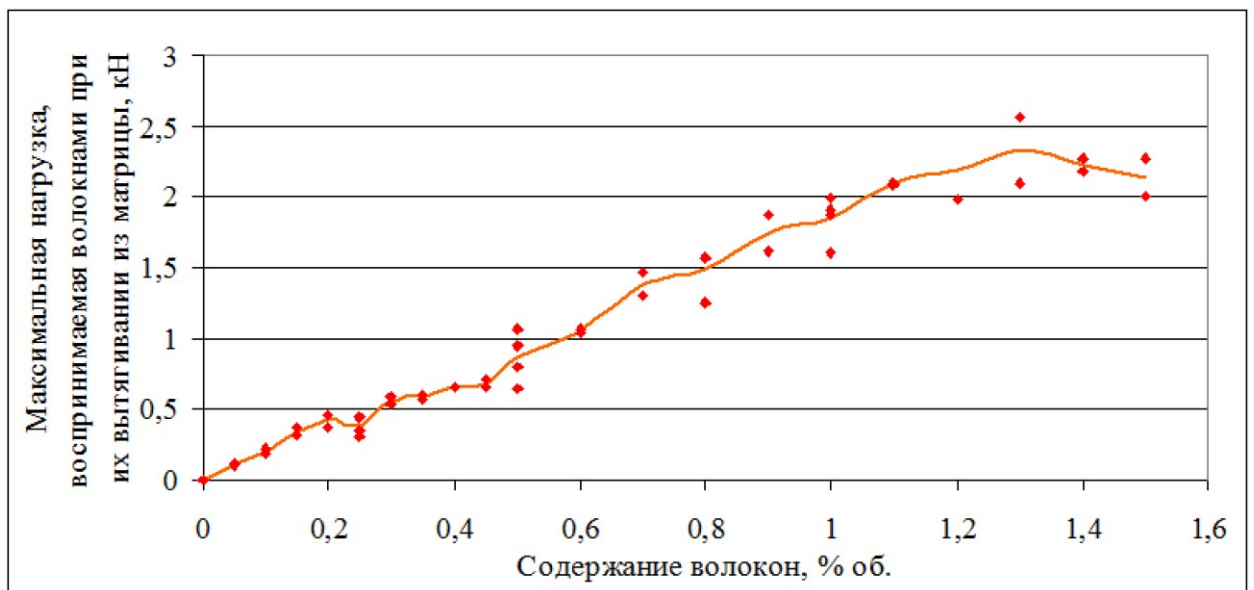


Рисунок 2.10 – Связь нагрузки во втором пике диаграммы разрушения фиброцементных образцов от расхода микроволокон

По графику видно, что нагрузка, воспринимаемая образцом во втором пике, то есть нагрузка, воспринимаемая только вытягивающимися из матрицы волокнами, возрастает пропорционально увеличению их расхода.

Совместим графики на рисунках 2.9 и 2.10, как показано на рисунке 2.11.

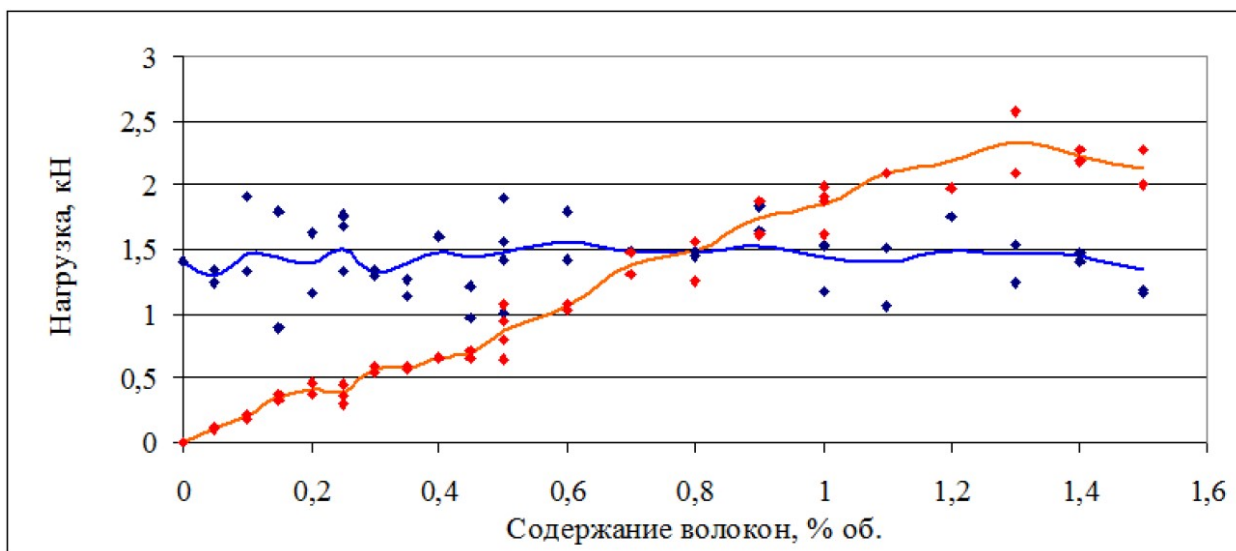


Рисунок 2.11 – Связь нагрузок в первом и втором пиках диаграмм разрушения с расходом микроволокон

По рисунку 2.11 можно достаточно точно определить точку пересечения графиков. В этой точке нагрузка, воспринимаемая волокнами, равна нагрузке, разрушающей матрицу. Другими словами, прочность матрицы равна напряжению в волокнах.

По данной нагрузке можно найти прочность фибробетона по известной формуле прочности на растяжение при изгибе (2.2).

$$R_{изг} = \frac{3P_c l_0}{2bh^2} \quad (2.2)$$

где,  $b$  и  $h$  – ширина и высота образца, м;  $l_0$  – база испытаний, расстояние между точками приложения нагрузки, м;  $P_c$  – действующая на образец нагрузка.

С другой стороны, прочность фибробетона в данной точке может быть определена из формулы (2.3) [93, 97], в основе которой лежат принципы "правила смесей". Три слагаемых в этой формуле описывают, соответственно, прочность матрицы, прочность контактной зоны и прочность сцепления волокон с матрицей. В момент пересечения магистральной трещины всего рабочего сечения образца и перераспределения нагрузки на волокна прочности матрицы и контактной зоны из дальнейших расчётов исключаются.

$$R_{\text{фц}} = \frac{2(\varphi\tau)l_f\mu_f}{d} + 3,5R_{\text{кз}}\mu_f + R_{\text{цк}}(1 - 4,5\mu_f) \quad (2.3)$$

где:  $(\varphi\tau)$  – характеристика прочности сцепления волокон с матрицей;  $l_f$  – длина фибры;  $\mu_f$  – объемная доля фибры;  $d$  – диаметр фибры;  $R_{\text{цк}}$  – прочность матрицы (цементного камня);  $R_{\text{кз}}$  – прочность контактной зоны

Прочность фибробетона, обеспеченную только вытягивающимися волокнами, можно определить по формуле (2.4) [93, 97]:

$$R_{\text{узг}} = \frac{2(\varphi\tau)l_f\mu_f}{d} \quad (2.4)$$

где,  $(\varphi\tau)$  – характеристика сцепления волокон с матрицей;  $l_f$  – длина фибры;  $\mu_f$  – объемная доля фибры;  $d$  – диаметр фибры;  $R_{\text{узг}}$  – прочность цементного камня на растяжение при изгибе.

Для определения прочности сцепления волокон с матрицей можно приравнять формулы (2.2) и (2.4) и выразить величину  $(\varphi\tau)$ , с получением формулы (2.5):

$$(\varphi\tau) = \frac{3Pl_o d}{4l_f\mu_f b h^2} \quad (2.5)$$

Из рис. 2.16 следует, что зависимость нагрузок в первом и втором пиках диаграмм разрушения фиброцемента от расхода волокон пересекается в точке с координатами 0,8% и 1,47 кН, что при подстановке в формулу (2.5)

позволяет рассчитать прочность сцепления микроволокон с матрицей, равную 0,51 МПа.

Следующим шагом было распространение данной методики на синтетические макроволокна. В данной части исследования армирование проводилось двумя видами полипропиленовой синтетической макрофибры, имеющими эквивалентный диаметром 0,7 мм и длину 50 мм, однако разный профиль. На поверхность макроволокон *Durus S500* (Рис. 2.1) в процессе изготовления был нанесён микрорельеф, что позволяет считать её фиброй периодического профиля, а волокно *Strofiber* (Рис. 2.2) имеет гладкий профиль.

По аналогичной схеме производилось формование и испытание образцов, сопровождавшееся построением диаграмм разрушения. Анализ построенных в ходе испытания диаграмм позволил, как и в случае использования микроволокон, выявить их принципиальное сходство: вне зависимости от вида фибры и её объёмного содержания на диаграмме разрушения видны два характерных пика. Первый пик характеризует упругое деформирование и разрушение матрицы, по горизонтальной оси диаграмм он ограничивается прогибами 0,03-0,05 мм. Вторым пиком диаграмм приходится на диапазон прогибов образцов 2-5 мм, в котором магистральная трещина пересекает сечение образца, и нагрузка, прикладываемая к образцу, с матрицы перераспределяется на армирующие волокна. При этом отмечается, что при высоких расходах волокон нагрузка во втором пике превышает нагрузку на первом, соответствующем пределу прочности матрицы, то есть низко модульные волокна в данной матрице, имеющей недостаточную прочность на изгиб, выступают в качестве упрочнителя.

Производя согласно вышеописанной методике обработку экспериментальных данных, можно построить совмещенный график нагрузок на первом и втором пиках диаграмм для волокон периодического (рис. 2.12) и гладкого (рис. 2.13) профилей.

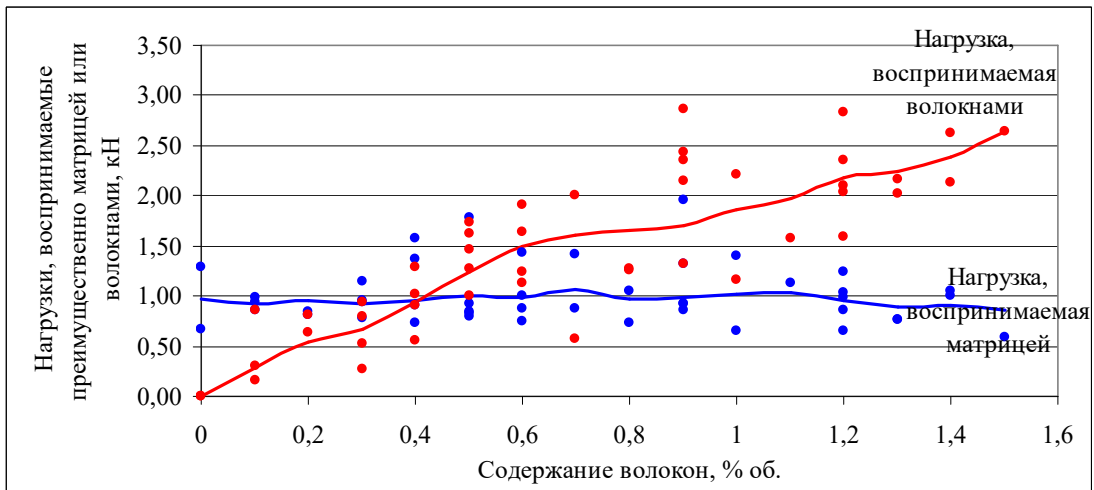


Рисунок 2.12 – Связь нагрузок в первом и втором пиках диаграмм разрушения с расходом макроволокон периодического профиля

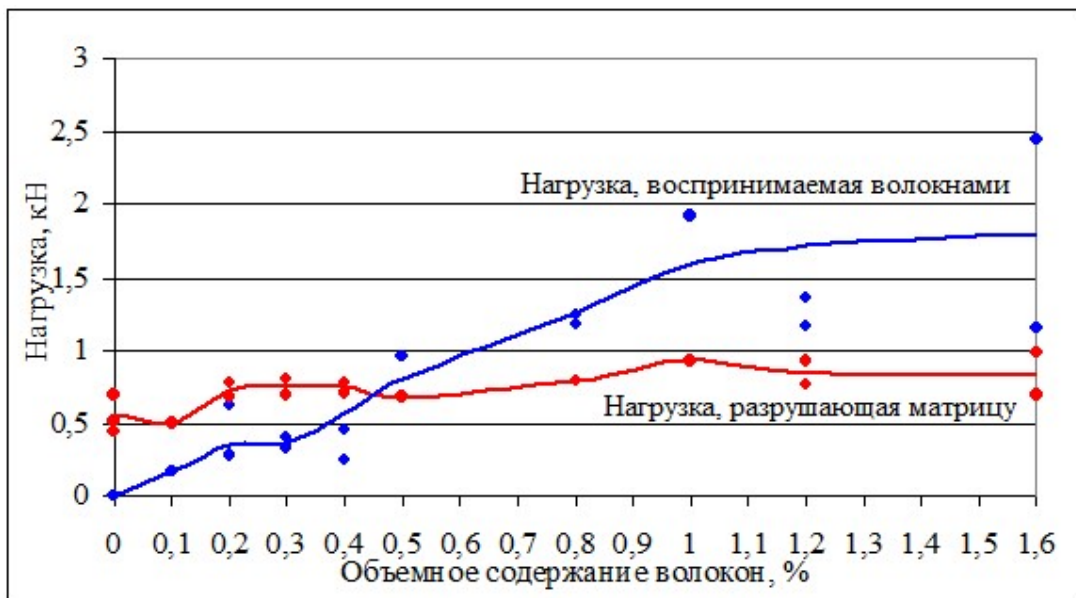


Рисунок 2.13 – Связь нагрузок в первом и втором пиках диаграмм разрушения с расходом макроволокон гладкого профиля

По рисунку 2.14 видно, что пересечение линий происходит в точке с координатами 0,4% и 0,9 кН. Подставляя численные значения в формулу (2.5), получим прочность сцепления синтетических макроволокон периодического профиля с матрицей, равную 4,43 МПа.

Найденные по рисунку 2.15 координаты точки пересечения, равные 0,45 % и 0,7 кН, при подстановке численных значений в формулу (2.5), показали величину сцепления синтетических макроволокон гладкого профиля с матрицей, равную 3,06 МПа.

### 2.3.2.2 Ускоренная методика определения прочности сцепления

Несмотря на то, что разработанная методика показывает высокую точность, проведение экспериментальной её части сопряжено со значительными трудозатратами. В связи с этим, предлагается возможный путь дальнейшего совершенствования методики определения прочности сцепления низко модульных волокон с матрицей [16, 97, 108].

Можно рассмотреть предлагаемые усовершенствования на примере испытаний фиброцементных образцов, изготовленных с применением синтетических макроволокон *Durus S500* (периодического профиля).

На рисунке 2.14 представлены диаграммы зависимостей прогибов от прилагаемых нагрузок, построенные в процессе проведения испытаний образцов по ГОСТ 29167. В частности, на рисунок вынесены диаграммы деформирования образца из неармированного цементного камня и фиброцементного образца, изготовленного с применением синтетических макроволокон периодического профиля, при их объемном содержании 0,6 %. Основа методики определения величины сцепления осталась неизменной, и подразумевает использование образцов-призм размерами 70×70×280 мм, изготовленных из цементного теста нормальной густоты. Объемное содержание волокон выбиралось таким образом, чтобы фибры, по виду фиброцементной смеси, было достаточно для попадания в рабочее сечение образца при его разрушении.

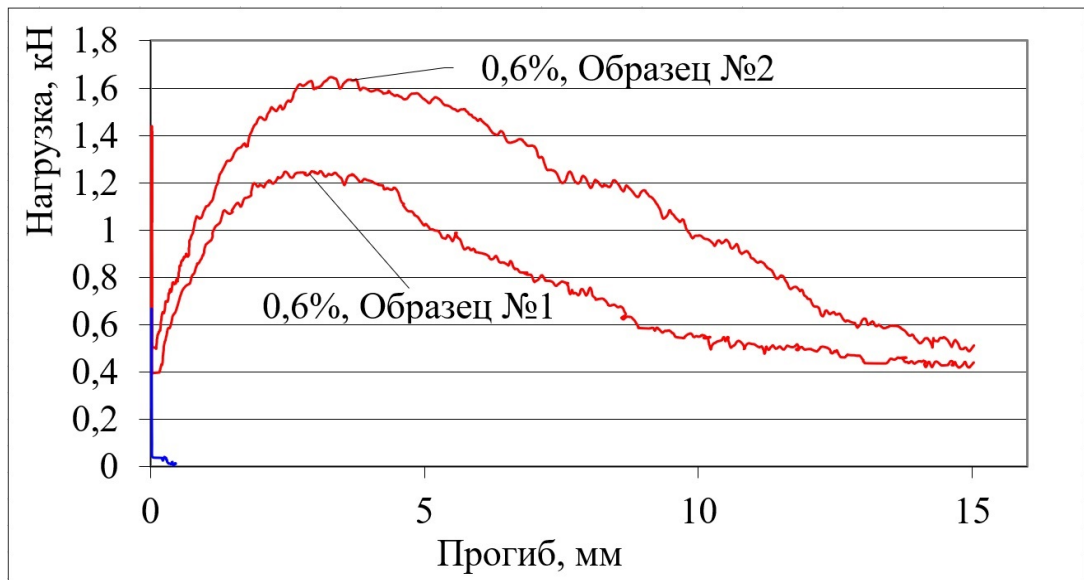


Рисунок 2.14 – Диаграммы разрушения цементного камня и фиброцемента, армированного волокнами периодического профиля

Из анализа диаграмм следует, что:

- нагрузка, разрушающая матрицу, составляет 1,04 кН (среднее арифметическое значение из двух рассмотренных диаграмм);
- максимальная нагрузка, воспринимаемая вытягивающимися из матрицы волокнами, составляет 1,45 кН (среднее арифметическое значение из двух рассмотренных диаграмм).

Необходимо внести следующие допущения:

- нагрузка, разрушающая матрицу, не изменяется при любом расходе волокон;
- нагрузка, воспринимаемая только вытягивающимися из матрицы волокнами, возрастает пропорционально их расходу.

С учетом полученных результатов и принятых допущений можно построить два графика. Первый – характеризует связь нагрузки, разрушающей матрицу, с расходом волокон, а второй – моделирует связь нагрузки, воспринимаемой только волокнами с их расходом. Такие графики представлены на рисунке 2.15.

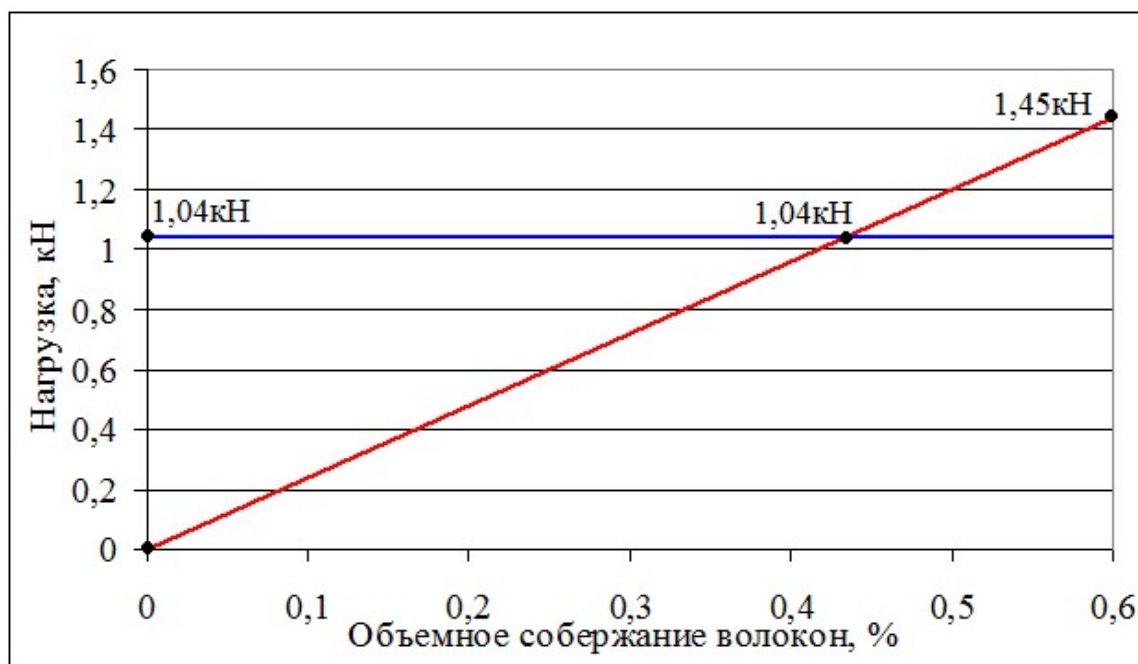


Рисунок 2.15 – Модели диаграмм зависимостей нагрузок, воспринимаемых матрицей и волокнами периодического профиля от их содержания

Затем, по графику, представленному на рисунке 2.15, необходимо найти координату точки пересечения линий по горизонтальной оси. В данном случае расход волокон, соответствующий пересечению линий, равен 0,43 %. Нагрузка в этой точке составляет 1,04 кН. Подставив найденные данные в формулу (2.5), получим величину сцепления синтетических макроволокон периодического профиля с цементным камнем равную 4,77 МПа.

Разработанная ускоренная методика была также апробирована на других видах низко модульных армирующих волокон – макроволокон *Strofiber*, имеющих гладкий профиль, и микроволокон *Fibrin XT*. Расчёты показали, что прочность сцепления макроволокон *Strofiber* с матрицей составляет 2,9 МПа, микроволокон *Fibrin XT* – 0,53 МПа.

Проведём сравнение результатов определения прочности сцепления низко модульных синтетических волокон с матрицей, полученных при использовании традиционной и усовершенствованной методик (табл. 2.9)



Таблица 2.9. Сравнение результатов определения прочности сцепления, полученные различными способами

Вид фибры	Характеристика сцепления ( $\varphi_t$ ), МПа	
	По традиционной методике	По усовершенствованной методике
<i>Durus S500</i> (макроволокно периодического профиля)	4,43	4,77
<i>Strofiber</i> (макроволокно гладкого профиля)	3,06	2,9
<i>Fibrin XT</i> (микроволоконно)	0,51	0,53

Видно, что расхождение между значениями характеристики сцепления макроволокон периодического профиля с матрицей составляет 7,1 %, а у волокон периодического профиля – 5,2 %. Для микроволокон разница составляет 3,9%. Расхождение между указанными значениями объясняется тем, что на практике, связь расхода волокон с воспринимаемой ими нагрузкой характеризуется не прямой возрастающей зависимостью, а нелинейно возрастающей. Расхождение составляет менее 10 %, что позволяет считать разработанную упрощенную методику определения прочности сцепления пригодной к использованию для макро- и микроволокон и подтверждает справедливость сделанных допущений.

### 2.3.3 Определение показателей трещиностойкости фибробетона при статическом нагружении

Определение силовых и энергетических характеристик разрушения является одной из наиболее важных задач в исследовании фибробетона.

Испытания производились на образцах-призмах размерами 70x70x280 мм, на которых перед испытаниями, согласно требованиям ГОСТ 29167, были сделаны иницирующие надрезы глубиной 25 мм на той грани образца, которая в процессе испытания будет находиться в растянутой зоне. Это связано с тем, что, как показывает анализ литературных источников, «при испытаниях образцов без начальных надрезов упругая энергия подается в образец в больших количествах для поиска «слабого звена» материала» [50,

52, 79, 81, 87]. Это увеличение зависит от размера образца и схемы нагружения, а не от физических свойств бетона. Следовательно, при испытаниях образцов без надрезов происходит завышение параметров деформирования и разрушения и, таким образом, искажение реальных свойств бетона [87].

Испытания проводились на установке, разработанной в СПбГАСУ (рис. 2.2) которая позволяет производить испытания в соответствии с требованиями ГОСТ 29167-91 «Бетоны. Методы определения характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении». В ходе данного испытания помимо прочностной характеристики материала программный комплекс экспериментальной установки автоматически строит диаграмму деформирования образца, которая «для определения силовых и энергетических характеристик трансформируется в расчетную, после чего производятся дополнительные построения. Планиметрированием определяются энергозатраты на отдельных этапах деформирования и разрушения образца:  $W_m$ ,  $W_e$ ,  $W_l$ ,  $W_{ub}$ ,  $W_{ce}$ , которые являются площадями фигур под полученной кривой» [50, 51, 52, 73, 87]. После этого расчетным путем определяются значения силовых и энергетических характеристик трещиностойкости по формулам, приведённым в ГОСТ 29167:

- Удельные энергозатраты на статическое разрушение до момента начала движения магистральной трещины ( $G_i$ )
- Удельные эффективные энергозатраты на статическое разрушение ( $G_F$ )
- Полные удельные упругие энергозатраты на статическое деформирование образцов до деления на части ( $G_{ce}$ )
- Статический джей-интеграл ( $J_i$ )
- Условный критический коэффициент интенсивности напряжений (показатель трещиностойкости) ( $K_c$ )

### 2.3.4 Определение водонепроницаемости

При испытании водонепроницаемости бетона и фибробетонов, а также для разработки метода оценки склонности бетона к взрывному разрушению в процессе нагревания использовался метод коэффициента фильтрации согласно ГОСТ 12730.5-84. Проведённые испытания позволили выявить серьёзные ошибки в формуле для обработки экспериментальных данных, препятствовавшие получению корректного результата, что отражено в статье [134].

На основании проведённых исследований были подготовлены предложения по внесению изменений в существующую нормативно-техническую документацию, которые впоследствии вошли в актуализированную редакцию ГОСТ 12730.5–2018 «Бетоны. Методы определения водонепроницаемости».

#### Выводы по второй главе

1) Произведён выбор и определены характеристики сырьевых материалов для изготовления бетонов и фибробетонов, в том числе - низкомодульных синтетических волокон.

2) Разработана и описана технология изготовления образцов, позволяющая получить максимально однородные фибробетонные смеси, обосновано применение стандартных методов физико-механических испытаний, учитывающих особенности структуры и свойств, а также поведения фибробетонов под нагрузкой.

3) Вследствие высокой трудоёмкости используемой оригинальной методики, разработана и экспериментально проверена усовершенствованная методика определения величины сцепления низкомодульных синтетических макроволокон с матрицей, позволяющая получить значение величины сцепления при минимальном числе измерений. Расхождение при

использовании составляет менее 5 %, что позволяет считать разработанную упрощенную методику определения прочности сцепления пригодной к использованию и подтверждает справедливость сделанных допущений;

4) Определены величины сцепления низко модульных синтетических волокон, имеющих различные геометрические характеристики (микро- и макро волокна) и различный профиль (гладкий или периодический) в случае макро волокон, с цементной матрицей. Величина сцепления гладких синтетических макро волокон, определённая по разработанной усовершенствованной методике, составила 2,9 МПа, волокон периодического профиля – 4,77 МПа, микро волокон – 0,53 МПа. При использовании традиционной методики прочность сцепления составила: для гладких синтетических макро волокон – 3,06 МПа, макро волокон периодического профиля – 4,43 МПа, микро волокон – 0,51 МПа.

5) На основании произведённых исследований были внесены изменения в действующую нормативно-техническую документацию по определению водонепроницаемости бетона.

### **3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПРОЧНОСТИ И ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ БЕТОНОВ, АРМИРОВАННЫХ НИЗКОМОДУЛЬНЫМИ СИНТЕТИЧЕСКИМИ ВОЛОКНАМИ**

#### **3.1 Роль армирующих волокон в процессе формирования структуры и свойств фибробетона с позиций механики разрушения**

В общем смысле, под понятием структуры понимается внутренне строение материала, которое отображает пространственное расположение кристаллов, кристаллических агрегатов, частиц разной формы и степени дисперсности с их взаимными связями и степенью взаимодействия между собой. Структура бетона формируется в процессе протекания реакции гидратации минералов портландцементного клинкера, схватывания и последующего твердения бетонной смеси. В соответствии с современными представлениями, цементные бетоны представляют собой гетерогенное полиструктурное капиллярно-пористое тело [93]. Гетерогенность структуры бетона, заключающаяся в значительном (до  $10^4$  раз) различии между размерами частиц составляющих компонентов, позволяет причислять бетоны, к классу композиционных материалов и выделить в ней несколько масштабных уровней. При этом подразумевается, что «каждая структура нижнего масштабного уровня входит в состав и является одним из компонентов структуры более высокого уровня. Такое строение бетонных композитов представляет собой, по выражению В.И. Соломатова, «структуру в структуре» или «композит в композите» со сложной полиструктурной организацией, которая в значительной степени определяет его свойства» [52, 87, 93].

«Количество выделяемых масштабных уровней может варьироваться и определяется по структурным неоднородностям, являющимся отражением того или иного механизма структурообразования» [64, 93]. Однако для

описания процессов структурообразования в бетоне целесообразно выделить три масштабных уровня.

Первый уровень – уровень цементного камня (микроскопический уровень), позволяющий описать процессы формирования новообразований, образующихся при протекании реакций гидратации клинкерных минералов, их фазовых состав, характеристики поровой структуры композита, а также установить взаимосвязь между слагающими композит компонентами.

Второй уровень – уровень бетона (макроскопический уровень), характеризующий количество компонентов бетона и соотношение между ними, их взаиморасположение и однородность распределения по объёму бетона, описывающий свойства и характеристики сырьевых компонентов и определяющий принципы построения фибробетона.

Третий уровень – третья структурная составляющая бетона – поверхность раздела между различными составными частями бетона, характеризующая внутренние поверхностные контакты разных по свойствам и состоянию фаз – цементного камня и заполнителей, – в пределах которых происходят физико-химические взаимодействия и изменения. Контактная зона обладает аномальными свойствами, отличными от свойств цементного камня, а её формирование связано с поверхностными явлениями в системе заполнитель-вода-цемент и различием их упругопластических свойств.

Современные представления о структурно-технологической модели бетона описывают её как совокупность элементарных объёмов, каждый из которых обладает всеми свойствами и признаками композита. Составной частью данной модели является «макроструктурная ячейка» [64, 93], размеры которой соизмеримы с размерами зёрен заполнителя, а характер и степень её взаимодействия с остальным объёмом материала определяется видом и активностью входящих в состав бетона компонентов и соотношением между ними. Исходя из этого, смысл конструирования структуры бетона и регулирования его свойств заключается в таком комбинировании дискретных структурных элементов, которое обеспечивает их определённую

монолитность и наиболее полно отвечает характеру и условиям работы конструкций.

При этом особое значение имеют свойства заполнителей (модуль упругости, прочность, долговечность, характер и природа поверхности и т.д.), минералогический состав и характеристики цемента, состав и свойства контактных зон и прочность границы раздела фаз, которая во многом определяется принятой технологией [64, 93].

Исходя из этих представлений, очевидно, армирующие волокна могут быть рассмотрены как часть своеобразного заполнителя. Применительно к волокнам, процессы образования контактных зон на границе раздела, справедливы в той же степени, что и для крупного и мелкого заполнителей, а за счёт развитой поверхности и высокой дисперсности роль контактных зон, обладающих повышенными плотностью и прочностью, многократно увеличивается, при этом характер и глубина изменений, происходящих в цементном камне и бетоне в присутствии волокон, будут зависеть от их вида, количества и дисперсности армирования [93]. Кроме того, исследования процессов формирования структуры бетонов показали, что армирующие волокна являются центрами кристаллизации, вокруг которых начинается формирование новообразований цементного камня [60, 93, 103], причём в данном случае кристаллическая структура имеет более упорядоченный характер чем при отсутствии волокон.

Влияние армирующих волокон на процессы гидратации оценивалось в ходе исследования, проведённого в СПбГАСУ. При помощи метода рентгенофазового анализа было установлено, что «цементный камень, образовавшийся в присутствии волокон и без них, имеет одинаковый фазовый состав, не зависящий в том числе и от вида армирующих волокон» [103]. Однако отмечалось, что в фиброармированных образцах интенсивность пиков, соответствующих гидроксиду кальция (портландиту, образовавшемуся в результате реакций гидратации), увеличена в сравнении с неармированными образцами, а интенсивность пиков, присущих  $C_3S$

значительно ниже. Это свидетельствует о том, что в присутствии волокон реакции гидратации происходят более интенсивно вне зависимости от свойств и состава самого волокна.

Если волокна обладают достаточной длиной, и их количество в смеси достаточно, то они начинают переплетаться между собой, первоначально (в процессе изготовления бетонной смеси) увеличивая связность смеси, а после схватывания и твердения образуя пространственный фиброцементный каркас, прочность которого зависит от материала, из которого изготовлены волокна, их геометрических характеристик и степени насыщения ими композита. При уменьшении длины фибры для создания каркаса требуется повысить насыщенность композита волокнами, что, однако, не может продолжаться бесконечно – существуют как геометрические ограничения по верхнему пределу насыщения, так и технологические – при превышении определённого процента армирования волокна начинают агломерироваться, создаются зоны, где объём цементного теста недостаточен для обмазки всех единичных волокон по всей площади поверхности, что ведёт к разрыву сплошности и ослаблению матрицы, негативно сказываясь на физико-механических характеристиках.

