

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

*На правах рукописи*

**Пантелеев Дмитрий Андреевич**

**ПОЛИАРМИРОВАННЫЕ ФИБРОБЕТОНЫ  
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АМОРФНОМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ  
ФИБРЫ**

**Специальность 05.23.05 – Строительные материалы и изделия**

Диссертация  
на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель:  
доктор технических наук,  
профессор Ю.В. Пухаренко

Санкт-Петербург – 2016

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. ФИБРОБЕТОНЫ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА.....	12
1.1 Проблема фибробетонов в современном строительном материаловедении.....	12
1.2 Особенности структуры фибробетона как композиционного материала.....	16
1.3 Влияние дисперсного армирования на прочность и деформативность фибробетона.....	18
1.3.1 Прочность на растяжение при изгибе и сжатие.....	18
1.3.2 Трещиностойкость и вязкость разрушения.....	23
1.3.3 Ударостойкость.....	27
1.3.4 Модуль упругости и коэффициент Пуассона.....	30
1.4 Полидисперсное армирование как способ дальнейшего улучшения свойств и повышения эффективности фибробетонов.....	32
1.5 Перспективы и особенности применения аморфнометаллической фибры при полиармировании фибробетонов.....	36
1.5.1 Эффективность аморфнометаллической фибры при моноармировании бетона.....	36
1.5.2 Возможные варианты сочетания аморфнометаллической фибры с другими видами армирующих волокон.....	38
Выводы по первой главе.....	43
2. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	45
2.1 Используемые сырьевые материалы и применяемое оборудование... ..	45
2.1.1 Используемые сырьевые материалы.....	45
2.1.2 Применяемое оборудование.....	47
2.2 Технология изготовления образцов.....	49

2.3	Методики испытаний образцов.....	50
2.3.1	Метод определения трещиностойкости и вязкости разрушения фибробетона при статическом нагружении.....	50
2.3.2	Метод определения модуля упругости, коэффициента Пуассона и призмной прочности фибробетона.....	56
2.4	Методика и результаты определения механических характеристик фибры.....	58
2.4.1	Определение прочности сцепления стальной фибры с матрицей...	59
2.4.2	Определение прочности аморфной металлической фибры.....	61
2.4.3	Методика определения модуля упругости аморфной металлической фибры.....	64
	Выводы по второй главе.....	66
3.	<b>ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СВОЙСТВ ПОЛИАРМИРОВАННОГО ФИБРОБЕТОНА.....</b>	<b>67</b>
3.1	Влияние вида армирующих волокон на характер разрушения фибробетона.....	67
3.2	Теоретические модели формирования свойств полиармированного фибробетона.....	70
3.2.1	Модуль упругости.....	70
3.2.2	Прочность.....	74
3.2.3	Вязкость разрушения.....	78
	Выводы по третьей главе.....	84
4.	<b>ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛИАРМИРОВАННОГО ФИБРОБЕТОНА.....</b>	<b>86</b>
4.1	Определение предела насыщения бетона аморфнометаллической и стальной фиброй.....	86
4.2	Определение модуля упругости, коэффициента Пуассона и призмной прочности.....	91

4.3	Определение энергических и силовых характеристик разрушения (прочность на растяжение при изгибе, трещиностойкость, вязкость разрушения).....	95
	Выводы по четвертой главе.....	100
5. ПРОЕКТИРОВАНИЕ СОСТАВОВ ПОЛИАРМИРОВАННЫХ ФИБРОБЕТОНОВ.....		101
5.1	Принципы проектирования составов моноармированных фибробетонов.....	101
5.2	Проектирование составов полиармированных фибробетонов с использованием аморфнометаллической фибры.....	104
5.3	Примеры разработки составов полиармированных фибробетонных смесей с использованием аморфнометаллической фибры.....	106
5.4	Опытно-промышленная проверка результатов лабораторных исследований с технико-экономической оценкой.....	112
	Выводы по пятой главе.....	119
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....		120
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....		122
ПРИЛОЖЕНИЯ.....		136
	<i>Приложение А.</i> Дипломы победителя конкурса грантов Санкт-Петербурга.....	136
	<i>Приложение Б.</i> Протокол совещания об изготовлении контейнерных автозаправочных станций.....	138
	<i>Приложение В.</i> Технические условия на наземные резервуары АЗК.....	140
	<i>Приложение Г.</i> Титульный лист рабочего проекта наземного резервуара.....	152
	<i>Приложение Д.</i> Протокол испытаний и акт о внедрении наземных резервуаров АЗК.....	153

## ВВЕДЕНИЕ

**Актуальность избранной темы.** Все большее применение в строительстве находят фибробетоны, обладающие улучшенными прочностными и деформативными характеристиками. При этом, в качестве дисперсной арматуры применяют различные по составу и происхождению, геометрическим характеристикам и физико-механическим свойствам волокна. Каждый вид волокна обладает своими преимуществами и недостатками. Так, введение в бетон стальных фибр обеспечивает значительное повышение его прочности, увеличивает сопротивление термическому воздействию и истиранию, позволяет добиться повышения вязкости разрушения композита. Дисперсное армирование низко модульными синтетическими волокнами не приводит к заметному повышению прочности при статических нагрузках, но сопротивление такого композита при действии ударных нагрузок оказывается более высоким по сравнению с неармированным бетоном. В последние годы появляются новые модификации фибр, например, получаемые из аморфнометаллических сплавов, которые требуют дальнейших исследований с целью определения их технико-экономической эффективности.

Как правило, при дисперсном армировании останавливаются на вариантах моноармирования, при которых управление свойствами бетона, достаточно ограничено, тогда как полиармирование (армирование одновременно несколькими видами волокон с различными характеристиками) дает возможность управлять широким комплексом свойств в одном композите. Вместе с тем, вопросы полиармирования фибробетонов к настоящему времени изучены недостаточно, а имеющаяся информация порой свидетельствует о противоречивости получаемых результатов исследований, что снижает объемы применения дисперсного армирования. В связи с этим возникает необходимость дальнейшего изучения физико-механических, энергетических и деформативных

характеристик и разработки перспективных вариантов дисперсного армирования фибробетонов для повышения их технико-экономической эффективности, надежности и эксплуатационной безопасности конструкций зданий и сооружений.

Об актуальности работы свидетельствует выполнение ее в соответствии с государственным заданием Минобрнауки РФ: тема №7.546.2011 «Развитие фундаментальных основ и практических принципов получения строительных конструкций повышенной эксплуатационной надежности и безопасности (применительно к уникальным зданиям и сооружениям)» и Планом фундаментальных научных исследований РААСН (раздел 7.2. Физико-химические основы структурообразования новых материалов, тема 7.2.3. «Исследование процессов формирования структуры и свойств фибробетонов на основе аморфнометаллической фибры»), а так же при поддержке грантов комитета по науке и высшей школе Правительства Санкт-Петербурга для студентов, аспирантов, молодых ученых и кандидатов наук 2013 г. и 2014 г. (дипломы победителей грантов СПб приведены в Приложении А).

**Степень разработанности темы исследования.** Работа основана на результатах теоретических и экспериментальных исследований отечественных и зарубежных ученых (Баженов Ю.М., Волков И.В., Голанцев В.А., Евсеев Б.А., Каприелов С.С., Ключев С.В., Ковалева А.Ю., Коротких Д.Н., Коротышевский О.В., Крылов Б.А., Курбатов Л.Г., Леонович С.Н., Лобанов И.А., Маилян Л.Р., Малышев В.Ф., Морозов В.И., Пухаренко Ю.В., Рабинович Ф.Н., Романов В.П., Талантова К.В., Шляхтина Т.Ф., Bhikshma V., Mangat P.S., Rangan V.K., Rasheed M.H.F., Shah S.P. и др.), направленных на изучение процессов структурообразования и формирования свойств фибробетонов, разработку составов, методов расчета и проектирования фиброармированных конструкций, определение эффективной области применения, и является их логическим продолжением.

**Цель исследования** заключается в разработке эффективных полиармированных фибробетонов с использованием аморфной металлической фибры с улучшенными физико-механическими, энергетическими и деформативными характеристиками.

**Задачи исследования:**

1. На основе анализа имеющихся данных и предварительных расчетов теоретически обоснована эффективность использования аморфнометаллической фибры в составе полидисперсного армирования фибробетона;

2. Исследованы физико-механические, энергетические и деформативные характеристики полиармированного фибробетона с применением аморфнометаллической фибры;

3. Разработаны методика проектирования и составы полиармированных фибробетонов с использованием аморфнометаллической фибры;

4. Разработаны проекты нормативно-технических документов (ТУ, ТР), регламентирующих применение новых составов полиармированного фибробетона для изготовления изделий и конструкций;

5. Проведена экспериментальная проверка данных лабораторных исследований в условиях действующего производства с технико-экономической оценкой предлагаемых технических решений.

**Объект исследования** – полиармированные фибробетоны с использованием аморфнометаллической фибры.

**Предмет исследования** – составы и свойства полиармированных фибробетонов с использованием аморфнометаллической фибры и изделий на их основе.

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

1. Теоретически обоснована и экспериментально доказана эффективность использования аморфнометаллической фибры в комбинации с другими известными видами армирующих волокон;

2. Разработана оригинальная методика и определены характеристики аморфнометаллической фибры при испытании в бетоне: прочность  $R_{ам.ф.} = 996$  МПа, модуль упругости  $E_{ам.ф.} = 224700$  МПа;

3. Предложены математические модели, позволяющие прогнозировать прочность и упруго-пластические характеристики полиармированного фибробетона под нагрузкой в зависимости от вида, размеров и объемного сочетания фибр в составе комбинации;

4. Впервые определены физико-механические характеристики полиармированных фибробетонов с применением аморфной металлической фибры, включая показатели деформативности. При этом обнаружен сверхсуммарный эффект при оптимальном сочетании аморфнометаллической и стальной фибры, в большей степени обеспечивающий улучшение свойств композита, чем при армировании теми же волокнами в отдельности;

5. Предложена методика проектирования и разработаны варианты составов новых видов полиармированных фибробетонов.

**Теоретическая значимость работы** заключается в определении расчетных характеристик аморфнометаллической фибры, разработке и исследовании математических моделей для расчета и прогнозирования прочности, модуля упругости и вязкости разрушения полиармированного фибробетона.

**Практическая значимость:**

1. Предложен состав фибробетонной смеси с использованием аморфнометаллической фибры, позволяющий повысить прочность и трещиностойкость композита при одновременном увеличении вязкости разрушения (положительное решение госэкспертизы по заявке на изобретение № 2014151260 «Фибробетонная смесь»);

2. Разработаны Технические условия и Технологический регламент на производство резервуаров наземного размещения для автозаправочных комплексов (АЗК), утвержденные ООО «НТЦ Инновационные Строительные Технологии»;

3. Изготовлена опытная партия наземных резервуаров АЗК в условиях действующего производства. Проведены натурные испытания опытных изделий, которые показали высокую эффективность полиармированных фибробетонов с применением аморфной металлической фибры, а так же продемонстрирована сходимост ь с результатами лабораторных экспериментов;

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

**Рабочая гипотеза:** применение аморфнометаллической фибры, имеющей высокую прочность сцепления с бетонной матрицей и работающей с ней совместно вплоть до разрушения, в комбинации с другими видами стальных волокон, при достижении с ними тесного взаимодействия, приводит к увеличению прочности и трещиностойкости композита при одновременном повышении вязкости разрушения.

**Методология и методы исследования.** В диссертационном исследовании использовались труды ведущих ученых и специалистов Российской Федерации, а так же других стран в области моно- и полиармированных фибробетонов. Физико-механические, энергетические и деформативные характеристики определялись в соответствии с действующими нормативными документами ГОСТ 10180-2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам», ГОСТ 29167-1991 «Бетоны. Методы определения характеристик трещиностойкости

(вязкости разрушения) при статическом нагружении», ГОСТ 24452-1980 «Бетоны. Методы определения призмочной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона».

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Теоретическое обоснование и экспериментальное подтверждение эффективности использования аморфной металлической фибры в комбинации с другими видами армирующих волокон;
2. Разработка оригинальной методики и результат определения прочности аморфнометаллической фибры;
3. Результаты прогнозирования деформативных, прочностных и энергетических характеристик полиармированного фибробетона на основе предлагаемых математических моделей;
4. Данные экспериментальных исследований прочностных и деформативных свойств полиармированного фибробетона с применением аморфной металлической фибры;
5. Методика и результаты проектирования состава полиармированных фибробетонов с использованием аморфнометаллической фибры.

**Область исследования** соответствует паспорту научной специальности 05.23.05 – Строительные материалы и изделия, а именно пункту 2 «Создание новых строительных материалов, обеспечивающих строительство быстровозводимых трансформируемых и долговечных зданий и сооружений», пункту 6 «Создание теоретических основ получения строительных композитов гидратационного твердения и композиционных вяжущих веществ и бетонов».

**Степень достоверности и апробация результатов.** Основные положения диссертационной работы представлялись и докладывались на следующих научных конференциях: 64-ой международной научно-технической конференции молодых ученых, посвященной 300-летию со дня рождения М.В. Ломоносова (Россия, СПб, 2011 год); Международной научно-практической конференции «Современные направления теоретических и прикладных исследований 2013» (Украина, Одесса, 19-30

марта 2013 года); II-ом и III-ем международном конгрессе молодых ученых «Актуальные проблемы современного строительства» (10-12 апреля 2013 г. и 9-11 апреля 2014 г., СПбГАСУ); V-ой международной конференции «Актуальные проблемы архитектуры и строительства» (Россия, СПб, 25-28 июня 2013 года).

**Публикации.** Материалы диссертации опубликованы в 9 печатных изданиях общим объемом 1,94 п.л., лично автором – 1,18 п.л., из них 3 в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов, утвержденный ВАК РФ. Получено положительное решение госэкспертизы по заявке на изобретение № 2014151260 «Фибробетонная смесь».

**Структура и объем диссертационной работы.** Диссертация состоит из введения, 5 глав с выводами по каждой из них, общих выводов, списка использованной литературы и приложений. Работа представлена на 155 страницах, содержит 33 рисунка, 28 таблиц, список литературы из 119 наименований.

# 1. ФИБРОБЕТОНЫ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

## 1.1 Проблема фибробетонов в современном строительном материаловедении

В настоящее время в строительстве большое развитие получают дисперсно-армированные бетоны. Это вызвано тем, что при всех преимуществах бетона и железобетона, они имеют и ряд недостатков, наиболее серьезным из которых считается низкая трещиностойкость, что является причиной хрупкого разрушения конструкций под нагрузкой. Этот и другие недостатки можно устранить в результате использования фибробетона – композиционного материала, состоящего из цементной матрицы с равномерным или заданным распределением по всему объему ориентированных или хаотично расположенных дискретных волокон разного типоразмера.

Первые сведения о фибробетоне появились в начале 20 века и связаны с именем русского инженера В.П. Некрасова [75], который работал над увеличением сопротивления бетона нагрузкам в сжатых и растянутых слоях сооружения путем добавления в бетон обрезков тонкой железной проволоки. На первом этапе исследований такой прием рассматривался лишь как помощь стержневому армированию, однако целесообразность использования дисперсного армирования бетонов уже в тот период была очевидна и так же подтверждались зарубежными учеными. Например, Гари Портер в 1910 году заявил о том, что при введении проволоки и гвоздей, механические характеристики бетона возрастают примерно в 8 раз [8, 22]. Однако постепенно идея о дисперсном армировании была забыта, и лишь в 60-х годах, при возникновении острой необходимости улучшения физико-механических свойств бетона, снова получила бурное развитие. Перед исследователями стояла задача увеличения сопротивления бетона

растяжению и повышения вязкости разрушения за счет применения стальной проволочной фибры и других волокон [11].

В настоящее время номенклатура используемых волокон весьма обширна, и согласно принятой классификации их разделяют:

– по модулю упругости волокна на высокомодульные (стальные, углеродные, стеклянные и др) и низкомодульные (полипропиленовые, вискозные и др.);

– по происхождению на природные (асбестовые, базальтовые, шерстяные и др.) и искусственные (вискозные, полиамидные и др.);

– по основному материалу на металлические (чаще всего стальные) и неметаллические (синтетические, минеральные).

Дисперсная арматура является рыхлым материалом в виде совокупности дискретных волокон разного происхождения, типа и размеров, которая предназначена для дисперсного армирования бетонов, в качестве упрочнителя и модификатора структуры композита.

При дисперсном армировании, упрочнение бетона с помощью фибры основано на гипотезе о том, что матрица композита передает равномерно распределенным в ней волокнам приложенную нагрузку за счет касательных сил, которые действуют по поверхности раздела фаз. В случае, когда модуль упругости фибры превышает модуль упругости бетонной матрицы, основную долю напряжений воспринимают волокна, а общая прочность композита прямо пропорциональна их объемному содержанию.

Для эффективного применения различные волокна должны удовлетворять следующим условиям:

- модуль упругости волокон должен быть выше, чем модуль упругости матрицы композита;
- волокна должны быть химически стойкими и не разрушаться в щелочной среде бетонов;
- объем выпуска волокон должен обеспечивать объемы производства изделий из фибробетонов;

- стоимость волокон должна быть минимальной с учетом выше перечисленных требований. [88]

Производство стальной фибры основано на резке низкоуглеродистой проволоки, листовой стали или фольги; формовании из расплава, фрезеровании слябов и полос, а также прерывистом вибрационном резании в процессе токарной обработки заготовки. Неметаллические фибры являются отрезками моноволокон, фибриллированных пленок и комплексных нитей, которые, в том числе, могут изготавливаться из промышленных отходов соответствующих производств [81].

Основной задачей при разработке составов и технологии фибробетонов является оптимизация геометрических параметров и размеров фибр, обеспечивающих надежное сцепление волокон с бетонной матрицей при допустимых нагрузках, повышение технологичности, снижение трудо- и энергоемкости операций по производству изделий и конструкций. Сцепление фибры с бетоном и повышение технологичности операций, в первую очередь, зависит от отношения длины фибры к ее диаметру ( $l/d$ ), которое может изменяться в широких пределах и влиять на степень анкеровки волокна в бетонной матрице, а также на технологические свойства фиброармированных бетонных смесей.