Наиболее наглядно процесс деформирования фибробетона под нагрузкой может быть показан при испытании на растяжение при изгибе. На первоначальных этапах нагружения при небольшой величине прогиба бетон деформируется упруго. Предельная величина напряжений, при превышении которой упругое деформирование переходит в пластическое, характеризуется модулем упругости. (3.1)

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (3.1)$$

Величина модуля упругости фибробетона при использовании дисперсного армирования может меняться в зависимости от модуля упругости волокна, и может быть определена расчётным путём при помощи «правила смеси» (3.2)



$$E_{fb} = \mu_b E_b + \phi \mu_f E_f, \quad (3.2)$$

где,  $E_b$  и  $E_f$  – модули упругости бетона (матрицы) и фибры;  $\mu_b$  и  $\mu_f$  – объемные доли бетона и фибры в составе композита.  $\phi$  – экспериментальный комплексный коэффициент [51, 93]

Формула (3.2) представляет собой формулу – вариацию «правила смесей», – модифицированную в [87] добавлением «экспериментального комплексного коэффициента», учитывающего взаимное влияние бетона и фибры, наличие между ними контактной зоны цементного камня с улучшенными свойствами, а также еще несколько возможных факторов» [93]. Данный коэффициент различен для каждого конкретного вида фибры.

Экспериментально подтверждено, что армирование бетона высокомодульными (как правило, стальными) волокнами ведёт к увеличению модуля упругости фибробетона. Однако во многих источниках данные о величине их влияния разнятся и лежат в пределах от 3% на каждый процент армирования [77] до 40-60% [51, 78, 79, 81, 87]. В то же время, автор работы [93] утверждает, что формула (3.2) не даёт реального представления о влиянии волокон во всем диапазоне насыщений, и она справедлива лишь в узком диапазоне малых насыщений, а также что в ней не учитывается взаимное влияние матрицы и волокна друг на друга. Очевидно, что в соответствии с правилом смесей увеличение прочности и модуля упругости должно находиться в прямой линейной зависимости с расходом волокон, однако это не подтверждается экспериментальными данными, и реальные характеристики отличаются от расчётных более, чем в два раза.

Конец зоны упругого деформирования свидетельствует о начале образования микротрещин, которые с ростом нагрузки увеличиваются, объединяясь между собой и образуя магистральную трещину. На данном этапе волокна, обладающие большей жесткостью, чем матрица, служат энергетическими барьерами на пути распространения трещин. В этом

механизме заключается одна из важнейших характеристик эффективности фибробетона как композиционного материала – высокая трещиностойкость.

Вопрос экспериментальной и расчетной оценки трещиностойкости материалов поднимался в большом количестве работ, как правило, с позиций механики разрушения [57, 62, 63, 74]. Наиболее часто встречается определение трещиностойкости как «способности материала сопротивляться образованию и развитию трещин» [58, 63, 65, 74, 79, 81, 84, 89]. Численно такая величина определяется критическим коэффициентом интенсивности напряжений, увеличение которого означает увеличение нагрузки, вызывающей развитие трещины в образце.

Литературный обзор показал, что, несмотря на то, что в различных работах приводятся несколько различные данные об увеличении трещиностойкости при армировании бетона волокнами, характер влияния во многом схож. Так, в работах В.Ю. Голубева [45, 92] армирование бетона стальной профилированной фиброй *Dramix* в количестве 2,9% по объему привело к увеличению трещиностойкости в 3,7 раза относительно неармированного бетона аналогичного состава.

В статье [118] приводятся данные об увеличении нагрузки в момент образования трещины по сравнению с неармированным составом на 40-80% при насыщении от 1,25% до 2,5% по объему. В работах [22, 35, 48, 128] отмечается увеличение трещиностойкости фибробетона в 1,5-2 раза относительно неармированного бетона.

Исследования показали, что на характеристики трещиностойкости большое влияние оказывают геометрические параметры волокон, а также материал, из которого они изготовлены. «При армировании бетона стальными проволочными волокнами диаметром 0,3 мм нагрузка, соответствующая образованию трещины, увеличивается в 1,25 раза относительно бетона, армированного аналогичными волокнами, но имеющих диаметр 1,25 мм, в связи с чем для конструкций, к которым предъявляются повышенные требования по трещиностойкости, следует применять волокна

небольших диаметров 0,2–0,5 мм» [96, 103]. В работе [114] механизм этого явления объясняется тем, что при использовании фибр меньших диаметров в единицу площади поперечного сечения попадает большее число отдельных волокон, которые в момент образования трещины более стеснены в перемещениях, чем более крупные волокна.

Следует разделять понятия трещиностойкости (способности сопротивляться образованию и развитию трещин) и вязкости разрушения, которые характеризуют различные стадии разрушения образца.

Вид разрушения цементных композитов во многом определяется видом и свойствами исходных компонентов, объемного соотношения между ними, главным образом, степенью насыщения матрицы армирующими волокнами и их видом, причём даже изготовленные из одного материала волокна могут придавать фибробетону как признаки вязкого разрушения, так и оставлять его хрупким [50, 51, 59, 62, 63, 70, 96, 103]. Образец неармированного бетона в ходе испытания на изгиб при достижении предельного состояния разрушается, как известно, хрупко, мгновенно разделяясь на две несвязанные половинки. Введением различных видов армирующих волокон можно не только увеличить прочность бетона на изгиб, но и придать ему вязкий характер разрушения, при котором армирующие волокна, после образования магистральной трещины и исчерпания запаса прочности матрицы, перераспределившие на себя усилия, действующие на образец, постепенно вытягиваются из образца, продолжая удерживать его от разрушения. Это свойство позволило устранить один из главных недостатков бетона – хрупкость при разрушении, значительно повысив безопасность эксплуатации конструкций.

Численно вязкость разрушения оценивается по показателю  $G_F$  – удельных эффективных энергозатрат на статическое разрушение, численно равных площади под участком диаграммы зависимости прогибов от прилагаемых нагрузок от начала движения магистральной трещины до момента полного разрушения композита [52]. Величина этого показателя

определяется, в основном, геометрическими и упругопластическими параметрами фибры. Существует понятие «критической длины волокна» ( $l_c$ ) – минимальной длины, при которой волокна рвутся от действия растягивающих напряжений. В зависимости от длины волокон, возможны два случая: если  $l_f > l_c$ , то большая часть волокон разрушается от растягивающих напряжений в момент разрушения композита, при этом вязкость разрушения будет невысока; при  $l_f < l_c$  напряжения недостаточны для разрушения волокон, и основной вклад в сопротивление композита разрушению будет вносить энергия, затрачиваемая на вытягивание волокон из матрицы, в то время как прочностные характеристики фибры будут использованы не полностью [87, 93]. Эти положения справедливы для всех видов армирующих волокон, а выполнение этих условий позволяет получить композит с вязким характером разрушения, используя волокна, которые по своей природе хрупкие [51]. Исследования показали, что энергетические затраты на вытягивание фибры из матрицы значительно превышают энергию, связанную с разрушением границ раздела фаз, из чего следует то, что создания композита с высокой вязкостью разрушения следует применять волокна с длиной, не превышающей критическую [73].

### **3.2 Теоретическая модель деформирования фибробетона с низкомолекулярными волокнами**

Многолетние исследования показывают, что определение силовых и энергетических характеристик трещиностойкости по методике ГОСТ 29167 позволяет получать наиболее информативные данные о поведении фибробетона под нагрузкой. Обработка полученных при испытаниях диаграмм позволяет сделать вывод о трещиностойкости фибробетонов различного состава и провести их количественное сравнение. Однако данный метод, даже с учётом его высокой точности, сопряжён с определенной трудоёмкостью – начиная от изготовления и подготовки образцов и

заканчивая обработкой результатов, что и послужило поводом к разработке метода моделирования диаграмм разрушения фибробетонных образцов под нагрузкой расчетным путем. При этом прогнозирование численных значений характеристик трещиностойкости фибробетона можно проводить на предварительных этапах исследований, а затем подтверждать сходимость расчетных и экспериментальных данных результатами испытаний малого количества образцов.

В ходе проведения многочисленных испытаний, в том числе для настоящего исследования (рис. 3.1) был получен большой массив данных, позволяющий судить о закономерностях, наблюдающихся при испытании фибробетонов, армированных низко модульными синтетическими волокнами

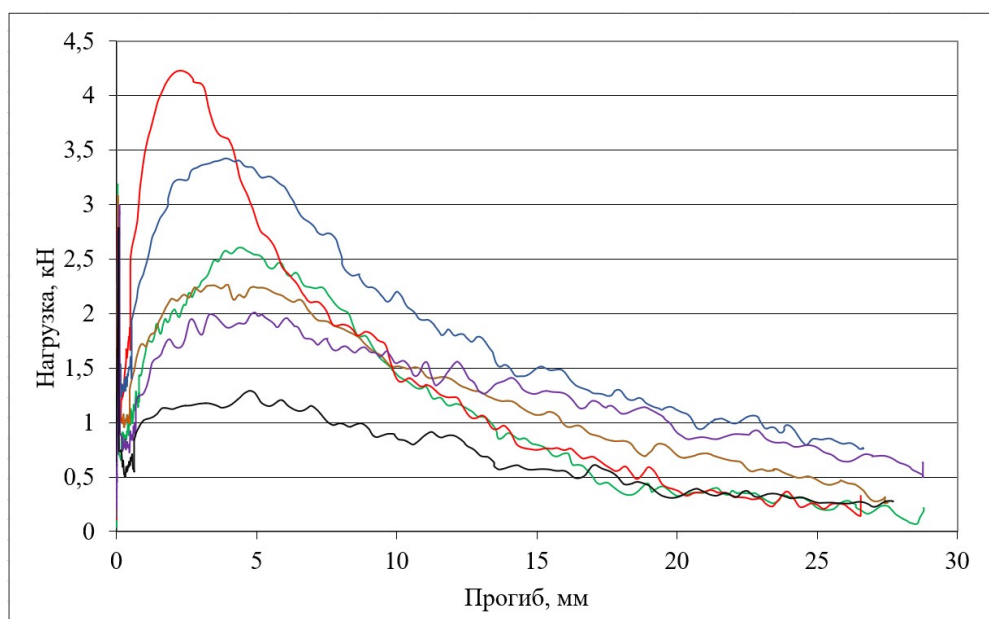


Рисунок 3.1 – Характерные диаграммы деформирования фибробетонных образцов с низко модульными волокнами

Анализ поведения фибробетонов под нагрузкой показал, что вне зависимости от геометрических характеристик использованных волокон характер их деформирования во многом схож между собой. Как при армировании бетона микроволокнами, так и при введении макрофибры можно выделить следующие закономерности в процессах деформирования образцов под нагрузкой.

Введение низко модульных волокон способствует увеличению прочности матрицы относительно неармированных образцов, что объясняется образованием на поверхности волокон уплотнённых и упрочнённых контактных зон. Данный эффект наблюдается при нахождении расхода волокон в оптимальном диапазоне, и при превышении предела насыщения он сменяется снижением характеристик ввиду создания дефектной структуры. Процесс деформирования сопровождается процессом микротрещинообразования, который в случае неармированной матрицы быстро приводит к слиянию микротрещин в одну магистральную трещину и разрушению бетона. Однако волокна, в достаточном количестве введённые в бетонную матрицу, оказываясь на пути распространения трещин, выполняют роль энергетических барьеров, поглощая энергию, подаваемую к трещине при нагружении образца, тем самым способствуя значительному повышению трещиностойкости композита.

Когда напряжения в матрице начинают превосходить предел её прочности, микротрещины сливаются в единую магистральную трещину, проходящую через всё поперечное сечение образца, что представляется на диаграммах в виде резкого падения прилагаемой нагрузки, которое заканчивается моментом её перераспределения с матрицы на волокна. В дальнейшем нагрузка на диаграмме начинает возрастать, достигая максимума при прогибе образца равном 3...5 мм. Это объясняется тем, что всё больше волокон, проходящих через поперечное сечение образца в зоне образования магистральной трещины, начинают воспринимать нагрузку, при этом оставаясь надёжно сцепленными с матрицей.

После прохождения экстремума прилагаемая нагрузка начинает плавно снижаться до минимальной. Это свидетельствует о том, что нормальные напряжения в волокнах не достигают предела их собственной прочности, что должно было бы сопровождаться их разрывом, но касательные напряжения на поверхности волокон превосходят прочность их сцепления с матрицей, приводя к вытягиванию фибры из бетона. Это свидетельствует о том, что

собственная прочность волокон недоиспользуется, однако такой характер разрушения (вязкий) значительно повышает безопасность эксплуатации конструкций, армированных данными видами волокон.

Таким образом, на основании анализа многочисленных экспериментальных диаграмм была разработана теоретическая модель деформирования фибробетона, изготовленного с применением низко модульных синтетических волокон, представленная на рисунке 3.2.

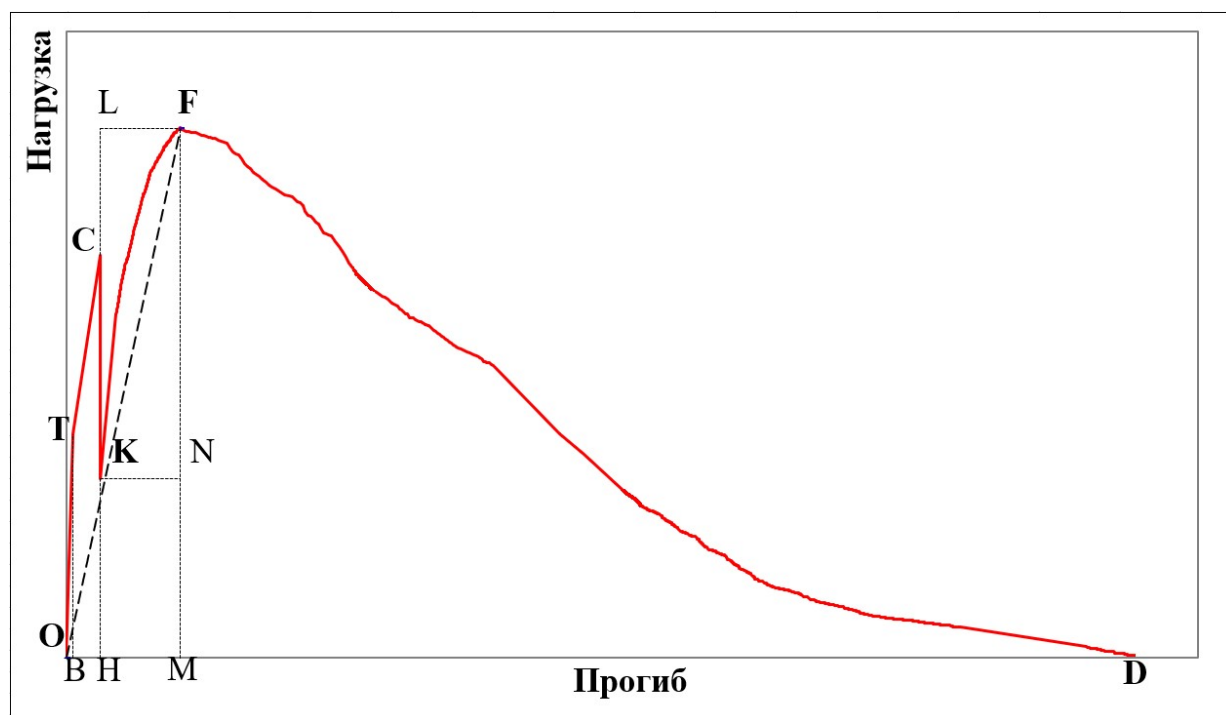


Рисунок 3.2 – Общий вид теоретической модели диаграммы деформирования фибробетонного образца с низко модульными волокнами

Данная диаграмма содержит ключевые точки и соединяющие их отрезки. Координаты ключевых точек можно найти расчетным путем, и затем построить по ним диаграммы зависимостей прогибов от прилагаемых нагрузок. По полученной таким образом диаграмме можно определить характеристики трещиностойкости моделируемого образца.

На рисунке видно, что, в отличие от диаграмм деформирования фибробетонов с высоко модульными волокнами [52], диаграмма имеет четыре характерных участка в пределах отрезков  $OT$ ,  $TC$ ,  $KF$  и  $FD$ . При этом, точка  $O$  обозначает начало отсчета данной системы координат и начало испытания

образца, точка  $T$  соответствует моменту перехода от упругих деформаций образца к пластическим, в точке  $C$  заканчивается процесс образования и слияния микротрещин в единую магистральную трещину, точка  $K$  определяет уровень напряжений в момент равновесия внутренних и внешних сил, после которого начинается развитие магистральной трещины, точка  $F$  соответствует максимальному значению нагрузки, после которого процесс разрушения приобретает необратимый характер, и точка  $D$  показывает величину максимального прогиба образца в момент полного разрушения, что соответствует концу испытания.

Моделирование поведения фибробетона под нагрузкой [16] подразумевает определение координат ключевых точек диаграмм разрушения и определение силовых и энергетических характеристик трещиностойкости по полученным диаграммам.

### 3.2.1 Определение величин нагрузки и прогиба в точке $T$

Построение расчётной диаграммы начинается, как и для фибробетонов с высокомодульной фиброй, с линии  $OT$ , соответствующей зоне упругих деформаций матрицы, и представляющей собой прямую линию, угол наклона которой определяется модулем упругости материала [52].

Нагрузка в точке  $T$ , соответствующая моменту начала трещинообразования при прогибе  $0,03...0,04$  мм, определяется по формуле (3.3):

$$P_T = \frac{f_T 48 E_{fb} I}{l_o^3} \quad (3.3)$$

где,  $P_T$  – нагрузка, действующая на образец;  $f_T$  – прогиб, соответствующий точке  $T$ ;  $I$  – момент инерции;  $l_o$  – база образца (расстояние между опорами),  $E_{fb}$  – модуль упругости фибробетона, определяемый по формуле (3.2).



### 3.2.2 Определение величины нагрузки и прогиба в точке С

При выражении значения нагрузки из известной формулы определения прочности бетона на изгиб полученное значение будет представлять собой координату точки С по оси нагрузок (формула 3.4):

$$P_C = \frac{2bh^2 R_{mb}}{3l_0} \quad (3.4)$$

где,  $b$  – ширина образца;  $h$  – высота образца;  $l_0$  – база испытаний;  $R_{mb}$  – прочность модифицированной матрицы.

Прочность модифицированной матрицы в данной точке может быть найдена из «правила смесей» (формула 3.5), при этом вклад фибры в обеспечение прочности композита на этом этапе не учитывается, поскольку её влияние заключается только в «модификации структуры цементного камня контактной зоны» [93, 106]:

$$R_{mb} = 3,5R_{кз}\mu_f + R_b(1 - 4,5\mu_f), \quad (3.5)$$

где,  $\mu_f$  – объемная доля фибры;  $R_b$ , и  $R_{кз}$  – прочность исходного бетона и контактной зоны на границе раздела «волокно-матрица» [93, 106]

Для определения прогиба в точке С, предложена формула (3.6), полученная выражением  $f_C$  из уравнения (3.3) с изменениями, специфическими для зоны пластического деформирования:

$$f_C = \frac{P_C l_0^3}{48E_{fb}^1 I} \quad (3.6)$$

где,  $E_{fb}^1$  – модуль деформации фибробетона, определяемый по формуле (3.7):

$$E_{fb}^1 = \nu_f E_{fb} \quad (3.7)$$

где,  $\nu_f$  – «коэффициент упругопластичности в момент, предшествующий разрушению матрицы» [52, 93, 106]; для бетона с низко модульными волокнами принимается в пределах 0,8...0,9.

### 3.2.3 Определение величины нагрузки и прогиба в точке $F$

Точка  $F$  показывает момент процесса деформирования и разрушения фибробетонного образца, когда магистральная трещина пересекла все его рабочее сечение, волокна частично вытянулись из матрицы и воспринимают максимальную нагрузку, какую только способны воспринять. После этой точки диаграмма разрушения приобретет нисходящий характер.

Выше упоминалось «правило смесей», преобразованное для расчета прочности фибробетона для случая, когда разрушение происходит в результате вытягивания волокон из матрицы.

Прочность фибробетона, обеспеченную только вытягивающимися волокнами, можно определить по формуле (3.8):

$$R_{fb} = \frac{2(\varphi\tau)l_f\mu_f}{d} \quad (3.8)$$

где,  $(\varphi\tau)$  – прочность сцепления волокон с матрицей;  $l_f$  – длина фибры;  $\mu_f$  – объемная доля фибры;  $d$  – диаметр фибры [106];

Для определения нагрузки в точке  $F$  можно приравнять формулы прочности на изгиб (2.2) и (3.8) и выразить значение нагрузки (формула (3.9)):

$$P_F = \frac{2bh^2R_{fb}}{3l_0} \quad (3.9)$$

Прогиб в точке  $F$  можно определить расчетным путем, по формуле (3.10), с учётом коэффициента упругопластичности.

$$f_F = \frac{P_F l_0^3}{48E_{fb}^1 I} \quad (3.10)$$

### 3.2.4 Определение величины нагрузки и прогиба в точке $K$

Определение координаты точки  $K$  осуществляется путем геометрических построений. При более детальном рассмотрении полученных

экспериментальных диаграмм деформирования фибробетонных образцов и диаграммы, отражающей их общий вид, можно сделать предположение о положении точки  $K$ .

Участки диаграммы разрушения фибробетонного образца, приближенные к точке  $K$ , представлены на рисунке 3.3.

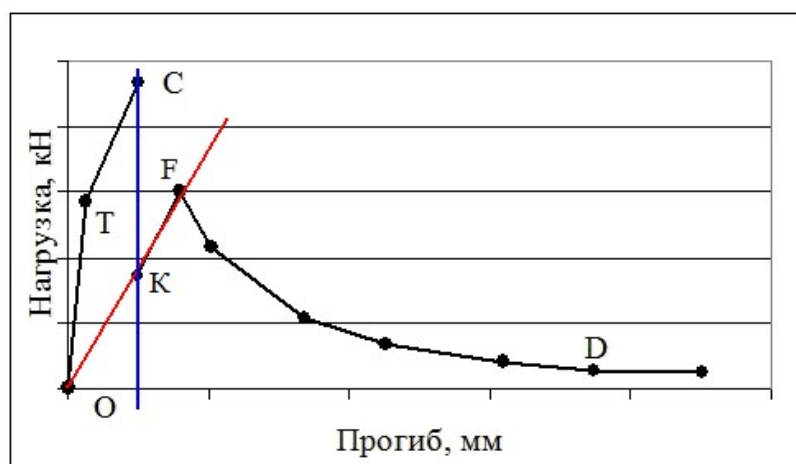


Рисунок 3.3 – Дополнительные построения на диаграмме разрушения фибробетонного образца

Предлагаемые допущения состоят в том, что если провести прямую через отрезок  $FK$  то она пройдет через начало отсчета диаграммы разрушения. Если через точку  $C$  провести перпендикуляр к горизонтальной оси, то точка  $K$  окажется на пересечении данного перпендикуляра и прямой  $OF$ . Произвести такие построения возможно только после расчета координат точек  $C$  и  $F$ .

### 3.2.5 Определение величины нагрузки и прогиба в точке $D$

Для построения линии  $FD$  следует учесть, что после достижения максимальной нагрузки в точке  $F$  заканчивается процесс образования и слияния микротрещин в единую магистральную трещину, проходящую через всё сечение образца, вследствие чего участие матрицы в процессе разрушения практически прекращается, а все напряжения

перераспределяются на волокна. Известно, что синтетические волокна обладают меньшей адгезией к цементному камню, чем другие виды волокон, поэтому восприятие нагрузок на участке  $FD$  обеспечивается только прочностью сцепления волокон с матрицей в процессе их вытягивания. Так как точка  $D$  соответствует окончанию испытания, то нагрузка становится равной нулю, и неизвестным остаётся величина прогиба в этой точке [106].

Площадь под кривой  $CD$  представляет собой энергетические затраты на статическое разрушение материала в результате движения магистральной трещины – вязкость разрушения фибробетона ( $W_{fb}$ ). В процессе деформирования образца после точки  $F$  основной вклад в сопротивление композита разрушению будет вносить энергия, затрачиваемая на вытягивание волокон из матрицы. Энергозатраты на вытягивание фибры могут быть рассчитаны по формуле 3.11, вывод которых описан в [52]:

$$W_{fb} = \frac{l_f^2(\varphi\tau)bh\mu_f}{6d} \quad (3.11)$$

Соединив точки  $F$  и  $D$ , получим под этой линией прямоугольный треугольник, площадь которого равна  $W_{fb}$ . Высота треугольника соответствует нагрузке в точке  $F$ , а прогиб в точке  $D$  может быть найден по формуле (3.12):

$$f_D = 2 \frac{W_{fb}}{P_F} + f_F \quad (3.12)$$

При построении линии  $FD$ , будет получаться прямой отрезок, тогда как на практике данный участок характеризуется нелинейно нисходящей зависимостью. Для достижения удовлетворительного согласия между расчетными и экспериментальными диаграммами, можно «путем последовательного приближения, в результате логарифмической или степенной аппроксимации полученного отрезка  $CD$  и увеличения прогиба в точке  $D$ , добиться равной с треугольником площади» [97, 106].

### **3.3. Построение расчетных диаграмм деформирования образцов, армированных низко модульной синтетической макрофиброй.**

#### **Прогнозирование прочности и трещиностойкости фибробетона с применением предложенной модели**

На основании изложенного в п.3.2 алгоритма проведём моделирование диаграмм разрушения фибробетонов, армированных низко модульными синтетическими волокнами *Durus S500* и *Strofiber*. По аналогии с традиционным методом построения диаграмм, моделирование проводится для образцов-призм размером 70×70×280 мм. Расстояние между точками приложения нагрузки при испытании образцов на изгиб (база) составляет 266 мм, в нижней (растянутой) грани образца имеется начальный надрез глубиной 25 мм [16, 68, 106]. Размеры образцов для моделирования выбраны таким образом, чтобы они повторяли процесс экспериментального исследования, и можно было оценить сходимость расчетных и экспериментальных результатов.

Расчёт начинается с зоны упругих деформаций, графически представляемой в виде прямой линии, выходящей из начала координат, угол наклона которой определяется модулем упругости фибробетона. Величина модуля упругости, определённая по формуле (3.2), составляет 31152 МПа.

Рассчитаем величины нагрузки и прогиба в точке  $T$ , соответствующей окончанию упругого деформирования и начала образования магистральной трещины. Вне зависимости от вида и расхода армирующих волокон процесс микротрещинообразования в бетоне и фибробетоне начинается при одинаковой величине прогиба ( $f_T = 0,037$  мм) [16, 68, 73, 106], и, используя указанную величину, можно по формуле (3.3) рассчитать нагрузку, соответствующую точке  $T$ , которая составит 1,78 кН. Момент инерции для прямоугольного рабочего сечения образца определяется по формуле (3.13) [4].

$$I = \frac{bh^3}{12} \quad (3.13)$$

Нагрузка в точке  $C$  определяется по формуле (3.4). С учетом приведенных данных, координата точки  $C$  по вертикальной оси составила 2,51 кН. Прогиб в точке  $C$  составляет 0,058 мм, при этом коэффициент упругопластичности составляет 0,9.

Нагрузка в точке  $F$  рассчитывается по формуле (3.9), с учетом, найденной экспериментальным путем, прочности сцепления волокон с матрицей она составляет 2,89 кН.

Прогиб в точке  $F$  можно определить по формуле (3.10), она составляет 2,89 кН.

После достижения максимальной (разрушающей) нагрузки в наивысшей точке  $F$  диаграммы, нагрузка начинает снижаться. В этот момент магистральная трещина пересекает все рабочее сечение образца, и таким образом исключает матричную составляющую композита из работы. Безусловно, матрица продолжает воспринимать нагрузку, но только посредством передачи ее волокнами, то есть работа матрицы состоит в обеспечении прочности сцепления ( $\varphi\tau$ ). Данный процесс разрушения фибробетонного образца описывается на диаграмме линией  $FD$ . Очевидно, что в случае развития описанного процесса нагрузка будет снижаться от наивысшей точки  $F$  до нуля [16, 52, 68, 73, 106]. Таким образом, оказывается неизвестной только прогиб образца  $f_D$ , который может быть определен из выражения (3.12), и составляет 44,19 мм. Как было сказано выше, в точке  $D$  заканчивается процесс деформирования и разрушения фибробетонного образца и испытание трещиностойкости завершается. Далее, по полученным диаграммам проводятся дополнительные построения, а по ним определяются численные значения характеристик трещиностойкости.

Описанные подходы моделирования поведения фибробетонных образцов под нагрузкой были использованы и при моделировании диаграмм

зависимостей прогибов образцов от прилагаемых нагрузок при других расходах волокон.

Полученные расчетным путем диаграммы представлены на рис. 3.4.

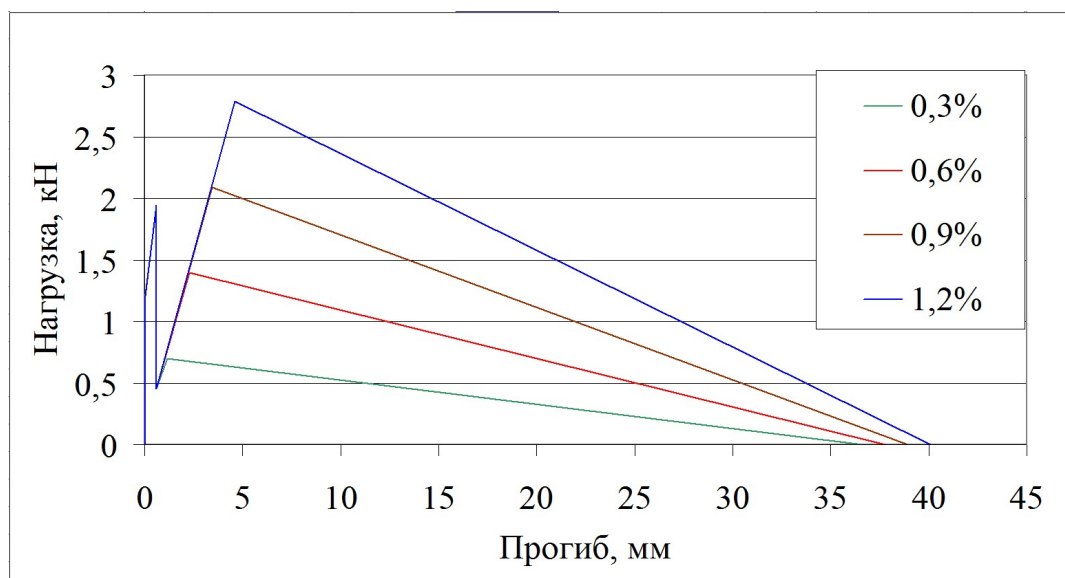


Рисунок 3.4 – Расчетные диаграммы деформирования и разрушения фибробетонных образцов, армированных синтетическими макроволоконными нитями периодического профиля

Аналогичным образом построены расчетные диаграммы разрушения фибробетонных образцов, армированных синтетическими макроволоконными нитями гладкого профиля. Полученные диаграммы представлены на рис. 3.5. Численные значения характеристик, полученных расчетным путем для обоих видов волокон, приведены в таблице 3.1.

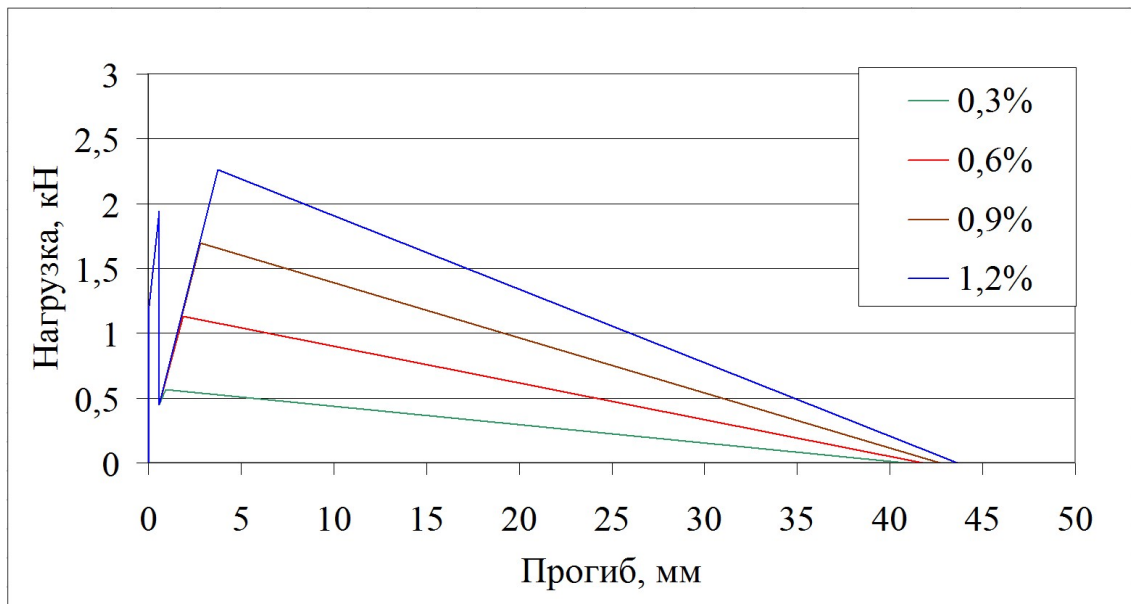


Рисунок 3.5 – Расчетные диаграммы деформирования и разрушения фибробетонных образцов, армированных синтетическими макроволоками гладкого профиля

Таблица 3.1 Силовые и энергетические характеристики трещиностойкости фибробетона, определенные расчётным путем

Характеристика трещиностойкости	Расход синтетических волокон макроволокон, % по объему							
	Неармированный	Периодического профиля ( <i>Durus S500</i> )				Гладкого профиля ( <i>Strofiber</i> )		
		0,3	0,6	0,9	1,2	0,3	0,6	0,9
$G_i^*$ – условные удельные энергозатраты на статическое разрушение до момента начала движения магистральной трещины, Дж/м <sup>2</sup>	28,3	25,3	25,3	25,6	24	25,9	25,3	24,9
$G_f^*$ – условные удельные эффективные энергозатраты на статическое разрушение, Дж/м <sup>2</sup>	226	1932	6065	6318	8142	958	2764	4451
$K_c^*$ – условный критический коэффициент интенсивности напряжений, МПа·м <sup>0,5</sup>	0,91	1,10	1,09	1,08	1,07	1,10	1,09	1,08
Модуль упругости, МПа×10 <sup>3</sup>	29,8	30,1	30,5	30,75	31,2	30,6	31,5	32,1



На рис. 3.6. представлено сравнение теоретических и экспериментальных диаграмм, построенных при одинаковом расходе волокон.

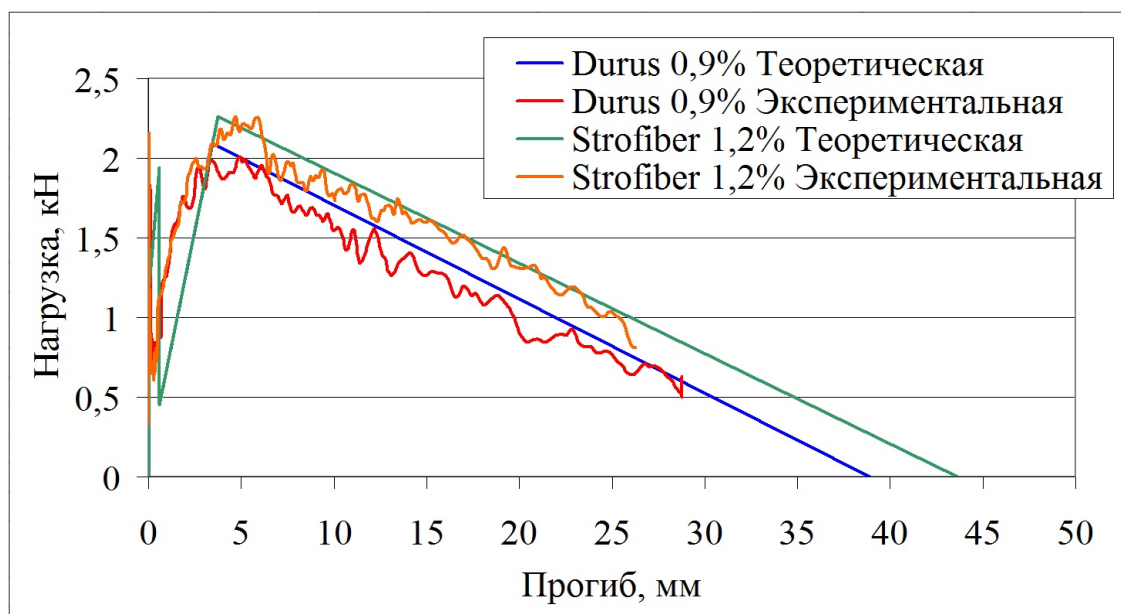


Рисунок 3.6 – Расчётные и экспериментальные диаграммы деформирования синтетических макроволокон гладкого и периодического профилей

Видно, что представленные теоретические диаграммы практически полностью совпадают с экспериментальными диаграммами, полученными в ходе предварительных экспериментов с теми же видами армирующих волокоо и при тех же их расходах, что подтверждает правильность выбранных подходов проведённых расчётов.

### Выводы по третьей главе

1) Синтетические волокна играют важную структурообразующую роль в бетоне, взаимодействуя с цементной составляющей матрицы и выполняя функцию подложки, на поверхности которой происходит образование контактных зон с повышенной плотностью и прочностью на границе раздела фаз волокно-матрица. При достаточном насыщении матрицы волокнами образуется фиброцементный каркас, благодаря высокой степени

дисперсности и непрерывности которого создается энергетический барьер на пути распространения трещин в композите при эксплуатационных нагрузках.

2) Дисперсно армированный бетон представляет собой многоуровневый композиционный материал, свойства которого определяются свойствами каждого масштабного уровня. При этом установлено, что определённые виды волокон, отличающиеся материалом, геометрическими и упругопластическими характеристиками, наиболее эффективно работают на разных масштабных уровнях.

3) Применение дисперсного армирования позволяет значительно увеличить трещиностойкость композита, а также избавиться от критического недостатка традиционного бетона – хрупкости при разрушении, сменив характер разрушения на вязкий. Это значительно увеличивает безопасность эксплуатации конструкций и не может быть достигнуто иными методами кроме фибрового армирования.

4) На основании многочисленных испытаний фибробетонов, армированных низко модульными синтетическими волокнами, выведен общий вид диаграмм деформирования такого рода композитов, имеющий заметные отличия от характера разрушения фибробетонов с высоко модульными волокнами и предложена теоретическая модель деформирования, позволяющая производить построение этих диаграмм, учитывающая особенности применяемого армирования.

5) На основании разработанной теоретической модели проведено моделирование диаграмм разрушения композитов, армированных синтетическими макро волокнами, для прогнозирования их поведения при нагружении, и по полученным теоретическим диаграммам для двух видов макро волокон с различным их количеством в композите определены энергетические и силовые характеристики разрушения. Сходимость полученных результатов с экспериментальными данными показало адекватность разработанной модели.

## **4. ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ФИБРОБЕТОНОВ, АРМИРОВАННЫХ СИНТЕТИЧЕСКИМИ ВОЛОКНАМИ**

До последнего времени вопросы эффективности низко модульных синтетических волокон при армировании бетона были освещены в недостаточной степени. Более того, зачастую исследования влияния волокон на физико-механические характеристики фибробетонов представляют собой лишь полученные в ходе проведения экспериментов величины тех или иных характеристик в зависимости от количества армирующих волокон, и не затрагивают вопросы структуры, образующейся в результате введения волокон, механизмов поведения фибробетонов под нагрузкой вплоть до разрушения или взаимодействия волокон с матрицей. Перечисленные свойства зависят от многих факторов, таких как состав бетона-матрицы, химическая природа, типоразмер и количество применяемых волокон, и определяют области эффективного использования исследуемых волокон.

### **4.1. Прочность и трещиностойкость**

#### **4.1.1. Влияние микро- и макроволокон на прочностные характеристики фибробетонов**

Одним из основных показателей качества конструкционного материала является прочность. Говоря о бетоне, первым делом подразумевается его прочность на сжатие, поскольку бетон практически не способен сопротивляться растягивающим напряжениям. Одним из способов повышения прочности на осевое растяжение и растяжение при изгибе является использование дисперсного армирования. В данном разделе представлены результаты прочностных характеристик бетонов, армированных низко модульными синтетическими волокнами. Состав бетона-

матрицы приведён в п. 2.2. Из каждого состава производилось формирование неармированных образцов-кубов, затем в оставшуюся часть матрицы вводились низко модульные волокна, после чего из фибробетонной смеси формовались образцы-кубы размерами 100x100x100 мм и образцы-призмы размерами 70x70x280 мм.

#### 4.1.1.1 Определение прочностных характеристик фибробетонов, армированных макро волокнами

Результаты определения прочности образцов, армированных синтетическими макро волокнами, представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 Прочностные характеристики фибробетонов, армированных макро волокнами.

Расход волокон	<i>Durus S500</i> (Периодического профиля)			<i>Strofiber</i> (Гладкая)		
	$\rho_{\text{ср}}$ , кг/м <sup>3</sup>	$R_{\text{сж}}$ , МПа	$R_{\text{изг}}$ , МПа	$\rho_{\text{ср}}$ , кг/м <sup>3</sup>	$R_{\text{сж}}$ , МПа	$R_{\text{изг}}$ , МПа
Неармированный	2346	33,9	4,63	2346	33,9	4,63
0,3%	2328	34,2	4,78	2353	35,5	4,98
0,6%	2369	36,6	6,06	2350	38,4	6,65
0,9%	2379	40,7	8,41	2390	37,0	6,63
1,2%	2400	43,2	10,97	–	–	–

Анализ экспериментальных данных показывает, что введение синтетических макро волокон в матрицу с крупным заполнителем приводит к повышению прочности на сжатие как при использовании волокон периодического профиля, так и гладких. Величина прироста прочности зависит, в основном, от геометрических параметров фибры, определяющих оптимальный диапазон насыщений матрицы волокнами, и для фибры *Durus* составляет 20% при расходе 0,9%, а для волокон *Strofiber* – 13% при расходе 0,6%.

Исследования показали, что ощутимый прирост прочности на сжатие при армировании бетона низко модульными волокнами наблюдается на

матрице сравнительно низкого класса по прочности на сжатие. При повышении прочности матрицы влияние низко модульных волокон становится менее выраженным. Это связано с тем, что повышение прочности на сжатие определяется созданием более плотных и прочных контактных зон на границе раздела волокно-матрица, которое в бетонах низких классов в большей степени подвержено модификации, чем в высокопрочных бетонах, где низко модульные волокна, наоборот, будут играть роль локальных дефектов, ослабляющих сечение конструкций.

Результаты определения прочности на растяжение при изгибе получены при помощи испытательной установки, разработанной в СПбГАСУ (рис. 2.4). Отмечается заметное увеличение прочностных характеристик, степень которого во многом определяется геометрическими параметрами используемых волокон. Фибробетоны, армированные гладкими макроволокнами, показывают увеличение прочности до 65% относительно неармированного бетона с аналогичным составом матрицы, при этом фибробетоны с макроволокнами волнового профиля, в зависимости от насыщения, могут приводить к увеличению прочности на растяжение при изгибе до 1,8...2,2 раз. Рассматривая диаграммы зависимости прогибов образцов от прилагаемых нагрузок, представленные на рис. 4.1. и 4.3, можно сделать выводы о том, что различные типоразмеры низко модульных волокон по-разному работают в бетоне. Гладкие волокна обеспечивают повышение прочности, в основном, за счёт модификации структуры, но их вклад в обеспечение вязкого характера разрушения меньше, и второй пик, соответствующий максимальной нагрузке, которую могут воспринять волокна перед исчерпанием прочности, выражен значительно меньше, нежели у волокон периодического профиля. Нагрузка, соответствующая второму пику на графиках, описывающих поведение фибробетонов, армированных макроволокнами периодического профиля, при насыщении выше 0,9% начинает превышать нагрузку, соответствующую пределу прочности матрицы (первый пик). Это и подтверждает зависимость

прочности сцепления волокон от вида их поверхности и свидетельствует о том, что прочностные характеристики волокон с периодическим профилем реализуются в фибробетоне в большей степени, одновременно приводя к повышению его прочностных характеристик.

#### *4.1.1.2 Определение прочностных характеристик фибробетонов, армированных микроволокнами*

Результаты определения прочностных характеристик приведены в таблице 4.2

Таблица 4.2 Прочностные характеристики фибробетонов, армированных микроволокнами

	$\rho_{\text{ср}}$ , кг/м <sup>3</sup>	$R_{\text{сж}}$ , МПа	$R_{\text{изг}}$ , МПа
Неармированный	2346	33,9	4,63
0,1%	2371	37,2	4,27
0,2%	2368	36,9	4,62
0,3%	2312	36,2	4,51
0,4%	2295	34,2	4,43

Значительно меньший в сравнении с макроволокнами верхний предел насыщения связан со значительно ухудшившимися технологическими характеристиками получаемой фибробетонной смеси, связанной с большой величиной общей удельной поверхности введённой в смесь фибры, требующей значительных затрат воды затворения на смачивание. Анализ полученных результатов показал, что наибольшую эффективность низко модульные микроволокна проявляют при малом насыщении – до 0,2% по объёму замеса (в пределах 2 кг волокон на 1 м<sup>3</sup> бетонной смеси). Введение волокон, приводит к повышению прочности на сжатие до 10%, практически не оказывая влияния на прочности на изгиб. Это свидетельствует о том, что сами волокна не вносят большого вклада в прочность композита, но модифицирует структуру контактной зоны вблизи поверхности волокон,

повышая её плотность и прочность. Дальнейшее насыщение бетона микроволокнами приводит к разуплотнению структуры, созданию сгустков волокон, не обмазанных цементным тестом и снижению физико-механических характеристик.

#### 4.1.2. Характеристики трещиностойкости фибробетонов, армированных микро- и макроволокнами

На рисунке 4.1 представлены диаграммы деформирования фибробетонных образцов, изготовленных с применением синтетической макрофибры, построенные в процессе испытания образцов-призм, армированных макроволокнами *Durus* (периодического профиля), на растяжение при изгибе.

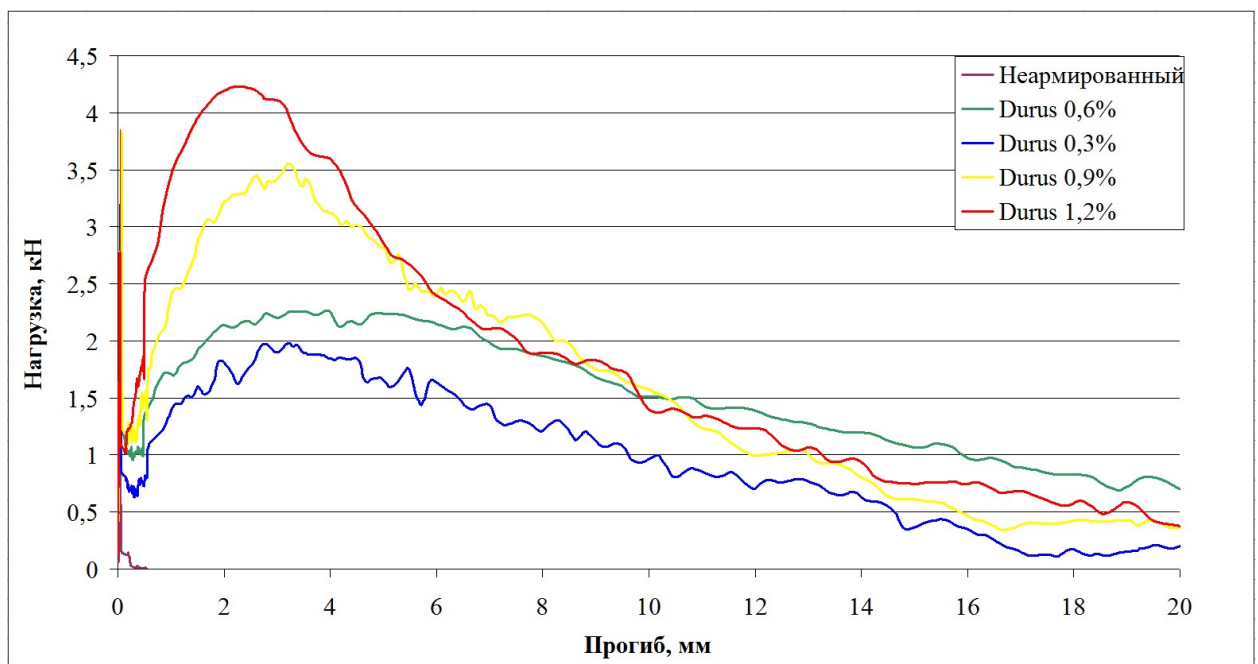


Рисунок 4.1 – Диаграммы зависимостей прогибов образцов от прилагаемых к ним нагрузок

На рисунке 4.2 те же диаграммы представлены в большем масштабе для более детального рассмотрения зоны упругих деформаций:

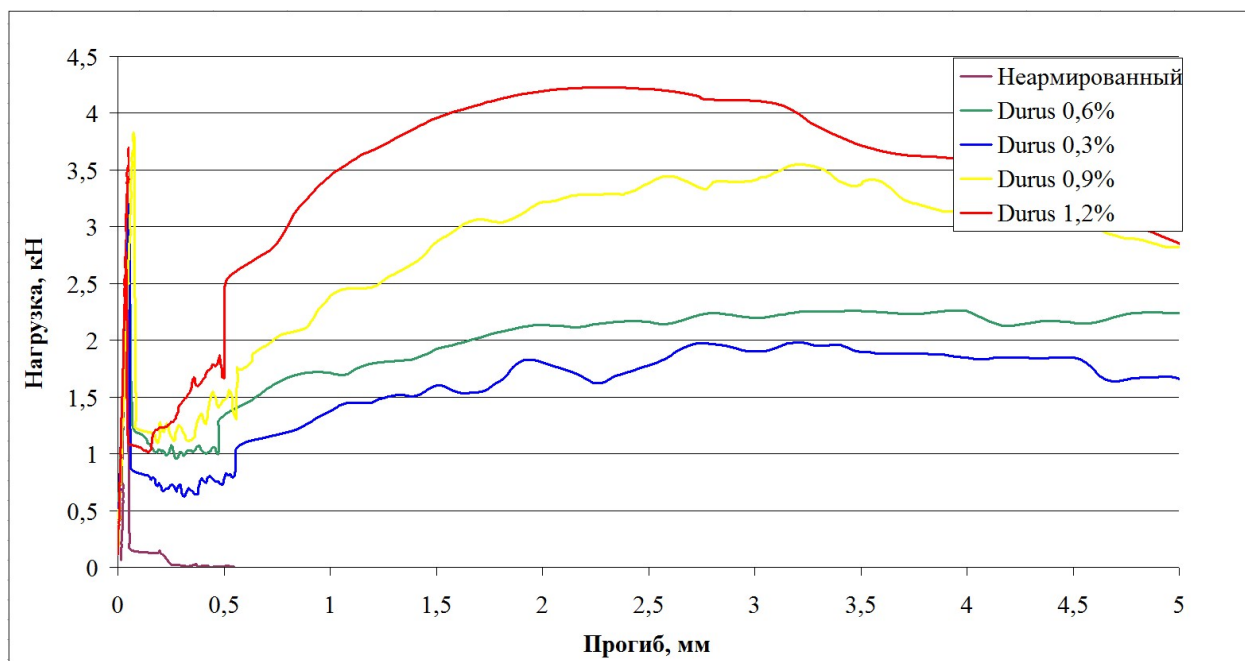


Рисунок 4.2 – Начала диаграмм зависимостей прогибов образцов от прикладываемых к ним нагрузок

На рисунке 4.3 представлены диаграммы зависимости прогибов от прикладываемых нагрузок, построенные в процессе испытания образцов, армированных макроволокном гладкого профиля *Strofiber*, на растяжение при изгибе.

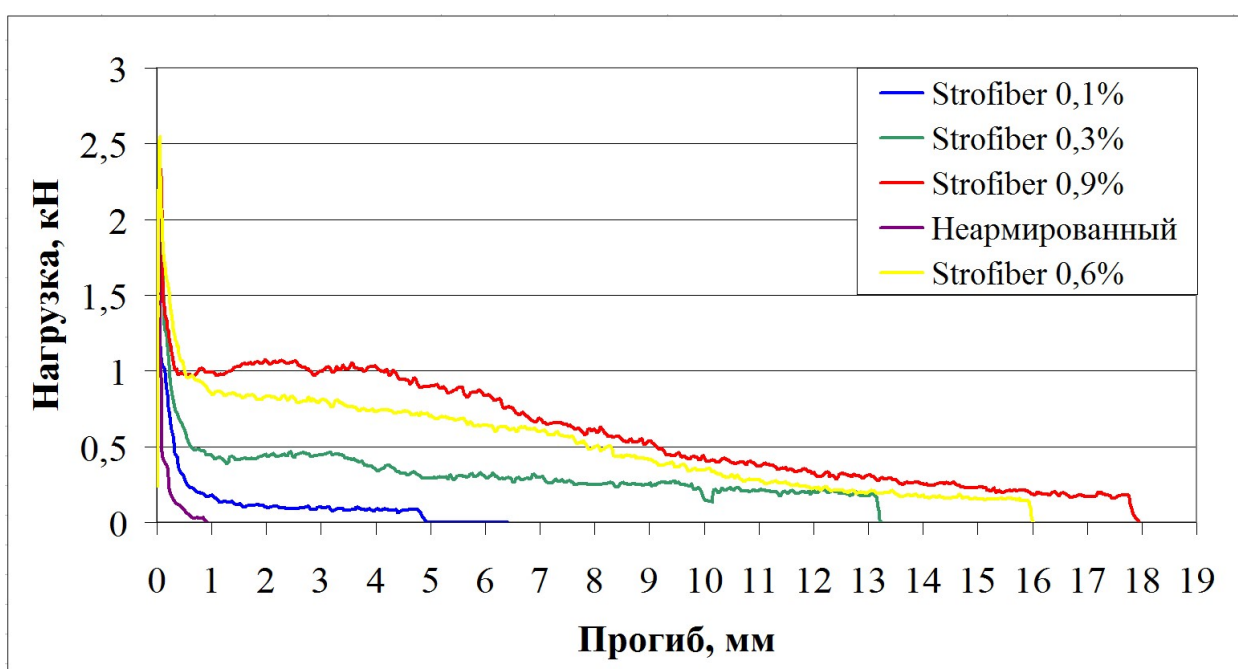


Рисунок 4.3 – Диаграммы зависимостей прогибов образцов от прикладываемых к ним нагрузок



На рисунке 4.4 представлены те же диаграммы зависимостей прогибов образцов от прилагаемых нагрузок, но ограниченные 5 мм по оси прогибов, для более подробного рассмотрения зоны упругих деформаций:

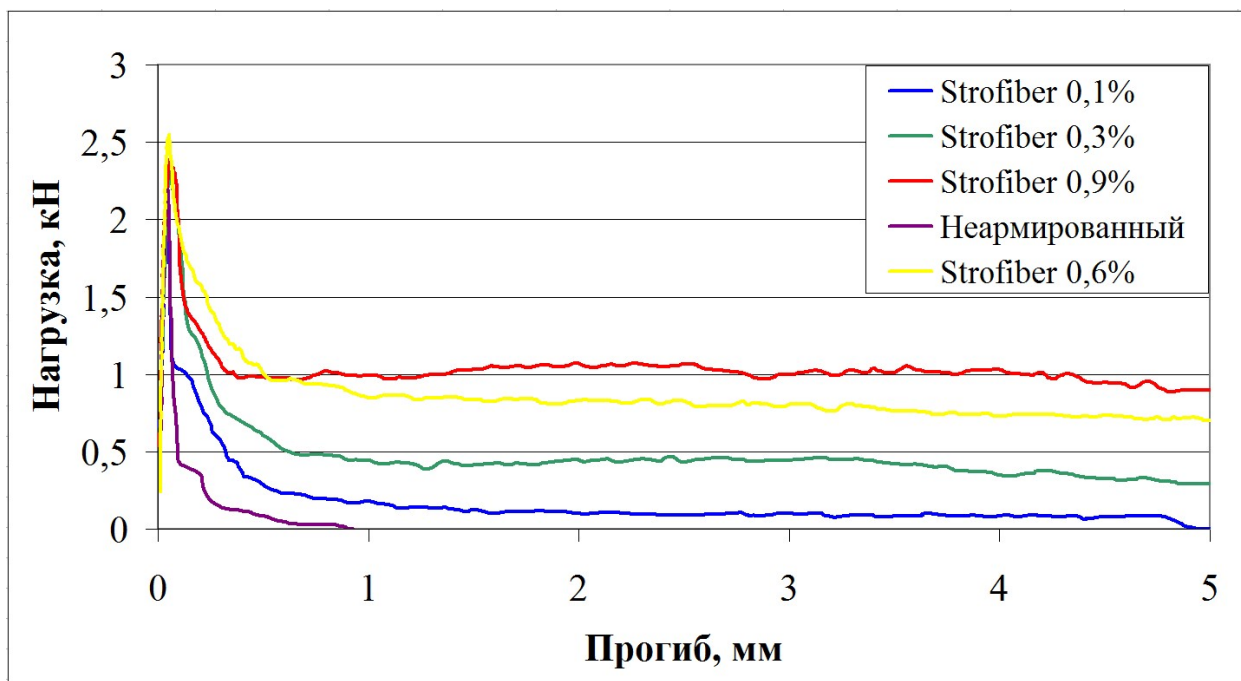


Рисунок 4.4 – Начала диаграмм зависимостей прогибов образцов от прилагаемых к ним нагрузок

По диаграммам, представленным на рисунках 4.2 и 4.4. видно, что неармированный образец разрушается хрупко. Хрупкое разрушение означает то, что после образования магистральной трещины образец сразу разделяется на две условные половины. В начале испытания образец прогибается под действием прилагаемой нагрузки и приобретает при этом упругие деформации, они характеризуются на диаграмме линейно восходящим участком. После этого в образце начинаются процессы микротрещинообразования, о чем свидетельствует изменение характера зависимости вблизи верхней точки диаграммы. Микротрещинообразование приводит к образованию, развитию и дальнейшему раскрытию магистральной трещины. Рост магистральной трещины характеризуется на диаграмме разрушения нелинейно нисходящим участком. Площадь под нелинейно нисходящим участком диаграммы вносит значительный вклад в

удельные эффективные энергозатраты на статическое разрушение,  $G_f^*$ , Силовые и энергетические характеристики трещиностойкости сведены в таблицу 4.3.

Таблица 4.3 Силовые и энергетические характеристики трещиностойкости фибробетона, армированного макроволокнами, определенные экспериментальным путем

Характеристика трещиностойкости	Расход синтетических волокон макроволокон, % по объему							
	Неармированный	Периодического профиля ( <i>Durus S500</i> )				Гладкого профиля ( <i>Strofiber</i> )		
		0,3	0,6	0,9	1,2	0,3	0,6	0,9
$G_i^*$ – условные удельные энергозатраты на статическое разрушение до момента начала движения магистральной трещины, Дж/м <sup>2</sup>	28,3	27,98	26,48	26,78	27,04	20,9	23,1	38,8
$G_f^*$ – условные удельные эффективные энергозатраты на статическое разрушение, Дж/м <sup>2</sup>	226	1126	2341	6728	8633	1126	2587	3231
$K_c^*$ – условный критический коэффициент интенсивности напряжений, МПа·м <sup>0,5</sup>	0,91	0,91	0,72	0,83	1,14	0,86	1,01	1,14
Модуль упругости, МПа×10 <sup>3</sup>	29,8	29,8	19,3	36,6	48,2	36,5	45,1	34,1

Удельные эффективные энергозатраты на статическое разрушение,  $G_f^*$ , неармированного образца наименьшие из всех серий. Это объясняется тем, что развитие трещины, проходящей через рабочее сечение образца при его разрушении, ограничивается только зернами крупного заполнителя.

Разрушение фибробетонных образцов происходит иначе. Рабочее сечение фибробетонного образца содержит некоторое количество армирующих волокон, препятствующих распространению трещины. Трещина разделяет образец на две условные половины, а пересекающие

трещину волокна, заанкерованные в обеих половинах образца, начинают вытягиваться из матрицы. В верхних точках диаграмм (верхние точки в левых частях диаграмм, обозначаемые точкой С) разрушения фибробетонных образцов происходит перераспределение напряжений. Если на этапе упругого деформирования материала волокна и матрица работали совместно, то после этого, напряжения перераспределяются таким образом, что прилагаемую нагрузку начинают воспринимать преимущественно волокна.

Как было сказано выше, после прохождения магистральной трещины через рабочее сечение образца, армирующие волокна начинают вытягиваться из матрицы, при этом такие волокна продолжают воспринимать значительную нагрузку. Это изменение характера разрушения, по сравнению с неармированным образцом, отражается на диаграммах в виде более пологой нисходящей ветви, в ряде случаев содержащей ярко выраженный второй пик. Степень влияния фибрового армирования хорошо прослеживается по удельным эффективным энергозатратам на статическое разрушение  $G_{f}^*$ , которые повышаются пропорционально увеличению расхода волокон. По графикам, представленным на рисунке 3.29 видно, что при увеличении расхода волокон правая ветвь диаграммы оказывается выше. То есть при увеличении количества волокон, пересекающих магистральную трещину, фибробетонный образец способен воспринимать все большую нагрузку.

Также важно отметить некоторую особенность работы низко модульных волокон, проявившуюся и в описываемом эксперименте. Она состоит в том, что низко модульные волокна воспринимают большую нагрузку после приобретения некоторого удлинения, это особенно наглядно отражается на диаграмме разрушения фибробетонных образца с расходом волокон 0,3-0,6 % об. в виде второго пика при прогибе образца 2-4 мм.

По мере увеличения ширины раскрытия трещины, вытягивающиеся из матрицы волокна постепенно выходят из работы, и на диаграммах разрушения это отражается в плавно нисходящей ветви.

Диаграммы для фибробетона, армированного синтетическими микроволокнами *Fibrin XT*, представлены на рис. 4.5. Для наглядности графики построены в одном масштабе с графиками для синтетической макрофибры, представленными выше.

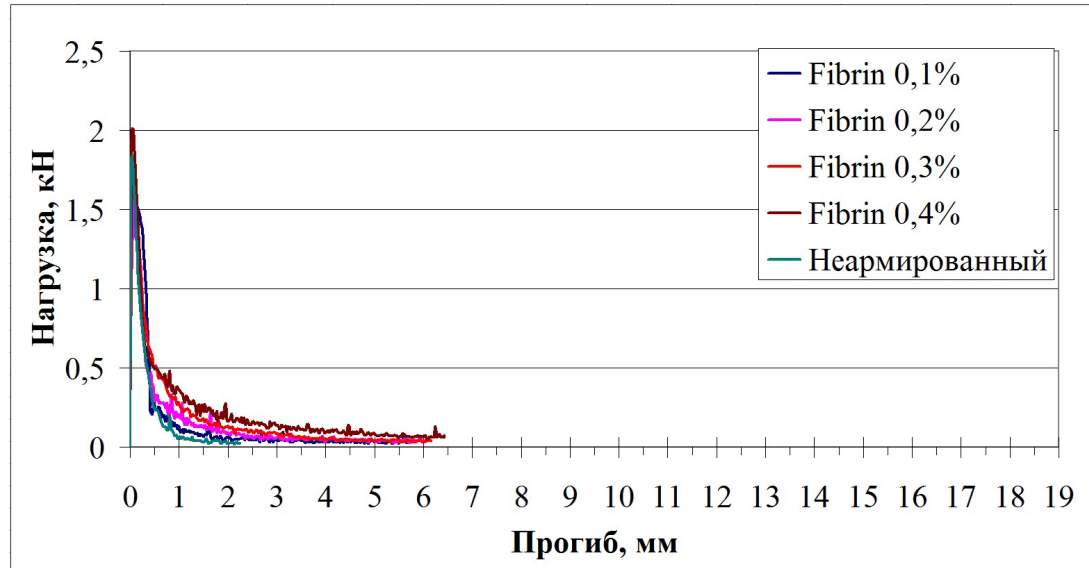


Рисунок 4.5 – Диаграммы зависимостей прогибов образцов от прилагаемых к ним нагрузок для составов, армированных микроволокном *Fibrin XT*

На рисунке 4.6 представлены те же диаграммы зависимостей прогибов образцов от прилагаемых нагрузок, но в большем масштабе, для более подробного рассмотрения зоны упругих деформаций:

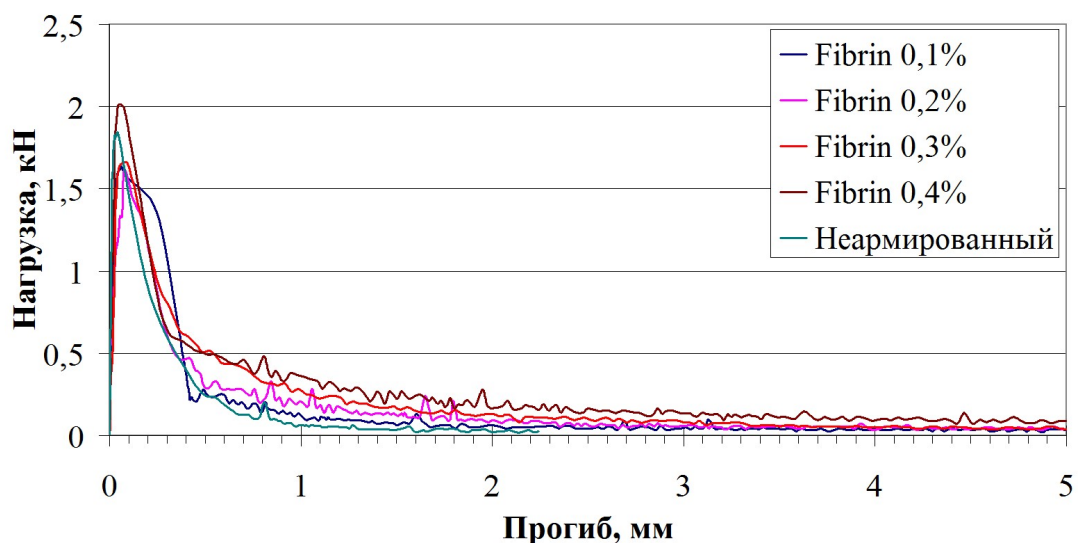


Рисунок 4.6 – Начала диаграмм зависимостей прогибов образцов от прилагаемых к ним нагрузок

Значения силовых и энергетических характеристик, полученные в ходе обработки экспериментальных данных, представлены в табл. 4.4.