Учитывая вышеописанное, при использовании стальной фибры отношение ее длины к диаметру принимают равным  $l/d = 80...100$ , что в определенной мере способно удовлетворить сформулированным условиям, однако всех проблем устранить не удастся. Основными проблемами остаются:

- низкая степень насыщения матрицы композита волокнами такого типа, что препятствует дальнейшему улучшению физико-механических, деформативных и эксплуатационных характеристик дисперсно армированного бетона;
- высокая стоимость и дефицит стального волокна малого диаметра, изготавливаемого при помощи резки низкоуглеродистой проволоки;

- необходимость перевооружения бетоносмесительных узлов предприятий сборного железобетона, вызванное недостаточной технологичностью проволочной фибры, которая проявляется в слеживаемости и отсутствии сыпучести.

В данных условиях радикальным способом улучшения конструкционных возможностей стальной фибры с одновременным повышением их технологичности становится увеличение боковой поверхности волокна, то есть применение фибры некруглого поперечного сечения, получаемой, например, в результате резания стальной ленты. Форма поперечного сечения, обусловленная процессом изготовления, обеспечивает значительную жесткость такой фибры в продольном направлении, что значительно облегчает процессы ее транспортирования и дозирования, а также способствует равномерному распределению волокон при повышенном содержании в бетонной смеси, что приводит к серьезному улучшению прочностных, деформативных и эксплуатационных характеристик фибробетона.

В последние годы получает распространение еще одна разновидность фибры подобного типа – аморфнометаллическая, которую получают методом закалки расплавленного металла с различными легирующими добавками. Расплав выливается на охлаждаемую подложку и отверждается, не успевая приобрести упорядоченную кристаллическую решетку, образуя отрезки лент определенной длины и толщины [82].

Известно, что полипропиленовые волокна не поддаются коррозии под воздействием щелочной среды при гидратации портландцемента. Однако волокна данного типа имеют плохую смачиваемость, следовательно, и плохую адгезию к цементному камню. Обеспечение сцепления фибры с бетоном достигается в большей степени только за счет сил механического заанкеривания.

Согласно литературным данным [35, 39, 44, 103] введение синтетических волокон в бетонную смесь не приводит к заметному

повышению прочности композита на осевое растяжение, растяжение при изгибе и сжатие при действии статических нагрузений, так как бетон не может передать статические усилия на волокна, которые обладают более низким, по сравнению с бетоном, модулем упругости. Однако, несмотря на низкие значения упругих характеристик, по сравнению со стальными, полипропиленовые волокна по-прежнему представляют высокий интерес в плане их применения для дисперсного армирования.

## **1.2 Особенности структуры фибробетона как композиционного материала**

Известно, что главной особенностью композитов, в том числе фибробетонов, является гетерогенность, что определяет всю сложность структуры подобных материалов [96, 118]. По мнению Соломатова В.И., фибробетон - это материал типа «структура в структуре» с очень сложной полиструктурной организацией, в котором, как минимум, можно выделить два масштабных уровня:

1) микроскопический (уровень цементного камня), который устанавливает фазовый состав новообразований, вид и характер пористости и др;

2) макроскопический (уровень бетона), который устанавливает вид и свойства заполнителя, цементного камня, фибры и соотношение между ними, а так же однородность распределения данных компонентов в объеме фибробетона.

Лобановым И.А. была предложена структурно – технологическая модель фибробетона [68], составной частью которой является макроструктурная ячейка, размеры которой зависят от степени насыщения армирующим волокном, и соизмеримы с геометрическими характеристиками волокон и размерами заполнителя. Все компоненты, которые составляют

макροструктурную ячейку, связаны между собой контактами, прочность которых определяет основные свойства дисперсно армированных бетонов.

В зависимости от места образования контакты могут быть разделены на три вида:

- между цементными зернами;
- между цементным камнем и заполнителем;
- между мелкозернистым бетоном и фиброй.

Цементный камень, заполнитель и фибра занимают не весь объем, так как остаются различные поры, которые могут содержать капиллярную и свободную воду, а так же воздух.

Свойствами макροструктурного элемента определяются характеристики композита. За такие характеристики как прочность и трещиностойкость главным образом отвечают контакты, состояние которых зависит от принятого способа изготовления. На формирование свойств композита оказывает влияние каждый из компонентов в отдельности, а так же контакты между ними, что отражает «правило смесей», которое используют для прогнозирования прочностных характеристик фибробетона и имеет вид:

$$R_{\phi\sigma} = 2\phi\tau\mu\frac{l}{d} + (1-\mu)R_{\sigma} \quad (1.1)$$

где:  $R_{\phi\sigma}$  – прочность фибробетона;  $R_{\sigma}$  – прочность бетона;  $l$  – длина фибры;  $d$  – диаметр фибры;  $\mu$  – объемное содержание волокон;  $\tau$  – касательные напряжения на границе раздела бетонной матрицы и волокна;  $\phi$  – комплексный коэффициент, учитывающий вид и ориентацию волокон, степень их взаимодействия друг с другом и матрицей, а также степень дисперсности армирования.

Однако «правило смесей» не учитывает особенностей изменений структуры матрицы композита, которые связаны с введением фибр, что не позволяет с достаточной точностью прогнозировать характеристики

материала. Особенности формирования контактов [63] между фиброй и цементным тестом обуславливается наличием капиллярных сил поверхностного натяжения, что обеспечивает прилипание к поверхности волокнистых включений микрочастиц, имеющих размер от нескольких микрон до 1-2 мм. За счет капиллярного сцепления создаются структурные элементы, которые упрочняются в процессе тепловой обработки из-за стесненных условий твердения, что приводит к изменению структуры матрицы композита. Таким образом, в результате введения фибры в бетон создаются зоны повышенной плотности бетона вблизи поверхности армирующего волокна и зоны меньшей плотности бетона по объему макроструктурной ячейки.

Позже «правило смесей» было видоизменено Пухаренко Ю. В., которое с учетом дополнительных данных, полученных в ходе исследований, приняло следующий вид:

$$R_{фб} = 2\varphi\tau\mu\frac{\ell}{d} + 3,5R_{к.з.}\mu + (1 - 4,5\mu)R_б \quad (1.2)$$

где:  $R_{кз}$  – прочность контактной зоны на границе раздела бетонной матрицы и волокна.

Данная модель является усовершенствованной и более эффективной, так как помимо вклада матрицы и армирующих волокон в расчете прочности фибробетона учитывает и вклад контактной зоны.

### **1.3 Влияние дисперсного армирования на прочность и деформативность фибробетона**

#### **1.3.1 Прочность на растяжение при изгибе и сжатие**

Известно, что дисперсное армирование бетона высокомолекулярными волокнами (стальные, углеродные и др.) увеличивает прочность бетона [37, 42, 87, 98]. В наибольшей степени дисперсное армирование

высокомодульной фиброй позволяет добиться повышения прочности фибробетона на растяжение при изгибе [38, 104, 105]. Согласно некоторым данным [14], в случае армирования стальной фиброй диаметром 0,3 мм, при насыщении 3% по объему, прочность на растяжение при изгибе увеличивается в 5 раз по сравнению с неармированным бетоном, а в случае [102] объемного насыщения бетона в количестве 2% прочность при изгибе увеличивается в 2 раза.

Используя стальную фибру большего диаметра, так же можно добиться повышения прочности на растяжение при изгибе в несколько раз. Так, Голубев В.Ю. в своих исследованиях [26], используя фибру «Dramix» с исходными характеристиками, равными  $d = 0,75$  мм и  $l = 60$  мм, при общем проценте армирования, равном 1% по объему, повысил прочность при изгибе, по сравнению с неармированным контрольным образцом, более чем в два раза.

Для фибробетона характерно и увеличение прочности на растяжение. Так при введении стальной фибры в количестве 3% по объему [5], наблюдается увеличение прочности в 2,5 раза, а при 1,5%-ом уровне армирования – в 1,5-2 раза по сравнению с неармированным бетоном. Эти данные подтверждает в своей работе [28] и В.И.Григорьев. В Техническом университете Дрездена [71] при испытаниях образцов с длинными предпочтительно ориентированными стальными волокнами, при объемном армировании 2,4 %, было отмечено повышение прочности на растяжение в 5,5 раз.

По мнению ряда отечественных и зарубежных специалистов, [7, 101, 102] прочность сталефибробетона на растяжение зависит от среднего расстояния между геометрическими центрами волокон. Павлов А.П. в [78] утверждает, что только при определенном расстоянии, сталефибробетон резко отличается от железобетона, так как фибра не способна воспринимать нагрузку, как это делает арматура в железобетоне, а действует сначала на бетонную матрицу, затрудняя развитие в ней микротрещин.

Определенный интерес представляет собой стеклянная фибра. Так в работе [24] утверждается, что стеклофибробетон, в сравнение с неармированным бетоном, может иметь предел прочности на растяжение при изгибе в 4-5 раза выше, а на осевое растяжение в 3 раза выше [18].

С помощью дисперсного армирования можно обеспечить и увеличение прочности на сжатие, пусть и в меньшей степени, чем на растяжение при изгибе. По некоторым данным это увеличение достигает 25% [20, 46, 119].

Наряду с этим, проведенный литературный анализ показал противоречивость мнений о влиянии диаметра применяемой фибры на прочностные характеристики фибробетона. Так в одних работах [14, 37] утверждают об увеличении прочности сталефибробетона при уменьшении диаметра армирующих волокон, и оптимальным диаметром волокна считают 0,3 мм, а фибру большего диаметра менее эффективной. В других источниках [109] говорится о том, что прочностные свойства материала практически не зависят от диаметра армирующих волокон, и предлагают использовать в качестве универсальной характеристики армирования следующую величину [51]:

$$K = \mu_0 \left( \frac{\ell}{d} \right) \quad (1.3)$$

где:  $\mu_0$  – коэффициент объемного армирования;  $\frac{\ell}{d}$  – отношение длины к диаметру фибры.

Установлено, что равным значениям  $K$  при прочих равных условиях соответствуют равные значения прочности фибробетона независимо от абсолютной величины диаметров фибры. По мнению некоторых авторов это происходит из-за улучшения условий анкеровки волокна в матрице композита и увеличения коэффициента ориентации крупных фибр.

Курбатов Л.Г. для конструкций, предельное состояние которых лимитируется их несущей способностью, рекомендует применять фибру диаметром 1-1,2 мм [51, 52].

Анализируя результаты экспериментальных исследований, изложенные в [90], можно прийти к выводу о том, что эффективность фибры разного диаметра может изменяться даже в довольно узком интервале объемного насыщения.

Согласно «правилу смесей» прочность бетона возрастает прямо пропорционально объемному содержанию волокон, если их модуль упругости, выше модуля упругости матрицы, следовательно, низко модульные волокна в тяжелых бетонах не способны исполнять роль упрочнителя в бетоне [101]. Однако, согласно работам некоторых исследователей [3, 90], при введении низко модульных волокон прочность бетона не только не уменьшается, что соответствовало бы правилу смесей, а увеличивается. Например, по данным Пухаренко Ю.В., при введении  $\mu_0 = 1-2\%$  полипропиленового волокна, длиной  $l = 20$  мм, прирост прочности достигает 15-18%, что является результатом не столько упрочняющего, сколько модифицирующего действия фибровых включений, улучшающих структуру и механические характеристики цементных матриц. Этот же эффект подтверждается в работе Зотова А.Н. [35], который приходит к выводу, что применение полипропиленовой фибры способствует совершенствованию прочностных свойств бетонов, так увеличение расхода волокон приводит к снижению прочности при сжатии, но к повышению прочности на растяжение при изгибе.

Одновременно литературный обзор показал, что данных о влиянии полидисперсного армирования на прочность фибробетона намного меньше, чем у моноармированного, однако и этих данных достаточно, что бы сделать вывод о возможности обеспечения регулирования свойств материала в более широких пределах, чем при моноармировании [43, 92, 94, 95].

В результате экспериментальных исследований [100] установлены закономерности изменения физико-механических свойств фибробетонов при использовании комбинаций стальных фрезерных фибр и полипропиленовых волокон. Так при проверке эффективности варианта комбинированного

дисперсного армирования осуществлялось совместное введение в бетонную смесь фрезерных фибр размером поперечного сечения  $b*t = 2,27*0,12$  мм и длиной 36 мм, а так же полипропиленовых волокон с исходными характеристиками  $l = 18$  мм и  $d = 0,02$  мм, при общей степени насыщения  $\mu_0 = 0,81; 1,62; 2,43$  по объему и относительном коэффициенте армирования полипропиленом  $n = 0; 0,17; 0,33; 0,5; 0,67; 0,83; 1,0$ . Анализ полученных данных показывает, что в данном случае может быть получен композит, прочность которого превышает прочность моноармированного сталефибробетона при одинаковом общем проценте армирования.

Согласно данным, приведенным в технической литературе, исследователи, занимаясь полиармированием, пробовали различные комбинации фибр, учитывая как их геометрические параметры, так и упругопластические свойства. Так в одном из авторских свидетельств предложено использовать комбинацию стальной высокомодульной фибры в количестве 5% по массе и синтетического низко модульного волокна в количестве 1% [64]. Такой материал обладает прочностью на растяжение при изгибе большей на 25%, чем в случае армирования исключительно стальной фиброй. В следующем исследовании [25], подобный эффект подтверждается и при введении меньшего количества фибровой арматуры, которое составляло 2,43% по объему: в случае применения комбинации стальной фибры с характеристиками  $l = 34$  мм и  $d = 0,3$  мм и синтетической  $l = 20$  мм и  $d = 0,02$  мм прочность на растяжение при изгибе была выше на 23%, чем при армировании исключительно стальной фиброй.

В работе [65], посвященной полидисперсному армированию, так же экспериментально доказана целесообразность совместного применения фибр разной природы с разным отношением длины к диаметру. Так при использовании комбинации из трех видов высокомодульных волокон (стальной проволоки диаметром 1,1 мм и 0,3 мм и синтетических высокомодульных волокон диаметром 0,08 мм) путем варьирования их количества при одинаковом общем содержании в смеси, равном 2,16% по

объему, удастся повысить прочность на растяжение при изгибе мелкозернистого фибробетона на 28% с 18,1 МПа до 23,2 МПа.

Прочность полиармированного фибробетона на сжатие, увеличивается примерно в тех же пределах, что и при моноармировании.

### 1.3.2 Трещиностойкость и вязкость разрушения

Как уже отмечалось, серьезным недостатком бетона является хрупкость при разрушении, которое происходит в результате практически мгновенного распространения магистральной трещины после незначительной пластической деформации. При идеально хрупком разрушении можно заново составить образец прежних размеров из его частей, полученных в процессе испытания, без зазоров между ними.

Хрупкое разрушение чаще всего происходит по определённым кристаллографическим плоскостям внутри зёрен – так называемое внутризёренное разрушение, которое может реализоваться сколом и срезом, отличающихся видом поверхностей разрушения [51, 76, 116].

Собственные исследования, а так же произведенный литературный обзор [27, 49, 80, 85, 93, 108], показали, что при введении высокомодульных волокон повышается трещиностойкость бетона, то есть его способность сопротивляться развитию трещин. В ряде работ это подтверждается экспериментально, так [102] при введении стальных фибр  $l = 25$  мм,  $d = 0,25$  мм в количестве 2,3% по объему нагрузка в момент образования первой трещины в два раза выше, чем у неармированных образцов. При введении 4% фибры по объему нагрузка возрастает примерно в 3 раза, эти значения так же подтверждены в работе [16].

Согласно [87] результатам исследований, посвященных определению трещиностойкости фибробетонов с применением стальной высокомодульной фибры, в случае, когда длина волокна больше критической длины ( $l > l_{кр}$ ), большинство волокон разрываются и вклад энергии вытягивания в общую

вязкость разрушения невелик. В случае, когда критическая длина больше длины волокна ( $l_{кр} \geq l$ ), основной вклад в энергию разрушения композита вносит энергия по вытягиванию фибры. Так же установлено, что энергетические затраты на вытягивание фибры гораздо выше энергии, связанной с разрушением границ раздела фаз, а значит для того, что бы повысить вязкость разрушения фибробетона, следует применять волокна длиной меньше, чем критическая длина ( $l_{кр} \geq l$ ).

В исследованиях Романова В.П., [108] при введении 2,5% фибры по объему, так же отмечается увеличение прочности в момент образования трещины вплоть до 80%, по сравнению с контрольными образцами.

В работе Голубева В.Ю. [26], при использовании стальной фибры «Dramix» с исходными характеристикам  $d = 0,75$  мм и  $l = 60$  мм, с общим содержанием волокон 2,9% по объему, вязкость разрушения по сравнению с неармированным бетоном повышается в 3,7 раза.

Так же показательными являются результаты [28, 111], из которых следует, что трещиностойкость при статическом нагружении примерно в 1,8-2 раза превосходит предел прочности неармированного бетона.

Из выше приведенных данных, можно сделать вывод о том, что фибробетон с использованием высокомодульных волокон обладает повышенной стойкостью к образованию и развитию трещин. Необходимо отметить, что трещиностойкость существенным образом зависит от степени дисперсности армирования, обусловленного величиной диаметра используемых фибр. Так по данным некоторых работ [25], дисперсное армирование стальными волокнами малого диаметра 0,3 мм увеличивает напряжения трещинообразования в большей степени, чем волокна большего диаметра.

Для конструкций, к которым предъявляются повышенные требования по трещиностойкости и вязкости разрушения, рекомендуется применять фибру диаметром 0,3–0,5 мм [54]. Согласно исследованиям Курбатова Л.Г. и Рабиновича Ф.Н. при армировании бетона стальными фибрами  $l = 25$  мм,  $d =$

0,3 мм и  $\mu = 2\%$  по объему, момент трещинообразования увеличивается в 1,25 раза по сравнению с бетоном, армированным волокнами  $l = 120$  мм,  $d = 1,2$  мм.

Объясняя механизм большего повышения трещиностойкости при уменьшении диаметра фибр, Рабинович Ф.Н. [106] приходит к выводу, что это происходит за счет существенного снижения податливости волокон в момент возникновения трещины в бетоне в связи с увеличением их количества на единицу площади расчетного сечения. Фибра с высоким модулем упругости, малого диаметра оказывает большее влияние на начальную ширину раскрытия трещин. Так в работе [53] установлено, что для фибр диаметром 0,3 мм трещины в момент их образования носили характер местных разрывов шириной 1,5 - 3 мкм и длиной 1 - 3 мкм. В случае же использования фибр диаметром 0,9 мм сразу образовались трещины шириной 7 - 10 мкм.

Известно, что высокомодульные неметаллические волокна, например, углеродные, тоже повышают трещиностойкость фибробетона [70, 73].