Таблица 4.4 Силовые и энергетические характеристики трещиностойкости фибробетона, армированного микроволокнами, определенные экспериментальным путем

	Неармированный	<i>Fibrin XT</i> (микрофибра)			
		0,1	0,2	0,3	0,4
$G_i^*$ – условные удельные энергозатраты на статическое разрушение до момента начала движения магистральной трещины, Дж/м <sup>2</sup>	28,3	31,3	26,1	36,1	31,7
$G_f^*$ – условные удельные эффективные энергозатраты на статическое разрушение, Дж/м <sup>2</sup>	226	229,4	253,6	285,3	404,6
$K_c^*$ – условный критический коэффициент интенсивности напряжений, МПа·м <sup>0,5</sup>	0,91	0,92	0,87	0,95	1,01
Модуль упругости, МПа×10 <sup>3</sup>	29,8	28,1	24,7	25,2	34,2

Низкомодульные синтетические микроволокна за счёт своей небольшой длины после образования магистральной трещины слабо препятствуют её распространению и, соответственно, не оказывают существенного влияния на вязкость разрушения композита. Таким образом, значения  $G_f$  в армированных составах возрастают относительно контрольного состава в гораздо меньшей степени. Максимальный вклад в увеличение вязкости разрушения закономерно вносит максимальное использованное количество волокон – 0,4%, повышающий затраты энергии на разрушение после образования трещины на 88% в сравнении с контрольным составом.

Значения удельных энергозатрат на статическое разрушение до момента начала движения магистральной трещины имеют достаточно сильный разброс, не позволяя выделить в них устойчивую зависимость, что,

вероятно связано с большим количеством дефектов в структуре конкретных образцов, подвергнутых испытаниям.

Критический коэффициент интенсивности напряжений для составов, армированных микросинтетическими волокнами, в большинстве составов снижался относительно контрольного образца. Предположительно, как и указано выше, это можно объяснить наличием дефектов в испытанных образцах, а также общим снижением прочности композитов на изгиб.

#### **4.1.2 Оценка совпадения численных значений характеристик трещиностойкости фибробетонов, полученных расчетным и экспериментальным путем**

Оценить согласие численных значений силовых и энергетических характеристик трещиностойкости фибробетонов, полученных при проведении натурных испытаний и в ходе теоретического моделирования можно путем сравнения данных в таблицах 3.1 и 4.4. По таблицам видно, что теоретически были смоделированы те же диаграммы, которые были получены в ходе фактических испытаний.

По представленным в таблицах 3.1 и 4.4. данным хорошо видно, что расчетные условные удельные эффективные энергозатраты на статическое разрушение возрастают пропорционально увеличению расхода волокон, при этом возрастание линейное. Это объясняется тем, что в рамках использованных формул единственной переменной являлось объемное содержание волокон. При этом экспериментальные условные удельные эффективные энергозатраты на статическое разрушение также возрастают пропорционально увеличению расхода волокон, но возрастание нелинейное. Можно отметить, что в случае использования волокон гладкого профиля экспериментальные и расчетные условные удельные эффективные энергозатраты на статическое разрушение практически полностью совпадают, в отличие от тех же результатов для волокон периодического

профиля. Это доказывает, что расхождение связано с отклонениями в экспериментальной части данного исследования.

Расчетный коэффициент интенсивности напряжений снижается при увеличении расхода волокон обоих видов, это связано с особенностями методики его определения. Данная величина определяется по удельным энергозатратам на статическое разрушение до момента начала движения магистральной трещины и модулю упругости. То есть, в том числе, по площади под левой частью диаграмм разрушения, относительно точки *C*. Площадь эта зависит от угла наклона зоны упругих деформаций, и при повышении модуля упругости фибробетона и неизменных свойствах матрицы, и будет снижаться. Экспериментальный коэффициент интенсивности напряжений определяется с некоторым разбросом, однако согласие расчетных и экспериментальных данных очевидно.

Прочность фибробетонов на растяжение при изгибе определяется по максимальной нагрузке, воспринятой за весь эксперимент, то есть по разрушающей нагрузке. По расчетным и экспериментальным диаграммам видно, что во всех случаях прочность фибробетона исчерпывается прочностью матрицы, исключение составляет образец, армированный макрофиброй периодического профиля при ее содержании 1,2 % по объему. По расчетным значениям прочности заметно ее повышение, это можно объяснить тем, что в «правиле смесей» фигурирует слагаемое, отражающее вклад в формирование прочности фибробетона прочности контактных зон между волокном и матрицей. Экспериментальные значения прочности определяются с разбросом, но, при некотором приближении, можно отметить их соответствие расчетным данным. Образец, армированный макрофиброй периодического профиля при ее содержании 1,2 % по объему, показывает повышенную прочность, как расчетную, так и экспериментальную, при этом полученные данные практически совпадают. Повышение прочности наблюдается из-за высокой прочности сцепления таких волокон с матрицей и их высоком объемном содержании в фибробетоне.

При всех наблюдаемых расхождениях, можно сказать, что диаграммы разрушения, расчетные и экспериментальные, совпадают концептуально, то есть оказываются схожими в достаточно высокой степени, что доказывает справедливость примененных допущений и подходов при теоретическом моделировании поведения фибробетона под нагрузкой.

#### 4.2 Показатели долговечности и эксплуатационной безопасности фибробетонов, армированных микро- и макроволокнами

Определённые в ходе исследования характеристики долговечности и эксплуатационной безопасности (морозостойкость, водонепроницаемость и истираемость) для фибробетонов, армированных синтетическими макроволокнами, представлены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 Результаты испытаний долговечности образцов, армированных макроволокнами

Вид фибры	Расход волокон	Морозостойкость $F$ , цикл	Водонепроницаемость		Истираемость $G$ , г/см <sup>2</sup>
			Коэффициент фильтрации, $K_{\phi}^{cp}$ , см/с	Марка $W$	
<i>Durus S500</i>	Неармированный	220	$5,9 \cdot 10^{-10}$	<i>W8</i>	0,77
	0,3%	245	$6,8 \cdot 10^{-10}$	<i>W6</i>	0,75
	0,6%	300	$4,8 \cdot 10^{-10}$	<i>W8</i>	0,56
	0,9%	315	$1,8 \cdot 10^{-10}$	<i>W8</i>	0,52
	1,2%	350	$0,85 \cdot 10^{-10}$	<i>W10</i>	0,47
<i>Strofiber</i>	0,3%	255	$0,81 \cdot 10^{-10}$	<i>W10</i>	0,68
	0,6%	300	$0,99 \cdot 10^{-10}$	<i>W10</i>	0,68
	0,9%	280	$25,66 \cdot 10^{-10}$	<i>W4</i>	0,63

По результатам испытаний видно, что введение низко модульных синтетических макроволокон положительно сказывается на морозостойкости композита, что связано с сочетанным действием нескольких факторов. Во-первых, при введении в матрицу армирующих волокон создаётся большое



количество зон с более высокими показателями плотности и прочности, находящихся на границе раздела между волокном и матрицей, что влечёт за собой снижение проницаемости композита в целом. Во-вторых, армирование бетона волокнами ведёт к улучшению поровой структуры композита, создаются более мелкие резервные поры, в которые способна отжиматься вода при замерзании, тем самым препятствуя разрушению материала.

Сравнивая между собой результаты испытания волокон, имеющих различный профиль, можно отметить близкий характер их влияния на морозостойкость при одинаковых процентах армирования. Верхний предел эффективного использования у исследованных волокон различный и определяется технологическими характеристиками фибробетонной смеси.

Результаты, полученные по данным экспериментов, свидетельствуют о возможности повышения морозостойкости бетона на 80%. Насыщение матрицы волокнами свыше оптимальной дозировки следует считать нецелесообразным ввиду значительного повышения вероятности возникновения дефектной структуры фибробетонной матрицы, не способной обеспечить улучшение характеристик.

Анализ разрушенных после испытаний образцов показывает, что макроволокна *Strofiber* в процессе перемешивания и формования способны занимать более сложную форму в сравнении с волокном *Durus* за счёт своей меньшей жёсткости. Также отмечено, что эти волокна секутся и распушаются, создавая структуру, подобную структуре фибробетона с микроволокнами, с большим числом контактных зон, чем в случае применения макроволокна *Durus*. Поэтому закономерно, что снижение проницаемости у бетонов, армированных волокном *Strofiber*, наступает при меньшем насыщении. Следует отметить, что при насыщении бетона волокнами в количестве 0,9% резко возрастает его проницаемость. Это свидетельствует о дефектности полученной структуры и даёт повод судить о нецелесообразности дальнейшего насыщения бетона волокнами *Strofiber*.

При использовании волокон *Durus* снижение проницаемости происходит постепенно, и при максимальном расходе волокон, равном 1,2%, удалось достичь повышения водонепроницаемости на одну марку (с *W8* до *W10*). Дальнейшее насыщение бетона волокнами ограничено технологическими факторами.

Представленные выше результаты позволяют судить о том, что введение макроволокон положительно сказывается на стойкости образцов к истирающему воздействию. При использовании волокон *Strofiber*, удалось достичь снижения истираемости на 10% относительно неармированных образцов. Следует отметить, что сами волокна практически не способны сопротивляться истирающему воздействию, но их введение приводит к модификации структуры цементного камня в бетоне-матрице, уплотняя и упрочняя её. Полученная таким образом матрица способна эффективнее сопротивляться истирающему воздействию.

Волокна *Durus* позволяют снижать истираемость и при большем насыщении. Их вклад в формирование границ раздела при одинаковых насыщениях ниже, чем у волокон *Strofiber*, поскольку они не распушаются при перемешивании, однако в процессе испытания они создают поверхности скольжения, площадь которых увеличивается с увеличением количества волокон в бетоне. Армирование волокном *Durus* в количестве 1,2% позволяет повысить стойкость бетона к истирающему воздействию на 64% относительно неармированного бетона с таким же составом матрицы. Оптимальной областью применения волокон будут полы промышленных и общественных зданий или верхние слои дорожных одежд. Следует отметить, что эффект от введения синтетических макроволокон сопоставим с эффектом от введения высокомодульных проволочных волокон, однако синтетические волокна будут выгодно отличаться безопасностью при эксплуатации и меньшей трудоёмкостью в процессе перемешивания, укладки и уплотнения фибробетонной смеси.

Результаты определения характеристик долговечности фибробетонов, армированных синтетическими микроволокнами, представлены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 Результаты испытаний долговечности образцов, армированных микроволокнами.

Вид фибры	Расход волокон	Морозостойкость $F$ , цикл	Водонепроницаемость		Истираемость $G$ , г/см <sup>2</sup>
			Коэффициент фильтрации, $K_{\phi}^{cp}$ , см/с	Марка $W$	
<i>Fibrin XT</i>	Неармированный	220	$5,9 \cdot 10^{-10}$	$W8$	0,77
	0,1%	280	$6,7 \cdot 10^{-12}$	$W14$	0,58
	0,2%	340	$7,4 \cdot 10^{-12}$	$W14$	0,56
	0,3%	270	$9,98 \cdot 10^{-11}$	$W10$	0,81
	0,4%	210	$4,08 \cdot 10^{-10}$	$W8$	0,89

При использовании синтетических микроволокон *Fibrin XT* возможно добиться значительного повышения морозостойкости относительно контрольного состава, на 80% повысив число циклов замораживания-оттаивания, которые способен выдержать фибробетон. Очевидно, что это также связано с возникновением большого количества модифицированных границ раздела фаз между волокном и матрицей, обладающих низкой проницаемостью. Целесообразность увеличения расхода микросинтетической фибры для повышения морозостойкости свыше 0,2% следует считать нецелесообразным ввиду значительного повышения вероятности возникновения дефектной структуры фибробетонной матрицы, не способной обеспечить улучшение физико-механических характеристик.

Из анализа результатов следует, что низко модульные синтетические микроволокна способны повысить водонепроницаемость бетона до трёх марок относительно неармированного состава. Наибольшую эффективность показали составы, армированные 0,1-0,2% микроволокон. Снижение водонепроницаемости у составов с большим расходом свидетельствует о

создании в бетоне дефектной структуры, не препятствующей проникновению воды под давлением.

При использовании микроволокон в количестве 0,1-0,2% по объёму удалось добиться снижения истираемости на 33% относительно неармированного состава. Дальнейшее насыщение бетона микроволокнами ведёт к повышению истираемости, что говорит о нецелесообразности увеличения расхода волокон.

### **4.3. Стойкость фибробетонов при действии высоких температур**

Анализ фрагментов конструкций и образцов бетона после их нагрева до высоких температур, в особенности при повышенной их влажности, показал, что разрушение таких конструкций сопровождается растрескиванием и отколами отдельных частей, причём с повышением прочности бетона склонность к такого рода разрушению возрастала. Это явление получило название взрывного разрушения бетона, вызываемого резким высвобождением воды, содержащейся в порах, в виде пара, создающего превышающие прочность бетона внутренние напряжения.

Для оценки жаростойкости бетонов в соответствии с ГОСТ 20910 используется величина остаточной прочности после нагрева образцов в достаточно мягких условиях. Огнестойкость строительных конструкций оценивается по времени, которое способно выдержать изделия до наступления одного или нескольких предельных состояний в процессе отжига открытым пламенем. Данные испытания являются дорогостоящими и трудоёмкими, требуют наличия специального оборудования для производства отжига в свободном или нагруженном состоянии. Однако эти методики не дают возможность произвести оценку стойкости бетона ко взрывному разрушению, позволяя лишь визуально оценить повреждения конструкций или определить снижение их несущей способности. В то же время, методики, позволяющей оценить стойкость бетона к взрывному

разрушению в процессе высоких температур и эффективность использования волокон для его предотвращения, на данный момент не существует.

Таким образом, для оценки влияния дисперсного армирования на стойкость бетона к воздействию высоких температур и на противодействие возникновению взрывного разрушения потребовалось создать методику, сочетающую высокую точность и достоверность с малыми трудозатратами.

Испытания производились на мелкозернистом бетоне постоянного состава, армированного синтетическими микроволокнами *Fibrin XT* в количестве 0,1%, 0,3%, 0,5%, 0,7% и 0,9% по объему. Из смеси каждого состава изготавливались плитки размером 150x150x70 мм. Для контроля изменения несущей способности из смеси каждого состава также изготавливались образцы-кубы 100x100x100 мм и образцы-призмы 70x70x280 мм. После набора прочности в нормальных условиях образцы для достижения ими равновесной влажности в течение 7 суток помещались в естественно-воздушные условия [69. 108].

Высокотемпературная обработка осуществлялась в лабораторной муфельной печи ПМ-1700 по следующему режиму:

- подъем температуры до заданных значений, составляющих 200°C и 400°C, осуществлялся со скоростью 20°/мин. При условии нагрева образцов до 600°C применялся ступенчатый подъем температуры с промежуточной выдержкой при 350°C с целью снижения внутренних напряжений и предотвращения быстрого испарения свободной и большей части физически связанной воды;

- изотермическая выдержка бетонных и фибробетонных образцов при максимальных температурах в течение 4 часов;

- охлаждение образцов до температуры 200–250 °C осуществлялось вместе с печью, после чего образцы извлекались из печи на металлический поддон, и дальнейшее охлаждение осуществлялось в естественно-воздушных условиях до комнатной температуры.

Суть разработанной методики заключается в сравнительной оценке проницаемости бетонов и фибробетонов, прошедших высокотемпературную обработку. Изменение проницаемости может служить характеристикой 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*.

Осмотр бетонных и фиброармированных образцов после извлечения из печи и охлаждения показал, что на всех их гранях образовались нитевидные трещины, количество и размер которых увеличивался с повышением температуры обработки. При содержании микрофибры до 0,5% по объёму размер трещин оказался меньшим, чем у контрольного образца, внутри образцов остались капиллярные поры на месте выгоревших волокон (рис. 4.7, б). Дальнейшее насыщение матрицы волокнами привело к определенной неравномерности распределения их по объёму вплоть до появления комков, на месте которых после выгорания при высокой температуре образовались пустоты, увеличивающие проницаемость образцов и снижающие их прочность в процессе испытаний.

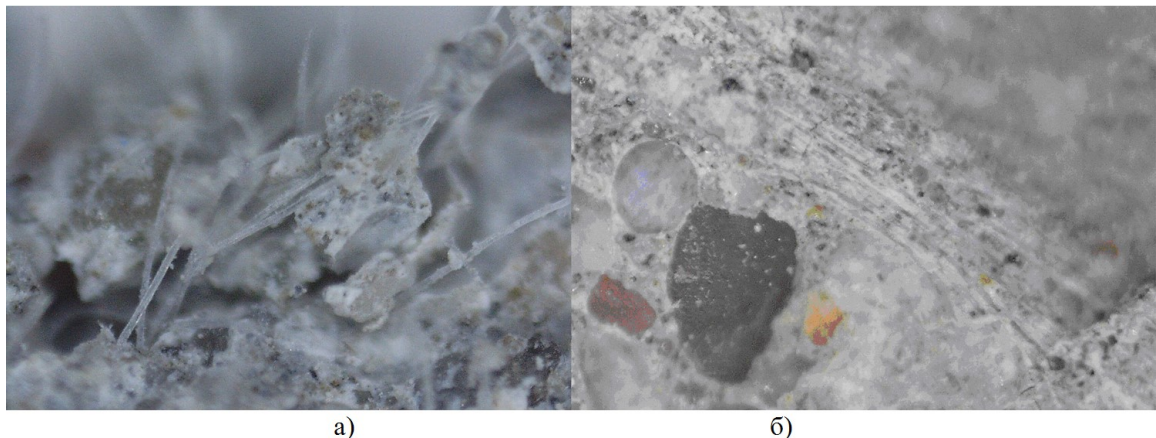


Рисунок 4.7 – Микрофотографии структуры фибробетона: а) после нагрева и выдержки при 200°C, б) после нагрева и выдержки при 400°C.

Анализ данных, представленных на рис. 4.8, подтверждает информацию [83] о том, что после нагрева образцов до 200°C имеет место некоторое повышение их прочности на сжатие, что объясняется конструктивным влиянием армирующих волокон, которое проявляется в сдерживании процесса образования и развития трещин в бетонной матрице. Дальнейшее повышение температуры в печи приводит к понижению прочности композита, и после обработки при 600°C её значение при испытании образцов на сжатие составляет половину от первоначальной при том же проценте армирования, а прочность на изгиб снижается в 7-10 раз.

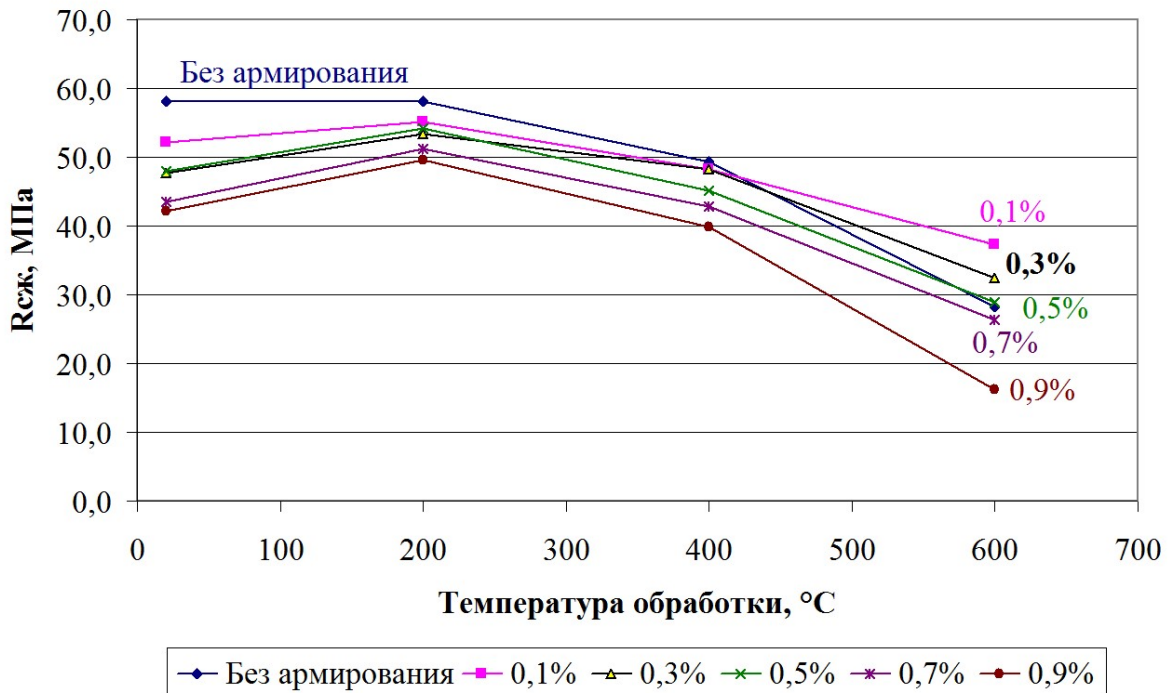


Рисунок 4.8 – Зависимость прочности на сжатие от процента армирования и температуры обработки

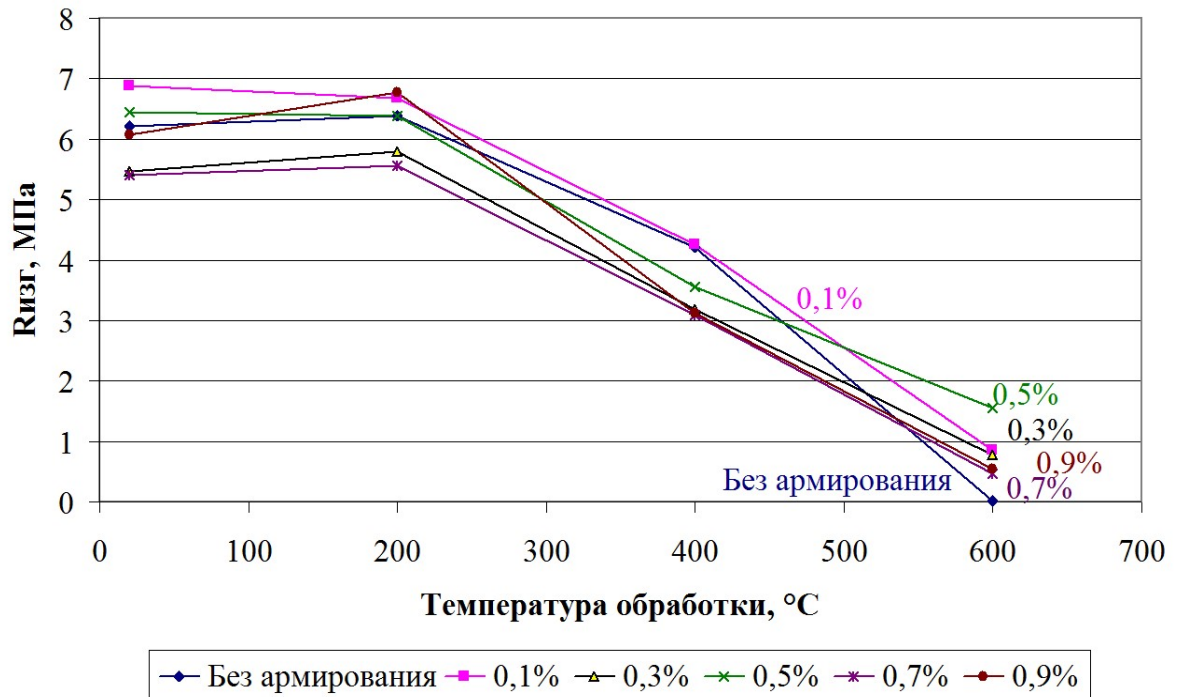


Рисунок 4.9 – Зависимость прочности на изгиб от процента армирования и температуры обработки

В табл. 4.7 и на рис. 4.10 и 4.11 представлены результаты испытания водопроницаемости бетонных и фибробетонных образцов по коэффициенту фильтрации.

Таблица 4.7 – Результаты определения коэффициента фильтрации

Объемный процент армирования	Коэффициент фильтрации $K_{\Phi}$ , см/с			
	20°C	200°C	400°C	600°C
Без армирования	$1,80 \cdot 10^{-13}$	$1,46 \cdot 10^{-9}$	$5,49 \cdot 10^{-8}$	—*
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 изначально (до температурного воздействия) мелкозернистая наномодифицированная бетонная матрица демонстрирует высокую водонепроницаемость ( $K_{\Phi}=1,8 \cdot 10^{-13}$  см/с). При добавлении 0,1% фибры в результате модификации структуры исходного бетона, его уплотнения и упрочнения имеет место дальнейшее уменьшение проницаемости образцов ( $K_{\Phi}=1,96 \cdot 10^{-14}$  см/с). При дальнейшем



насыщении матрицы волокнами проницаемость бетона повышается, и при максимальном проценте армирования (0,9% по объёму) коэффициент фильтрации достигает значений  $1,36 \cdot 10^{-7}$  см/с (марка менее *W2*), что свидетельствует о неоднородности структуры бетона вследствие его «переармирования».

Анализ значений коэффициентов фильтрации образцов, полученных после нагревания до 200°C, показывает, что, несмотря на уменьшение их водонепроницаемости в целом, составы с 0,1% и 0,3% волокон сохраняют способность сопротивляться проникновению воды, практически, наравне с неармированным бетоном (рис. 4.11), и в этом случае следует ожидать значительного сопротивления выходу воды из толщи конструкции при пожаре. Однако, ни один из образцов, армированный синтетической микрофиброй, не показал признаков взрывного разрушения в процессе термической обработки, что свидетельствует о положительной роли дисперсного армирования для снижения вероятности взрывного разрушения композита. 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.

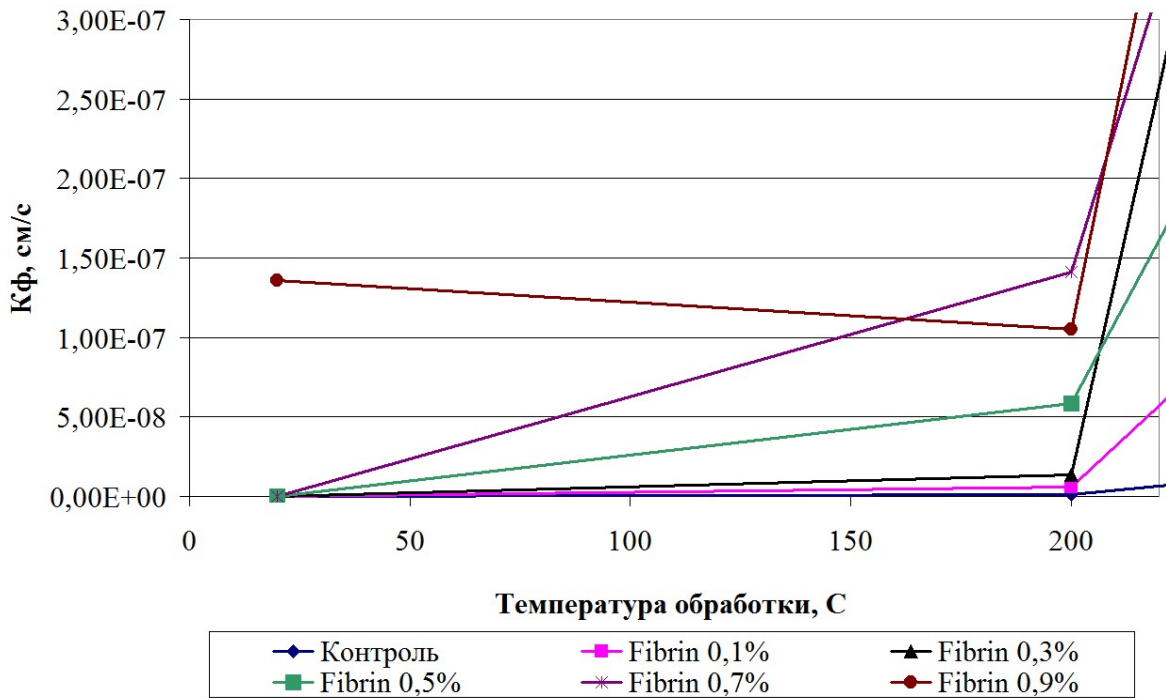


Рисунок 4.10 – Изменение коэффициента фильтрации в зависимости расхода фибры при температурах нагрева в интервале 20– 200°С

По рис. 4.11 видно, что после выдержки при температуре 400°С имеет место дальнейшее повышение проницаемости всех без исключения образцов, которое можно объяснить следующим образом.

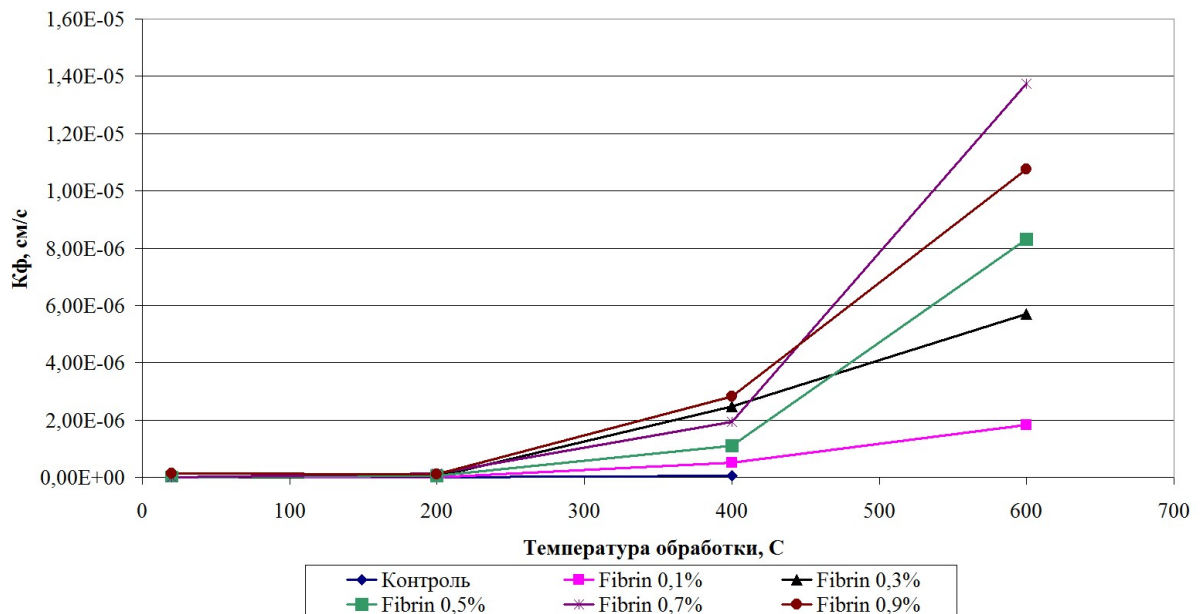


Рисунок 4.11 – Зависимость коэффициента фильтрации от процента армирования и температуры обработки

При указанной температуре происходит полное выгорание полимерных волокон, они уже не состояниии сдерживать процесс трещинообразования в бетоне, и вода получает возможность свободного выхода из него в виде пара. При этом в фибробетонах испарение воды усиливается благодаря появлению сетки сквозных пор, капилляров и других дефектов, образованных на месте выгоревших волокон и пронизывающих образец по всему объёму. Таким образом, гипотеза о значительном снижении риска возникновения взрывного разрушения конструкций при пожаре при использовании синтетических микроволокон подтверждается.

Согласно полученным данным, выдержка образцов при 600°C приводит к практически полному разупрочнению композита вне зависимости от вида и расхода волокон. График на рис. 4.11 наглядно иллюстрирует, что образцы не способны сопротивляться фильтрации воды даже при минимальном давлении (0,2...0,3 МПа) как через сетку пор, оставшихся на месте выгоревших волокон, так и через огромное количество образовавшихся сквозных трещин. В качестве положительного момента, связанного с дисперсным армированием, следует отметить некоторую «наследственность» влияния волокон, которая, при определенном насыщении, выражается в большей сохранности структуры бетонной матрицы, остаточной прочности, что, в свою очередь, способствует сохранению целостности строительных конструкций и повышению их безопасности при пожаре.

#### **4.4. Исследование характеристик полиармированных фибробетонов**

Анализ экспериментальных данных, полученных в ходе определения физико-механических характеристик фибробетонов с различными видами армирующих волокон, показал, что отдельные виды волокон способны в значительной мере улучшать только некоторые характеристики, при этом величины других характеристик остаются практически неизменными. Так, установлено, что синтетические макроволокна преимущественно

увеличивают прочностные характеристики композита, мало влияя на долговечность фибробетонов. Микроволокна, напротив, приводят к улучшению таких характеристик, как морозостойкость, водонепроницаемость и истираемость, но их положительное влияние на прочность не превышает 10%. Исходя из этого, было выдвинуто предположение о перспективности совмещения волокон различного типоразмера в одном композиционном материале с целью получения бетона, обладающего одновременно высокой прочностью и долговечностью.

С целью проверки выдвинутой гипотезы были проведены экспериментальные исследования характеристик фибробетонов, армированных комбинациями синтетических макро- и микроволокон, взятых в различных соотношениях. В ходе проведения исследований в качестве дисперсной арматуры использовались два вида волокон - макрофибра *Durus S500* и микрофибра *Fibrin XT*. Результаты испытаний приведены в таблице 4.8.

Таблица 4.8 Физико-механические характеристики полиармированных фибробетонов

Состав	$\rho_{\text{ср}}$ , кг/м <sup>3</sup>	$R_{\text{сж}}$ , МПа	$R_{\text{изг}}$ , МПа	$W$ , марка	$F$ , циклов	$G$ , см <sup>2</sup> /г
Неармированный	2346	33,9	4,63	<i>W8</i>	220	0,77
<i>Durus</i> 0,6% <i>Fibrin</i> 0,1%	2358	37,3	6,25	<i>W12</i>	320	0,57
<i>Durus</i> 0,6% <i>Fibrin</i> 0,4%	2307	32,7	4,98	<i>W6</i>	205	0,71
<i>Durus</i> 0,9% <i>Fibrin</i> 0,1%	2365	41,3	8,83	<i>W12</i>	330	0,51
<i>Durus</i> 0,9% <i>Fibrin</i> 0,2%	2341	41,0	9,03	<i>W14</i>	355	0,51
<i>Durus</i> 1,2% <i>Fibrin</i> 0,1%	2381	42,6	11,31	<i>W14</i>	360	0,46
<i>Durus</i> 1,2% <i>Fibrin</i> 0,2%	2372	41,3	9,11	<i>W12</i>	375	0,44

Из анализа таблицы следует, что полиармированные составы сочетают в себе характеристики, присущие обоим видам волокон в отдельности. Наибольшую эффективность показали составы, армированные 0,9% макроволокон в сочетании с 0,2% микроволокон, а также 1,2% макроволокон

и 0,1% микроволокон. Данные составы показали одновременно наиболее высокую прочность на изгиб (повышение относительно контрольного состава в 1,9 раза и 2,4 раз соответственно) вкпе с высокими показателями долговечности. В частности, удалось добиться повышения водонепроницаемости на 3 марки, морозостойкости – на 64%, стойкости к истиранию – на 59% относительно неармированного состава с тем же составом матрицы. Составы с большим количеством армирующих волокон показывают снижение физико-механических характеристик, что сопровождается значительным ухудшением технологичности фибробетонных смесей, и обуславливается нарушением структуры матрицы.

В процессе проведения испытаний на растяжение при изгибе были построены диаграммы деформирования полидисперсно армированных фибробетонов, некоторые из которых представлены на рис. 4.12.

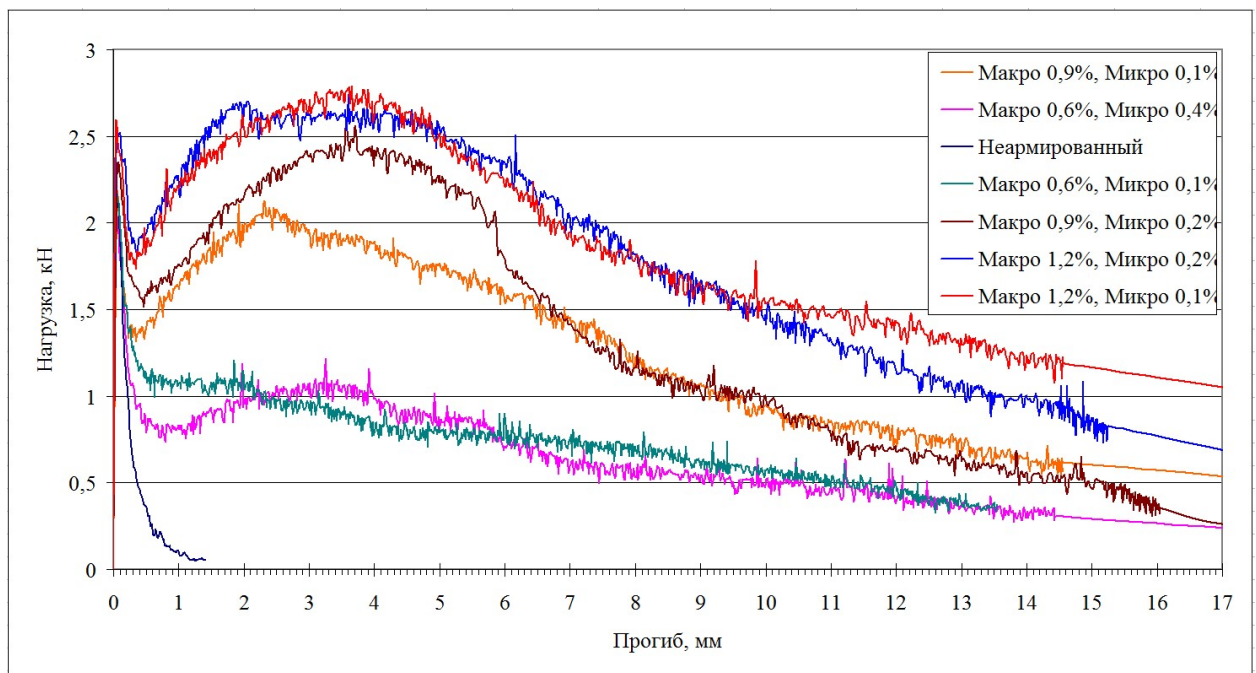


Рисунок 4.12 – Диаграммы разрушения полидисперсно армированных образцов

Во многом вид диаграмм определяется количеством макроволокон, а расход микроволокон оказывает влияние в незначительной степени. Силовые и энергетические характеристики разрушения исследованных полидисперсно

армированных композитов, полученных в процессе анализа диаграмм, приведены в табл. 4.9.

Таблица. 4.9 – Силовые и энергетические характеристики трещиностойкости фибробетона, определенные экспериментальным путем

	Неармированный	Полиармированные составы					
		<i>Durus</i> 0,6% <i>Fibrin</i> 0,1%	<i>Durus</i> 0,6% <i>Fibrin</i> 0,4%	<i>Durus</i> 0,9% <i>Fibrin</i> 0,1%	<i>Durus</i> 0,9% <i>Fibrin</i> 0,2%	<i>Durus</i> 1,2% <i>Fibrin</i> 0,1%	<i>Durus</i> 1,2% <i>Fibrin</i> 0,2%
$G_i^*$ – условные удельные энергозатраты на статическое разрушение до момента начала движения магистральной трещины, Дж/м <sup>2</sup>	28,3	23,12	31,17	29,12	30,01	28,18	28,12
$G_f^*$ – условные удельные эффективные энергозатраты на статическое разрушение, Дж/м <sup>2</sup>	226	2339	2412	6811	7125	8651	8778
$K_c^*$ – условный критический коэффициент интенсивности напряжений, МПа·м <sup>0,5</sup>	0,91	0,77	0,52	0,91	0,99	1,25	1,18
Модуль упругости, МПа×10 <sup>3</sup>	29,8	27,3	21,0	36,3	38,1	43,7	41,1

Как было отмечено выше, после прохождения магистральной трещины через рабочее сечение образца армирующие волокна начинают вытягиваться из матрицы, продолжая воспринимать нагрузку. При этом характер разрешения определяется количеством макроволокон в композите. Величины энергетических и силовых характеристик близки к тем, которые были получены для составов, армированных только макроволокном, при том же

проценте армирования. Это свидетельствует о незначительном влиянии микроволокон на силовые и энергетические характеристики разрушения композита.

### Выводы по четвёртой главе

По результатам проведения теоретических и экспериментальных исследований фибробетонов, армированных низкомодульными синтетическими волокнами, получены следующие результаты:

1) В процессе проведения экспериментальных исследований величины сцепления низкомодульных синтетических волокон с матрицей обнаружены особенности работы волокон такого вида под нагрузкой, в частности, экспериментально подтверждён отличный от высокомодульных волокон характер изменения прочности композита в зависимости от количества фибры;

2) Полученные в ходе исследования величины физико-механических характеристик показывают, что применением низкомодульных синтетических макроволокон, введённых в матрицу с крупным заполнителем класса по прочности на сжатие В25, возможно повысить прочность на сжатие до 20%, и на изгиб в 1,8...2,2 раза при использовании волокон периодического профиля. Морозостойкость бетонов может быть повышена на 80%, позволяя перейти от марки  $F_1300$  к  $F_1400$ , а водонепроницаемость - на одну марку (с  $W8$  до  $W10$ ). Введение макроволокон периодического профиля способствует снижению истираемости на 64% в сравнении с неармированным бетоном с таким же составом матрицы.

3) Определённые в ходе экспериментальных исследования энергетические и силовые характеристики разрушения фибробетонов, армированных низкомодульными синтетическими макроволоконками в таких же количествах, оказываются схожими с теоретическими в достаточно высокой степени, что доказывает справедливость применённых допущений и

подходов при теоретическом моделировании поведения фибробетона с низко модульными синтетическими волокнами под нагрузкой.

4) Армирование синтетическими микро волокнами позволяет повысить стойкость бетонов к действию высоких температур и снижает риск взрывного разрушения конструкций, что повышает их эксплуатационную надежность и безопасность при ликвидации пожара. Вместе с тем, установлено, что при выгорании при температурах выше 350°C такие волокна образуют токсичные дымовые газы, и это следует учитывать, особенно, при строительстве тоннелей и других подземных сооружений.

5) Полидисперсное армирование бетона низко модульными волокнами является перспективным видом дисперсного армирования. Используя такое сочетание волокон, возможно получить композит, сочетающий в себе как повышенные прочностные характеристики, свойственные бетонам, армированным макро волокнами, так и высокие показатели долговечности, которые приобретают бетоны, армированные микро волокнами. Наиболее эффективными составами следует считать составы, содержащие 0,9% макро волокон и 0,2% микро волокон, а также 1,2% макро волокон и 0,1% микро волокон. Данные составы близки по своим характеристикам и показали повышение прочности на изгиб относительно контрольного состава в 2,24 и 2,8 раза соответственно, повышение водонепроницаемости на 3 марки (от *W8* до *W14*), морозостойкости – на 64%, стойкости к истирающим воздействиям – на 59%.



## **5. ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ АРМИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ СИНТЕТИЧЕСКИМИ ВОЛОКНАМИ С УЧЕТОМ ПОЛУЧЕННЫХ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ**

В предыдущих главах были подробно описаны особенности работы синтетических волокон в бетонах, их влияние на физико-механические характеристики полученных композиционных материалов и некоторые области эффективного использования таких волокон. Установлено, что синтетические волокна позволяют как получить композиты с высокими прочностными характеристиками, но и обладающие высокими показателями долговечности. На основании анализа многочисленных исследований [52, 67, 86, 87, 93] установлено, что при использовании дисперсного армирования можно получить высококачественные изделия, имеющие сниженную стоимость относительно конструкций с традиционным армированием. Сокращение затрат при этом достигается за счёт снижения материалоемкости изделий, упрощения технологического процесса производства и возможного снижения капитальных вложений в организацию производства.

Активное развитие в последние годы авиатранспорта, сопровождающееся возрождением малой авиации, в особенности в отдалённых районах, возведением новых и реконструкцией существующих аэродромов гражданского и военного назначения, возникла потребность в конструктивных элементах взлётно-посадочных полос и рулёжных дорожек, к материалу которых предъявляются специфические требования. Исходя из условий эксплуатации таких конструкций, помимо прочностных свойств, особое внимание уделяется обеспечению их долговечности [52].

С целью ускорения и снижения трудоёмкости возведения аэродромных покрытий, повышения их качества, часто они устраиваются из сборных железобетонных элементов – плит ПАГ (Плита Аэродромная Гладкая). Использование сборных конструкций позволяет снизить издержки на транспортирование и хранение сырьевых материалов, оборудование для

приготовления, укладки и уплотнения бетонных смесей, поддержание нормальных условий для твердения бетона. Изготовленные в заводских условиях конструкции могут выполняться предварительно напряжёнными, а также, как правило, имеют более низкий коэффициент вариации физико-механических характеристик.

## 5.1. Оценка эффективности применения синтетических макроволокон в конструкции плит ПАГ

### 5.1.1. Конструкция и характеристики плиты ПАГ-20

Согласно действующей нормативной документации, серийно выпускаются аэродромные плиты трёх видов – ПАГ-14, ПАГ-18 и ПАГ-20, имеющих одинаковые длину (6 м) и ширину (2 м) и различную толщину (0,14, 0,18 и 0,2 м соответственно) в зависимости от их несущей способности. Общий вид плиты ПАГ-20 представлен на рисунке 5.1.

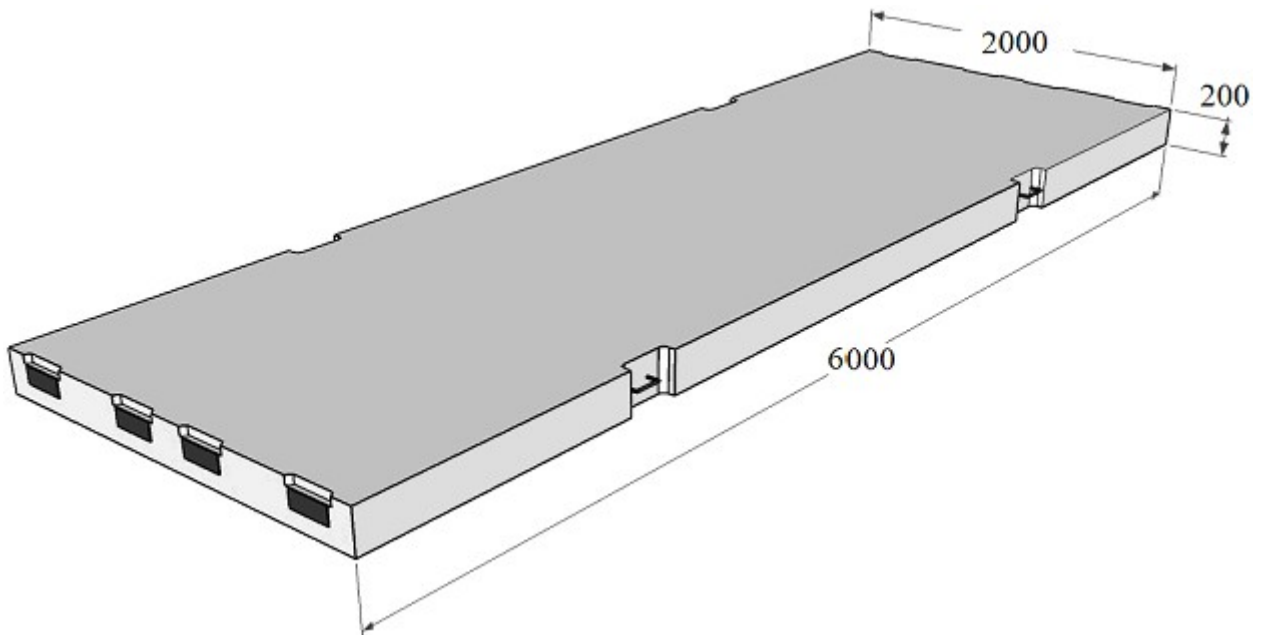


Рисунок 5.1 – Общий вид плиты ПАГ-20.

Согласно ГОСТ 25912, «Плиты должны изготавливаться из бетона класса по прочности на растяжение при изгибе не ниже  $B_{тб}4,0$  и класса по прочности на сжатие не ниже В30». Армирование плиты представлено на рисунке 5.2.

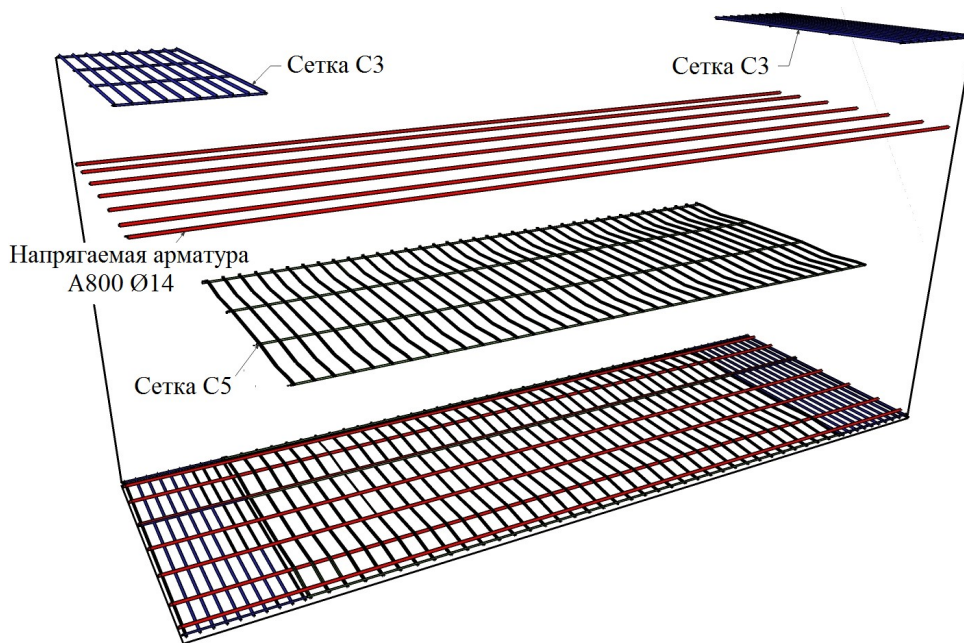


Рисунок 5.2 – Плита ПАГ-20. Армирование

При устройстве покрытия плиты укладываются длинной стороной по направлению движения воздушного судна, свариваются между собой посредством закладных деталей, а швы между отдельными плитами заполняются битумной мастикой. Как правило, сборные покрытия из плит ПАГ укладываются «на основание из цементно-песчаной смеси, песка, щебня, шлака или песчано-гравийной смеси» [52, 110].

Применение предварительного напряжения в конструкции аэродромных плит обуславливается необходимостью обеспечения высокой трещиностойкости, определяющей долговечность и безопасность эксплуатации конструкций. Однако использование преднапряжения в железобетонных конструкциях может вызывать определённые проблемы при их эксплуатации. В частности, при внецентренном сжатии в бетоне растянутой зоны или в торцах изделий при сосредоточенном и

неравномерном приложении сжимающих усилий могут образовываться трещины, которые, развиваясь, способны привести к разрушению бетона вблизи напрягаемой арматуры и её проскальзыванию по бетону, резко снижая несущую способность плиты [52, 110, 111]. Предотвратить образование такого рода дефектов возможно за счёт дополнительного усиления конструкций плит. Одним из вариантов такого усиления может являться использование дисперсного армирования.

Известен опыт замены бетона на фибробетон при производстве предварительно напряжённых изделий. Так, в работе [113] описано применение стальных проволочных волокон в производстве ребристых плит покрытий, в которых сохранена напрягаемая арматура в продольных рёбрах и ненапрягаемая в поперечных, но исключена сетчатая. Отмечается, что применением дисперсного армирования удалось добиться уменьшения толщины полки на 10 мм с сохранением несущей способности, что привело к снижению собственного веса конструкции и сокращению расхода бетона. В работе [52], выполненной в СПбГАСУ, производились расчёты аэродромных плит ПАГ-20, в которых бетон заменялся на сталефибробетон, армированный стальными проволочными волокнами и аморфнометаллической фиброй в количестве 1%. При использовании этих волокон удалось уменьшить толщину плит до 156 мм и 153 мм соответственно, при этом величина прогиба при испытании на трещиностойкость оставалась равной прогибу плиты, изготовленной из бетона без дисперсного армирования. Одновременно с этим распределительная сетчатая арматура была убрана из плиты.

Следует отметить, что аморфная металлическая фибра, хоть и показала высокие результаты, является дорогостоящим продуктом, выпускаемым в небольших количествах в рамках опытно-промышленных партий. Стальные проволочные волокна, показывая сопоставимые результаты, при эксплуатации на объектах воздушного транспорта могут нанести ущерб пневматикам, что является недопустимым с точки зрения безопасности.

Таким образом, было принято решение о применении синтетических волокон при производстве плит ПАГ [113]. Исследования, представленные в главе 3, показали, что за счёт модификации структуры композита низко модульные синтетические волокна увеличивают прочностные характеристики композита и его долговечность, а также – его модуль упругости.

В расчёте предлагается не учитывать вклад каждого волокна в отдельности в обеспечение несущей способности, а представить фибру как составную часть композита, имеющего свойства, отличающиеся как от неармированного бетона, так и от фибры. Таким образом, методика расчёта плиты, изготовленной из фибробетона, принята аналогичной плите без дисперсного армирования.

Одним из испытаний, производимых при приёмке аэродромных плит, является испытание на трещиностойкость. В соответствии с требованиями ГОСТ, «загрузка плиты при испытании проводят ступенями. Доля нагрузки каждой ступени должна составлять не более 10% контрольной нагрузки, а двух последних ступеней – не более 5%. После приложения каждой ступени контрольной нагрузки плиту выдерживают под нагрузкой не менее 10 мин, а после приложения полной контрольной нагрузки – не менее 30 мин.» [1].

Схема приложения нагрузки представлена на рисунке 5.3.

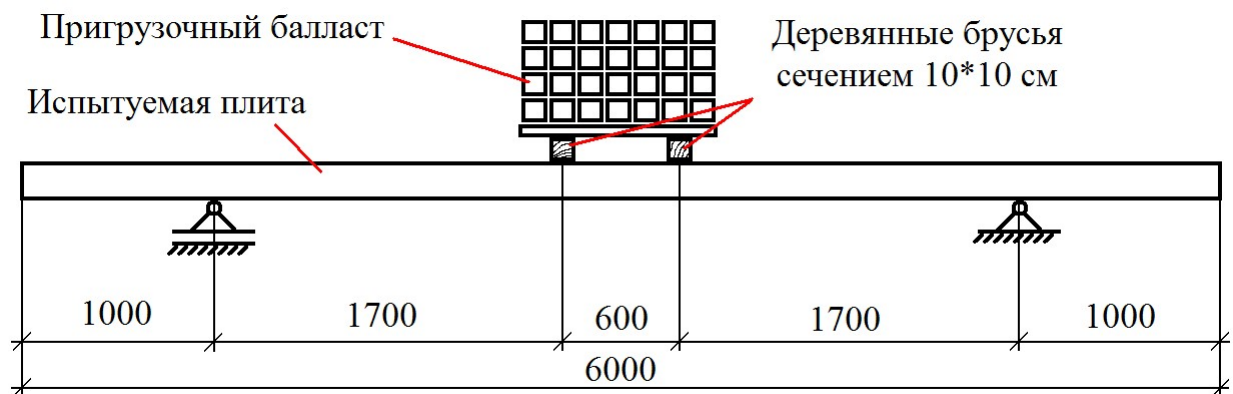


Рисунок 5.3 – Схема испытания трещиностойкости плит нагружением [1]

После загрузки конструкции производят её осмотр. Критерием прохождения испытаний на трещиностойкость является отсутствие трещин на одной из граней плиты, видимых при тщательном осмотре с лупой с четырёхкратным увеличением. [1] Значение контрольной нагрузки зависит от толщины плиты и применяемого класса арматурной стали и указано в таблице 3 ГОСТ 25912. В данном случае, величина расчётной нагрузки составила 94,13 кН.

Таким образом, расчётная схема плиты ПАГ-20 выглядит следующим образом (рисунок 5.4):

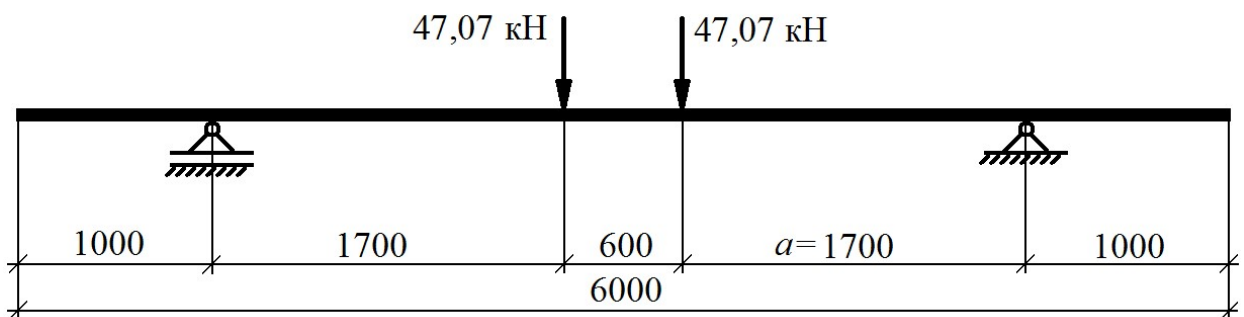


Рисунок 5.4 – Расчётная схема плиты ПАГ-20 [1]

Используя СП 52-102-2004 «Предварительно напряженные железобетонные конструкции», можно определить прогиб плиты, возникающий при такой схеме нагружения, при традиционном армировании и при использовании дисперсного армирования. Исходя из того, что при испытании на трещиностойкость «не допускается образование трещин» [1], расчёт плиты производится по деформациям для конструкций без трещин в растянутой зоне, то есть по прогибам.

Для сравнения влияния синтетических волокон производился расчёт предварительно напряжённой железобетонной плиты ПАГ-20 и плит с такими же геометрическими характеристиками, но изготовленных с комбинированным армированием – стальной стержневой арматурой с синтетической фиброй.

### 5.1.2. Расчёт состава фибробетона по графо-аналитическому методу

Проектирование состава фибробетона ведётся по разработанному в СПбГАСУ графо-аналитическому методу [93].

#### Задание на проектирование:

Разработать состав фибробетона для использования в качестве матрицы в составе фиброжелезобетонной плиты ПАГ-20 со следующими характеристиками:

- предел прочности на сжатие *не менее 37,5 МПа*;
- предел прочности на изгиб *не менее 9,5 МПа*;
- марка по удобоукладываемости *П4*;
- марка по морозостойкости *не менее F<sub>1300</sub>*;
- марка по водонепроницаемости *не менее W6*.

1. Сырьевые компоненты имеют следующие характеристики: Портландцемент ЦЕМ I 42,5Н производства *Heidelberg cement* (АО "Сланцевский цементный завод "Цесла"); щебень гранитный фракции 5–20 мм, истинная плотность щебня 2580 кг/м<sup>3</sup>, насыпная плотность щебня 1330 кг/м<sup>3</sup>; песок средней крупности  $M_{кр} = 2,3$ , истинная плотность 2580 кг/м<sup>3</sup>, водопотребность 5 %. В качестве дисперсного армирования используется макрофибра *Durus S500* в случае моноармирования и комбинация из макроволокон *Durus S500* и микроволокон *Fibrin XT*. Параметры дисперсной арматуры представлены в главе 2.

2. Состав исходной бетонной смеси определяем по методу абсолютных объемов [31]:

- Водоцементное отношение:

$$\frac{B}{Ц} = \frac{AR_u}{(R_0 + 0,5AR_u)} \quad (5.1)$$

$$\frac{B}{Ц} = \frac{0,6 \cdot 42,5}{(37,5 + 0,5 \cdot 0,6 \cdot 42,5)} = 0,51$$

где: А – коэффициент, зависящий от качества материалов; R<sub>ц</sub> – активность портландцемента; R<sub>0</sub> – прочность бетона

Расход воды с учетом требуемой подвижности, с учётом применения наномодифицированного суперпластификатора определенным по графикам, составил:  $V = 178,5 \text{ л/м}^3$ ;

Расход портландцемента:

$$Ц = \frac{B}{\frac{B}{Ц}} = \frac{178}{0,51} = 351,75 \text{ кг/м}^3 \approx 352 \text{ кг/м}^3 \quad (5.2)$$

где:  $B$  – расход воды;  $B/Ц$  – водоцементное отношение.

Расход щебня:

$$Щ = \frac{1000}{\left( \alpha \frac{П_{щ}}{\rho_n^{щ}} + \frac{1}{\rho_u^{щ}} \right)} \quad (5.3)$$

$$Щ = \frac{1000}{\left( 1,51 \frac{0,5}{1,33} + \frac{1}{2,65} \right)} = 1061 \text{ кг/м}^3$$

где:  $\alpha$  – коэффициент раздвижки зерен;  $П_{щ}$  – пустотность щебня;  $\rho_u^{щ}$  – истинная плотность щебня;  $\rho_n^{щ}$  – насыпная плотность щебня.

Расход песка:

$$П = \rho_u^n \left( 1000 - \frac{Ц}{\rho_u^n} - \frac{Щ}{\rho_u^{щ}} - B \right) \quad (5.4)$$

$$П = 2,58 \left( 1000 - \frac{352}{3,16} - \frac{1061}{2,65} - 178 \right) \approx 800 \text{ кг/м}^3$$

где:  $\rho_u^n$  – истинная плотность песка;  $\rho_u^n$  – истинная плотность портландцемента;  $Ц$ ,  $Щ$ ,  $B$  – расход портландцемента, щебня и воды соответственно.

Проверка:

$$\frac{П}{\rho_n} + \frac{Щ}{\rho_{щ}} + \frac{B}{\rho_v} + \frac{Ц}{\rho_c} = \frac{800}{2,58} + \frac{1061}{2,65} + \frac{178}{1} + \frac{352}{3,16} = 1000$$

Таким образом, расход сырьевых компонентов на  $1 \text{ м}^3$  базового состава (состава матрицы), который будет использован для изготовления бетонных и фибробетонных образцов, будет выглядеть следующим образом:



Таблица 5.1 – Расход материалов на 1 м<sup>3</sup> базового состава

Цемент	352 кг
Песок	800 кг
Щебень	1061 кг
Вода	178 л
Добавка-пластификатор	2,1 кг

По результатам испытаний контрольных образцов Установлены прочностные характеристики неармированного бетона-матрицы:  $R_{сж}= 39,6$  МПа,  $R_{рп}= 4,2$  МПа.

3. Определяем величину сцепления волокон с матрицей, необходимую для выполнения дальнейших расчетов (согласно методике, предложенной в Главе 2), которая для выбранного типоразмера макрофибры *Durus S500* составила  $(\varphi\tau)=4,77$  МПа.