В работе [65], посвященной полиармированному фибробетону, так же наблюдается повышение трещиностойкости в зависимости от применения разных комбинаций фибр. Например, при одновременном использовании сразу трех видов высокомодульной фибры (стальной проволоки диаметром 1,1 мм и 0,3 мм, и синтетических высокомодульных волокон диаметром 0,08 мм) путем варьирования их количества при одинаковом общем содержании в смеси, равном 3,5% по объему, удается повысить показатель трещиностойкости мелкозернистого фибробетона на 33%, с 14,1 МПа до 18,8 МПа.

При исследовании вязкости разрушения дисперсно армированных бетонов в ряде случаев целесообразно использовать закономерности механики разрушения, позволяющей изучить характер и условия распространения трещин. Возникает необходимость определения энергетических и силовых характеристик разрушения фибробетона, с

помощью которых можно судить о трещиностойкости композита. Критический коэффициент интенсивности напряжений (ККИН)  $K_c$  – это коэффициент характеризующий поле напряжений у вершин трещины. Когда напряжения и деформации при вершине трещины достигают критических значений, происходит расширение трещины. Коэффициентом интенсивности напряжений определяет то, что происходит внутри зоны пластичности, а следовательно этот коэффициент есть мера трещиностойкости материала.

В работе [27, 33] в ходе испытаний производилось ступенчатое нагружение образцов с фиксацией вертикальных перемещений. По результатам испытаний была установлена нагрузка трещинообразования и критический коэффициент интенсивности напряжений. При этом было достигнуто увеличение воспринимаемых напряжений до момента трещинообразования в 2-3 раза для стальной фибры и в 1,5-2 раза для полипропиленовой фибры, что так же было подтверждено в работе [12, 19, 113]. Полученные значения ККИН фибробетонов различных составов показали, что при увеличении количества стальной фибры, увеличивается и коэффициент интенсивности напряжений.

В работе [72] утверждается, что при увеличении количества синтетической низко модульной фибры, уменьшается коэффициент интенсивности напряжений. Однако при увеличении длины синтетического волокна – ККИН увеличивается.

В статье [33, 89] представлены результаты экспериментальных исследований по определению величин ККИН для образцов, изготовленных из фибробетона на основе стальной и полимерной фибры, которые почти полностью подтвердили приведенные выше результаты.

Эти и другие работы [1, 69, 85], посвященные определению коэффициента интенсивности напряжений, производились применительно к моноармированным фибробетонам, и подобных результатов исследований для полиармированных образцов не обнаружено.

То, что длина фибры влияет на вязкость разрушения композита, подтверждено и в работе [91]. Результаты исследований, посвященных вязкости разрушения фибробетонов с высокомодульными волокнами, показали, что для создания композиционного материала с высокой вязкостью, даже в случаях, когда волокна и матрица по своей природе хрупкие, необходимо выполнять армирование волокнами таких размеров, при которых они вытягиваются из матрицы в процессе трещинообразования. Показано, что для увеличения энергии по вытягиванию необходимо стремиться к увеличению длины волокна. Исходя из этого установлено, что отношение длины волокна к его диаметру ( $l/d$ ) оказывает сильное влияние на вязкость композита.

Известно, что фибровое армирование позволяет добиться увеличения энергии разрушения. Так в одной из работ, при использовании стальной фибры «Dramix» ( $d = 0,75$  мм,  $l = 60$  мм) в количестве 2,5% по объему, была построена диаграмма зависимости «нагрузка - относительная деформация» и с ее помощью рассчитана энергия, затраченная на разрушение образцов, которая оказалась в 137 раз больше, чем у обычного бетона [26].

### 1.3.3 Ударостойкость

По данным, приведенным в отечественной и иностранной литературе [2, 9, 10, 17, 97, 103], установлено, что с помощью дисперсного армирования, независимо от вида применяемого волокна, можно добиться повышения ударостойкости бетона в несколько раз. Это связано с тем, что еще на стадии структурообразования происходит перераспределение напряжений при пластической усадке от наиболее опасных зон ко всему объему бетона, а непосредственно при нагружении – торможение роста трещин фибрами со снижением концентрации напряжений. Так же отмечается, что степень повышения сопротивления ударным воздействиям зависит от

геометрических характеристик используемой фибры, процента армирования, а так же от технологии изготовления конструкции [55].

А.В.Парфенов в [83] указывает, что отличительной особенностью ударных нагрузок является кратковременность их действия, составляющая  $10^{-2}$  -  $10^{-5}$  с. В целях упорядочения испытаний ударостойкости как правило выделяют обычные и высокоскоростные ударные воздействия. Действие обычных ударных нагрузок происходит за  $10^{-2}$  -  $10^{-3}$  с со скоростью до 5 м/с, что соответствует свободному падению груза с высоты 1 - 3 м, скорость же возрастания напряжений при этом составляет  $10^2$  -  $10^3$  МПа/с. Высокоскоростная ударная нагрузка действует в течение  $10^{-4}$  -  $10^{-5}$  с со скоростью 10-15 м/с и более, напряжения возрастают со скоростью  $10^5$  МПа/с и выше.

Установлено [66, 104], что при объемном армировании, равном 1-3%, применение низко модульного синтетического волокна обеспечивает получение материала, который по ударостойкости не уступает материалу, армированному стальной фиброй. Это связано с тем, что при быстром приложении нагрузки энергия, необходимая для разрушения дисперсно армированного бетона после образования в нем трещины, должна затрачиваться на выдергивание волокон из бетонной матрицы. То есть, когда время действия нагрузки очень мало, нужно за короткий срок произвести большую работу, чтобы обеспечить выдергивание большой массы тонкого и пластического волокна из бетона. Именно с этим связано высокое сопротивление бетона, армированного синтетической фиброй, воздействиям ударных нагрузок.

Однако при повышении содержания фибры до 5-10%, модуль упругости волокна становится определяющим фактором для обеспечения высокой ударной стойкости фибробетона. Существует мнение [97], что высокий процент армирования не является единственным условием для повышения ударостойкости фибробетона и большее значение для этого показателя имеет расстояние между геометрическими центрами фибр в

матрице. При этом между показателем эффективности дисперсного армирования и расстоянием между фибрами ( $S$ ) существует зависимость [74]:

$$K_{эф} = AS^{\frac{1}{n}} \quad (1.4)$$

где:  $A$  и  $n$  – константы, зависящие от вида и свойств, применяемой фибры.

В работе [101] приведены данные, которые показывают повышение ударостойкости бетона более чем в 3 раза за счет введение 2% стальной фибры. Интересными выглядят результаты, приведенные в работе [67], из которых следует, что ударостойкость фибробетона с капроновыми волокнами в 1,15 раза выше, чем у фибробетона со стальной фиброй, и в 3,5 раза выше, чем у неармированного бетона.

В работе [83] установлено, что оптимальным по показателю ударной выносливости для металлической фибры является концентрация 1,5% от объема бетонной смеси, для полипропиленовой – 1%. Повышение ударостойкости композита при содержании фибры до 0,5% по объему незначительно, что подтверждается и теоретическими оценками минимального уровня концентрации фибры, необходимого для создания упорядоченной объемно- связанной структуры фибробетона.

В работе [24] утверждается, что стеклофибробетон, в сравнение с неармированным бетоном, может иметь ударную вязкость разрушения больше в 15-20 раз.

Установлено, что так же как и в случае с прочностью, полидисперсное армирование играет положительную роль в обеспечении высокой ударной прочности фибробетона. Например, для конструкций, к которым предъявляются повышенные требования по ударостойкости, помимо высокомодульных волокон, количество которых определяется по расчету прочности, необходимо применять и низко модульные микроволокна, которые, помимо повышения ударной вязкости фибробетона, позволят понизить расход дорогой высокомодульной фибры. Например, в работе [100] экспериментально доказано, что наличие низко модульных волокон

позволяет, изменяя общий процент армирования ( $\mu_0$ ) и процентную долю волокна в композите ( $n$ ), регулировать показатели ударостойкости фибробетона. В зарубежных и отечественных источниках также рекомендуют использовать с этой целью комбинацию синтетических и стеклянных видов фибр [13, 103].

#### 1.3.4 Модуль упругости и коэффициент Пуассона

Несмотря на то, что область применения фибробетона в значительной степени зависит от его упругих свойств, деформативные характеристики фибробетона, в отличие от прочностных, изучены не столь подробно [45, 79, 107, 116, 117]. Более того, как показал литературный обзор, результаты исследований довольно противоречивы и порой имеют значительный разброс значений определяемых характеристик. Так, в одних работах исследователи настаивают на том, что введение волокна крайне незначительно влияет на модуль упругости (деформации) бетона [15, 60, 77], а в других – утверждают об увеличении модуля упругости вплоть до 50% [45]. Например, Смирнов Д.А. в своей работе [110] приходит к выводу о том, что за счет дисперсного армирования, при объемном содержании фибр до 8%, можно добиться увеличения модуля упругости от 3% до 54%. При этом, важным условием для заметного повышения влияния фибр на модуль упругости фибробетона, является обеспечение полного сцепления фибр с бетонной матрицей.

Установлено [115], что при нагружении конструкций до исчерпания их несущей способности, при условии полного сцепления фибры с бетоном, модуль упругости фибробетона меняется незначительно за счет разгрузки фибр, перераспределения деформаций и напряжений между бетоном и армирующим волокном. Это значит, что при любом уровне нагрузок можно иметь дело только с начальным значением модуля упругости композита.

В работах Леоновича И.А. [58, 59] говорится об уменьшении модуля упругости бетона в случае применения синтетического полиакрилового и полипропиленового волокна.

Опубликованных исследований, касающихся коэффициента Пуассона, совсем немного, как правило, они носят теоретический характер, и совершенно не подкреплены экспериментально. Чаще всего специалисты сходятся во мнении, что фибровое армирование вовсе не влияет или влияет незначительно на коэффициент Пуассона и при проектировании конструкций из фибробетона рекомендуют принимать его значение равным значению коэффициента исходного бетона [115].

Известно, что модуль упругости полиармированных фибробетонов линейно возрастает, а коэффициент Пуассона линейно понижается с увеличением содержания в композите высокомодульного волокна от значений, свойственных композиту с низкоимодульной фиброй до значений, характерных для высокоимодульного материала [25]. Голанцевым В.А. экспериментально подтверждена возможность использования «правила смесей» при определении модуля упругости и коэффициента Пуассона для полиармированного фибробетона:

$$E_{x_1+x_2} = E_m V_m + E_{a_1} V_{a_1} + E_{a_2} V_{a_2} \quad (1.5)$$

$$\nu_{x_1+x_2} = \nu_m V_m + \nu_{a_1} V_{a_1} + \nu_{a_2} V_{a_2} \quad (1.6)$$

где:  $E_m, \nu_m$  – модуль упругости и коэффициент Пуассона матрицы;  $E_a, \nu_a$  – модуль упругости и коэффициент Пуассона волокон в полиармированном фибробетоне;  $V_m, V_a$  – объемная доля матрицы и волокон.

В ряде отечественных и зарубежных источников [6, 29] утверждается, что при использовании фибр разного диаметра и длины, мелкие волокна располагаются в пространстве между волокнами больших размеров, тем самым увеличивая степень наполнения композита, и, соответственно, повышая модуль упругости фибробетона. Таким образом, при оптимальном сочетании разных фибр можно достигнуть преимущества в удельных

показателях модуля упругости по сравнению с моноармированным материалом.

В одной из работ [25] автор приходит к выводу о том, что в зависимости от содержания низко модульных волокон упругопластические свойства полиармированного фибробетона различны. Так, при комбинировании стальных и капроновых волокон в разных соотношениях в пределах общего процента армирования 0,81...2,03% по объему, модуль упругости отличался на 11%, а коэффициент Пуассона более, чем в 2 раза. К подобному выводу приходит и автор данной работы [100], экспериментально показывая, что наличие низко модульных волокон позволяет, изменяя общий процент армирования ( $\mu_0$ ) и процентную долю волокна в композите ( $n$ ), управлять упругопластическими свойствами фибробетона.

#### **1.4 Полидисперсное армирование как способ дальнейшего улучшения свойств и повышения эффективности фибробетонов**

Фибробетоны являются наиболее яркими представителями в ряду строительных композитов, в которых собраны воедино лучшие качества исходных составляющих – армирующих волокон и бетона.

Приведенные выше данные убедительно показывают преимущества фиброармированных бетонов перед их аналогами без волокон, а использование дисперсной арматуры наряду со стержневой в составе железобетонных конструкций приводит к качественным изменениям в характере их поведения под нагрузкой.

Степень всех этих положительных изменений свойств материала и характеристик конструкций на его основе главным образом определяется видом и свойствами используемых волокон и бетона, соотношением и степенью взаимодействия между ними. Таким образом, тесная взаимосвязь армирующих волокон с бетонной матрицей, кроме ее собственной активности, обеспечивается протяженностью поверхностей раздела, которая,

в свою очередь, зависит от степени насыщения бетона волокнами, их геометрических характеристик и поверхностной энергии.

Учитывая это, логично предположить, что наибольших положительных эффектов в плане улучшения структуры и свойств фибробетонов можно добиться в результате полиармирования при оптимальном сочетании двух и более видов фибр разного состава, с различными размерами, прочностными и упруго-пластическими характеристиками.

Целью полиармирования является создание такого материала, который сохраняя и преумножая достигнутые преимущества, исключал бы недостатки композита, имеющие место в варианте моноармирования.

Таким образом, преимуществами полиармирования являются:

- получение композита имеющего большую прочность, чем при моноармировании;
- целенаправленное регулирование комплекса физико-механических свойств композита в более широких пределах, чем при моноармировании;
- возможность улучшения показателей долговечности и эксплуатационных характеристик композита.

Проделанный литературный обзор показал, что использование полидисперсного армирования для управления свойствами композиционных материалов, а так же влияния упругопластических, геометрических параметров волокон и прочности их сцепления с бетонной матрицей композита на свойства фибробетонов, позволяет сделать вывод о перспективности использования полиармирования [43, 94, 95].

По мнению Голанцева В.А. [25], принцип полидисперсного армирования основан на том, что применяемая для этого фибра, различных геометрических параметров, обеспечивает формирование пространственных ячеек на разных уровнях структуры бетона. Более крупные ячейки накладываются на более мелкие, тогда как размеры структурных ячеек каждого уровня зависят от параметров армирования. Таким образом, волокна

малых диаметров будут находиться в стесненных условиях более крупных ячеек, а фибра большего диаметра размещена в матрице композита, имеющей микроармирование. В этом случае микроволокна препятствуют развитию микродефектов на стадии трещинообразования, находясь в контактной зоне волокон большего диаметра, и снижают концентрацию напряжений, тем самым способствуя их перераспределению на больший объем бетона. В данном варианте происходит увеличение прочности сцепления волокон большего диаметра с матрицей, что в итоге и позволяет добиться повышения прочности композита.

Однако, со временем, после множества проведенных экспериментальных и теоретических исследований, такой подход к структурообразованию фибробетона стал неактуальным, так как он носит чисто теоретический характер и поэтому дает весьма идеализированное представление о структуре фибробетона, которое базируется на классических законах композиционных материалов, но при этом не учитывает важную структурообразующую роль и своеобразие бетонной матрицы, а так же практически не затрагивает роль контактной зоны на границе раздела фаз «волокно-матрица», состояние которой во многом определяет важнейшие характеристики дисперсно армированных бетонов.

Ю.В. Пухаренко сформулирована новая концепция [90], которая заключается в том, что на каждом структурном уровне фибробетона можно выделить две фазы, взаимодействующие между собой по поверхности раздела через зону контакта на всех стадиях структурообразования и последующей работы материала:

- дисперсная фаза, представляющая совокупность отрезков фибр заданного размера;
- дисперсионная среда – матрица, в которой происходят значительные изменения в процессе формирования структуры и свойств композита.

Термодинамически структура дисперсно армированного бетона формируется за счет стремления фаз к равновесию путем снижения их внутренней поверхностной энергии. При этом, как показали сравнительные испытания кинетики нарастания пластической прочности бетонов с волокнами и без них, опережающим является процесс образования структурных агрегатов, которые представляют собой систему, состоящую из волокна, окруженного плотным и прочным слоем цементных новообразований. Высокая энергия взаимосвязи частиц внутри системы позволяет считать такие агрегаты самостоятельными элементами структуры, которые контактируют с дисперсионной средой через поверхность раздела фаз. При этом взаимонезависимое расположение этих элементов может сохраняться лишь до некоторой критической концентрации армирующих волокон. При увеличении процента армирования или геометрического фактора происходит их сближение с конечным образованием фиброцементного каркаса с замоноличиванием в местах контакта и заполнением полученных ячеек материалом матрицы меньшей плотности и прочности. Характеристики дисперсно армированного бетона определяются степенью анизотропности фиброцементного каркаса, объемной концентрацией фаз и энергией взаимодействия, а так же протяженностью внутренних поверхностей раздела, что в свою очередь зависит от вида и дисперсности исходных компонентов, состава дисперсно армированного бетона и технологии изготовления изделий.

В соответствии с этим, вопросы полидисперсного армирования фибробетонов приобретают особую актуальность, тем более, что имеющейся информации очень мало, и требуются дальнейшие исследования в рамках обозначенной проблемы. Тем более, что появляются новые виды фибр с принципиально новыми характеристиками структуры и свойств, например, аморфнометаллическая.

## **1.5 Перспективы и особенности применения аморфнометаллической фибры при полиармировании фибробетонов**

### **1.5.1 Эффективность аморфнометаллической фибры при моноармировании бетона**

Аморфнометаллические сплавы – это конденсированные среды, для которых характерно неупорядоченное расположение атомов в пространстве. Раньше понятие «металлы» связывали исключительно с понятием «кристалл», атомы которого расположены строго упорядоченно, позже были получены металлические сплавы, которые не имеют кристаллической структуры, их стали называть аморфными металлическими стеклами. Ученые, изучающие аморфные металлы, выяснили, что по своим свойствам они сильно отличаются от металлических кристаллов с упорядоченным расположением атомов.

Известно [34], что атомы расплавленного металла не имеют фиксированного положения в пространстве, поэтому возникла идея «заморозить», путем очень быстрого охлаждения, беспорядочное расположение атомов, которое скорее характерно для жидкости. Долгое время структуру жидкого металла не удавалось воспроизвести в твердом состоянии. Проблема была в том, что в процессе охлаждения атомы успевали перестроиться, образовав кристалл, однако удалось выяснить, что при охлаждении металлического расплава процесс кристаллизации можно предотвратить путем охлаждения его со скоростью  $10^6 - 10^8$  К/с. При этом кристаллизации не происходит, так как за столь короткое время атомы не успевают переместиться на расстояние, позволяющее им сформировать кристаллическую решетку.