4. Рассчитываем значения характерных пределов армирования с использованием выражений [73, 93, 106], которые, учитывая, что фибры располагаются в цементном камне, и разрушение материала происходит в результате нарушения сцепления фибр с матрицей, принимают вид:

$$\mu_{\min} = \frac{V_{кз} R_{цк}}{(\varphi\tau)2 \frac{l_f}{d} - (2 \frac{E_\phi}{E_{кз}} + 3,5) R_{кз} + 4,5 R_{цк}} \quad (5.5)$$

$$\mu_k = V_{кз} \alpha \frac{(R_{кз} - R_{цк})}{R_{цк} (2 \frac{E_\phi}{E_{цк}} - 1) - R_{кз} (2 \frac{E_\phi}{E_{кз}} - 1)} \quad (5.6)$$

ГДЕ:  $\mu_{\min}$  – минимальная объемная доля волокон, после которой они начинают проявлять армирующие свойства;  $\mu_k$  – расход волокон, соответствующий началу образования фиброцементного каркаса;  $V_{кз}$  – объемная доля цементного теста, в которой могут быть распределены волокна с образованием контактных ( $V_{кз}= 0,2$ );  $R_{цк}$  – прочность цементного камня;  $R_{кз}$  – прочность контактной зоны, равная  $1,4R_{цк}$  [93];  $(\varphi\tau)$  – прочность сцепления волокон с матрицей;  $E_\phi$ ,  $E_{цк}$  и  $E_{кз}$  – модули упругости фибры,

цементного камня и контактных зон соответственно;  $l_f$  – длина фибры;  $d$  – диаметр фибры;  $\alpha$  – коэффициент, принимаемый равным 0,785.

$$\mu_{\min} = \frac{0,2 \cdot 6}{4,77 \cdot 2 \cdot \frac{4,8}{0,07} - \left(2 \frac{5740}{20000} + 3,5\right) \cdot 8,4 + 4,5 \cdot 6} = 0,0019 = 0,19\%$$

$$\mu_{\kappa} = 0,2 \cdot 0,785 \frac{(8,4 - 6)}{6 \left(2 \frac{5740}{20000} - 1\right) - 8,4 \left(2 \frac{5740}{30000} - 1\right)} = 0,143 = 14,3\%$$

5. Определяем прочность фибробетона ( $R_{\text{фб}}$ ) при насыщениях, соответствующих критическим пределам армирования:

– при минимальной объемной доле волокон ( $\mu_{\min}$ )

$$R_{\text{фб}} = \frac{2(\varphi\tau)l_f\mu_{\min}}{d} + 3,5R_{\text{кз}}\mu_{\min} + R_{\sigma}(1 - 4,5\mu_{\min}) \quad (5.7)$$

$$R_{\text{фб}} = \frac{2 \cdot 4,77 \cdot 4,8 \cdot 0,004}{0,07} + 3,5 \cdot 8,4 \cdot 0,0019 + 5,44(1 - 4,5 \cdot 0,0019) = 4,96 \text{ МПа}$$

– при объемной доле волокон, соответствующей образованию фиброцементного каркаса ( $\mu_{\kappa}$ )

$$R_{\text{фб}} = \frac{2(\varphi\tau)l_f\mu_{\kappa}}{d} + 3,5R_{\text{кз}}\mu_{\kappa} + R_{\sigma}(1 - 4,5\mu_{\kappa}) \quad (5.8)$$

$$R_{\text{фб}} = \frac{2 \cdot 4,77 \cdot 5 \cdot 0,149}{0,4} + 3,5 \cdot 8,4 \cdot 0,143 + 4,01(1 - 4,5 \cdot 0,143) = 97,7 \text{ МПа}$$

6. Строим график зависимости « $R_{\text{фб}} - \mu_f$ »

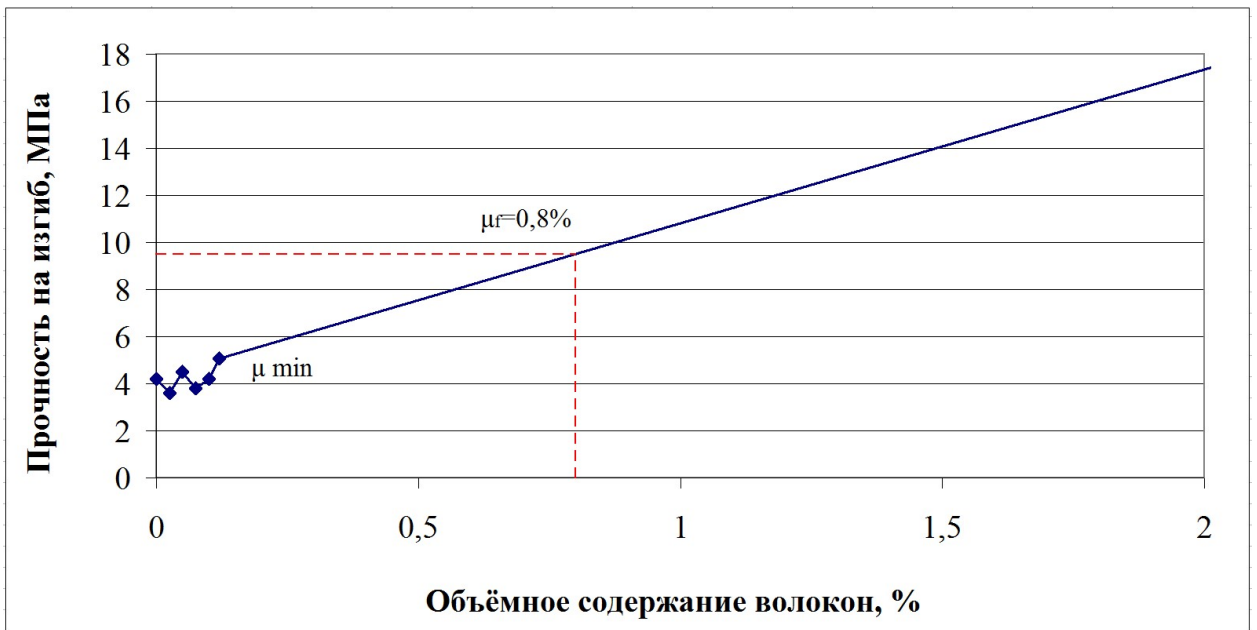


Рисунок 5.5 – График « $R_{fb} - \mu_f$ » для фибробетона с макроволокнами

7. По графику определяем коэффициент армирования  $\mu_f = 0,008 = 0,8\%$ , соответствующий получению заданной прочности фибробетона, которая должна быть не менее 9,5 МПа.

8. Корректировка состава фибробетонной смеси:

– расчетная средняя плотность фибробетонной смеси

$$\rho = 352 + 800 + 1061 + 178 + 7,2 + 2,1 = 2391 \text{ кг/м}^3$$

Фактическая средняя плотность, измеренная при проведении пробных формовок, составляет 2345 кг/м<sup>3</sup>.

После проведения корректировки окончательный состав фибробетонной смеси представлен в табл. 5.2.

Таблица 5.2 – Расход материалов на 1 м<sup>3</sup> базового состава

Цемент	345 кг
Песок	784 кг
Щебень	1040 кг
Фибра	7,8 кг
Вода	175 кг
Добавка-пластификатор «Макромер П-163 наномодифицированная»	2,07 л

### 5.1.3. Расчёт плиты ПАГ-20

Произведём расчёт плиты по прогибам в соответствии с положениями СП 52-102-2004 [3] для случая моноармирования 0,9% синтетических микроволокон и полидисперсного армирования комбинацией макроволокон в количестве 0,9% и микроволокон в количестве 0,2%.

Расчёт изгибаемых элементов по прогибам производится из условия 5.1:

$$f \leq f_{ult}, \quad (5.1)$$

где:  $f$  – прогиб элемента от действия внешней нагрузки;  $f_{ult}$  – значение предельно допустимого прогиба [3].

Для свободно опёртых изгибаемых предварительно напряжённых элементов постоянного по длине элемента сечения кривизну допускается определять по упрощённой формуле 5.2 для наиболее напряжённого сечения, принимая её для остальных сечений такого участка изменяющейся пропорционально значению изгибающего момента [3]:

$$f = St^2 \left( \frac{1}{r} \right)_{\max}, \quad (5.2)$$

где:  $f$  – максимальный прогиб изгибаемого элемента;  $S$  – коэффициент, зависящий от расчетной схемы элемента и вида нагрузки;  $l$  – пролёт;  $\left( \frac{1}{r} \right)_{\max}$  – полная кривизна в сечении с наибольшим изгибающим моментом.

Коэффициент  $S$  определяется по формуле 5.3, вид которой зависит от схемы нагружения элемента, указанного в табл. 4.3. Пособия к СП 52-102-2004. Величина коэффициента  $S$  составляет 0,102.

$$S = \frac{1}{8} - \frac{a^2}{8l^2}, \quad (5.3)$$

где:  $a$  – расстояние между точкой опирания плиты и точкой приложения нагрузки [3].

Полная кривизна изгибаемых преднапряжённых элементов для участков без трещин в растянутой зоне определяется по формуле 5.4.

$$\frac{1}{r} = \left(\frac{1}{r}\right)_1 + \left(\frac{1}{r}\right)_2, \quad (5.4)$$

где:  $\left(\frac{1}{r}\right)_1$  – кривизна от непродолжительного действия кратковременных нагрузок;  $\left(\frac{1}{r}\right)_2$  – кривизна от продолжительного действия постоянных нагрузок [3].

Кривизну изгибаемых элементов от действия соответствующих нагрузок определяют по формуле 5.5:

$$\frac{1}{r} = \frac{M - N_p e_{op}}{D}, \quad (5.5)$$

где:  $M$  – изгибающий момент от внешней нагрузки;  $N_p$  и  $e_{op}$  – усилие предварительного обжатия и его эксцентриситет относительно центра тяжести приведённого поперечного сечения элемента;  $D$  – изгибная жёсткость приведённого поперечного сечения элемента [3, 4].

Произведение  $N_p e_{op}$  позволяет «при определении кривизны изгибаемого элемента учесть величину выгиба изделия, появляющегося в момент передачи усилия обжатия на бетон. Однако поскольку напрягаемая арматура находится как в растянутой, так и в сжатой зоне конструкции и располагается симметрично относительно горизонтальной оси плиты, проходящей через её центр тяжести, то выгиб изделия от арматуры в растянутой зоне будет компенсировать выгиб изделия от арматуры в сжатой зоне, в результате чего этим произведением можно пренебречь» [3, 52]. Для наглядности, поперечное сечение плиты ПАГ-20 со схемой расположения арматуры в середине пролёта представлено на рисунке 5.6.

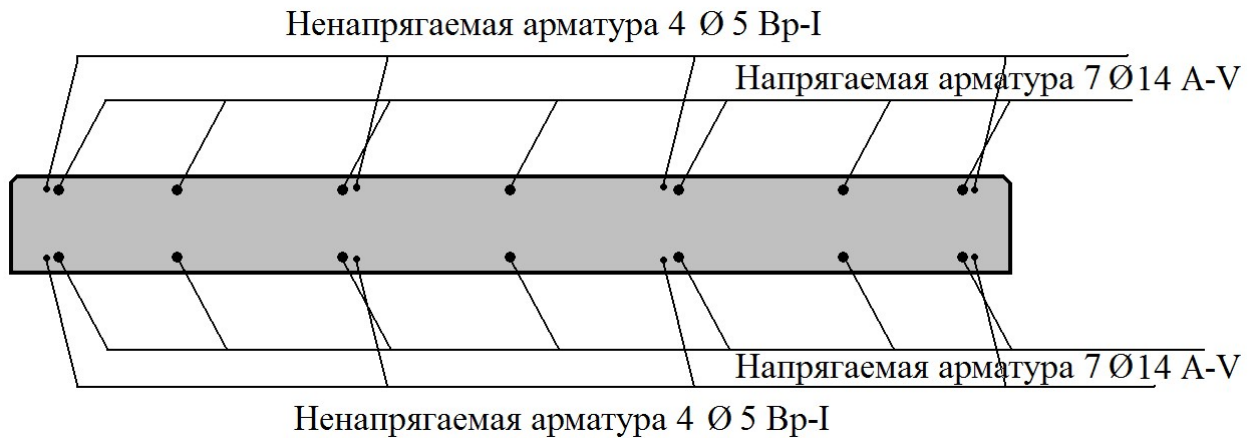


Рисунок 5.6 – Схема расположения арматуры в плите ПАГ-20 (поперечный разрез) [1]

Изгибная жёсткость элемента может быть рассчитана по формуле 5.6:

$$D = E_{b1} I_{red}, \quad (5.6)$$

где:  $E_{b1}$  – модуль деформации сжатого бетона, определяемый в зависимости от продолжительности действия нагрузки:  $I_{red}$  – момент инерции приведённого поперечного сечения относительно его центра тяжести [3, 4].

Модуль деформации сжатого бетона при непродолжительном действии нагрузки определяется по формуле 5.7:

$$E_{b1} = 0,85 E_b, \quad (5.7)$$

где:  $E_b$  – модуль упругости бетона [3, 4].

В соответствии с данными, полученными в ходе определения деформативных характеристик бетона-матрицы и фибробетонов, представленными в таблицах 3.17 и 3.20, модуль упругости использованного в ходе исследования бетона составил 29800 МПа, бетона, армированного 0,9% макроволокон периодического профиля – 36600 МПа, а полидисперсно армированного бетона, содержащего 0,9% макроволокон периодического профиля и 0,2% микроволокон – 38100 МПа. Таким образом, модуль деформации сжатого бетона при непродолжительном действии нагрузки ( $E_{b1}$ )

составляет 25330 МПа, а фибробетонов – 31110 МПа и 32385 МПа соответственно.

Момент инерции определяют по общим правилам сопротивления упругих элементов как для сплошного тела с учётом площадей поперечного сечения бетона и арматуры с коэффициентом приведения арматуры к бетону [4]. Опуская промежуточные вычисления, получим величину момента инерции ( $I_{red}$ ) при непродолжительном действии кратковременных нагрузок, равную 0,00153 м<sup>4</sup>. Изгибная жёсткость  $D$  приведённого поперечного сечения элемента равна 42,29 МПа·м<sup>4</sup>. Кривизна от пригрузочного балласта, нагружающего плиту в процессе испытания на трещиностойкость, считается непродолжительной [1, 3]. Таким образом, кривизна от непродолжительных нагрузок, найденная по формуле 5.5, для бетона составляет

$$\left(\frac{1}{r}\right)_1 = 0,00203 \quad (5.8)$$

Для фибробетонов кривизна составила 0,00156 для моноармированного и 0,00151 для полиармированного составов.

Аналогично определяется кривизна от продолжительного действия постоянных и временных нагрузок [3], однако при определении изгибной жёсткости элемента  $D$  используется модуль деформации сжатого бетона при продолжительном действии нагрузки, учитывающий ползучесть бетона (формула 5.9) и равный 11462 МПа для бетона, 14077 МПа для моноармированного фибробетона и 14654 МПа для полиармированного.

$$E_{b1} = \frac{E_b}{1 + \varphi_{b,cr}}, \quad (5.9)$$

где:  $\varphi_{b,cr}$  – коэффициент ползучести бетона, определяемый по таблице 5 СП 52-102-2004 в зависимости от относительной влажности воздуха и класса бетона по прочности. В данном случае равен 1,6 [3]

Таким образом, для бетонной плиты момент инерции ( $I_{red}$ ) приведённого поперечного сечения относительно его центра тяжести при

продолжительном действии постоянных нагрузок равен 0,001893 м<sup>4</sup>. Изгибная жёсткость в этом случае получается равной 21,7 МПа·м<sup>4</sup>. Кривизна от продолжительных нагрузок (собственного веса конструкции) составляет:

$$\left(\frac{1}{r}\right)_2 = 0,00369 \quad (5.10)$$

Подставляя полученные данные в формулу 5.2, определим величину прогиба плиты ПАГ-20 при испытании на трещиностойкость, составляющую 9,39 мм.

В случае плиты, изготовленной из фибробетона, армированного синтетическими макро волокнами в количестве 0,9%, кривизна от продолжительных нагрузок составляет 0,0025: При этом прогиб фиброжелезобетонной плиты составляет 6,65 мм.

Плита с полидисперсным армированием имеет кривизну от продолжительных нагрузок, равную 0,00242. Прогиб полидисперсно армированной фиброжелезобетонной плиты равен 6,44 мм.

Методом последовательных приближений можно определить минимально возможную толщину фиброжелезобетонных плит, величина прогиба которых при испытании на трещиностойкость не превысит прогиб железобетонной плиты. Расчёты показывают, что при толщине плиты, моноармированной синтетической макрофиброй, равной 172 мм, величина прогиба составит 9,44 мм. При толщине плиты, изготовленной с применением полидисперсно армированного фибробетона, равной 171 мм, её прогиб будет равен 9,28 мм.

Близкие значения прогиба получены при расчёте плиты ПАГ-20 с исходными данными, полученными при армировании плиты аморфнометаллической фиброй в количестве 1%, в работе [52]. Прогиб плиты составил 6,45 мм. Это свидетельствует о целесообразности замены дорогостоящей аморфнометаллической фибры на более дешёвые и распространённые синтетические волокна с сохранением несущей способности конструкции. Отдельно следует отметить, что использование



синтетических волокон благоприятно сказывается на характеристиках долговечности фибробетонных конструкций, что даёт возможность увеличивать межремонтный интервал, тем самым снижая затраты на эксплуатацию.

## 5.2. Технико-экономическая оценка предлагаемых изменений

Ниже представлены расчёты экономической эффективности предлагаемых технических решений относительно применения синтетических волокон в конструкции аэродромных плит ПАГ-20. В таблице 5.3. представлены расчёты плиты, изготовленной из бетона и с армированием в соответствии с действующей нормативно-технической документацией.

Таблица 5.3 Расход и стоимость сырьевых материалов на изготовление железобетонной плиты ПАГ-20

Материал	Масса ед., кг	Количество	Стоимость 1 кг, руб	Стоимость общая, руб
Портландцемент ЦЕМ I 42,5		864 кг	5,75	4968
Песок		1452 кг	0,23	334
Щебень гранитный фр. 5-20 мм		3000 кг	1,04	3120
Напрягаемая арматура А-V $\varnothing 14$ $l=6000$ мм	7,247	14	37,2	3775
Сетка С5 Вр-1 $\varnothing 5$ $l=1960$ мм	0,298	132	19,5	767
Вр-1 $\varnothing 5$ $l=4650$ мм	0,707	8	19,5	111
Сетка С3 Вр-1 $\varnothing 5$ $l=750$ мм	0,114	16	19,5	36
А-II $\varnothing 10$ $l=1980$ мм	1,22	40	37,9	1850
ИТОГО				14959

Исходя из результатов исследований, представленных в главе 3 диссертации, а также учитывая данные, полученные в ходе расчёта плиты по

прогибам, представленные в п. 5.1, произведём расчёт стоимости плиты, изготовленной из фибробетона, моноармированного синтетическим макроволокном (табл. 5.4) и полиармированного комбинацией синтетических макро- и микроволокон (табл. 5.5). При расчёте учтено уменьшение толщины плиты, достигаемое при использовании фибрового армирования, изменение расхода сырьевых компонентов для изготовления бетонной смеси, а также ликвидация арматурных сеток, роль которых берёт на себя дисперсная арматура.

Таблица 5.4 Расход и стоимость сырьевых материалов на изготовление фиброжелезобетонной плиты ПАГ-20 с моноармированием

Материал	Масса ед., кг	Количество	Стоимость 1 кг, руб	Стоимость общая, руб
Портландцемент ЦЕМ I 42,5		712 кг	5,75	4094
Песок		1618 кг	0,23	372
Щебень гранитный фр. 5-20 мм		2146 кг	1,04	2232
Напрягаемая арматура А-V $\varnothing$ 14 $l=6000$ мм	7,247	14	37,2	3775
Макрофибра полипропиленовая 0,8%		14,57 кг	198	2885
ИТОГО				13358

Таблица 5.5 Расход и стоимость сырьевых материалов на изготовление фиброжелезобетонной плиты ПАГ-20 с полидисперсным армированием

Материал	Масса ед., кг	Количество	Стоимость 1 кг, руб	Стоимость общая, руб
Портландцемент ЦЕМ I 42,5		708 кг	5,75	4071
Песок		1608 кг	0,23	370
Щебень гранитный фр. 5-20 мм		2134 кг	1,04	2219
Напрягаемая арматура А-V $\varnothing$ 14 $l=6000$ мм	7,247	14	37,2	3775
Макрофибра полипропиленовая 0,8%		14,48 кг	198	2868
Микрофибра 0,2%		3,32	198	658
ИТОГО				13961

Согласно полученным данным, при армировании плиты синтетическими макроволокнами экономический эффект от её применения составил 1601 рубль на одно изделие. Если армировать плиту комбинацией макро- и микроволокон, то экономия на одном изделии составит 998 рублей. Несмотря на меньшую экономию при производстве плит с полидисперсным армированием, данный вариант, учитывая условия эксплуатации изделий, является более предпочтительным. При сохранении прочностных характеристик изделий, придаваемым макроволокнами, значительный прирост характеристик долговечности обеспечивает наличие микроволокон в составе композита, что увеличивает срок эксплуатации изделий, межремонтный интервал и, соответственно, снижает затраты в процессе эксплуатации.

Следует отметить, что при расчётах не были учтены затраты на арматурные работы по изготовлению сеток С3 и С5, имеющие высокую трудоёмкость, и от которых удалось отказаться при изготовлении фиброжелезобетонных изделий. Дополнительная экономия может быть получена также за счёт сокращения затрат на транспортные работы, связанные с уменьшенной толщиной и, соответственно, массой изделий.

**Выводы по пятой главе**

1) Применение низкомолекулярных синтетических макроволокон является перспективным в таких конструкциях, как аэродромные плиты покрытия типа ПАГ.

2) Замена железобетона в конструкции плит на фибробетон с применением синтетических макроволокон позволяет увеличить их прочность и жёсткость, а при сохранении прочностных показателей на уровне традиционного бетона – значительно уменьшить толщину конструкции и отказаться от технологической арматуры и трудозатрат по её изготовлению.

3) Использование полидисперсно армированного бетона позволяет получить конструкцию с улучшенными показателями как прочности, так и долговечности, что позволит увеличить межремонтный интервал и общий срок службы.

4) Замена бетона на фибробетон, уменьшение толщины, а следовательно – собственного веса конструкции, снижение трудозатрат и увеличение долговечности обеспечивает ощутимый экономический эффект.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведённых диссертационных исследований теоретически обоснована и экспериментально подтверждена эффективность армирования бетона низко модульными синтетическими макро волокнами в отдельности и в комбинациях с другими видами синтетических волокон. При этом получены следующие теоретические и практические данные:

1. На основании литературного обзора и собственных предварительных исследований определена роль низко модульных 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 усовершенствованный расчётно-экспериментальный метод, позволяющий с высокой точностью и сравнительно небольшими трудозатратами определять величину сцепления армирующих волокон с цементной матрицей.

4. Предложена модель деформирования фибробетонов, армированных низко модульными синтетическими волокнами, под нагрузкой, и выведены 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».

Дальнейшую работу предполагается вести по следующим направлениям:

- 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 высоко модульными микро волокнами.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ 25912-2015. Плиты железобетонные предварительно напряжённые для аэродромных покрытий [Текст]. – Взамен ГОСТ 25912-91; введ. 01 – 07 – 2015. – Москва: Стандартинформ, 2015. – 35 с.
2. ГОСТ 29167-91. Бетоны. Методы определения характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении [Текст]. введ. 01 – 07 – 1992. Москва: ИПК Издательство стандартов, 2004. – 15 с.
3. СП 52-102-2004. Предварительно напряжённые железобетонные конструкции [Текст]. введ. 24 – 05 – 2005. – Москва, 2005. – 38 с.
4. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения [Текст]. введ. 20 – 06 – 2019. – Москва: Стандартинформ, 2019. – 150 с.
5. Berkowski, P., Kosior-Kazberuk, M. Effect of fiber on the concrete resistance to surface scaling due to cyclic freezing and thawing // *Procedia Engineering*. 2015. Vol. 111. P. 121–127
6. Bolat, H., Simsek, O., Cullu, M. The effects of macro synthetic fiber reinforcement use on physical and mechanical properties of concrete // *Composites Part B: Engineering*. 2014. Vol. 61. P. 191–198.
7. *Fuchs F., Jasienski A.* Road pavements of cement concrete. Execution of monolithic pavements. // *Febel-Cem "Dossier Cement"*. 2001. Vol. 26. P. 76–96.
8. *Greenhalgh J.*, 20 years of fibre concrete linings in the UK // *Tunnels and Tunelling*. 2010. 10. P. 48-53.
9. *Hasan M.J., Afroz M., Mahmud M.I.* An Experimental Investigation on Mechanical Behavior of Macro Synthetic Fiber Reinforced Concrete. // *International Journal of Civil & Environmental Engineering IJCEE-IJENS*. 2011, vol. 11. no. 03, pp. 18–23.

10. *Kiyanets, A.V.* Concrete with recycled polyethylene terephthalate fiber // Magazine of Civil Engineering, 2018. №8, P. 109–118.
11. *Kui He., Hui Yang, Fang Fang Jia, Er Po Wang.* Experimental Study on Mechanical Properties of Synthetic Macro-Fiber Reinforced Reactive Powder Concrete // Applied Mechanics and Materials. 2014. P. 496–500.
12. *Mitchell M.* Using fibres in concrete for fire resistance // Tunnels and Tunelling. 2007. Vol. 2. P. 6-8.
13. *Mohajerani, A., Hui, S., Mirzababaei, M.* Amazing Types, Properties, and Applications of Fibres in Construction Materials // Materials. 2019. 12 (16). 2513.
14. *Novak J., Kohoutkova A.* Fibre reinforced concrete exposed to elevated temperature // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. 2017. Vol. 246
15. *Park J-J, Yoo D-Y, Kim S. Kim S-W.* Benefits of synthetic fibers on the residual mechanical performance of UHPFRC after exposure to ISO standard fire // Construction and Building Materials. 2019. Vol. 104.
16. *Pukharenko Yu.V.* Modelling the behavior of fiber-reinforced concrete with low-modulus fibers under load (Моделирование поведения фибробетонов с низко модульными волокнами под нагрузкой) / Yu.V. Pukharenko, D.A. Panteleev, M.I. Zhavoronkov, M.P. Kostrikin, Said Mujtaba Eshanzada // «MATEC Web of Conferences» 329, 04002 (2020), ICMTMTE 2020
17. *Rosidawani, Iswandi I., Saptahari S., Ivinda P.* Behaviour of macro synthetic fiber reinforced concrete columns under concentric axial compression. // The 5th International Conference of Euro Asia Civil Engineering Forum (EACEF-5). Indonesia, 2015. P. 987–994.
18. *Salvador, R., Figueiredo, A.* Evaluation of the durability of synthetic macrofibers in cement matrices // Fibre Concrete 2013. Czech Republic, 2013. P. 91–92



19. *Serrano R.* Analysis of fire resistance of concrete with polypropylene or steel fibers/ R. Serrano, A. Cobo, M.I. Prieto, M. Gonzales // Construction and Building Materials. 2016. Vol. 122, Pp. 302-309.
20. *Shihada S.* Effect of polypropylene fibers on concrete fire resistance // Journal of Civil Engineering and Management. 2011. Vol. 17 (2), Pp. 259-264.
21. *Seung Hun Park, Dong Joo Kin, Gum Sung Ryu, Kyung Taek Koh.* Tensile behavior of Ultra High Performance Hybrid Fiber Reinforced Concrete // Cement & Concrete Composites. 2012. Vol. 34. P. 172–184.
22. *Swamy, R.N.* The mechanics of fibre reinforced of cement matrices/ R.N. Swamy, P.S. Mangat// ACI Journal. – 1974. – SP 44. – p. 1-28.
23. *Tuochao W.* Improvement of Impact Resistance of Synthetic Macro-Fiber Reinforced Concrete // Applied Mechanics and Materials. 2014. Vols.578–579. P. 501–504.
24. *Tuan Kiet Tran, Dong Joo Kim.* High strain rate effects on direct tensile behavior of high performance fiber reinforced cementitious composites // Cement & Concrete Composites. 2014. Vol. 45. P. 186–200.
25. *Yildirim S.T., Ekinici, C.E.* Effects on Freeze-Thaw Durability of Fibers in Concrete // Polypropylene. 2012. P. 185–192.
26. *Wang, Y., Backer, S., Li, V.* An experimental study of synthetic fibre reinforced cementitious composites // Journal of Materials Science. 1987. Vol. 22 (12). P. 4281–4291
27. *Zheng, Z., Feldman, D.* Synthetic fibre-reinforced concrete // Progress in Polymer Science. 1995. Vol. 2, Issue 2, P. 185–210
28. *Бабаев, В. Б.* Мелкозернистый цементобетон с использованием базальтового волокна для дорожного строительства : автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Бабаев Виктор Борисович. – Белгород, 2013. – 22 с.
29. *Баранова, А.А.* Исследование влияния фибры, изготовленной из разных материалов, на физико-механические характеристики мелкозернистого бетона / А.А. Баранова, М.В. Баденикова, А.А. Боброва,

К.Н. Рудых // Сборник научных трудов ангарского государственного технического университета. – 2018. – №15. Т.1, – С. 115–118

30. *Баженов, Ю. М.* Модифицированные высококачественные бетоны / Ю.М. Баженов, В.С. Демьянова, В.И. Калашников. – М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2006. – 368 с.

31. *Баженов, Ю. М.* Технология бетонов [Текст] / Ю. М. Баженов – Москва: АСВ. 2007. – 528 с.

32. *Базанов, С.М.* Улучшение качества бетона на основе использования смешанных видов волокон / С. М. Базанов, М.В. Торопова [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.allbeton.ru/article/20.html>

33. *Бальмаков, М.Д.* Нанокпозиционное материаловедение. / М.Д. Бальмаков, Ю.В. Пухаренко // Вестник гражданских инженеров – 2005. – № 3 (4). – С. 53-57

34. *Белькова Н.А., Крюков Э.И., Ткачёва Д.А.* Разработка составов фибробетона для устройства полов и стяжек // Химия, физика и механика материалов. – 2019. – № 3. – С. 4–13.

35. *Борисюк, А.П.* Исследование деформационных характеристик фибробетона со стальной фиброй / А.П. Борисюк, Ю.Ю. Зятюк // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2016. – № 3 (52). – С. 160 – 168.

36. *Богданова Е.Р.* Экспериментальные исследования бетона, дисперсно армированного синтетической полипропиленовой фиброй // Известия ПГУПС. – 2015. – № 2. – С. 91–98.

37. *Боровских И. В.* Мелкозернистый бетон для дорожных покрытий из жёстких смесей / И. В. Боровских, Н. М. Морозов, А. Ф. Искандарова // Символ науки. – 2016. – С. 39 – 41.

38. *Будницкий, Г.И.* Перспективы стандартизации дисперсного армирования в тоннелестроении / Г. И. Будницкий, С.В, Мазеин. // Метро и тоннели. – 2012. – №5. – С. 34 – 35.

39. *Бушев В.П., Пчелинцев В.А., Федоренко В.С., Яковлев А.И.* Огнестойкость зданий. – М.: Стройиздат, 1970.
40. *Васильев В.В.* Механика конструкций из композиционных материалов. – М. Машиностроение. 1988.
41. *Верещагин, В.И.* Синергетические принципы создания строительных и композиционных материалов полифункционального назначения / В.И. Верещагин, Л.П. Рихванов, Ю.С. Саркисов [и др.] // Известия Томского политехнического университета. – 2009. – Т. 315. – № 3. – С. 12–15.
42. *Войлоков И. А.* Применение дисперсного армирования при строительстве гидротехнических сооружений / И. А. Войлоков // Инженерно-строительный журнал. – 2009. – № 1. – С. 28-32
43. *Войлоков, И. А.* Технология устройства двухслойных полов промышленных зданий со слоем износа из сталефибробетона : автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Войлоков Илья Анатольевич. – СПб, 2012. – 26 с.
44. *Вукалович, М.П.* Теплофизические свойства воды и водяного пара. – М.: Машиностроение, 1967. 160 с.
45. *Голубев, В.Ю.* Высокопрочный бетон повышенной вязкости разрушения: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / В.Ю. Голубев. – СПб., 2009. – 183 с.
46. *Голованов В.И.* Прочностные характеристики фибробетона для тоннельных сооружений в условиях высоких температур / В.И. Голованов, Н.С. Новиков, В.В. Павлов, С.П. Антонов // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2017. – № 2. – С. 63–67.
47. *Горб А.М.* Фибробетон — история вопроса, нормативная база, проблемы и решения/ А. М. Горб, И. А. Войлоков// Международное аналитическое обозрение. – 2009. – №2, – С.1-4
48. *Григорьев, В.И.* Напряженно-деформированное состояние сталефиброжелезобетонных изгибаемых элементов при импульсном

воздействии: Автореф. дис... канд. техн. наук/ Ленингр. инж.-строит. ин-т. – Л., 1987. – 24 с.

49. *Жаворонков, М.И.* Методика определения энергетических и силовых характеристик разрушения фибробетона/ М.И. Жаворонков// Вестник гражданских инженеров. – 2014. – № 6(47). – С. 155-160.

50. *Жаворонков, М.И., Пухаренко Ю. В., Пантелеев Д. А.* Определение вклада фибры в формирование прочности сталефибробетона // Вестник гражданских инженеров. – 2017. – № 1 (60). – С. 172–176.

51. *Жаворонков, М.И.* Определение характеристик разрушения и модуля упругости фибробетона/ М.И. Жаворонков// Известия КГАСУ. – 2015. – № 3 (33). – С. 114-120.