Таким образом, в последние годы появилась и получает распространение фибра из аморфнометаллического сплава на железной основе системы Fe-C-P-Si (рисунок 1.1). Расплавленный металл с

различными легирующими добавками выливается на охлаждаемую подложку и отверждается, не успевая приобрести упорядоченную кристаллическую решетку.

Аморфная металлическая фибра представляет собой отрезки лент определенной длины, толщиной 0,03 мм и шириной 3 мм. По меньшей мере, на одной из поверхностей ленты сформирован микрорельеф в виде поперечных выступов и впадин, расположенных перпендикулярно под углом или под разными углами к продольной оси, либо в виде точечных выступов и углублений на поверхности. Формирование указанного рельефа производится в процессе разлива расплава на охлаждаемый барабан, на поверхности которого предварительно поперечным шлифованием, нарезкой борозд, накаткой, химическим травлением или иным способом, сформирован микрорельеф.



Рисунок 1.1 – Аморфнометаллическая фибра

Предварительный литературный обзор показал, что в случае применения аморфной металлической фибры, в качестве дисперсного армирования бетонов, можно достигнуть некоторых положительных

результатов. Так, в работе [114] была доказана эффективность армирования цементного бетона аморфнометаллическим волокном. По результатам полученных данных были сделаны следующие выводы:

- минимальное насыщение бетона волокнами, после которого наблюдается увеличение его прочности и трещиностойкости, составляет 0,5% по объему;
- прочность на растяжение при изгибе бетона, армированного фиброй из аморфного металла, может повышаться более, чем в 2 раза при концентрации до 1,5% по объему, что выше, чем у фибробетонов на стальной фибре;
- аморфнометаллическое волокно, за счет своей удельной поверхности, обладает хорошим сцеплением с матрицей композита, что позволяет добиться значительного повышения прочности на растяжение при изгибе.

Однако, как показали исследования Жаворонкова М.И. [31], у данного вида фибры есть и серьезные недостатки. Бетон, армированный аморфнометаллической фиброй, имеет признаки хрупкого разрушения.

Таким образом, аморфная металлическая фибра в значительной степени повышает прочность бетона, однако требуется разработка мероприятий по борьбе с высокой хрупкостью его разрушения.

### **1.5.2 Возможные варианты сочетания аморфнометаллической фибры с другими видами армирующих волокон**

Для определения границ, цели и задач диссертационного исследования были проведены предварительные эксперименты, в результате которых установлены принципиальная возможность и эффективность сочетания аморфнометаллической фибры с другими известными видами армирующих волокон и наиболее перспективные комбинации. В плане поставленной задачи были изготовлены фибробетонные образцы, армированные:

- аморфнометаллической и стальной проволочной фиброй (рисунок 1.2);
- аморфнометаллической и макросинтетической фиброй (рисунок 1.3);
- аморфнометаллической и полипропиленовой фиброй (рисунок 1.4).



Рисунок 1.2 – Стальная фибра



Рисунок 1.3 – Макросинтетическая фибра



Рисунок 1.4 – Полипропиленовая фибра

В качестве матрицы для получения фибробетонных образцов использовался мелкозернистый бетон. Все образцы имели одинаковый состав матрицы: Ц:П = 1:2 при В:Ц = 0,32 и расходе добавки суперпластификатора 0,7 % от массы цемента.

Варианты полиармирования бетона и прочностные характеристики опытных образцов приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Прочностные характеристики полиармированных фибробетонов

Вид комбинации волокон	Объемное содержание волокон, $\mu$ , %	Призменная прочность, $R_{np}$ , МПа	Прочность на растяжение при изгибе, $R_{изг}$ , МПа
Аморфнометаллическая/ стальная	0,5/ 0,5	51,1	14,78
	1,0/ 0,5	56,3	17,61
	1,0/ 1,0	60,4	21,55
Аморфнометаллическая/ макросинтетическая	0,5/ 0,5	46,1	9,94
	1,0/ 0,5	50,9	15,04
	1,0/ 1,0	51,6	15,84
Аморфнометаллическая/ полипропиленовая	0,5/ 0,5	45,6	9,54
	1,0/ 0,5	48,9	13,56
	1,0/ 1,0	47,3	13,84

Предварительные исследования показали, что наибольшего эффекта можно добиться, используя аморфнометаллическую фибру в комбинации со стальной. На рисунке 1.5 представлена гистограмма прочности на растяжение при изгибе фибробетонных образцов, армированных аморфной металлической фиброй в комбинации с другими видами волокон, из которой видно, что наилучший результат достигнут при использовании в комбинации двух видов высокомодульных волокон.

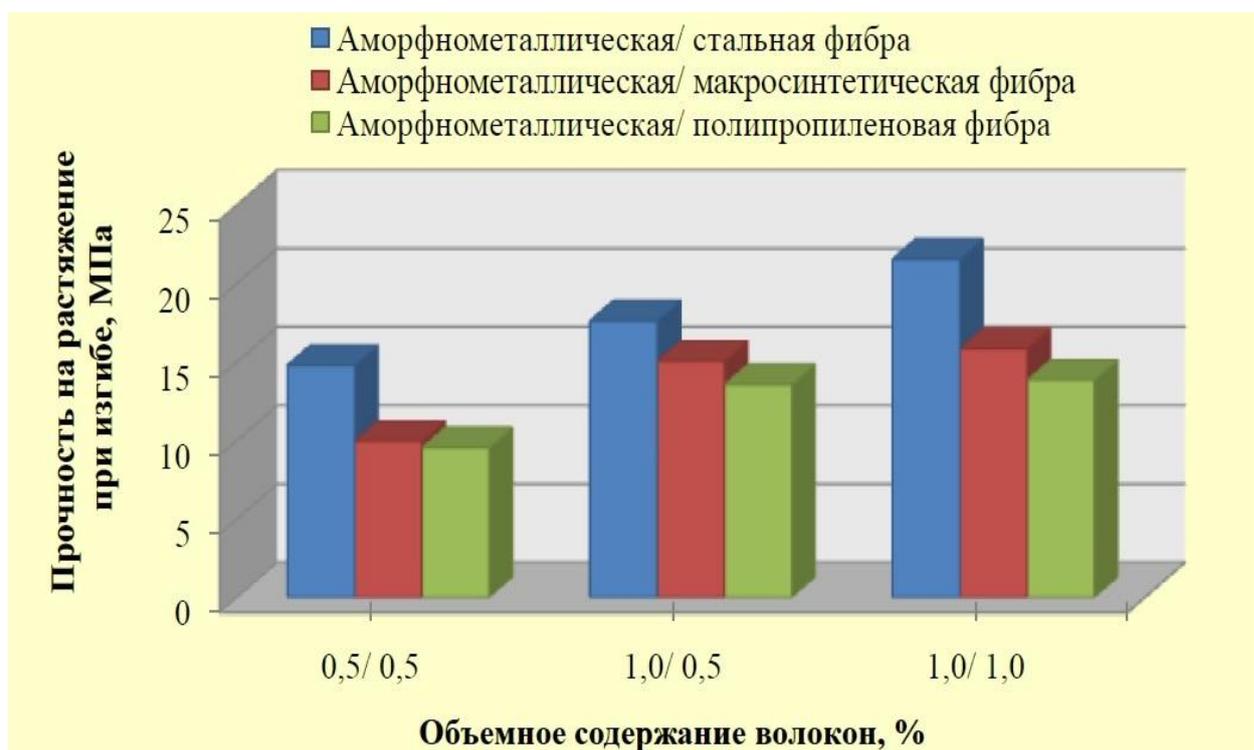


Рисунок 1.5 – Зависимость прочности на растяжение при изгибе от вида и содержания волокон

Исходя из полученного результата, в дальнейшем при проведении диссертационного исследования рассматривался вариант полиармирования бетона в виде комбинации стальной и аморфнометаллической высокомодульной фибры.

Эффективность дисперсного армирования и степень использования потенциальных возможностей фибры во многом зависят от ее взаимодействия с бетонной матрицей по границе раздела фаз. Именно прочность сцепления определяет характер разрушения фибробетона, которое может происходить в результате разрыва волокон при максимальных

напряжениях или вытягивания их из матрицы после нарушения с ней связи. Величина сцепления, в свою очередь, зависит от площади боковой поверхности фибры, контактирующей с цементным камнем в бетоне, и значит от ее формы и размеров.

В таблице 1.2 представлены характеристики применяемых армирующих волокон, позволяющие определить критическую длину фибр, при которой в процессе разрушения фибробетонных образцов происходит их разрыв.

Таблица 1.2 – Характеристики армирующих волокон

Вид фибры	Эквивалентный диаметр, $d$ , мм	Длина, $l$ , мм	Плотность материала, $\rho$ , г/см <sup>3</sup>
Стальная	0,3	22	7,8
Аморфнометаллическая	0,3	30	7,8

Из условия равновесия внутренних и внешних сил

$$\sigma_{\phi} \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\tau_{\text{сц}} \pi \cdot d_{\phi} \ell_{\text{кр}}}{2} \quad (1.7)$$

критическая длина фибры составляет:

$$\ell_{\text{кр}} = \sigma_{\phi} \frac{d_{\phi}}{2\tau_{\text{сц}}} \quad (1.8)$$

где:  $\sigma_{\phi}$  – нормальные напряжения в волокнах;  $d_{\phi}$  – диаметр волокон;  $\tau_{\text{сц}}$  – сцепление волокон с бетонной матрицей композита.

Тогда, по формуле (1.8), критическая длина стальной фибры при  $d = 0,3$  мм,  $\sigma_{\text{ст.ф.}} = 540$  МПа,  $\tau_{\text{сц}} = \varphi\tau = 2,5$  [90], составит:

$$\ell_{\text{ст.кр.}} = \frac{540 \cdot 0,3}{2 \cdot 2,5} = 32,4 \text{ мм}$$

Боковая поверхность, контактирующая с цементным камнем и обеспечивающая, таким образом, определяющую величину сцепления на границе раздела фаз, может оцениваться:

- для стальной фибры длиной окружности:

$$\pi d = 3,14 \cdot 0,3 = 0,942 \text{ мм}$$

- для аморфнометаллической фибры длиной периметра:

$$2 \cdot (h+b) = 2 \cdot (0,03 + 3) = 6,06 \text{ мм}$$

Таким образом, при эквивалентном диаметре, боковая поверхность аморфнометаллической фибры в 6,4 раза превышает боковую поверхность стальной фибры из проволоки.

При таких условиях критическая длина аморфнометаллической фибры при  $d_{\phi}^{\text{экв}} = 0,3$  мм составляет:

$$\ell_{\text{ам.кр.}} = \frac{(540 \dots 1620) \cdot 0,3}{2 \cdot 2,5 \cdot 6,4} = (5 \dots 15) \text{ мм}$$

Следовательно, при длине стальной фибры, составляющей 22 мм, происходит ее вытягивание из бетонной матрицы композита. Разрушение фибробетона, армированного аморфной металлической фиброй, даже при условии увеличения ее собственной прочности в 2-3 раза происходит в результате разрыва волокон.

### **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) При всех преимуществах бетона он имеет ряд серьезных недостатков, основными из которых являются низкая прочность на растяжение и трещиностойкость, что является причиной хрупкого разрушения конструкций под нагрузкой;

2) Улучшению прочностных, деформативных и энергетических характеристик бетона способствует дисперсное армирование волокнами различной природы и типоразмеров. При этом, особенно эффективно армирование одновременно несколькими видами волокон (полиармирование), которое позволяет управлять комплексом необходимых характеристик в одном композите. Однако, вопросы полиармирования

фибробетонов к настоящему времени изучены недостаточно, а имеющаяся информация порой свидетельствует о противоречивости получаемых результатов исследований;

3) В результате анализа имеющихся данных, проведения собственных экспериментов и предварительных расчетов теоретически обоснована эффективность использования аморфнометаллической фибры в составе полидисперсного армирования фибробетона;

4) На основе сформулированной рабочей гипотезы определены цель и задачи диссертационного исследования.

## 2. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

### 2.1 Используемые сырьевые материалы и применяемое оборудование

#### 2.1.1 Используемые сырьевые материалы

При выполнении экспериментальных исследований использовались следующие материалы:

- Портландцемент

При проведении исследований был использован портландцемент бездобавочный марки ПЦ 500 Д0 производства ОАО «Осколцемент» (г. Старый Оскол). В таблице 2.1 представлены некоторые характеристики использованного портландцемента, такие как тонкость помола, нормальная густота и сроки схватывания цементного теста, предел прочности при изгибе и сжатии в возрасте 7 и 28 суток; в таблице 2.2 приведены химический и минералогический состав портландцемента.

Таблица 2.1 – Характеристики портландцемента

Портландцемент ПЦ 500 Д0 производства ОАО «Осколцемент»	Тонкость помола, по удельной поверхности, см <sup>2</sup> /г	Нормальная густота цементного теста, %	Сроки схватывания цементного теста, мин.	Предел прочности при изгибе, МПа (в возрасте 7 суток)	Предел прочности при сжатии, МПа (в возрасте 7 суток)	Предел прочности при изгибе, МПа (в возрасте 28 суток)	Предел прочности при сжатии, МПа (в возрасте 28 суток)
Методика исследования	ГОСТ 310.2-1976	ГОСТ 310.3-1976	ГОСТ 30744-2001	ГОСТ 30744-2001	ГОСТ 30744-2001	ГОСТ 30744-2001	ГОСТ 30744-2001
Результат исследования	2964,2	28,6	н.с. 146 к.с. 244	6,04	26,83	8,12	52,48

Таблица 2.2 – Минералогический и химический состав портландцемента

Марка цемента	Минералогический состав, %				Химический состав, %					
	C <sub>3</sub> S	C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> A	C <sub>4</sub> AF	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O+K <sub>2</sub> O	CaO	SiO <sub>2</sub>	ппп
ПЦ 500 Д0	68,8	10,3	8,9	11,3	0,9	2,34	0,75	50,1	14,0	3,56

- Заполнитель

Кварцевый песок с модулем крупности  $M_{кр} = 2,34$  по ГОСТ 8736-93 «Песок для строительных работ». Гранулометрический состав представлен в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Гранулометрический состав песка

Остатки на ситах	диаметр сит, %						Модуль крупности $M_{кр}$
	2,5	1,25	0,63	0,315	0,14	< 0,14	
Частные	6,2	6,8	32,7	30,1	17,1	7,1	2,34
Полные	6,2	13,0	45,7	75,8	92,9	100	

Характеристики плотности кварцевого песка:

- Насыпная плотность заполнителя, высушенного до постоянной массы, составила  $\rho_n = 1650 \text{ кг/м}^3$ ;
- Истинная плотность заполнителя составила  $\rho_u = 2650 \text{ кг/м}^3$ ;
- Насыпная плотность в уплотненном состоянии, то есть поведение данного вида заполнителя при вибрации, а также эффективность принятого способа формования, составляющей при использовании лабораторной виброплощадки  $\rho_{уп} = 2000 \text{ кг/м}^3$ .

- Дисперсная арматура

Для дисперсного армирования бетонов применялась:

1. Фибра стальная волнового профиля из проволоки (рисунок 2.1);
2. Фибра металлическая аморфная «Химмет» (рисунок 2.2).

Параметры армирующих волокон представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4 – Геометрические и физические параметры применяемой фибры

Вид фибры	Эквивалентный диаметр, $d_{экв}$ , мм	Длина, $l$ , мм	Боковая поверхность, мм	Плотность материала, $\rho$ , г/см <sup>3</sup>
Стальная из проволоки	0,3	22	0,94	7,8
Аморфная металлическая	0,3	30	6,06	7,8



Рисунок 2.1 –  
Стальная фибра



Рисунок 2.2 –  
Аморфнометаллическая  
фибра

- Суперпластификатор

Для регулирования подвижности бетонных смесей использовался суперпластификатор Schomburg Remicrete SP-10 (FM) – это высокоэффективный пластификатор на основе полиэфиркарбоксилата, который, воздействуя на процессы гидратации, способствует ускоренному раннему и конечному набору прочности. Технические характеристики суперпластификатора приведены в таблице 2.5.

Таблица 2.5 – Технические характеристики суперпластификатора

Суперпластификатор Schomburg Remicrete SP-10 (FM)	Сырьевая основа	Цвет	Физическое состояние	Плотность $\rho$ , г/см <sup>3</sup>
	полиэфиркарбоксилат	светло- желтый	жидкость	1,1

### 2.1.2 Применяемое оборудование

В ходе экспериментальной части диссертационного исследования применялось следующее испытательное оборудование:

- Бетоносмеситель лабораторный БЛ-10, принудительного действия, предназначен для приготовления бетонов. Технические характеристики бетоносмесителя БЛ-10 приведены в таблице 2.6.

Таблица 2.6 – Технические характеристики бетоносмесителя

Наименование показателей	Ед. измерения	Значение
Геометрический объем	л	23
Объем готового замеса бетонной смеси	л	10
Число оборотов активатора	об/мин	47
Время перемешивания	с	40-60
Габариты ( <i>lxbxh</i> )	мм	410x410x450

- Виброплощадка лабораторная «Matest», модель С282, предназначена для уплотнения бетонных образцов по ГОСТ 10180-2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам». Частота вибрации 3000 кол/мин, габариты 400\*300\*200 мм.

- Камера пропарочная КУП-1А, предназначена для тепловлажностной обработки бетона по ГОСТ 22783-77 «Бетоны. Метод ускоренного определения прочности на сжатие».

- Пресс испытательный двухдиапазонный «Matest», модель С040PN132 с электронным силоизмерителем «CYBER-PLUS EVOLUTION», предназначен для испытаний бетонных образцов на прочность при сжатии по ГОСТ 10180-2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам». Технические данные приведены в таблице 2.7.

Таблица 2.7 – Технические характеристики испытательного прессы

Предел нагружения	1500/250 кН
Класс точности	1
Габариты	630*350*1260 мм
Скорость перемещения поршня	0...52 мм/мин

- Пресс универсальный для сжатия/растяжения «Matest», позволяющий производить испытания в соответствии с требованиями ГОСТ 29167-91 «Бетоны. Методы определения характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении». В ходе испытаний существует возможность построения диаграммы зависимости прогибов

образца от прилагаемых нагрузок. Технические данные разрывной машины приведены в таблице 2.8.