52. *Жаворонков, М.И.* Развитие методов определения характеристик трещиностойкости фибробетона: Дис. ... канд. техн. наук /. СПбГАСУ. – СПб., 2017

53. *Зотов, А.Н.* Структура и свойства модифицированных мелкозернистых бетонов с полипропиленовой фиброй: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Зотов Александр Николаевич. – Кострома, 2016. – 263 с.

54. *Ибе, Е.Е., Шугурова, А.В.* Перспективы применения фибробетона при строительстве гидротехнических сооружений // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 9, №1 (2017)

55. *Ивлев В. А.* Фибробетон в тонкостенных изделиях кольцевой конфигурации: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / Ивлев Василий Александрович. – Уфа, 2009. – 24 с.

56. *Калашников В.И.* Бетоны нового поколения на основе сухих тонкозернисто-порошковых смесей / В.И. Калашников, О.В. Тараканов, Ю.С. Кузнецов и др. // Magazine of Civil Engineering. – 2012. – №8. – С. 47 – 53.

57. *Карпенко Н. И.* Общие модели механики железобетона. — М.: Стройиздат, 1996

58. *Качанов Л.М.* Основы механики разрушения. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1974. – 312 с.

59. Клюев, С.В. К вопросу фибрового армирования бетонов // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века – 2018. – №3-4. – С. 42 –47

60. Клюев, С.В. Мелкозернистый фибробетон, армированный полипропиленовым волокном / А.В. Клюев, С.В. Клюев, А.В, Нетребенко, А.В. Дураченко // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. – 2014. – №4. – С. 67 – 72.

61. Коровкин, М.О. Исследование эффективности полимерной фибры в мелкозернистом бетоне // М.О. Коровкин, Н.А. Ерошкина, А.Р. Янбукова / Инженерный вестник Дона. – 2017. – №2

62. Коротких, Д.Н. Закономерности разрушения структуры высокопрочных цементных бетонов на основе анализа полных равновесных диаграмм их деформирования (часть 1) // Вестник ВолгГАСУ. Серия: Строительство и архитектура. – Вып. 26. 2012. – С. 56-67

63. Коротких, Д.Н. Закономерности разрушения структуры высокопрочных цементных бетонов на основе анализа полных равновесных диаграмм их деформирования (часть 2)// Вестник ВолгГАСУ. Серия: Строительство и архитектура. – Вып. 27. 2012. – С. 54-62

64. Коротких, Д. Н. Многоуровневое дисперсное армирование структуры бетонов для повышения их вязкости разрушения / Д. Н. Коротких // Вестник гражданских инженеров – 2009. – №3(20). – С. 126–128

65. Коротких, Д.Н. Характеристика показателей разрушения высокопрочных бетонов на основе анализа полных равновесных диаграмм их деформирования/ А.В. Ушаков, Д.Н. Коротких // Вестник Центрального регионального отделения РААСН. Воронеж, 2011 – С. 76-89

66. Коротышевский, О.В. Пути повышения эффективности дисперсно-армированного бетона: опыт Латвийской ССР / О. В. Коротышевский. – Рига, 1987. – 44 с.

67. Кострикин, М. П. Влияние дисперсного армирования на долговечность цементных бетонов для дорожного строительства. Актуальные проблемы строительства: 70-я междунар. науч.-практ. конф.

студентов, аспирантов, молодых ученых и докторантов. СПб.: СПбГАСУ, 2017. – С. 102 – 106.

68. *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.

69. *Кострикин М.П.* К вопросу о влиянии высоких температур на прочностные характеристики фибробетона / М.П. Кострикин // Архитектура – Строительство – Транспорт: 74-ая научная конференция профессорско-преподавательского состава и аспирантов университета / Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. – СПб., Ч. 1. 2018. – С. 128-132.

70. *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 / Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. – СПб., 2014. – С. 206 – 210.

71. *Кострикин, М. П.* Повышение эффективности дисперсного армирования путём комбинирования высоко- и низко модульных волокон / М.П. Кострикин // Актуальные проблемы строительства: 69-я междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов, молодых ученых и докторантов. СПб.: СПбГАСУ, 2016. – С. 305–309.

72. *Кострикин М. П., Пантелеев Д. А.* Разработка вариантов армирования бетона различными видами фибр и их комбинациями // Актуальные проблемы строительства: материалы междунар. науч.-практ. конф. студентов, аспирантов, молодых ученых и докторантов. СПб.: СПбГАСУ, 2014. С. 206–210.

73. *Кострикин М.П.* Характер и степень взаимодействия синтетической макрофибры с цементным камнем // Вестник гражданских инженеров. – 2018. № 6 (69) – С. 116–120.

74. *Кристенсен Р.* Введение в механику композитов. / пер. с англ. А.И. Бейля, Н.П. Жмудя под ред. Ю.М. Тарнопольского. – М.: Мир, 1982. – 335с.

75. *Куделькин, А.Б.* Фибробетон – современный материал для полов промышленных зданий / А.Б. Куделькин, М.А. Ращупкина // Архитектурно-строительный и дорожно-транспортный комплексы: проблемы, перспективы, инновации. Сборник материалов IV Международной научно-практической конференции. 2019 / СибАДИ. – Омск., 2019 – С. 451 – 455

76. *Кузнецова И.С., Рябченкова В.Г., Корнюшина М.П., Саврасов И.П., Востров М.С.* Полипропиленовая фибра – эффективный способ борьбы со взрывообразным разрушением бетона при пожаре // Строительные материалы. – 2018. – № 11. – С. 15–20.

77. *Купер, Дж.* Растрескивание и разрушение композитов / Дж. Купер, М. Пигготт // Механика разрушения. – М.: Мир, 1970. – С. 165–216

78. *Леонович С.Н., Литвиновский Д.А.* Аналитические зависимости прочностных, деформативных, силовых и энергетических параметров высокопрочного бетона при нагреве // Вестник Белорусского национального технического университета. – 2011. – № 4. – С. 30-34.

79. *Леонович, С.Н.* Анализ результатов экспериментальных исследований параметров трещиностойкости бетона/ С.Н. Леонович, Е.А. Гузеев// Проблемы технологии производства строительных материалов, изделий и конструкций, строительства зданий и сооружений: сборник статей II Межвузовской научно-технической конференции/ Под ред. Н.П. Блещика и В.В. Тура. – Брест: БПИ, 1998. – С. 141-153.

80. *Леонович С.Н., Литвиновский Д.А.* Вязкость разрушения высокопрочного бетона после воздействия высокой температуре // Строительные материалы. – 2017. – № 11. – С. 12-17.

81. *Леонович, С.Н.* Определение энергетических и силовых параметров бетона по полностью равновесным диаграммам деформирования: учебно-методическое пособие для студентов строительных специальностей/ С.Н. Леонович. – Мн.: БНТУ, 2005. – 39 с.

82. *Леонович С.Н., Литвиновский Д.А.* Свойства конструкционного бетона после пожара // Судебная экспертиза Беларуси. – 2017. – № 2 (5). – С. 51-57.

83. *Леонович С.Н., Литвиновский Д.А.* Трещиностойкость высокопрочного бетона после воздействия высоких температур // Сборник научных трудов РААСН. Т.2. – 2018. – № 2 (5). – С. 301-310.

84. *Мэттьюз Ф., Ролингс Р.* Композиционные материалы. Механика и технология. / Пер. с англ. С.Л. Баженов. – М.: Техносфера, 2004. – 408 с.

85. *Пантелеев Д. А.* Деформативные и прочностные характеристики полиармированного фибробетона // Известия КГАСУ. – 2015. – № 3 (33). – С. 133–139.

86. *Пантелеев, Д. А.* Оценка эффективности полиармирования фибробетона/ Д.А. Пантелеев // Вестник гражданских инженеров. – 2013. – № 6 (41). – С. 102-108.

87. *Пантелеев, Д. А.* Полиармированные фибробетоны с использованием аморфнометаллической фибры: Дис. ... канд. техн. наук / С.П.Б.ГАСУ. - СПб., 2016

88. *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 / Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. – СПб., 2013 – 164 - 166 с.

89. *Партон В.З.* Механика разрушения: От теории к практике. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1990. – 240с.



90. *Парфенов А.В.*. Ударная выносливость бетонов на основе стальной и синтетической фибры : Дис. ... канд. техн. наук : 05.23.05 : Уфа, 2004. 178 с.

91. *Петров, Д.Н.* Определение прочностных показателей бетонов с полимерной фиброй. // Записки Горного института. – 2013. – Т.204. – С. 236 – 239.

92. *Пухаренко Ю.В., Голубев В.Ю.* Высокопрочный сталефибробетон // Промышленное и гражданское строительство. – 2007. – №9. – С. 40-41.

93. *Пухаренко, Ю. В.* Научные и практические основы формирования структуры и свойств фибробетонов: автореферат дисс...док. техн. наук: 05.23.05/ Юрий Владимирович Пухаренко; СПбГАСУ. – СПб, 2004 – 46 с.

94. *Пухаренко, Ю. В.* Наномодифицированные добавки в бетоны для транспортного строительства / Ю.В. Пухаренко, В.Д. Староверов, Д.И. Рыжов // Транспорт Российской Федерации. Журнал о науке, экономике, практике. – 2014. – № 5 (54). – С. 48-52

95. *Пухаренко, Ю. В.* Наномодифицированный сталефибробетон для мостовых конструкций / Ю.В. Пухаренко, И.У. Аубакирова // Вестник науки и образования Северо-Запада России. – 2017. Т.3. №4.

96. *Пухаренко Ю.В., Голубев В.Ю.* О вязкости разрушения фибробетона // Вестник гражданских инженеров. – 2008. – №3. – С. 80–83.

97. *Пухаренко Ю.В., Морозов В.И., Пантелеев Д.А., Жаворонков М.И.* Определение прочности сцепления армирующих волокон с матрицей в фибробетоне // Строительные материалы. – 2020. – № 3. – С. 30–43.

98. *Пухаренко Ю. В., Лезов В. Ю.* Оптимизация параметров армирования мелкозернистого бетона синтетическими волокнами // Интенсификация технологических процессов в производстве сборного железобетона: Межвуз. темат. сб. тр. Л.: ЛИСИ, 1988. С. 24–27.

99. *Пухаренко Ю.В.* Опыт проектирования и производства эффективных строительных конструкций из фиброармированных бетонов /

Ю. В. Пухаренко, В. С. Стерин, И. Н. Легалов // Популярное бетоноведение. . – 2008. – № 4. – С. 113-117

100. Пухаренко Ю.В. Опыт производства облицовочных фиброцементных плит для вентилируемых фасадов / Ю. В. Пухаренко // Вестник гражданских инженеров / СПб., – 2012. – № 4 (33), – С. 74-77

101. Пухаренко, Ю. В. Особенности структурообразования цементных композитов в присутствии углеродных наночастиц фуллероидного типа / Ю.В. Пухаренко, В.Д. Староверов, Д.И. Рыжов // Вестник МГСУ / М., 2017. Т.12, вып.7 (106), – С. 718-723

102. Пухаренко Ю.В. Полидисперсное армирование строительных композитов – фибробетонов / Ю.В. Пухаренко, И.У. Аубакирова // Технологии бетонов. – 2011. – № 1-2, – С. 28-29

103. Пухаренко Ю.В. Принципы формирования структуры и прогнозирование прочности фибробетонов // Строительные материалы. – 2004. – № 10 (598). – С. 47–50.

104. Пухаренко, Ю.В. Прочность и деформативность полиармированного фибробетона с применением аморфной металлической фибры / Ю.В. Пухаренко, Д.А. Пантелеев, В.И. Морозов, У.Х. Магдеев // Academia. Архитектура и строительство. – 2016. – № 1. – С. 107-111.

105. Пухаренко Ю.В. Реставрация и строительство: потенциал фиброармированных материалов и изделий // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 4.

106. 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.

107. Пухаренко Ю. В., Жаворонков М. И., Пантелеев Д. А. Совершенствование методов определения силовых и энергетических характеристик трещиностойкости фибробетона // Вестник МГСУ. – 2019. – Т. 14, № 3 (126). – С. 301–310.

108. Пухаренко Ю.В. Стойкость фибробетона к высокотемпературному воздействию / Ю.В. Пухаренко, М.П. Кострикин // Строительство и реконструкция. 2020. – №2 (88). – С. 96 – 106.

109. Пухаренко, Ю. В. Фуллероидные углеродные наночастицы для модификации бетонов / Ю.В. Пухаренко, В.Д. Староверов, Д.И. Рыжов // Вестник гражданских инженеров. – 2015. – № 2 (49), – С. 107-116

110. 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. – СПб., 2020. – №2 (59). – С. 128 – 133.

111. Пухаренко Ю.В. Эффективность применения фибробетона в конструкциях при динамических воздействиях / Ю.В. Пухаренко, В.И. Морозов // Вестник МГСУ. 2014. №3, – С. 189–196.

112. Рабинович Ф.Н. Дисперсно – армированные бетоны. – М.: Стройиздат, 1989. – 176 с.

113. Рабинович, Ф. Н. Композиты на основе дисперсно-армированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технологии, конструкции / Ф. Н. Рабинович. – М.: Изд-во АСВ, 2004 – 560 с.

114. Рабинович Ф.Н. Особенности работы композиционных материалов с пластичными и хрупкими матрицами/ Ф.Н. Рабинович // Промышленное и гражданское строительство. – 1995. – № 11. – С.24–26

115. Рабинович, Ф.Н. Эффективность применения полимерных фибр для дисперсного армирования бетона / Ф. Н. Рабинович, С. М. Баев // Промышленное и гражданское строительство – 2009. – № 9. – С. 38 – 41.

116. *Ройтман В.М.* Инженерные решения по оценке огнестойкости проектируемых и реконструируемых зданий. М., Ассоциация «Пожнаука», 2001.

117. *Ройтман В.М.* Обеспечение стойкости железобетонных конструкций против взрывообразного разрушения при пожаре с помощью тонкослойных огнезащитных вспучивающихся покрытий / Ройтман В. М., Габдулин Р. Ш. // Пожары и чрезвычайные ситуации: предотвращение, ликвидация. – 2013. – № 2. С. 11–16.

118. *Романов, В.П.* К вопросу о пределе трещиностойкости фибробетона на растяжение // Исследование новых типов пространственных конструкций гражданских зданий и сооружений: Сб. науч. тр./ ЛенЗНИИЭП: Л., 1977 – С. 96 – 105

119. *Русанов, В.Е.* Эффективность применения фибронабрызгбетона в мосто- и тоннелестроении // Вестник СибАДИ. – 2012. – Вып. 5 (27). – С. 65 – 68.

120. *Рыжов Д. И.* О долговечности бетонов из наномодифицированных смесей // Вестник гражданских инженеров. – 2013. – № 2 (37). – С. 146-151

121. *Рогачёв, К.В.* Влияние высоких температур на сцепления стальной фибры с цементно-песчаной матрицей и физико-механические свойства фибробетона // Строительство и реконструкция. . – 2006. – №3. С. 143 – 151.

122. *Смирнова, О.М.* Дисперсное армирование для получения высококачественного бетона / О.М. Смирнова, Р.В. Корпош // Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2017. Т. 3, № 4. С. 1–5.

123. *Смирнова, О.М.* Влияние дисперсного армирования синтетическим макроволокном на прочность дорожного бетона // Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2016. Т. 2, № 3. С. 15–19.

124. *Смирнова, О.М., Харитонов А.М.* Прочностные и деформативные свойства фибробетона с макрофиброй на основе полиолефинов // *Строительные материалы.* – 2018. – № 12. – С. 44–49.

125. *Соболев Г.М., Зотов А.Н.* Модифицированные фибробетоны с повышенными эксплуатационными характеристиками // *Труды Костромской государственной сельскохозяйственной академии.* – Выпуск 82. – Караваево: Костромская ГСХА, 2015. – С. 55-61.

126. *Соловьёв, В.Г., Шувалова Е.А.* Эффективность применения различных видов фибры в бетонах // *Международный научно-исследовательский журнал.* – 2017. – №9 (63). – С. 78-81.

127. *Соловьёв, В.Г.,* Эффективность взаимодействия различных видов фибры с бетонной матрицей / *В.Г.Соловьёв, А.А. Бамматов, И.Д. Кухарь, М.Р. Нуртдинов* // *Наука и бизнес: Пути развития.* – 2018. – №5 (83). – С. 57 – 61.

128. *Ставров Г.Н., Романов В.П., Захаров И.Д.* Состояние и перспективы применения сталефибробетона в конструкциях, подверженных динамическим воздействиям. // *Применение сталефибробетона в строительстве.* –1985. – С. 55-58.

129. *Суворов, И. О.* Влияние дисперсного полиармирования на усадочные деформации фибропенобетона неавтоклавного твердения / *И. О. Суворов* // *Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова.* – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2015. – № 1. – С. 32-35.

130. *Утепов Е.Б., Ахметов Д.А., Роот Е.Н., Ермуханбет, М.А.* Армирование самоуплотняющегося бетона полипропиленовым фиброволокном // *Вестник гражданских инженеров.* – 2019. – № 6 (77). – С. 220-227.

131. *Фахратов, М.А. Евдокимов, В.О. Бородин, А.С.* Перспективы применения наноструктурированного бетона в строительстве. // *Инженерный вестник Дона.* – 2018. – № 3.

132. Федосовская, О.С. Применение фибробетонов на основе макросинтетической фибры при строительстве транспортных тоннелей // АРХИТЕКТУРА. СТРОИТЕЛЬСТВО. ТРАНСПОРТ. ТЕХНОЛОГИИ. ИННОВАЦИИ. Материалы Международного конгресса ФГБОУ ВПО «СибАДИ» / Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет (СибАДИ). – Омск., 2013 – С. 214 – 216.

133. Хежнев Х.А., Пухаренко Ю.В. Гипсобетонные композиты, армированные базальтовыми волокнами // Вестник гражданских инженеров. – 2013. – № 2. – С. 152–156.

134. Хренов Г.М. Предпосылки к актуализации нормативной базы в области водонепроницаемости бетонов / Г.М. Хренов, М.П. Кострикин // Вестник гражданских инженеров. – 2016. – № 6 (59). – С. 147–149.

135. Чернышов, Е. М. Анализ энергетических характеристик разрушения строительных композиционных материалов с многоуровневым дисперсным армированием. Современные проблемы строительного материаловедения: Материалы пятых чтений РААСН / Е. М. Чернышов, Е. И. Дьяченко, Д. Н. Коротких // Воронеж. гос. арх.-строит. акад. – Воронеж, 1999. – С. 534–539

136. Исследование свойств фибробетона с использованием синтетической микро- и макрофибры производства «Русеал»: отчёт о НИР / Пухаренко Ю.В. – СПбГАСУ, 2020. – 65 с.

## **ПРИЛОЖЕНИЯ**

К диссертации Кострикина М.П. на соискание учёной степени кандидата технических наук по специальности 2.1.5. Строительные материалы и изделия на тему:

**Дисперсно армированные бетоны с применением синтетической макрофибры**

**Приложение А – Рекомендации по изготовлению фибробетонных изделий и конструкций с синтетической фиброй производства ООО «РУССЕАЛ»**  
160

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный  
университет (СПбГАСУ)

РЕКОМЕНДАЦИИ  
по изготовлению фибробетонных изделий и конструкций с синтетической  
фиброй производства ООО «РУССЕАЛ»

Санкт-Петербург

2022



Приложение А – Рекомендации по изготовлению фибробетонных изделий и конструкций с синтетической фиброй производства ООО «РУССЕАЛ»

161

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет (СПбГАСУ)

Согласовано

Генеральный директор

ООО "Руссеал"

"Руссеал"

"Russseal"

В.В. Сысоев

« 28 » февраля 20 22 г.



Утверждаю

Проректор по научной работе

Д.Т.н., профессор

Е.В. Королёв

« 28 » февраля 20 22 г.



РЕКОМЕНДАЦИИ

по изготовлению фибробетонных изделий и конструкций с синтетической фиброй производства ООО «Руссеал»

Руководитель разработки:

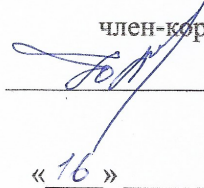
Заведующий кафедрой ТСМиМ

д. т. н., профессор

член-корреспондент РААСН

Ю.В. Пухаренко

« 16 » 02 20 22 г.

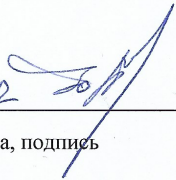
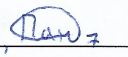


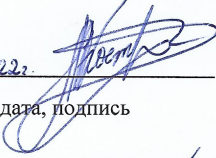
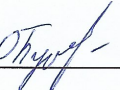


Санкт-Петербург

2022

Приложение А – Рекомендации по изготовлению фибробетонных изделий и конструкций с синтетической фиброй производства ООО «РУССЕАЛ»  
162

Список разработчиков

Руководитель темы д-р техн. наук, профессор	<u>16.02.2022</u> 	Ю.В. Пухаренко
	дата, подпись	
канд. техн. наук, доцент	<u>16.02.2022</u> 	Д.А. Пантелеев
	дата, подпись	
канд. техн. наук, доцент	<u>16.02.2022</u> 	М.И. Жаворонков
	дата, подпись	
канд. техн. наук, доцент	<u>16.02.2022</u> 	И.У. Аубакирова
	дата, подпись	
инженер	<u>16.02.2022</u> 	М.П. Кострикин
	дата, подпись	
инженер	<u>16.02.2022</u> 	О.Ю Пухаренко
	дата, подпись	

**Приложение А – Рекомендации по изготовлению фибробетонных изделий и конструкций с синтетической фиброй производства ООО «РУССЕАЛ»**

163

**Содержание**

1. Общие положения.....	5
2. Нормативные ссылки.....	8
3. Вид и характеристики исходных материалов.....	9
4. Проектирование состава фибробетона .....	12
5. Приготовление фибробетонной смеси.....	14
6. Транспортирование, укладка и уплотнение фибробетонной смеси.....	16
7. Уход за твердеющим фибробетоном.....	17
Список источников.....	18
Приложение А. Методика определения величины сцепления фибры с матрицей.....	20
Приложение Б. Пример проектирования состава фибробетона с синтетическими волокнами.....	22

# Приложение А – Рекомендации по изготовлению фибробетонных изделий и конструкций с синтетической фиброй производства ООО «РУССЕАЛ»

164

## 1. Общие положения

1.1 Рекомендации разработаны кафедрой технологии строительных материалов и метрологии СПбГАСУ на основе результатов исследований и практического опыта, накопленного в процессе работы с фибробетонами, армированными низко модульными синтетическими волокнами, для помощи при изготовлении фибробетонных изделий и конструкций с использованием синтетической фибры производства ООО «РУССЕАЛ» и служат для:

- обоснования рационального выбора вида волокон (фибры) для эффективного применения в составе бетона строительных изделий и конструкций;
- определения оптимального соотношения исходных компонентов и их количества, включая фибру, в составе фибробетона;
- назначения оптимальных условий и режимов проведения технологических операций на всех стадиях изготовления изделий и конструкций с применением фиброармированных бетонов.

1.2 Синтетические волокна для армирования бетонов изготавливаются преимущественно из полипропилена, отличающегося высокой коррозионной стойкостью и химической инертностью к щелочной среде, что определяет их сохранность на протяжении всего срока службы конструкции.

1.3 Исходя из различий в геометрических характеристиках, применяемые для армирования бетона низко модульные синтетические волокна условно делят на макро волокна (макрофибру) и микро волокна (микрофибру).

1.4 Синтетические макро волокна способствуют увеличению прочности бетона, повышению его ударостойкости и стойкости к истирающим воздействиям, обеспечивают вязкий характер разрушения, что увеличивает эксплуатационную надежность и безопасность строительных конструкций.

1.5 Синтетические микро волокна положительно влияют на структуру бетона, предотвращают появление усадочных трещин, улучшают показатели

# Приложение А – Рекомендации по изготовлению фибробетонных изделий и конструкций с синтетической фиброй производства ООО «РУССЕАЛ»

165

долговечности (повышают морозостойкость и непроницаемость), а также увеличивают безопасность конструкций, потенциально подверженных воздействию высоких температур (свыше 400°C), препятствуя взрывному разрушению бетона.

1.6. Комбинирование оптимальных количеств микро- и макрофибры в составе одного композита позволяет сочетать положительные качества обоих видов волокон, увеличивая диапазон улучшенных характеристик.

1.7. Применение микро- и макроволокон способствует уменьшению расхода или полному отказу от использования обычной стержневой арматуры в составе железобетонных изделий и конструкций.

1.8. Примеры рационального использования низко модульных синтетических волокон для дисперсного армирования бетона при изготовлении бетонных и железобетонных изделий и конструкций представлены в табл.1.

Таблица 1 – Рекомендуемые области использования синтетических волокон

Изделия и конструкции	Вид синтетической фибры	Эффект от армирования
Несущие конструкции с зонным дисперсным армированием (плиты покрытий и перекрытий, балки, ригели, колонны)	Макрофибра	Увеличение прочности на изгиб и сжатие
Ударо- и износостойкие изделия и конструкции (сваи, фундаменты и станины машин, дорожные и аэродромные покрытия, промышленные полы, бортовые камни, тротуарная плитка, плиты проезжей части, бетонные отбойники)	Макрофибра или комбинация макро- и микрофибры	Увеличение прочности, ударо- и износостойкости, морозо- и солестойкости, предотвращение усадочных трещин
Конструкции инженерных и гидротехнических сооружений (элементы вновь возводимых и ремонтируемых плотин, мостов, подпорных стенок;	Макрофибра или комбинация макро- и	Повышение прочности, ударостойкости, стойкости к истиранию, водонепроницаемости,

**Приложение А – Рекомендации по изготовлению фибробетонных изделий и конструкций с синтетической фиброй производства ООО «РУССЕАЛ»**

166

конструкции емкостных сооружений, лотки, канализационные коллекторы)	микрофибры	морозо- и солестойкости
Малоармированные конструкции (кольца смотровых колодцев, безнапорные трубы, элементы временной шахтной кровли)	Микрофибра или комбинация макро- и микрофибры	Повышение прочности, ударостойкости, стойкости к истиранию, снижение массы и трудоемкости изготовления
Густоармированные и тонкостенные конструкции (оболочки, складчатые панели и покрытия структурного типа, напорные трубы, элементы тоннельной обделки)	Микрофибра	Повышение водонепроницаемости и морозостойкости, предотвращение усадочных трещин, снижение массы и трудоемкости изготовления
Конструкции с повышенной твердостью и структурной вязкостью (рабочие поверхности штамповочного, прессового и др. силового оборудования)	Макрофибра, микрофибра или комбинация макро- и микрофибры	Повышение прочности, ударостойкости, стойкости к истиранию, поверхностной твердости и вязкости разрушения, снижение вибрационных воздействий
Элементы фасадной отделки, изделия малых архитектурных форм, элементы несъемной опалубки	Микрофибра	Повышение прочности, ударостойкости, стойкости к истиранию, морозостойкости, технологичности, снижение водопоглощения и усадки
Кровельные материалы в виде черепицы и крупноразмерных листов	Микрофибра	Улучшение поровой структуры, повышение прочности на изгиб, водонепроницаемости и морозостойкости,

**Приложение А – Рекомендации по изготовлению фибробетонных изделий и конструкций с синтетической фиброй производства ООО «РУССЕАЛ»**  
167

		уменьшение массы, снижение усадки
Трехслойные стеновые панели и перегородки	Микрофибра	Улучшение поровой структуры, звукоизоляционных характеристик, повышение прочности на изгиб, водонепроницаемости и морозостойкости, уменьшение массы, снижение усадки
Ограждающие конструкции и теплоизоляционные изделия на основе легких и ячеистых бетонов	Микрофибра	Улучшение поровой структуры, звуко- и теплоизоляционных характеристик, повышение прочности, ударостойкости и морозостойкости, уменьшение массы, снижение усадки
Огнезащитные облицовки и огнеупорные изделия	Микрофибра	Повышение пожарной безопасности конструкций за счет предотвращения взрывного разрушения при пожаре

**2. Нормативные ссылки**

В настоящих Рекомендациях использованы ссылки на следующие документы:

ГОСТ 7473-2010 Смеси бетонные. Технические условия;

ГОСТ 8267-93 Щебень и гравий из плотных горных пород для строительных работ. Технические условия;

# Приложение А – Рекомендации по изготовлению фибробетонных изделий и конструкций с синтетической фиброй производства ООО «РУССЕАЛ»

168

ГОСТ 8269.0-97 Щебень и гравий из плотных горных пород и отходов промышленного производства для строительных работ. Методы физико-механических испытаний;

ГОСТ 8735-88 Песок для строительных работ. Методы испытаний;

ГОСТ 8736-2014 Песок для строительных работ. Технические условия;

ГОСТ 25192-2012 Бетоны. Классификация и общие технические требования;

ГОСТ 26633-2015 Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия;

ГОСТ 29167-91 Бетоны. Методы определения характеристики трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении;

ГОСТ 30108-94. Материалы и изделия строительные. Определение удельной эффективной активности естественных радионуклидов;

ГОСТ Р 54257-2010 Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения и требования;

ГОСТ 55224-2012 Цементы для транспортного строительства. Технические условия;

СП 28.13330.2012 Защита строительных конструкций от коррозии. Актуализированная редакция СНиП 2.03.11-85;

СП 70.13330 Несущие и ограждающие конструкции. Актуализированная редакция СНиП 3.03.01-87;

СТО НОСТРОЙ 2.27.125-2013 «Освоение подземного пространства. Конструкции транспортных тоннелей из фибробетона. Правила проектирования и производства работ».

### 3. Вид и характеристики исходных материалов

Для приготовления фибробетонной смеси используются следующие материалы: цемент, заполнители (мелкий в случае применения



**Приложение А – Рекомендации по изготовлению фибробетонных изделий и конструкций с синтетической фиброй производства ООО «РУССЕАЛ»**  
169

мелкозернистой матрицы или мелкий и крупный для матрицы в виде тяжёлого бетона), армирующие волокна (фибра), химические добавки и вода.

3.1. Фибра

3.1.1. Характеристики синтетической фибры производства ООО «РУССЕАЛ» должны соответствовать требованиям Технических условий (ТУ), разработанных и введенных в действие в установленном порядке.

3.1.2. Характеристики синтетической макрофибры RS-Macro Wave, удовлетворяющей ТУ 20.60.11-002-30726220-2019, представлены в табл. 2.

Таблица 2 – Технические характеристики макрофибры RS Macro Wave

Характеристика	Значение
Материал	Полипропилен
Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	900
Длина, мм	50
Ширина, мм	1,5 ± 0,5
Толщина, мм	0,5 (± 8%)
Кислото- и солестойкость	Высокая
Щелочестойкость	Высокая
Температура плавления, °С	162
Температура воспламенения, °С	500
Предел прочности на растяжение, МПа	125
Модуль упругости, МПа	3000 (±10%)
Удлинение до разрыва, %	15 (±10%)

3.1.3. Характеристики синтетической микрофибры RS, удовлетворяющей требованиям ТУ 2272-001-30726220-2015, приведены в табл. 3.

Таблица 3 – Технические характеристики микрофибры RS

Характеристика	Значение
Материал	Полипропилен
Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	900
Длина, мм	20
Эквивалентный диаметр, мм	0,05 – 0,1

## Приложение А – Рекомендации по изготовлению фибробетонных изделий и конструкций с синтетической фиброй производства ООО «РУССЕАЛ»

170

l/d	до 400
Поверхность	Покрыта замасливателем
Массовая доля раствора замасливателя, %	15 (±3%)
Температура плавления, °С	160-170
Модуль упругости, МПа	до 4500
Электропроводность	Незначительная

### 3.2. Цемент

3.2.1. Для производства фибробетонных изделий рекомендуется применять портландцемент класса не ниже ЦЕМ I 42,5, соответствующий требованиям ГОСТ 31108.

3.2.2. При выборе цемента следует учитывать:

- вид и размеры и условия эксплуатации конструкций;
- вид и особенности (например, химическую активность) применяемого заполнителя;
- необходимость обеспечения требуемой удобоукладываемости и сохраняемости бетонной смеси;
- условия и режим выполнения технологических операций и последующего твердения;

3.2.3. При использовании в дорожных фибробетонах цемент должен удовлетворять требованиям ГОСТ Р 55224.

### 3.3 Заполнители

3.3.1. Заполнители для фибробетонов должны быть фракционированными и чистыми, без примесей.

3.3.2. Запрещается применять в качестве заполнителя природную песчано-гравийную смесь без фракционирования.

3.3.3. В качестве мелкого заполнителя для фибробетона используется кварцевый песок, а также пески из отсевов дробления и их смеси, удовлетворяющие требованиям ГОСТ 8736.

3.3.4. В качестве крупного заполнителя для фибробетона применяется щебень и гравий из плотных горных пород по ГОСТ 8267 и ГОСТ 26633.

Показатели качества крупного заполнителя определяют по ГОСТ 8269.0 и ГОСТ 8269.1. Марки по прочности крупных плотных заполнителей по дробимости должны быть выше требуемого класса бетона по прочности на сжатие не менее чем в 2 раза.