Таблица 2.8 – Технические характеристики разрывной машины

Макс. сжимающая нагрузка	1500 кН
Макс. сжимающая нагрузка	500 кН
Габариты	470*410*1875 мм

## 2.2 Технология изготовления образцов

В качестве матрицы для получения фибробетонных образцов использовался мелкозернистый бетон, который позволяет обеспечить высокую степень насыщения волокнами и высокую дисперсность армирования [32].

Все образцы, изготовленные в ходе исследований, имели одинаковый состав матрицы: Ц:П = 1:2 при В:Ц = 0,32 и расходе добавки суперпластификатора 0,7 % от массы цемента.

Приготовление фибробетонных смесей осуществлялось в лабораторном бетоносмесителе принудительного действия БЛ-10 при следующей очередности загрузки компонентов: песок, портландцемент и вода с растворенной в ней добавкой суперпластификатора. По готовности цементно-песчаного раствора в него вводилась фибра, и перемешивание продолжалось до обеспечения равномерного распределения фибры по всему объему замеса.

Для уплотнения смесей в процессе формирования образцов применялась стандартная виброплощадка; время вибрирования, в зависимости от вида и количества вводимой фибры, составляло 30...90 секунд.

Как известно, процесс твердения фибробетонных образцов является одним из самых ответственных технологических этапов, именно в этот период формируется структура цементного камня, поэтому при благоприятных условиях твердения создаются предпосылки для получения фибробетона с высокими прочностными, деформативными и

энергетическими характеристиками. Тепловлажностная обработка осуществлялась в пропарочной камере при температуре изотермической выдержки 80°С, по следующему режиму:

- подъем температуры – 3 часа;
- изотермическая выдержка – 6 часов;
- охлаждение в закрытой камере – 15 часов.

После чего образцы выдерживались в естественно-воздушных условиях в течение 14 суток.

### **2.3 Методики испытаний образцов**

В ходе выполнения диссертационной работы использовались стандартные методы испытаний и исследований сырьевых материалов и изделий на их основе.

Производились испытания прочности образцов на растяжение при изгибе в соответствии с ГОСТ 10180-2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам».

Для определения энергетических и силовых параметров использовался ГОСТ 29167-1991 «Методы определения характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении».

Определение модуля упругости и призмочной прочности производилось в соответствии с требованиями ГОСТ 24452-80 «Бетоны. Методы определения призмочной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона».

#### **2.3.1 Метод определения трещиностойкости и вязкости разрушения фибробетона при статическом нагружении**

Проблемы определения вязкости разрушения фибробетонных конструкций рекомендуется решать методами механики разрушения.

Основной задачей механики разрушения является исследование закономерностей зарождения и развития трещин.

Существует классический (рисунок 2.3, а) и неклассический (рисунок 2.3, б) подход оценки прочности материала. Классический подход [76] был сформулирован в начале 20 века и заключается в том, что расчётной моделью реального твёрдого тела служит сплошная среда с заданными реологическими свойствами, а элемент деформируемого тела находится в одном из таких состояний: сплошном ( $C$  - состояние) или разрушенном ( $P$  - состояние). Переход материала из состояния сплошного состояния в разрушенное – осуществляется мгновенно, если только напряжённно-деформированное состояние достигает некоторого критического значения, например, когда растягивающие напряжения в данной точке деформируемого твёрдого тела достигают предела прочности.

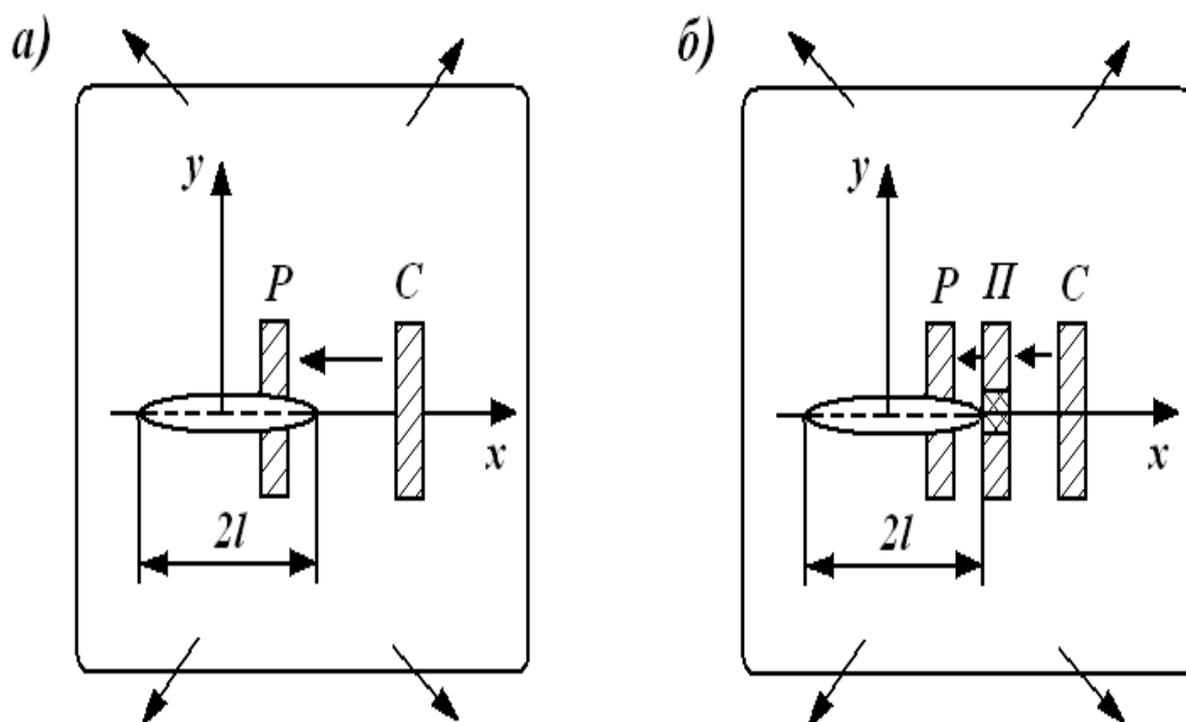


Рисунок 2.3 – Классический (а) и неклассический (б) подходы оценки прочности материалов

Однако такой подход к материалам, которые находятся в хрупком состоянии и в структуре которых имеются дефекты - трещины, не позволяет

решить задачу об их прочности, так как в нём не учитывается особое напряженно-деформированное состояние материала в процессе деформации тела.

Основная идея неклассического подхода заключается в том, что переход элемента деформируемого тела из сплошного состояния в разрушенное сопровождается промежуточным состоянием, которое обязательно нужно учитывать при решении задач о прочности тела с дефектами.

Специфика области предразрушения заключается [76] в том, что материал в ней всегда деформирован за предел упругости. Именно в этой области происходит наиболее интенсивное пластическое течение, а так же повреждаемость материала, предопределяющая локальное разрушение. Таким образом, неклассическая схема разрушения предусматривает учёт состояния предразрушения около трещин в деформируемом теле бетона. Поэтому, при оценке прочности твёрдого тела необходимо учитывать его физико-механические характеристики, например, способность оказывать сопротивление распространению в нём трещины – его трещиностойкость.

Поскольку основными характеристиками, контролирующими поведение материала в вершине трещины, являются напряжения, деформации и энергия, то все критерии механики разрушения, аналогично классическим теориям прочности, делятся на энергетические, силовые и деформативные.

Критерии начала распространения трещины могут быть получены как на основе энергетических соображений, так и силовых. В 1920 году А.А. Гриффитсом был предложен энергетический критерий разрушения, который заключается в том, что для развития начальной трещины в идеально хрупком теле необходимо затратить энергию, равную той, которая расходуется на обеспечение целостности структуры материала в вершине трещины. Силовой критерий был сформулирован Дж. Р. Ирвином лишь в 1957 г [4], который

позволяет определить напряжение в критический момент нагружения, когда начинается нестабильное развитие трещин за счет запаса упругой энергии.

Определение силовых и энергетических характеристик разрушения является одной из наиболее важных задач в исследовании фибробетона [47, 48, 50, 84, 112]. Испытания производились на образцах-призмах размером 7\*7\*28 см по неравновесной схеме, на образцах были сделаны надрезы: нижний  $a_0 = 25$  мм и верхний  $a_{0t} = 5$  мм. Это связано с тем, что, как показывает анализ литературных источников [30, 61, 62], при испытаниях образцов без надреза упругая энергия подается в образец в больших количествах для поиска «слабого звена» материала. 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. Так, значение удельных энергозатрат оказывается почти вдвое больше, а повышение коэффициента интенсивности напряжений достигает 30%.

Для определения прочности на растяжение при трехточечном изгибе был использован универсальный пресс для сжатия/растяжения с датчиком измерения перемещений и специально сконструированное приспособление – упор для испытаний образцов-призм (рисунок 2.4), позволяющие 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 пресс автоматически строит диаграмму деформирования образца, которая трансформируется в расчетную, после чего производятся дополнительные построения. Планиметрированием определяются энергозатраты на отдельных этапах деформирования и разрушения образца:  $W_m$ ,  $W_e$ ,  $W_l$ ,  $W_{ui}$ ,  $W_{ce}$ , которые являются площадями фигур под полученной кривой.



Рисунок 2.4 – Испытание фибробетонных призм для определения силовых и энергетических характеристик разрушения

Полные энергозатраты состоят из энергозатрат на диссипативные (необратимые) процессы, на развитие и слияние исходных технологических микротрещин  $W_m$ , упругое деформирование на стадии иницирования квазистатического разрушения  $W_e$  и локальное квазистатическое деформирование  $W_l$  [61]. После этого расчетным путем определяются значения силовых и энергетических характеристик трещиностойкости:

1) Удельные энергозатраты на статическое разрушение до момента начала движения магистральной трещины:

$$G_i = \frac{W_m + W_e}{t(b - a_0 - a_{0t})} \quad (2.1)$$

где:  $W_m$  – энергозатраты на процессы развития и слияния микротрещин до формирования магистральной трещины статического разрушения;  $W_e$  – энергозатраты на упругое деформирование до начала движения

магистральной трещины статического разрушения;  $t$  и  $b$  – размеры образца;  $a_0$  и  $a_{0t}$  – длина начального надреза.

2) Удельные эффективные энергозатраты на статическое разрушение:

$$G_F = \frac{W_e + W_l}{t(b - a_0 - a_{0t})} \quad (2.2)$$

где:  $W_l$  – энергозатраты на локальное статическое деформирование в зоне магистральной трещины.

3) Полные удельные упругие энергозатраты на статическое деформирование образцов до деления на части:

$$G_{ce} = \frac{W_{ce}}{t(b - a_0 - a_{0t})} \quad (2.3)$$

где:  $W_{ce}$  – полные упругие энергозатраты на статическое деформирование до деления на части.

4) Статический джей-интеграл:

$$J_i = \frac{W_m + W_e + W_{ui}^c}{t(b - a_0 - a_{0t})} \quad (2.4)$$

где:  $W_{ui}^c$  – расчетные энергозатраты на упругое деформирование сплошного образца.

5) Условный критический коэффициент интенсивности напряжений (трещиностойкость):

$$K_c = \frac{3F_c L_0}{2b^{\frac{1}{2}} t} \sqrt{a_0 b} (1,93 - 3,07\lambda + 14,53\lambda^2 - 25,11\lambda^3 + 25,8\lambda^4) \quad (2.5)$$

где:  $F_c$  – нагрузка, соответствующая динамическому началу движения магистральной трещины при неравновесных испытаниях;  $L_0$  – длина образца;  $\lambda$  – относительная длина начального надреза.

6) Прочность на осевое растяжение:

$$R_{bt} = \frac{0,77 K_c}{\sqrt{2,6\pi d_{am}}} \quad (2.6)$$

7) Критерий хрупкости (вязкость разрушения):

$$\chi_F^c = \frac{G_F E_b}{R_{bt}^2} \quad (2.7)$$

где:  $R_{bt}^2$  – прочность на осевое растяжение.

### **2.3.2 Метод определения модуля упругости, коэффициента Пуассона и призмной прочности фибробетона**

Целью данного исследования было определение деформативных характеристик, таких, как модуль упругости и коэффициент Пуассона, которые, несмотря на то, что область применения фибробетона в значительной степени зависит от его упругих свойств, изучены, на данный момент, не так хорошо, как прочностные.

Модуль упругости – коэффициент, характеризующий сопротивление материала растяжению или сжатию при упругой деформации, показывает критическое напряжение, которое может иметь структура материала при максимальной ее деформации до разрушения.

Коэффициент Пуассона – коэффициент, характеризующий отношение относительного поперечного сжатия к относительному продольному растяжению.

Модуль упругости и коэффициент Пуассона рассчитывались с учетом экспериментальных данных, которые получены при помощи механических тензометров (рисунок 2.5). Тензометры для измерения деформаций образцов устанавливались по всем четырем граням, развернутым на 90°.

В начале испытания образец с установленными датчиками устанавливался в пресс, после чего с тензометров снимались показания, представляющие собой начало отсчета. После этого к образцу прикладывалась нагрузка, соответствующая 5% от предполагаемой разрушающей, сама нагрузка стабилизировалась, с тензометров снимались показания. Когда разница между условным нулем и действующим

показанием тензометров была разная, нагрузка снималась, и образец перемещался в сторону наименьшего показания. В случае успешной центровки испытание продолжалось. Нагрузка увеличивалась до 30% от предполагаемой разрушающей и стабилизировалась на этом уровне в течение 5 минут, после чего снова снимались показания с тензометров.

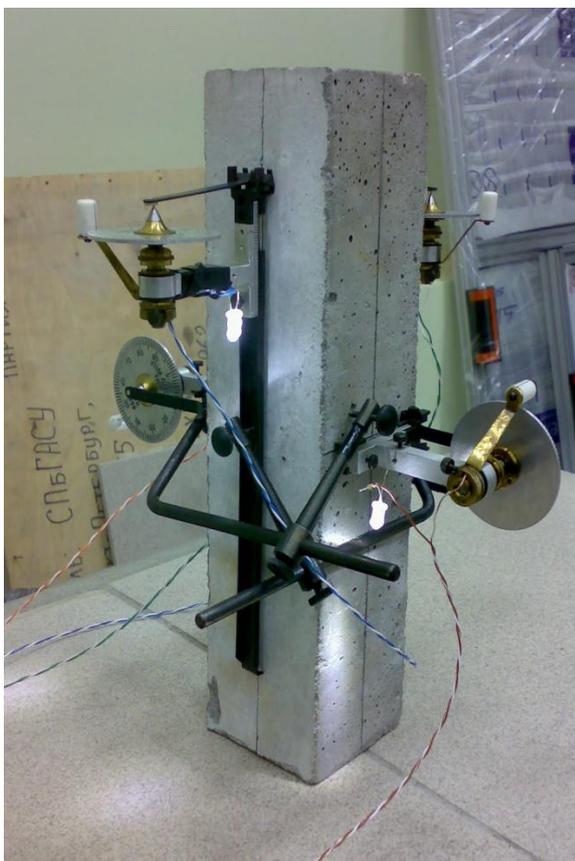


Рисунок 2.5 – Подготовка фибробетонного образца к испытанию модуля упругости и коэффициента Пуассона

После этого тензометры снимались с образца, а нагрузка увеличивалась до момента разрушения. Расчетным путем разрушающая нагрузка преобразовывалась в значение призмочной прочности. Разница в показаниях тензометров до и после приложения нагрузки, так же расчетным путем, преобразовывалась в величины продольных деформаций.

Модуль упругости  $E_{\sigma}$  и коэффициент Пуассона  $\nu$  вычислялся для каждого образца при уровне нагрузки равной 30% от разрушающей по следующим формулам:

$$E_{\sigma} = \frac{\sigma_1}{\varepsilon_{1y}} = \frac{P_1}{F \times (\varepsilon_1 - \sum \varepsilon_{1n})} \quad (2.8)$$

где:  $\sigma_1$  – приращение напряжения от условного нуля до уровня внешней нагрузки, равной 30% от разрушающей;  $P_1$  – приращение внешней нагрузки;  $\varepsilon_{1y}$  – приращение упругомгновенной относительной продольной деформации образца, соответствующее уровню нагрузки  $P_1 = 0,3P_p$  и измеренное в начале каждой ступени ее приложения;  $\varepsilon_1$  – приращение полных относительных продольных деформаций образца, соответствующее уровню нагрузки  $P_1 = 0,3P_p$  и измеренное в конце ступени ее приложения;  $\sum \varepsilon_{1n}$  – приращение относительных продольных деформаций быстронатекающей ползучести, полученной при выдержке нагрузки на ступенях нагружения до уровня нагрузки  $P_1 = 0,3P_p$ .

$$\nu = \frac{\varepsilon_{2y}}{\varepsilon_{1y}} \quad (2.9)$$

где:  $\varepsilon_{2y}$  – приращение упругомгновенной относительной поперечной деформации образца, соответствующее уровню нагрузки  $P_1 = 0,3P_p$  и измеренное в начале каждой ступени ее приложения.

## 2.4 Методика и результаты определения механических характеристик фибры

Для разработки комбинаций полиармирования и прогнозирования их эффективности представляется целесообразным определить прочность и модуль упругости аморфной металлической фибры, а также величину сцепления стальной проволочной фибры с матрицей – факторов, влияющих на прочностные и деформативные характеристики композита.

### 2.4.1 Определение прочности сцепления стальной фибры с матрицей

Чаще всего разрушение фибробетона происходит за счет вытягивания волокон из бетона в результате нарушения связи на границе раздела волокно – матрица, и, таким образом, за счет повышения прочности сцепления фибры с матрицей можно добиться максимального использования прочностных свойств самого волокна, вплоть до его разрыва в момент разрушения композита. Сцепление фибры с бетонной матрицей композита является результатом комбинированного проявления адгезии, трения и механического зацепления в зоне их контакта с цементным камнем. Влияние каждого из этих факторов на анкеровку волокон в матрице может быть различным и зависит от состава, структуры и свойств цементного камня, а также от материала фибр, их формы и размеров [36, 99]. Таким образом, основным механизмом увеличения прочности дисперсно-армированного бетона является увеличение прочности сцепления армирующего волокна с бетонной матрицей композита.