При использовании макрофибры наибольший размер зерен крупного заполнителя должен быть не более 20 мм.

3.3.5. При выборе заполнителей предпочтение следует отдавать местным материалам после предварительной оценки их соответствия требованиям нормативных документов.

#### 3.4. Химические добавки

3.4.1. Химические добавки для фибробетона должны соответствовать ГОСТ 24211 и ГОСТ 26633. Их применение рекомендуется после получения положительных результатов предварительных лабораторных исследований и последующей проверки в производственных условиях.

3.4.2. Для улучшения подвижности фибробетонной смеси, снижения расхода цемента, повышения прочности, водонепроницаемости, морозостойкости и сопротивляемости истиранию рекомендуется применение пластифицирующих добавок последнего поколения на основе эфиров поликарбоксилатов, модифицированных углеродными фуллероидными наночастицами, эффективность которых доказана лабораторными исследованиями и опытом практического применения [3-7].

#### 3.5. Вода затворения

Вода для затворения бетонной смеси и приготовления растворов химических добавок должна соответствовать требованиям ГОСТ 23732.

### **4. Проектирование состава фибробетона**

4.1. В зависимости от вида, размеров, назначения и от условий эксплуатации фибробетонные изделия и конструкции могут изготавливаться на основе тяжёлого обычного или мелкозернистого бетонов

## Приложение А – Рекомендации по изготовлению фибробетонных изделий и конструкций с синтетической фиброй производства ООО «РУССЕАЛ»

172

– классов по прочности на сжатие: В12,5; В15; В20; В22,5; В25; В27,5; В30; В35; В40; В45; В50; В55; В60; В70; В80; В90; В100; В110; В120;

– классов по прочности на растяжение при изгибе  $B_{tb}$  2,0;  $B_{tb}$  2,4;  $B_{tb}$  2,8;  $B_{tb}$  3,2;  $B_{tb}$  3,6;  $B_{tb}$  4,0;  $B_{tb}$  4,4;  $B_{tb}$  4,8;  $B_{tb}$  5,2;  $B_{tb}$  5,6;  $B_{tb}$  6,0;  $B_{tb}$  6,4;  $B_{tb}$  6,8;  $B_{tb}$  7,2;  $B_{tb}$  7,6;  $B_{tb}$  8,0;  $B_{tb}$  8,4;  $B_{tb}$  8,8;  $B_{tb}$  9,2;  $B_{tb}$  9,6;  $B_{tb}$  10,0;

– марок по морозостойкости F<sub>1</sub>100; F<sub>1</sub>150; F<sub>1</sub>200; F<sub>1</sub>300; F<sub>1</sub>400; F<sub>1</sub>500; F<sub>1</sub>600; F<sub>1</sub>800; F<sub>1</sub>1000; F<sub>2</sub>100; F<sub>2</sub>150; F<sub>2</sub>200; F<sub>2</sub>300; F<sub>2</sub>400; F<sub>2</sub>500;

– марок по водонепроницаемости W4; W6; W8; W10; W12; W14; W16 и выше;

– марок по истираемости G1, G2, G3

4.2 Для проектирования состава фибробетонных смесей рекомендуется графо-аналитический метод, в соответствии с которым:

4.2.1. Формулируется задание на проектирование, которое должно включать:

- вид и размеры изделия или конструкции;
- требуемые классы бетона по прочности на сжатие и, при необходимости, на изгиб;
- требуемые марки по морозостойкости, водонепроницаемости или другие характеристики, необходимые по условиям работы конструкции;
- параметры удобоукладываемости бетонной смеси: жесткость или осадка конуса.

4.2.2. В зависимости от вида и размеров конструкции, с учетом рекомендаций, представленных в табл.1, а также технических и технологических возможностей предприятия, выбирается вид фибробетона: назначается максимальная крупность заполнителя, вид и геометрические размеры фибры.

4.2.3. По известным методикам (например, по методу абсолютных объёмов) подбирается состав исходного бетона и определяются его прочностные характеристики.

4.2.4. По методике, представленной в Приложении А, определяется величина сцепления волокон с матрицей, необходимая для выполнения дальнейших расчетов [1, 2].

4.2.5. Рассчитывается прочность фибробетона при насыщениях, соответствующих критическим пределам фибрового армирования [8].

4.2.6. Строится график зависимости прочности фибробетона от расхода армирующих волокон в смеси, по которому устанавливается коэффициент армирования, соответствующий получению заданной прочности фибробетона.

4.2.7. Изготавливаются пробные замесы фибробетонной смеси расчетного состава и образцы, после испытания которых, при необходимости, производится корректировка стандартными методами.

4.3. Пример проектирования состава фибробетона с низко модульными волокнами Руссеал по п.4.2 приведен в Приложении Б.

## **5. Приготовление фибробетонной смеси**

5.1. Процесс приготовления фибробетонных смесей должен удовлетворять требованиям ГОСТ 7473, ГОСТ 10181, ГОСТ 25192, ГОСТ 26633.

5.2. Основным показателем качества фибробетонной смеси является однородность и равномерность распределения фибры по ее объему, что во многом зависит от типа применяемого смесителя.

5.3. Выбор типа смесителя для фибробетонных смесей следует осуществлять в зависимости от вида и характеристик исходного бетона с учетом типоразмера и количества применяемой фибры (табл. 4).

5.4. Применяемые бетоносмесители и режимы перемешивания должны обеспечивать получение гомогенной смеси с коэффициентом вариации прочности бетона из данного замеса не более 9%.

**Приложение А – Рекомендации по изготовлению фибробетонных изделий и конструкций с синтетической фиброй производства ООО «РУССЕАЛ»**  
174

5.5. Для повышения равномерности распределения фибр в объеме замеса рекомендуется:

- увеличение подвижности смеси путем введения наномодифицированных пластифицирующих добавок;
- равномерная подача фибры в смеситель с помощью специальных устройств или вручную;

Таблица 4 – Рекомендуемые типы смесителей для приготовления фибробетонных смесей

Вид армирующих волокон или их комбинаций	Тип смесителя в зависимости от вида и удобоукладываемости исходной бетонной смеси				
	Крупно- или мелкозернистая марки Ж 1 и выше	Крупно- или мелкозернистая марки П 1 ... П 4	Крупно- или мелкозернистая марки выше П4	Мелко- или тонкозернистая шликерная	Ячеистобетонная
Микрофибра синтетическая	лотковый двухвальный или планетарный	лотковый двухвальный или планетарный	лотковый двухвальный, планетарный или турбулентный*	турбулентный	турбулентный
Макрофибра синтетическая	планетарный, лотковый одно- или двухвальный, роторный	планетарный, лотковый одно- или двухвальный, роторный	планетарный, лотковый одно- или двухвальный, роторный или турбулентный*	не рекомендуется	не рекомендуется
Комбинация синтетических микро- и макрофибры	лотковый двухвальный или планетарный	лотковый двухвальный или планетарный	планетарный, лотковый двухвальный или турбулентный*	не рекомендуется	не рекомендуется

*Примечание:* \* - для фибробетонных смесей без крупного заполнителя.

5.6. Дозирование компонентов бетонной смеси может осуществляться весовыми или объемными дозаторами. Погрешность дозирования не должна превышать:

- 1 % для цемента, воды и жидких добавок,
- 2 % для заполнителей.

5.7. Введение синтетических волокон в бетоносмеситель следует осуществлять постепенно в готовую бетонную смесь во избежание комкования. В случае использования полидисперсного (комбинированного)

армирования микроволокна рекомендуется добавлять после введения макрофибры, после чего перемешивание не должно превышать времени, необходимого для их полной распушки.

5.8. **ВНИМАНИЕ:** Для смесей, армированных волокнами, стандартный метод определения подвижности по осадке конуса может не отражать их истинной подвижности, ввиду образования фиброцементного каркаса, препятствующего свободному перемещению составляющих. В данном случае удобоукладываемость рекомендуется оценивать предварительно в лаборатории путем моделирования условий укладки и уплотнения, отражающих реальный процесс изготовления изделий и конструкций.

#### **6. Транспортирование, укладка и уплотнение фибробетонной смеси**

6.1. Доставка приготовленных смесей к месту укладки может осуществляться всеми видами применяемого для этой цели транспорта с учетом присутствия и влияния синтетической фибры.

6.2. Не рекомендуется производить перегрузку смесей из одного транспортного средства в другое во избежание расслоения и потери подвижности фибробетонной смеси.

6.3. Разгрузку транспортного средства с фибробетонной смесью при необходимости осуществляют с вибропобуждением.

6.4. Высота свободного падения смеси при разгрузке не должна превышать 1 м для предотвращения возможного расслоения.

6.5. Время транспортирования фибробетонной смеси от начала затворения смеси до ее укладки и уплотнения не должно превышать указанного в сопроводительном документе.

6.6. Укладку и уплотнение фибробетонной смеси следует выполнять принятыми в технологии средствами с учётом необходимости получения изделия с плотностью, отвечающей требованиям проектной документации.

## Приложение А – Рекомендации по изготовлению фибробетонных изделий и конструкций с синтетической фиброй производства ООО «РУССЕАЛ»

176

6.6 Запрещается добавление воды при его укладке до затвердевания. Для качественного уплотнения и во избежание возможного разуплотнения, смеси, содержащей синтетические микроволокна в количестве более 0,2, целесообразно использовать пригруз.

### 7. Уход за твердеющим фибробетоном

7.1 Уход за свежеложенной фибробетонной смесью следует осуществлять с учетом требований СП 70.13330. Для получения качественных фибробетонных изделий и конструкций оптимальной является среда с относительной влажностью 90 ... 100 % и температурой + 18 ... 25°С.

7.2 Создание благоприятных условий для твердения фибробетонной смеси, особенно на больших площадях, может достигаться путём полива фибробетона распыляемой струей воды, а также использованием укрывного материала.

7.3. При бетонировании в жаркую погоду или при отрицательной температуре необходимо предпринимать меры, обеспечивающие нормальное протекание последующих процессов при неблагоприятных условиях:

- при температуре выше +30°С обеспечивать дополнительные меры по сохранению влажности, необходимой для схватывания и твердения бетона (укрытие плёнкой, полив затвердевшего бетона);

- при бетонировании зимой следует применять тепляки, прогрев бетона тепловыми пушками, лампами и т.д.

7.4. При изготовлении изделий и конструкций с использованием ускоренной тепловой обработки, условия и режим ее проведения следует устанавливать предварительно в ходе лабораторных испытаний.



Список источников

1. Пухаренко Ю.В., Морозов В.И., Пантелеев Д.А., Жаворонков М.И. Определение прочности сцепления армирующих волокон с матрицей в фибробетоне // Строительные материалы. 2020. № 3. С. 30–43.
2. 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.
3. Пухаренко, Ю. В. Фуллероидные углеродные наночастицы для модификации бетонов / Ю.В. Пухаренко, В.Д. Староверов, Д.И. Рыжов // Вестник гражданских инженеров / СПб., 2015. № 2 (49), - с. 107-116
4. Пухаренко, Ю. В. Наномодифицированный сталефибробетон для мостовых конструкций / Ю.В. Пухаренко, И.У. Аубакирова // Вестник науки и образования Северо-Запада России. – 2017. Т.3. №4.
5. Пухаренко Ю. В. Особенности структурообразования цементных композитов в присутствии наночастиц фуллероидного типа/ Ю. В. Пухаренко, Д. И. Рыжов, В. Д. Староверов// Вестник МГСУ. – 2017. –Том 12. – Вып. 7 (106). – С. 718–723.
6. Pukhareno Y. V. Obtaining the nanomodifier for cement composites based on the “DEALTOM” carbon nanotubes. [Получения наномодификатора для цементных композитов на основе «DEALTOM» углеродных нанотрубок.]/ Y. V. Pukhareno, , D. G., Letenko, V. A., Nikitin, V. I. Morozov// Materials Physics and Mechanics. – 2017. – Vol. 31. – № 1/2. – P. 59–62.
7. Пухаренко, Ю. В. Nanomodified concrete mixes for form-free moulding [Наномодифицированные бетонные смеси для безопалубочного формования] / Ю. В. Пухаренко, В. Д. Староверов, Д. И. Рыжов // Materials

**Приложение А – Рекомендации по изготовлению фибробетонных изделий и конструкций с синтетической фиброй производства ООО «РУССЕАЛ»**  
178

Today: Proceedings В сборнике: International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment 2019. – 2019. – Vol. 19, Part 5, p. 2189–2192.

8. *Пухаренко, Ю. В.* Научные и практические основы формирования структуры и свойств фибробетонов: автореферат дисс...док. техн. наук: 05.23.05/ Юрий Владимирович Пухаренко; СПбГАСУ. – СПб, 2004 – 46 с.

## **Приложение А**

### **Методика определения величины сцепления фибры с матрицей**

Для определения характеристики сцепления волокон с матрицей (фт) в СПбГАСУ разработан расчетно-экспериментальный метод, в котором, в отличие от прямого выдёргивания волокна из бетона, учитываются расположение и ориентация фибр в образце, характер и условия их работы в матрице.

Суть методики 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 (см. рис. Б.2).

Испытания проводятся на цементном тесте нормальной густоты. Для этого в смесителе приготавливается 8 литров цементного теста, которое делят пополам. Из одной половины формируют два неармированных образца-призмы размером 70х70х80 мм, в оставшуюся половину смеси вводят армирующие волокна в количестве, достаточном для попадания в рабочее сечение образца при его разрушении в процессе испытания. Как правило, синтетические микроволокна вводятся в количестве 0,1...0,2% по объёму, а макроволокна в количестве 0,6...1,0% по объёму.

Твердение образцов осуществляется в нормальных условиях в течение 28 суток, после чего их подвергают испытанию на изгиб по трехточечной схеме. По полученным результатам строится график в координатах «нагрузка – расход волокон» (рис. А.1). В данном случае график изменения нагрузки в момент разрушения неармированных образцов представляет собой горизонтальную линию, а для армированных образцов – прямую, линейно возрастающую в зависимости от объемного содержания волокон.

Приложение А – Рекомендации по изготовлению фибробетонных изделий и конструкций с синтетической фиброй производства ООО «РУССЕАЛ»

180

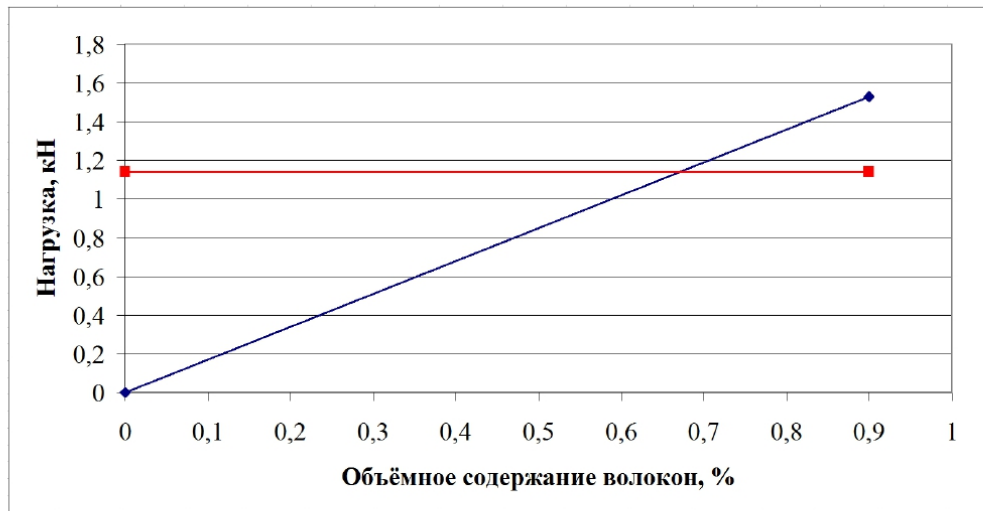


Рис. А.1- Пример построения графика зависимости разрушающей нагрузки от процента армирования

По полученному графику определяют координаты точки пересечения линий и рассчитывают величину взаимодействия фибры с матрицей ( $\varphi\tau$ ) по формуле:

$$(\varphi\tau) = \frac{3Pl_0d}{4l_f\mu_fbh^2} \quad (\text{А.1})$$

где:  $(\varphi\tau)$  – характеристика сцепления волокон с матрицей, МПа;  $P$  – разрушающая нагрузка в точке пересечения графиков, кН;  $l_0=3,8b$  – расстояние между опорами (база испытаний), м;  $d$  – диаметр фибры, м;  $l_f$  – длина фибры, м;  $\mu_f$  – объемная доля фибры;  $b$  – ширина образца, м;  $h$  – высота образца, м.

## Приложение Б

### Пример проектирования состава фибробетона с синтетическими волокнами

#### Задание:

Разработать состав фибробетона для использования в качестве матрицы в составе фиброжелезобетонной аэродромной плиты ПАГ-20 (рис. Б.1) со следующими характеристиками (БСТ В25 В<sub>тв</sub>5 П4 F<sub>1</sub>300 W6):

- предел прочности на сжатие *не менее 32 МПа*;
- предел прочности на изгиб *не менее 6,5 МПа*;
- марка по удобоукладываемости П4;
- марка по морозостойкости *не менее F<sub>1</sub>300*;
- марка по водонепроницаемости *не менее W6*.

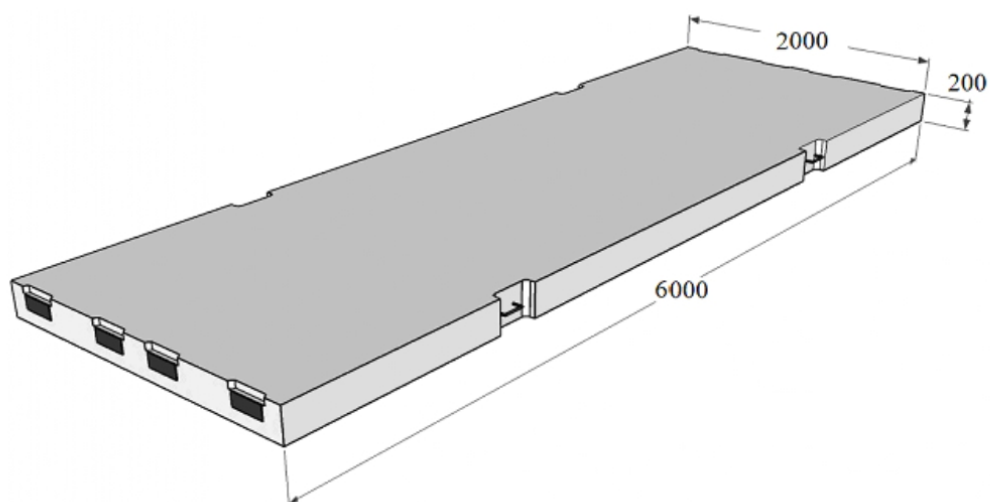


Рисунок Б.1 – Плита ПАГ-20. Общий вид.

1. В качестве исходных компонентов выбираем синтетическую макрофибру RS-Макро Wave производства ООО «РУССЕАЛ», портландцемент ЦЕМ I 42,5Н производства Heidelberg cement (АО "Сланцевский цементный завод "Цесла"), щебень гранитный фракции 5–20 мм (истинная плотность 2650 кг/м<sup>3</sup>, насыпная плотность 1330 кг/м<sup>3</sup>), песок

**Приложение А – Рекомендации по изготовлению фибробетонных изделий и конструкций с синтетической фиброй производства ООО «РУССЕАЛ»**  
182

средней крупности  $M_{кр} = 2,3$  (насыпная плотность  $1480 \text{ кг/м}^3$ , истинная плотность  $2500 \text{ кг/м}^3$ , водопотребность  $5 \%$ ).

2. Состав исходной бетонной смеси определяем по методу абсолютных объемов:

– водоцементное отношение

$$\frac{B}{Ц} = \frac{AR_y}{(R_b + 0,5AR_y)} \quad (\text{Б.1})$$

$$\frac{B}{Ц} = \frac{0,6 \cdot 42,5}{(32 + 0,5 \cdot 0,6 \cdot 42,5)} = 0,57$$

где: А – коэффициент, зависящий от качества заполнителей;  $R_{ц}$  – активность портландцемента;  $R_b$  – прочность бетона.

В соответствии с принятой стандартной методикой подбора состава расход воды с учетом требуемой подвижности, определенный по графикам, составил:  $B = 190 \text{ л/м}^3$ ;

– расход портландцемента:

$$\frac{Ц}{B} = \frac{B}{B} = \frac{190}{0,57} = 328,2 \text{ кг/м}^3 \approx 328 \text{ кг/м}^3 \quad (\text{Б.2})$$

где: В – расход воды; В/Ц – водоцементное отношение;

– расход щебня:

$$\frac{Щ}{Ц} = \frac{1000}{\left( \alpha \frac{П_{щ}}{\rho_{н}^{щ}} + \frac{1}{\rho_{н}^{щ}} \right)} \quad (\text{Б.3})$$

$$\frac{Щ}{Ц} = \frac{1000}{\left( 1,51 \frac{0,5}{1,33} + \frac{1}{2,65} \right)} = 1060 \text{ кг/м}^3$$

где:  $\alpha$  – коэффициент раздвижки зерен (в соответствии с принятой стандартной методикой);  $П_{щ}$  – пустотность щебня;  $\rho_{н}^{щ}$  – истинная плотность щебня;  $\rho_{н}^{щ}$  – насыпная плотность щебня;

**Приложение А – Рекомендации по изготовлению фибробетонных изделий и конструкций с синтетической фиброй производства ООО «РУССЕАЛ»**  
183

– расход песка:

$$P = \rho_u^n \left( 1000 - \frac{Ц}{\rho_u^n} - \frac{Щ}{\rho_u^{щ}} - B \right) \quad (Б.4)$$

$$P = 2,6 \left( 1000 - \frac{330}{3,16} - \frac{1060}{2,65} - 190 \right) \approx 803 \text{ кг} / \text{м}^3$$

где:  $\rho_u^n$  – истинная плотность песка;  $\rho_u^{щ}$  – истинная плотность портландцемента; Ц, Щ, В – расход портландцемента, щебня и воды соответственно.

Проверка по абсолютным объемам:

$$\frac{P}{\rho_n} + \frac{Щ}{\rho_{щ}} + \frac{B}{\rho_v} + \frac{Ц}{\rho_c} = \frac{803}{2,6} + \frac{1060}{2,65} + \frac{187}{1} + \frac{328}{3,16} = 1000.$$

Таким образом, расход сырьевых компонентов на 1 м<sup>3</sup> исходной бетонной смеси для дальнейшего использования в качестве матрицы композита, выглядит следующим образом:

Таблица Б.1 – Расход материалов на 1 м<sup>3</sup> исходной бетонной смеси

Цемент	328 кг
Песок	803 кг
Щебень	1060 кг
Вода	187 л
Добавка-пластификатор «Макромер П-163 наномодифицированная»	2 кг

В результате испытания контрольных образцов установлены прочностные характеристики исходного бетона:  $R_{сж} = 32,2 \text{ МПа}$ ,  $R_{рп} = 4,01 \text{ МПа}$ .

3. Определяем величину сцепления волокон с матрицей, необходимую для выполнения дальнейших расчетов (см. Приложение А), которая для выбранного типоразмера макрофибры составила  $(\varphi\tau) = 3,1 \text{ МПа}$ .

4. Рассчитываем значения характерных пределов армирования с использованием выражений, которые, учитывая, что фибры располагаются в цементном камне, и разрушение материала происходит в результате нарушения сцепления фибр с матрицей, принимают вид:

$$\mu_{\min} = \frac{V_{\text{кз}} R_{\text{цк}}}{(\varphi\tau)2 \frac{l_f}{d} - (2 \frac{E_{\text{ф}}}{E_{\text{кз}}} + 3,5)R_{\text{кз}} + 4,5R_{\text{цк}}} \quad (\text{Б.5})$$

$$\mu_{\text{к}} = V_{\text{кз}} \alpha \frac{(R_{\text{кз}} - R_{\text{цк}})}{R_{\text{цк}} \left(2 \frac{E_{\text{ф}}}{E_{\text{цк}}} - 1\right) - R_{\text{кз}} \left(2 \frac{E_{\text{ф}}}{E_{\text{кз}}} - 1\right)} \quad (\text{Б.6})$$

где:  $\mu_{\min}$  – минимальная объемная доля волокон, после которой они начинают проявлять армирующие свойства;  $\mu_{\text{к}}$  – расход волокон, соответствующий началу образования фиброцементного каркаса;  $V_{\text{кз}}$  – объемная доля цементного теста, в которой могут быть распределены волокна с образованием контактных ( $V_{\text{кз}} = 0,2$ );  $R_{\text{цк}}$  – прочность цементного камня;  $R_{\text{кз}}$  – прочность контактной зоны, равная  $1,4R_{\text{цк}}$  [8];  $(\varphi\tau)$  – прочность сцепления волокон с матрицей;  $E_{\text{ф}}$ ,  $E_{\text{цк}}$  и  $E_{\text{кз}}$  – модули упругости фибры, цементного камня и контактных зон соответственно;  $l_f$  – длина фибры;  $d$  – диаметр фибры;  $\alpha$  – коэффициент, принимаемый равным 0,785.

$$\mu_{\min} = \frac{0,2 \cdot 6}{3,1 \cdot 2 \cdot \frac{5}{0,1} - (2 \frac{3000}{20000} + 3,5) \cdot 8,4 + 4,5 \cdot 6} = 0,004 = 0,4\%$$

$$\mu_{\text{к}} = 0,2 \cdot 0,785 \frac{(8,4 - 6)}{6 \left(2 \frac{3000}{20000} - 1\right) - 8,4 \left(2 \frac{3000}{30000} - 1\right)} = 0,149 = 14,9\%$$



**Приложение А – Рекомендации по изготовлению фибробетонных изделий и конструкций с синтетической фиброй производства ООО «РУССЕАЛ»**  
185

5. Определяем прочность фибробетона ( $R_{фб}$ ) при насыщениях, соответствующих критическим пределам армирования:

– при минимальной объемной доле волокон ( $\mu_{min}$ )

$$R_{фб} = \frac{2(\varphi\tau)l_f\mu_{min}}{d} + 3,5R_{кз}\mu_{min} + R_о(1 - 4,5\mu_{min}) =$$

$$R_{фб} = \frac{2 \cdot 3,1 \cdot 5 \cdot 0,004}{0,4} + 3,5 \cdot 8,4 \cdot 0,004 + 4,01(1 - 4,5 \cdot 0,004) = 5,3 \text{ МПа}$$

– при объемной доле волокон, соответствующей образованию фиброцементного каркаса ( $\mu_k$ )

$$R_{фб} = \frac{2(\varphi\tau)l_f\mu_k}{d} + 3,5R_{кз}\mu_k + R_о(1 - 4,5\mu_k) =$$

$$R_{фб} = \frac{2 \cdot 3,1 \cdot 5 \cdot 0,149}{0,4} + 3,5 \cdot 8,4 \cdot 0,149 + 4,01(1 - 4,5 \cdot 0,149) = 52,1 \text{ МПа}$$

6. Строим график зависимости « $R_{фб} - \mu_f$ »

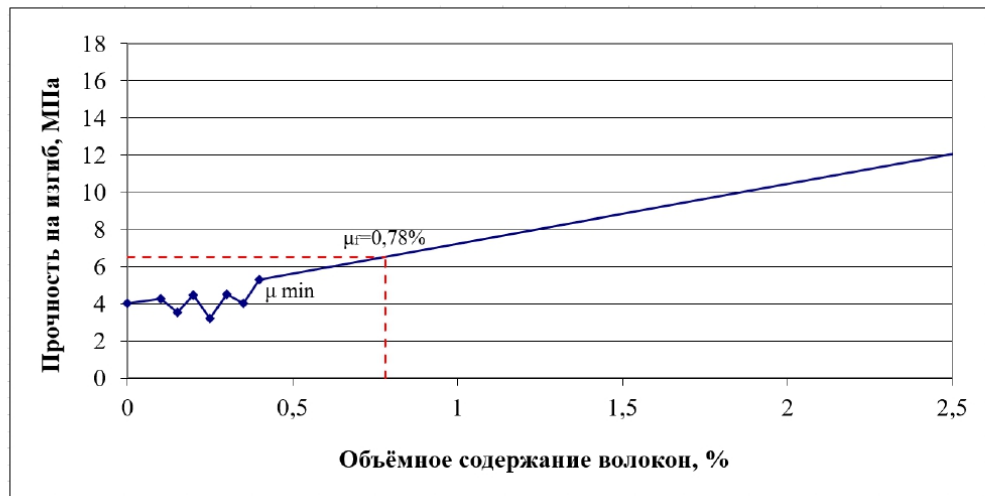


Рисунок Б.2 - График « $R_{фб} - \mu_f$ » для фибробетона с макроволокнами

7. По графику определяем коэффициент армирования  $\mu_f = 0,0078 = 0,78\%$ , соответствующий получению заданной прочности фибробетона, которая должна быть не менее 6,5 МПа.

**Приложение А – Рекомендации по изготовлению фибробетонных изделий и конструкций с синтетической фиброй производства ООО «РУССЕАЛ»**  
186

8. Корректировка состава фибробетонной смеси:

– расчетная средняя плотность сталефибробетонной смеси

$$\rho = 330 + 800 + 1040 + 190 + 7 + 2 = 2379 \text{ кг/м}^3$$

Фактическая средняя плотность, измеренная при проведении пробных формовок, составляет 2345 кг/м<sup>3</sup>.

После корректировки окончательный состав фибробетонной смеси представлен в табл. Б.2.

Таблица Б.7 – Расход материалов на 1 м<sup>3</sup> базового состава

Цемент	329 кг
Песок	781 кг
Щебень	1047 кг
Фибра	6,9 кг
Вода	187 кг
Добавка-пластификатор «Макромер П-163 наномодифицированная»	1,97 л

Приложение Б – Акт внедрения  
187

УТВЕРЖДАЮ

УТВЕРЖДАЮ

ООО «Руссеал»  
Генеральный директор

ФГБОУ ВО «СПбГАСУ»  
Директор по научной работе



В.В. Сысоев

2022 г.



Е.В. Королёв

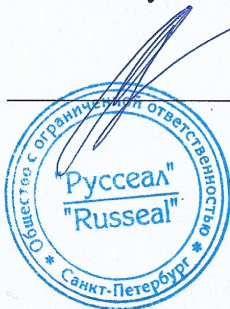
2022 г.

АКТ

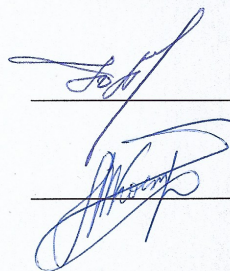
Мы, нижеподписавшиеся, представители ФГБОУ ВО «СПбГАСУ»: заведующий кафедрой ТСМиМ, д.т.н., профессор Пухаренко Ю.В., аспирант кафедры ТСМиМ Кострикин М.П., с одной стороны, и представитель ООО «Руссеал»: генеральный директор Сысоев В.В., с другой стороны, составили настоящий акт о том, что в рамках сотрудничества по результатам проведённых исследований эффективности армирования бетонов низко модульными синтетическими волокнами разработаны, успешно апробированы в ходе практического использования и переданы ООО «Руссеал» «Рекомендации по изготовлению фибробетонных изделий и конструкций с синтетической фиброй производства ООО «Руссеал».

От ООО «Руссеал»:

От ФГБОУ ВО «СПбГАСУ»:



В.В. Сысоев



Ю.В. Пухаренко

М.П. Кострикин



Рис. А.1 – Диплом победителя конкурса ГРАНТов КНВШ - 2016



Рис. А.2 – Диплом победителя конкурса ГРАНТов КНВШ - 2017

Приложение В – Дипломы победителя конкурсов  
189



Рис. А.3 – Диплом победителя конкурса ГРАНТов КНВШ - 2018

Приложение В – Дипломы победителя конкурсов  
190

Электронная копия

20.11.2018  
Россия, Москва



**НАУКА**  
И ОБРАЗОВАНИЕ ON-LINE

№ QE-De18-259

# ДИПЛОМ

награждается

*Кострикин Максим Павлович*

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

за **1** место

в IV Международном конкурсе учебных и научных работ студентов, магистрантов, аспирантов, докторантов

## QUALITY EDUCATION - 2018

(В РАМКАХ ТРЕБОВАНИЙ ФГОС)

Степень: Аспирантура  
Направление: Технические науки

Номинация: Научные работы  
Форма: отчет о  
научно-исследовательской работе

Название конкурсной работы: Оценка влияния высоких температур на характеристики дисперсно армированных бетонов  
Руководитель: Пухаренко Юрий Владимирович

Директор по научным проектам



Романов А.О.

Рис. А.4 – Диплом победителя конкурса Quality Education - 2018



Рис. А.5 – Диплом победителя конкурса Quality Education - 2019