В СПбГАСУ разработан расчетно-экспериментальный метод, в соответствии с которым определяется не просто прочность сцепления фибр с матрицей, например, путем ее выдергивания из бетона, а характеристика сцепления ( $\tau$ ), учитывающая расположение и ориентацию фибр, характер и условия их работы в матрице.

Суть методики [87] определения показателя ( $\tau$ ) 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.

В качестве исходной смеси используется цементное тесто нормальной густоты. Из одного замеса готовятся армированные и неармированные образцы определенного состава, которые в дальнейшем делят на несколько частей: из одной формуют цементные образцы, а в другие перед

формованием добавляют различное, постоянно увеличивающееся, количество волокон.

По результатам испытаний строится график «Прочность – коэффициент армирования», по которому определяется положение точки, соответствующей сформулированному выше условию (рисунок 2.6).

По полученным данным рассчитывается характеристика сцепления фибр с цементным камнем из теста нормальной густоты:

$$(\tau) = \frac{R_{фц} - 3,5 \cdot R_{кз} \cdot \mu_{min} - (1 - 4,5 \cdot \mu_{min}) \cdot R_{ц.к}}{2 \cdot \frac{l}{d} \cdot \mu_{min}} \quad (2.10)$$

где:  $R_{фц}$ ,  $R_{кз}$  и  $R_{ц.к}$  – прочность фиброцемента, контактной зоны и цементного камня из теста нормальной густоты;  $\mu_{min}$  – коэффициент армирования, соответствующий сформулированному в методике условию;  $l$  и  $d$  – длина и диаметр фибры.

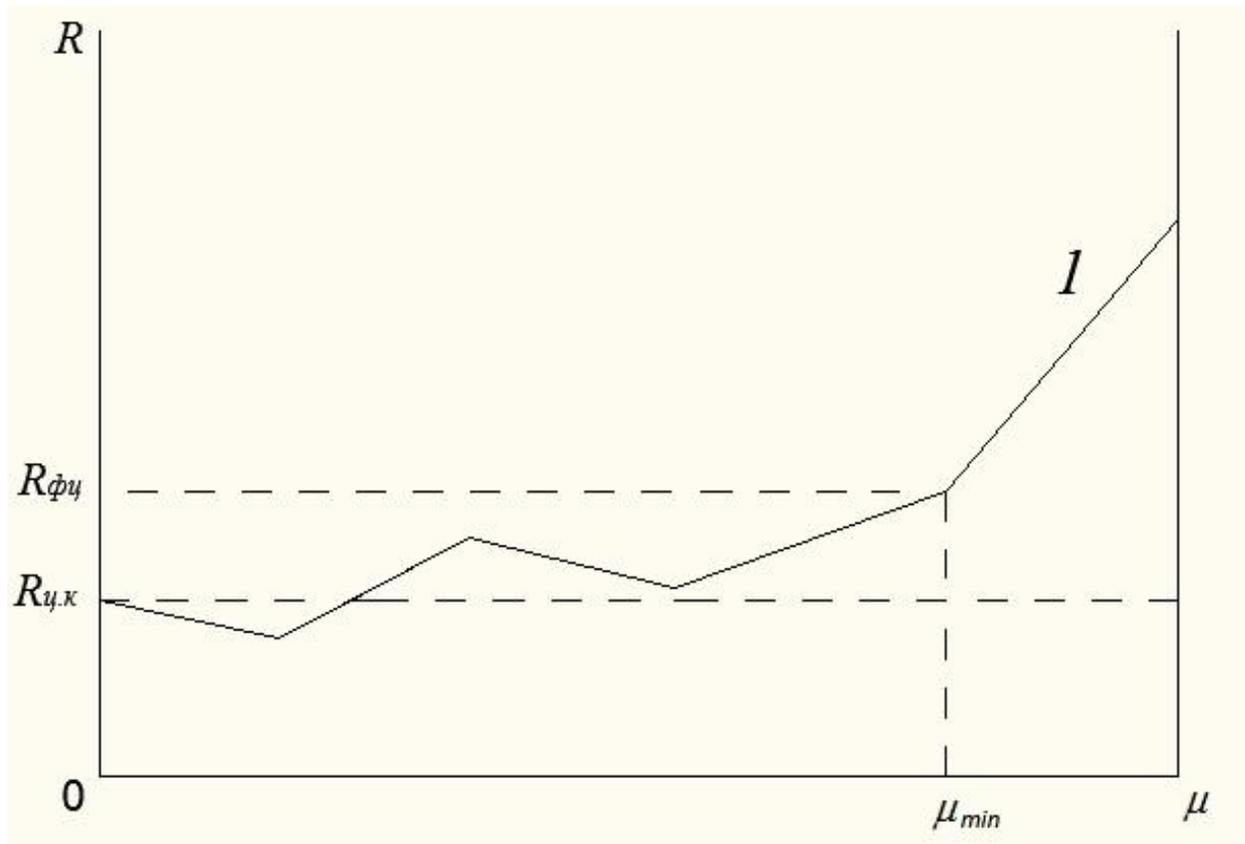


Рисунок 2.6 – Влияние коэффициента армирования волокнами на прочность цементного камня: 1 - цементный камень, армированный высокомодульными волокнами

В таблице 2.9 приведены характеристики сцепления некоторых видов фибр с цементным камнем, полученные с применением предлагаемой методики.

Таблица 2.9 – Характеристики сцепления фибр с цементным камнем

№	Вид фибры	Показатель сцепления ( $\tau$ , МПа) при использовании цемента марки	
		М 400 Д20	М 500 Д0
1	Фибра стальная волнистая из низкоуглеродистой проволоки	1,52	2,51
2	Фибра токарная из низкоуглеродистой стали	2,16	3,45

Следует отметить, что определенное таким образом значение ( $\tau$ ) справедливо лишь для конкретных видов фибры и цемента, поэтому при выполнении диссертационных исследований определена аналогичная характеристика применительно к используемым в работе материалам. Для стальной фибры из проволоки и цемента марки ПЦ500 Д0 по формуле (2.10) была рассчитана характеристика сцепления, которая использовались в дальнейшем при выполнении соответствующих расчетов:

$$\tau_{ст.ф.} = \frac{17,2 - 3,5 \cdot 11,34 \cdot 0,02 - (1 - 4,5 \cdot 0,02) \cdot 8,1}{2 \cdot 0,02 \cdot \frac{22}{0,3}} = 3,08 \text{ МПа}$$

#### 2.4.2 Определение прочности аморфной металлической фибры

В ходе предварительных испытаний установлено, что образцы, армированные аморфнометаллической фиброй, имеют признаки хрупкого разрушения (рисунок 2.7). При этом сама фибра разрывалась, что говорит о ее надежном сцеплении с матрицей композита.

Учитывая это, приведенная в п. 2.4.1 методика получила дальнейшее развитие. В данном случае, для определения прочности аморфнометаллической фибры с учетом ее поведения в бетоне при

нагрузении, изготавливалось две серии образцов: неармированные (контрольные) образцы из цементного теста нормальной густоты и образцы, армированные аморфной металлической фиброй, с постепенным повышением процента объемного армирования.



Рисунок 2.7 – Поверхность разрушенного фиброцементного образца, армированного аморфнометаллической фиброй

Результаты испытаний образцов приведены в таблице 2.10.

Таблица 2.10 – Результаты прочности на растяжение при изгибе фиброцементных образцов

Общий процент армирования по объему, $\mu$ , %	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
Прочность на растяжение при изгибе, $R_{изг}$ , МПа	8,1	8,3	8,8	11,5	10,8	11,2	10,9	15,1	16,6	16,9	17,2

По завершению экспериментальной части методики был построен график зависимости прочности на растяжение при изгибе от процента объемного армирования, представленный на рисунке 2.8.

По графику видно, что минимальное количество вводимого волокна, при котором в момент возникновения трещины в матрице они способны

воспринимать нагрузку составляет  $\mu_{min} = 0,7 \%$ , при использовании меньшего количества волокна материал может проявлять некоторые свойства композита, однако прочность в этом случае будет практически такой же, как и у неармированного образца.

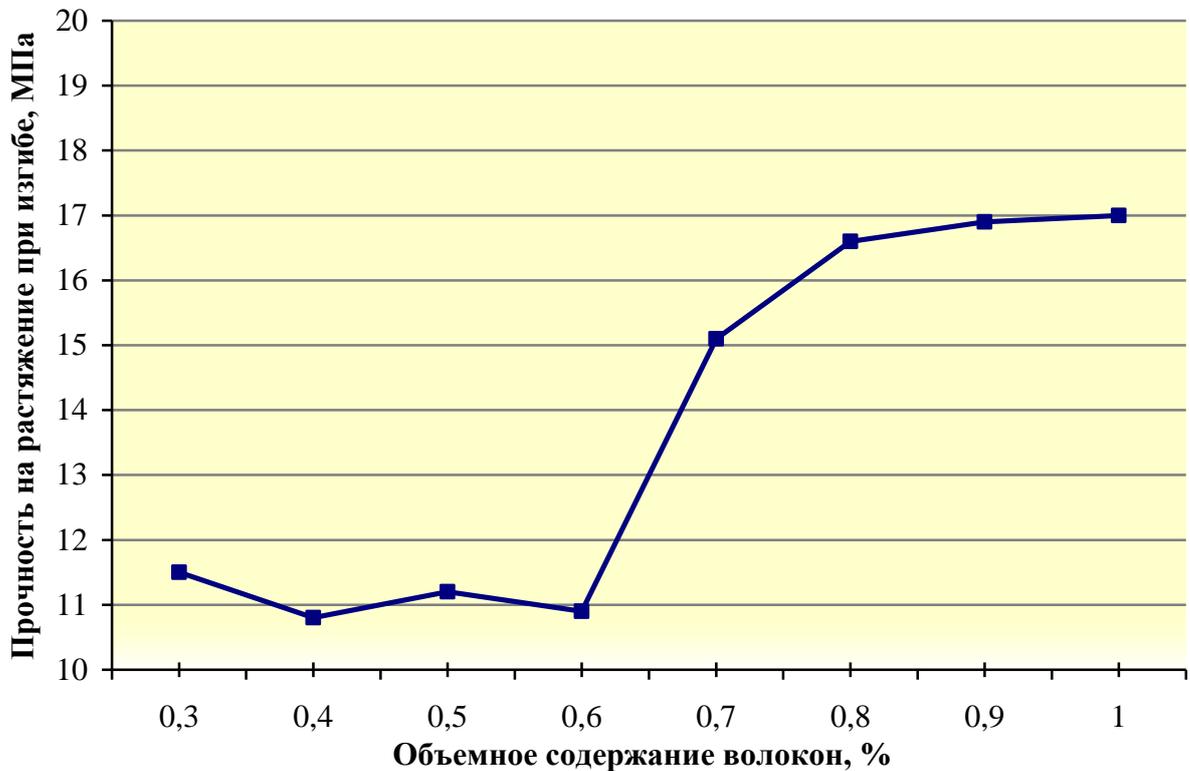


Рисунок 2.8 – График зависимости прочности фиброцементных образцов от объемного содержания волокон

По полученным данным рассчитывается значение прочности аморфнометаллической фибры по уравнению, отличном от того, которое используется для определения прочности сцепления между армирующим волокном и матрицей:

$$R_{ам.ф.} = \frac{R_{фб} - 3,5R_{к.з} \mu_{min} - (1 - 4,5\mu_{min})R_{ц.к.}}{\mu_{min}} = \frac{15,1 - 3,5 \times 11,34 \times 0,007 - (1 - 4,5 \times 0,007) \times 8,1}{0,007} = 996 \text{ МПа}$$

где:  $R_{ам.ф.}$ ,  $R_{фб}$ ,  $R_{ц.к.}$ ,  $R_{к.з.}$  – прочность аморфнометаллической фибры, а так же прочность фибробетона, цементного камня и контактной зоны ( $R_{к.з.} = 1,4 \times R_{ц.к.} = 1,4 \times 8,1 = 11,34 \text{ МПа}$ );  $\mu$  – общая объемная доля волокон.

### 2.4.3 Методика определения модуля упругости аморфной металлической фибры

Сущность метода по определению модуля упругости аморфной металлической фибры заключается в сравнении модуля упругости фибробетона, армированного аморфнометаллической фиброй, и фибробетона, армированного стальной фиброй, с одинаковым общим процентом армирования по объему. По полученным характеристикам определяется коэффициент  $K_{эф}$  – отношение модуля упругости фибробетона с использованием аморфной металлической фибры к модулю упругости фибробетона с применением стальной фибры. Зная, из справочных источников, модуль упругости стального волокна, и найденный коэффициент  $K_{эф}$ , можно определить модуль упругости аморфнометаллической фибры.

Для определения модуля упругости фибробетонов, армированных аморфной металлической и стальной фиброй, были приготовлены образцы-призмы размером 7\*7\*28 см, со следующим соотношением волокон: 0,5 %, 1%, 1,5 % и 2 % по объему.

В качестве бетонной матрицы композита использовался цементнопесчаный раствор с соотношением портландцемента к кварцевому песку 1:2. Полученные, в ходе эксперимента, значения модуля упругости фибробетонов, приведены в таблице 2.11.

Таблица 2.11 – Результаты испытаний модуля упругости фибробетона

Модуль упругости, $E_{фб}$ , МПа	Процент объемного армирования, $\mu$ , %			
	0,5	1,0	1,5	2,0
Фибробетон, армированный аморфнометаллической фиброй	34293	39421	41860	43945
Фибробетон, армированный стальной фиброй	33676	35840	38719	40654

На рисунке 2.9 приведена диаграмма зависимости модуля упругости фибробетона от вида и процента объемного армирования, которая построена согласно результатам, полученным в ходе эксперимента.

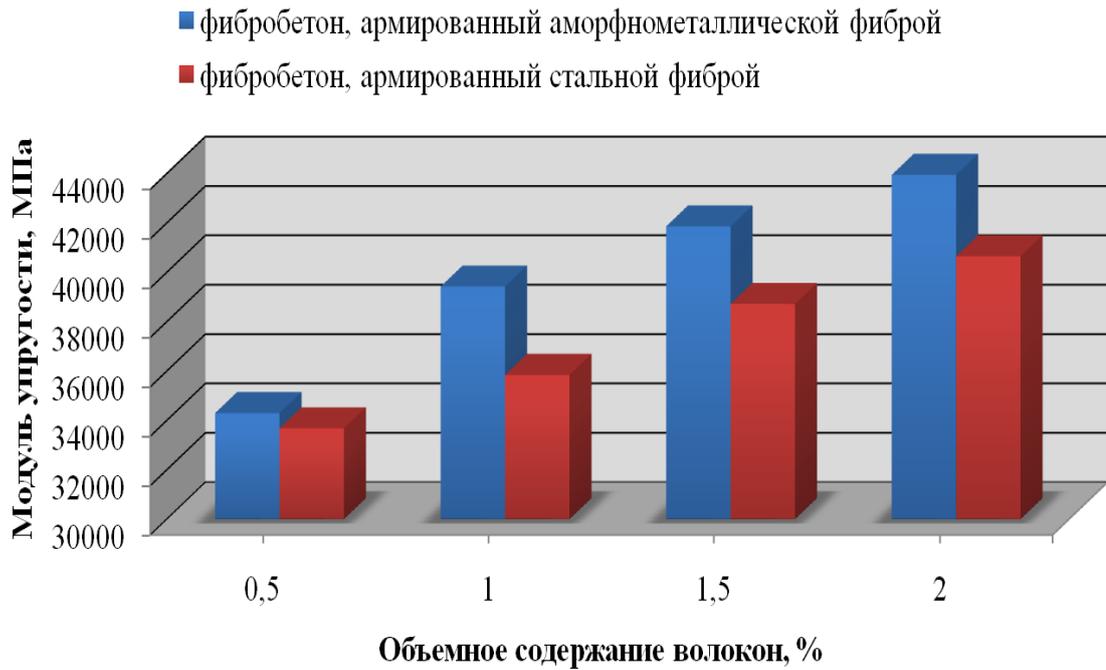


Рисунок 2.9 – Зависимость модуля упругости фибробетона от вида и содержания волокон

Применительно к используемым в диссертационном исследовании видам армирующих волокон, определили  $K_{эф}$ , значения которого приведены в таблице 2.12:

$$K_{эф} = \frac{E_{фб}^{ам.ф.}}{E_{фб}^{ст.ф.}} \quad (2.11)$$

Таблица 2.12 – Коэффициенты эффективности для фибробетонов, армированных разной общей объемной долей фибры

Объемное содержание волокон, $\mu$ , %	Коэффициент эффективности, $K_{эф}$
0,5	1,02
1,0	1,1
1,5	1,08
2,0	1,08

Учитывая линейный характер изменения модуля упругости в зависимости от насыщения бетона волокнами и практически постоянное значение  $K_{эф}$  в диапазоне армирования, имеющем значение ( $\mu = 1,0 - 2,0$  %), определили модуль упругости аморфной металлической фибры:

$$E_{ам.ф.} = E_{ст.ф.} \cdot K_{эф} = 210000 \cdot 1,07 = 224700 \text{ МПа}$$

**Выводы по второй главе:**

В результате критического анализа и проведенных экспериментов разработана материальная, методическая и инструментальная база проведения диссертационных исследований:

1) Установлены требования и исследованы характеристики исходных материалов для получения полиармированных фибробетонов, включая параметры армирующих волокон;

2) Разработана технология изготовления фибробетонных образцов и обосновано применение для проведения испытаний стандартных методов исследования с учетом особенностей структуры, свойств и поведения под нагрузкой фиброармированных бетонов;

3) Предложена оригинальная методика, в соответствии с которой определены характеристики аморфнометаллической фибры: прочность  $R_{ам.ф.} = 996$  МПа, модуль упругости  $E_{ам.ф.} = 224700$  МПа.

### **3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СВОЙСТВ ПОЛИАРМИРОВАННОГО ФИБРОБЕТОНА**

Эффективность любого конструкционного материала, в том числе и бетона, характеризуют его прочность и деформативность, которые, в свою очередь, зависят от вида, свойств, активности применяемых для получения исходных материалов и соотношения между ними, компонентов структуры, состояния и степени их взаимодействия, принятой технологии. Для учета всех этих и возможно других факторов в процессе создания материала, формировании и оптимизации его структуры и свойств, необходимо выбрать модель, адекватно отражающую поведение этого материала под нагрузкой. Однако, анализ результатов теоретических исследований в области фибробетонов показывает, что эта задача чрезвычайно сложная. Большинство предлагаемых моделей носит феноменологический характер, который не отражает вопросов, касающихся формирования структуры композита, прочности и других показателей качества, их взаимосвязи с состоянием исходных материалов, составами и технологическим процессом изготовления конструкций. Важнейшим из этих вопросов является оценка поведения армирующих волокон в процессе нагружения, определяющего характер разрушения фибробетона.

#### **3.1 Влияние вида армирующих волокон на характер разрушения фибробетона**

Разработке теоретических моделей для прогнозирования физико-механических характеристик полидисперсно армированного фибробетона предшествовали лабораторные исследования, целью которых являлась проверка положений рабочей гипотезы относительно поведения стальной

проволочной и аморфнометаллической фибры в процессе приложения нагрузки и разрушения фибробетонных образцов.

При проведении исследований в качестве исходного использовался мелкозернистый бетон со следующим расходом компонентов (кг/м<sup>3</sup>), характеристика которых приведена в главе 2:

- портландцемент – 650;
- кварцевый песок – 1300;
- суперпластификатор – 4,55;
- вода – 208.

Для определения поведения аморфной металлической и стальной фибры в бетоне были изготовлены моноармированные образцы с общим процентом армирования, равным 2% по объему, а так же полиармированные образцы с отношением аморфнометаллической фибры к стальной, равным 0,5.

В результате испытания образцов получили подтверждение предварительные выводы и, соответственно, положения рабочей гипотезы о том, что разрушение фибробетона, армированного стальной фиброй, сопровождается вытягиванием волокон из бетонной матрицы, тогда как разрушение образца, армированного аморфнометаллической фиброй, происходит в результате разрыва волокон (рисунок 3.1).

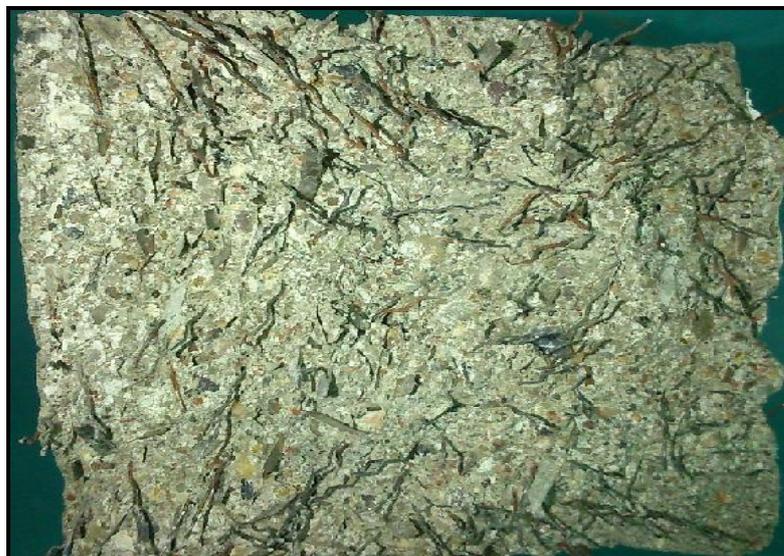


Рисунок 3.1 – Структура полиармированного фибробетонного образца

В таблице 3.1 приведены экспериментальные значения прочностных, деформативных и энергетических характеристик моно- и полиармированных образцов.

Таблица 3.1 – Экспериментальные значения прочности на растяжение при изгибе, модуля упругости и вязкости разрушения моно- и полиармированных образцов

Характеристики фибробетона	Доля аморфной металлической фибры в общем объеме армирования, $n$		
	1,0	0,5	0
Прочность на растяжение при изгибе, $R_{изг}$ , МПа	21,73	21,55	17,21
Модуль упругости, $E$ , МПа	43945	42000	40654
Критерий хрупкости (вязкость разрушения), $X^c_{F}$ , м	30,44	107,9	143,96

Из таблицы 3.1, а также из графика зависимости прогибов от прилагаемых нагрузок, представленного на рисунке 3.2, видно, что фибробетон, армированный аморфнометаллическим волокном, обладает наибольшей прочностью на растяжение при изгибе. Кроме того, повышается жесткость материала, о чем свидетельствует больший угол наклона восходящей части кривой на графике, что означает повышение модуля упругости и увеличение нагрузки в момент образования первой трещины, но при этом композит демонстрирует признаки хрупкого разрушения. У образца, армированного стальной фиброй, прочность на растяжение при изгибе ниже, однако его разрушение более вязкое по сравнению с образцом, армированным аморфнометаллической фиброй. Таким образом, аморфная металлическая фибра в значительной степени увеличивает прочность и трещиностойкость бетона, однако требуется создание дополнительных условий для повышения сопротивляемости распространению трещин после их образования в бетоне. В качестве решения данной проблемы в диссертации рассматривается вариант дисперсного полиармирования композита.

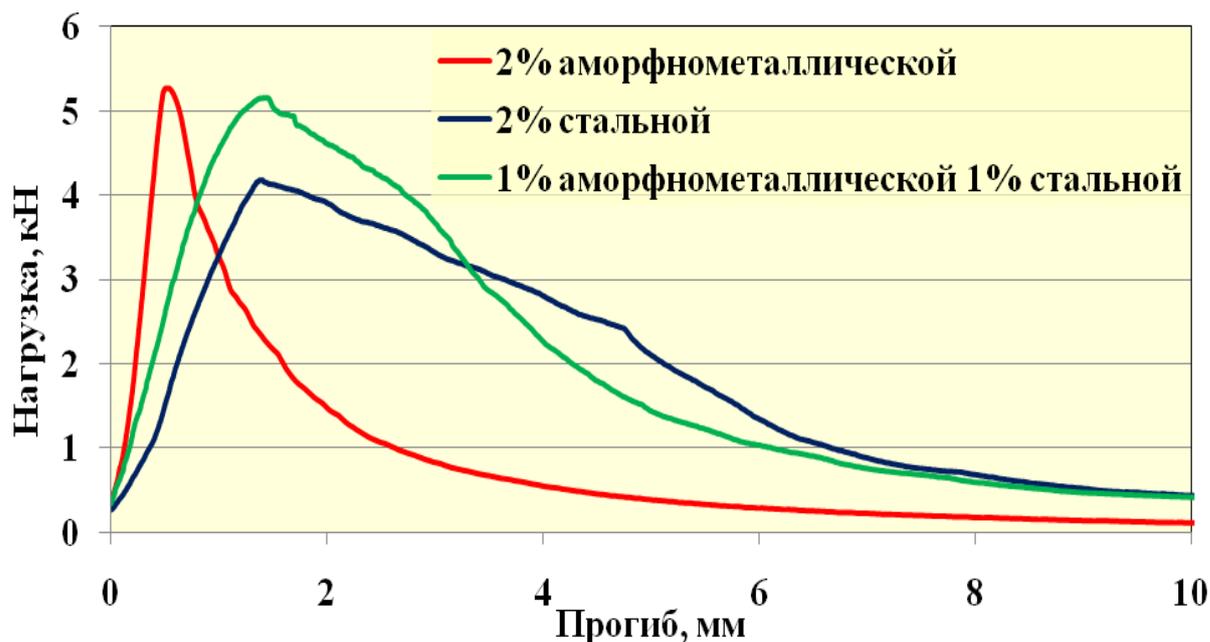


Рисунок 3.2 – Зависимость прогибов фибробетонных образцов от прилагаемых нагрузок

Для получения возможности теоретической оценки поведения полиармированного фибробетона под нагрузкой до образования трещин и в дальнейшем, в процессе их развития, а также для прогнозирования прочностных и деформативных характеристик композита в зависимости от вида и свойств применяемых волокон и бетона, в диссертационной работе предложены и экспериментально проверены математические модели, основанные на результатах структурного анализа.

## 3.2 Теоретические модели формирования свойств полиармированного фибробетона

### 3.2.1 Модуль упругости

Для определения теоретических значений модуля упругости композиционных материалов разработаны и применяются различные математические модели, в том числе известные модели Рейсса и Фойхта [57], позволяющие рассчитывать модуль упругости фибробетона через заранее

известные аналогичные показатели материала матрицы и армирующих волокон и коэффициенты армирования.

Так, модуль упругости по модели Рейсса определяется по формуле (3.1) для моноармированных фибробетонов и (3.2) для полиармированных фибробетонов:

- для фибробетонов, армированных одним видом волокна (моноармированных):

$$E^R = \frac{E_1 E_2}{\mu_1 E_2 + \mu_2 E_1} \quad (3.1)$$

где:  $E_1, E_2$  – модули упругости бетона и фибры соответственно;  $\mu_1, \mu_2$  – объемная доля бетона и фибры в композите соответственно;

- для полиармированных фибробетонов (в данном случае, двумя видами волокон):

$$E^R = \frac{E_1 E_2 E_3}{\mu_1 E_2 E_3 + \mu_2 E_1 E_3 + \mu_3 E_1 E_2} \quad (3.2)$$

где:  $E_1, E_2, E_3$  – модули упругости бетона, аморфнометаллической и стальной фибры в фибробетоне соответственно;  $\mu_1, \mu_2, \mu_3$  – объемная доля бетона, аморфнометаллической и стальной фибры в композите соответственно.

Модуль упругости по модели Фойхта определяется по формуле (3.3) для моноармированных фибробетонов и (3.4) для полиармированных фибробетонов:

- для моноармированных фибробетонов:

$$E^V = \mu_1 E_1 + \mu_2 E_2 \quad (3.3)$$

- для полиармированных фибробетонов:

$$E^V = \mu_1 E_1 + \mu_2 E_2 + \mu_3 E_3 \quad (3.4)$$

Следует отметить, что представленные модели базируются на классических законах композиционных материалов, во многом повторяя известное «правило смесей», и при этом не учитывают важной структурообразующей роли и своеобразия цементной (бетонной) матрицы,

процесса формирования вблизи поверхности раздела «волокно-матрица», контактной зоны, состояние которой во многом определяет важнейшие свойства фибробетона.

Учитывая это, в диссертационной работе предлагается следующая модель для прогнозирования значений модуля упругости полиармированного фибробетона, в которой помимо вклада матрицы и армирующих волокон учитывается комплексный коэффициент  $\varphi$ , зависящий от вида волокон и степени их взаимодействия друг с другом и матрицей.

$$E_{\phi\delta} = E_{\delta}\mu[\varphi_{ам.ф.}n + \varphi_{ст.ф.}(1-n)] \quad (3.5)$$

где:  $E_{\phi\delta}$ ,  $E_{\delta}$  – модуль упругости фибробетона и бетона;  $\mu$  – общая объемная доля волокон;  $n$  – доля аморфнометаллической фибры в общем объеме армирования;  $\varphi$  – экспериментальный комплексный коэффициент.

В таблице 3.2 представлены результаты теоретических расчетов по приведенным формулам и экспериментальные данные, полученные путем испытания лабораторных образцов фибробетона по стандартной методике, приведенной в главе 2. При этом значение модуля упругости неармированного фиброй бетона того же состава, полученное параллельно с испытанием фибробетонных образцов, составляет  $E_{\delta} = 31643$ .

Таблица 3.2 – Значения модуля упругости для моно- и полиармированных фибробетонных образцов

Доля аморфной металлической фибры в общем объеме армирования, $n$	Модуль упругости по Фойхту, $E^V$ , МПа	Модуль упругости по Рейссу, $E^R$ , МПа	Модуль упругости по предлагаемой модели, $E_{\phi\delta}$ , МПа	Экспериментальное значение модуля упругости, $E_{эксп}$ , МПа
0	35210	32190	40670	40654
0,5	35357	32193	42274	42000
1,0	35504	32196	43938	43945

Из приведенных данных следует, что наибольшую сходимость расчетных значений модуля упругости с результатами, полученными при испытании фибробетонных образцов, демонстрирует предлагаемая модель, что отчетливо видно на рисунке 3.3.



Рисунок 3.3 – Зависимость модуля упругости от соотношения аморфнометаллической и стальной фибры

При этом, для проведения расчетов по формуле (3.5) с учетом значений модулей упругости фибробетонов на разной фибре, определенных в главе 2, по графику на рисунке 3.4 установлены экспериментальные комплексные коэффициенты для фибробетонов, армированных аморфной металлической фиброй  $\varphi_{ам.ф.} = 1,33$ , и армированных стальной фиброй  $\varphi_{ст.ф.} = 1,23$ .

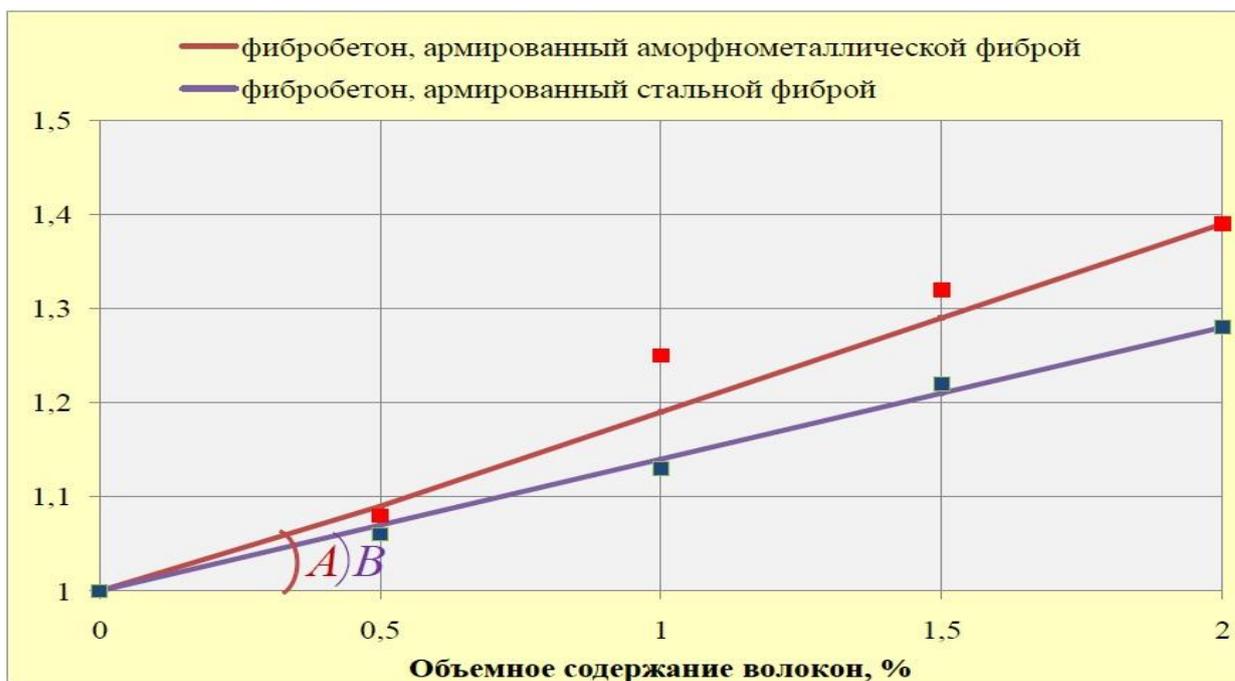


Рисунок 3.4 – Зависимость коэффициента  $\varphi$  от вида и содержания волокон

### 3.2.2 Прочность

Как было показано в главе 1, прочность композиционного материала, в том числе фиброцемента и фибробетона, в первом приближении оценивается «правилом смесей», которое, в случае прочной связи на границе раздела волокно - матрица, обеспечивающей совместную деформацию компонентов вплоть до разрушения, выражается уравнением аддитивности (3.6):

$$R_{\phi\delta} = \sigma_{\phi}\mu + R_{\delta}(1 - \mu) \quad (3.6)$$

где:  $\sigma_{\phi}$  – напряжение в фибре в момент разрушения матрицы;  $R_{\delta}$  – предел прочности матрицы;  $\mu$  – объемное содержание волокон.

Приведенная выше формула справедлива только при условии, когда модуль упругости применяемой фибры выше, чем у матрицы ( $E_{\phi} > E_{\delta}$ ). Однако и в этом случае ее использование не совсем корректно, так как на практике волокна могут разрушаться не одновременно, а последовательно из-за наличия в них дефектов: наиболее дефектные разрушаются при малых напряжениях, далеких от предела прочности, а волокна с меньшими дефектами разрушаются при более высоких напряжениях, и в результате прочность композита оказывается ниже рассчитанной по уравнению. Кроме того, в фибробетоне прочность определяется не только механическими характеристиками составляющих компонентов, но и характером и степенью взаимодействия между ними.

При проектировании фибробетонов представляется важным установить такой диапазон объемного содержания фибр, при котором бы исключалось их хрупкое разрушение.

Для прогнозирования прочности фибробетона в точках, соответствующих критическим пределам армирования, может быть использована формула И.А.Лобанова, в соответствии с которой вклад дисперсной арматуры, в зависимости от геометрических характеристик волокон и степени их взаимодействия с матрицей, оценивается либо ее

прочностью ( $R_\phi$ ), либо величиной сцепления на границе раздела «фибра – матрица» ( $\tau$ ) с учетом объемного содержания волокон ( $\mu$ ).

В частности, при однонаправленном армировании волокнами, имеющими прочную связь с матрицей вплоть до разрушения, упомянутая выше формула (3.6) прочности фибробетона может быть записана в следующем виде:

$$R_{\phi\delta} = R_\phi \mu + \mu \left( 2 \frac{\delta}{r} + \frac{\delta^2}{r^2} \right) R_{к.з.} + \left[ 1 - \mu \left( 1 + 2 \frac{\delta}{r} + \frac{\delta^2}{r^2} \right) \right] R_\delta \quad (3.7)$$

где:  $R_\phi$ ,  $R_{к.з.}$ ,  $R_\delta$  – прочность фибры, контактной зоны и бетона соответственно;  $\delta$  – величина поперечного сечения (толщина) контактной зоны;  $r$  – радиус волокон.

В приведенной формуле (3.7) кроме радиуса, величина которого, как правило, известна или может быть легко определена, наибольший интерес вызывает толщина контактной зоны ( $\delta$ ), которую вначале принимали равной 300 мкм. Это обеспечивало получение достоверного результата и было оправданно при армировании бетона волокнами в количестве  $\mu = 1-2\%$ , но при большем насыщении расчетные характеристики имели серьезное расхождение с экспериментальными данными, что было доказано Пухаренко Ю.В. [90], который установил взаимосвязь между величиной контактной зоны и радиусом используемых фибр ( $r$ ):

$$\delta = r \left( \sqrt{\frac{\rho_\phi}{m_\phi} \cdot V_{к.з.} + 1} - 1 \right) = r(\sqrt{4,5} - 1) = 1,12r \quad (3.8)$$

где:  $\rho_\phi$  и  $m_\phi$  – средняя плотность и масса фибр;  $V_{к.з.}$  – суммарный объем контактных зон.

Таким образом, толщина контактной зоны является величиной переменной, зависящей от размера поперечного сечения применяемых фибр, и значение  $\delta = 300$  мкм соответствует частному случаю при использовании волокон диаметром  $d_\phi \approx 0,5$  мм.

С учетом полученного соотношения, формула для расчета прочности фибробетона может быть записана в следующем виде:

$$R_{\phi\delta} = R_{\phi}\mu + \mu \left( 2 \cdot \frac{1,12r}{r} + \frac{1,12^2 \cdot r^2}{r^2} \right) R_{\kappa.з.} + \left[ 1 - \mu \left( 1 + 2 \cdot \frac{1,12r}{r} + \frac{1,12^2 \cdot r^2}{r^2} \right) \right] R_{\sigma} \quad (3.9)$$

Упростив уравнение (3.9), получим:

$$R_{\phi\delta} = R_{\phi}\mu + 3,5\mu R_{\kappa.з.} + (1 - 4,5\mu)R_{\sigma} \quad (3.10)$$

Исходя из вышеизложенного, расчетные значения прочности моноармированного фибробетона, в зависимости от характеристик волокон и матрицы, а также степени их взаимодействия, могут определяться с использованием следующих выражений [99]:

1) При прочной связи фибры с бетонной матрицей (фибробетон, армированный аморфнометаллической фиброй) прочность при изгибе определяется по формуле (3.11):

$$R_{\phi\delta} = R_{ам.ф.}\mu + 3,5R_{\kappa.з.}\mu + R_{\sigma}(1 - 4,5\mu) \quad (3.11)$$

2) При отсутствии прочной связи фибры с бетонной матрицей (фибробетон, армированный стальной фиброй), по формуле (3.12):

$$R_{\phi\delta} = 2\tau_{см.ф.} \frac{\ell_{см.ф.}}{d_{см.ф.}} \mu + 3,5R_{\kappa.з.}\mu + R_{\sigma}(1 - 4,5\mu) \quad (3.12)$$

При полидисперсном армировании, волокна, имеющие надежное сцепление с матрицей композита и не обладающие с ней прочной связью, при разрушении фибробетона проявляют себя по-разному: рвутся (аморфнометаллическая фибра) или вытягиваются (стальной фибра).

Исходя из этого, предлагается модель для прогнозирования прочности, учитывающая поведение обоих видов фибр в макроструктуре фибробетона (3.13).

$$R_{\phi\delta} = \left[ R_{ам.ф.}n + 2\tau_{см.ф.} \frac{\ell_{см.ф.}}{d_{см.ф.}}(1-n) \right] \mu + 3,5R_{\kappa.з.}\mu + R_{\sigma}(1 - 4,5\mu) \quad (3.13)$$

где:  $R_{ам.ф.}$ ,  $R_{к.з.}$ ,  $R_b$  – прочность аморфнометаллической фибры, контактной зоны и бетона;  $\frac{\ell_{ст.ф.}}{d_{ст.ф.}}$  – отношение длины стальной фибры к диаметру;  $\tau_{ст.ф.}$  – прочность сцепления стальной фибры на границе раздела с матрицей;  $\mu$  – общая объемная доля волокон;  $n$  – доля аморфнометаллической фибры в общем объеме армирования.

В таблице 3.3 представлены экспериментальные и теоретические, найденные с помощью предложенной математической модели, значения прочности на растяжение при изгибе моно- и полиармированного фибробетона.

Таблица 3.3 – Значения прочности на растяжение при изгибе для моно- и полиармированных фибробетонных образцов

Доля аморфной металлической фибры в общем объеме армирования, $n$	Теоретическая прочность фибробетона $R_{теор.}$ , МПа	Экспериментальная прочность фибробетона $R_{эксп.}$ , МПа
бетон без фибры	-	8,12
0	14,86	17,21
0,5	21,48	21,55
1,0	28,10	21,73

Полученная модель позволяет учитывать вклад волокон разного вида в формирование интегрального значения прочности фибробетона с достаточно высокой степенью сходимости с экспериментальными результатами, что видно на рисунке 3.5.



Рисунок 3.5 – Зависимость прочности на растяжение при изгибе от соотношения аморфнометаллической и стальной фибры

### 3.2.3 Вязкость разрушения

Высокая прочность материала не гарантирует высокой сопротивляемости распространению трещин. В любом материале есть внутренние дефекты, которые под действием даже незначительных напряжений могут увеличиваться в размерах, распространяться в объеме и приводить к разрушению. Даже один и тот же материал, в зависимости от размеров образцов, во время испытания может вести себя по-разному, в большей степени проявляя признаки хрупкого или вязкого разрушения. Таким образом, высокая вязкость разрушения является одним из самых ярких проявлений и важнейшей характеристикой фибробетона как композиционного материала.

В качестве критерия оценки вязкости разрушения композита и, соответственно, его способности сопротивляться процессу образования и развития трещин служит показатель, основанный на энергетическом подходе Гриффитса, описанном в главе 2:

$$G = \frac{\pi \sigma^2 L_{mp}}{E} \quad (3.14)$$

где:  $G$  – величина нагрузки необходимая для распространения трещины на единицу длины;  $\sigma$  – приложенное напряжение;  $L_{mp}$  – длина трещины,  $E$  – модуль упругости.

Установлено, когда значение  $(\sigma^2 L_{mp})$  становится критическим, величина вязкости разрушения ( $G$ ) так же достигает критического значения –  $G_{кр}$ , и с этого момента трещина растет самопроизвольно без дополнительных затрат энергии извне. Таким образом,  $G_{кр}$  – критерий является мерой сопротивления композита распространению растущей трещины.

Очевидно, для изотропных материалов  $G_{кр}$  повышается с увеличением пластичности. Однако, это же в полной мере относится и к армированным композитам, для повышения вязкости которых рекомендуется использовать матрицу и волокна с высокой пластичностью и пределами текучести. Вместе

с тем, в композиционных материалах существуют и другие механизмы повышения вязкости, например, создание огромного числа поверхностей раздела волокон с матрицей, которые являются энергетическим барьером на пути распространения трещин. Такая диссипация энергии [91] создает дополнительное сопротивление процессу разрушения границ раздела фаз вблизи вершины трещины (зона точки 2 на рисунке 3.6) и следующему за этим вытягиванию волокон из матрицы композита (зона точки 1 на рисунке 3.6).

Таким образом, вязкость разрушения композита зависит от вида и свойств исходных компонентов, а также от объемного соотношения между ними, главным образом, от степени насыщения матрицы армирующими волокнами, и в конечном счете определяется прочностью границ раздела фаз. При этом, если длина волокон больше некоторой критической длины ( $l_f > l_{кр.ф}$ ), то большая их часть в момент разрушения композита будет разрываться, и вязкость разрушения будет невысокой, а если ( $l_f < l_{кр.ф}$ ), то основной вклад в сопротивление композита разрушению будет вносить энергия, затрачиваемая на вытягивание волокон из матрицы.

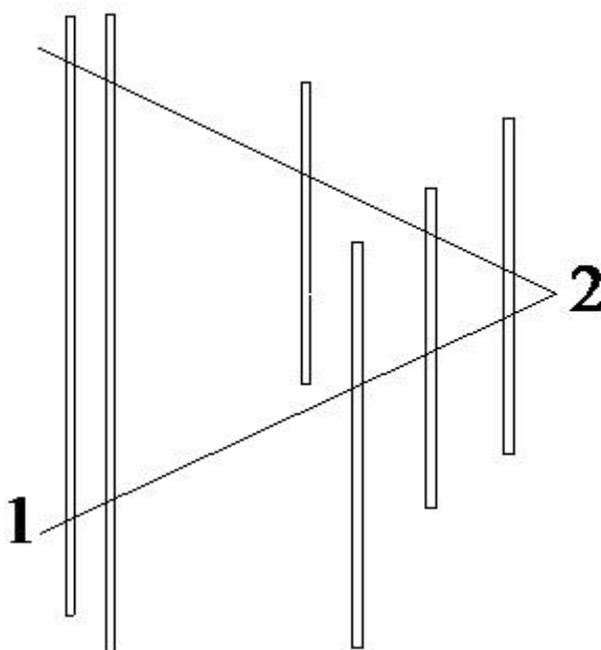


Рисунок 3.6 – Схема распространения трещины

Отсюда следует, что для создания композитного материала с высокой вязкостью разрушения необходимо применять армирование волокнами с такими размерами, при которых они не разрываются, а выдергиваются из матрицы в процессе образования и развития трещин.

В полиармированном фибробетоне работают оба механизма, но участие аморфнометаллической и стальной фибры в формировании вязкости разрушения различно, и это обстоятельство необходимо учитывать при разработке модели. В данном случае энергия сопротивления фибробетона процессу разрушения должна определяться по следующей формуле:

$$W_{фб} = W_{ам.ф.} + W_{ст.ф.} \quad (3.15)$$

где:  $W_{фб}$  – энергия разрушения полиармированного фибробетона с момента начала движения трещины (вязкость разрушения);  $W_{ам.ф.}$  и  $W_{ст.ф.}$  – вклад соответственно аморфной металлической и стальной фибры в энергию разрушения полиармированного фибробетона.

*Вклад аморфной металлической фибры в энергию разрушения  
полиармированного фибробетона*

Поведение аморфнометаллической фибры в процессе разрушения фибробетона не одинаково. Часть волокон при максимальных напряжениях разрывается, другие волокна, концы которых расположены относительно растущей трещины на расстояниях  $x \leq \frac{\ell_{ам.кр}}{2}$ , вытягиваются из матрицы.

Энергия, необходимая для вытягивания таких волокон, и является вкладом аморфнометаллической фибры в общую вязкость разрушения композита:

$$W_{ам.ф} = N \int_0^{\ell_{ам.кр}/2} W_{выт} \frac{dx}{\ell_{ам.кр}/2} \quad (3.16)$$

где:  $N$  – число аморфнометаллических фибр, вытягиваемых из матрицы:

$$N = \frac{\ell_{ам.кр.}}{\ell_{ам.ф.}} n \mu \left/ \frac{\pi d_{ам.ф.}^2}{4} \right. \quad (3.17)$$

где:  $l_{ам.ф.}$ ,  $l_{ам.кр.}$  и  $d_{ам.ф.}$  – длина, критическая длина и эквивалентный диаметр аморфной металлической фибры;  $\mu$  – общая объемная доля волокон;  $n$  – доля аморфнометаллической фибры в общем объеме армирования.

Энергия вытягивания одной фибры  $W_{выт.}$ , конец которой расположен на расстоянии  $x$  от поверхности трещины:

$$W_{выт.} = \frac{\pi d_{ам.ф.}^2}{4} \int_0^x \sigma_{ам.ф.}^{max} dx = \frac{\pi d_{ам.ф.}^2}{4} \int_0^x \frac{4\tau x}{d_{ам.ф.}} dx \quad (3.18)$$

Тогда из уравнения (3.18) получим:

$$W_{выт.} = \frac{\pi}{2} d_{ам.ф.} \tau x^2 \quad (3.19)$$

где:  $\sigma_{ам.ф.}^{max}$  – максимальное нормальное напряжение.

После подстановки приведенных значений  $N$  и  $W_{выт.}$  и проведения соответствующих преобразований получим:

$$W_{ам.ф.} = \frac{1}{12} n \mu \frac{\ell_{ам.кр.}}{\ell_{ам.ф.}} \sigma_{ам.ф.}^{max} \ell_{ам.кр.} \quad (3.20)$$

Для определения  $\sigma_{ам.ф.}^{max}$  воспользуемся графиком, представленном на рисунке 3.7.

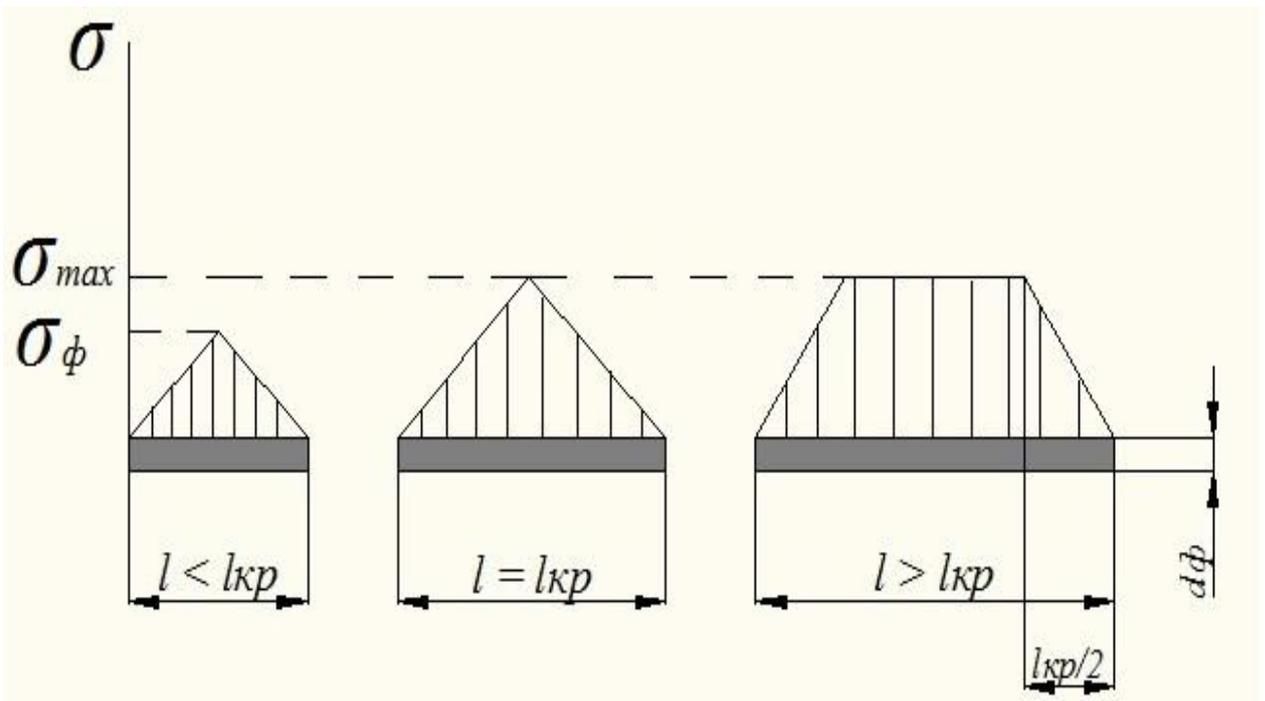


Рисунок 3.7 – Эпюры растягивающих напряжений в фибре различной длины

Из рисунка следует, что при длине фибры, меньшей критической длины ( $l_{\phi} < l_{кр.}$ ), нормальные напряжения в волокнах ( $\sigma_{\phi}$ ) растут от концов к середине по линейному закону. Максимальные напряжения не достигают предела прочности фибры, и разрушение такого фибробетона наступает в результате вытягивания волокон из бетонной матрицы, следующего за разрушением границ раздела волокно-матрица.

Если длина фибры больше критической длины ( $l_{\phi} > l_{кр.}$ ), максимальные напряжения в волокнах в момент образования и начала движения трещины не изменяются, однако увеличиваются участки волокон, на которых действуют эти напряжения, а это значит, что для разрушения фибробетона необходимо приложить большее усилие.

Если предположить, что на концах волокон длиной  $\frac{l_{кр.}}{2}$  действует растягивающее напряжение  $\beta\sigma_{\phi}^{\max}$ , а на остальных участках фибры напряжение составляет  $\sigma_{\phi}^{\max}$ , то среднее напряжение, действующее в фибре, можно определить как среднее арифметическое следующим образом:

$$\overline{\sigma_{\phi}} = \frac{\beta\sigma_{\phi}^{\max} \mu \frac{l_{кр.}}{l_{\phi}} + \sigma_{\phi}^{\max} \mu \left(1 - \frac{l_{кр.}}{l_{\phi}}\right)}{\mu} = \sigma_{\phi}^{\max} \left[1 - (1 - \beta) \frac{l_{кр.}}{l_{\phi}}\right] \quad (3.21)$$

Так как напряжения от концов фибр растут линейно, то  $\beta = 0,5$ , и уравнение для вычисления среднего напряжения будет иметь вид:

$$\overline{\sigma_{\phi}} = \sigma_{\phi}^{\max} \left(1 - \frac{l_{кр.}}{2l_{\phi}}\right) \quad (3.22)$$

Исходя из этого, максимальное напряжение в аморфнометаллической фибре к моменту начала движения образовавшейся трещины в композите составит:

$$\sigma_{ам.ф.}^{\max} = \left(1 - \frac{l_{ам.кр.}}{2l_{ам.ф.}}\right) R_{ам.ф.} = \left(1 - \frac{7,6}{2 \cdot 30}\right) \cdot 996 = 870 \text{ МПа}$$

*Вклад стальной фибры в энергию разрушения полиармированного  
фибробетона*

В случае, когда длина фибры меньше критической длины ( $l_{ст.ф} < l_{ст.кр}$ ), доля вытянутых волокон будет равна 1, а энергия, затрачиваемая на их вытягивание при разрушении композита:

$$W_{ст} = N \int_0^{l_{ст.ф}/2} W_{выт} \frac{dx}{l_{ст.ф}/2} \quad (3.23)$$

В этом случае число стальных фибр, вытягиваемых из матрицы:

$$N = (1 - n) \mu \frac{\pi d_{ст.ф.}^2}{4} \quad (3.24)$$

и вклад стальной фибры в вязкость разрушения фибробетона составит:

$$W_{ст} = \frac{1}{6} (1 - n) \mu \tau_{ст.ф} \frac{l_{ст.ф.}^2}{d_{ст.ф.}} \quad (3.25)$$

где:  $l_{ст.ф}$  и  $d_{ст.ф}$  – длина и диаметр стальной фибры;  $\tau_{ст.ф}$  – касательное напряжение.

После подстановки найденных значений  $W_{ам}$  и  $W_{ст}$  в формулу (3.15) получим выражение для определения вязкости разрушения полиармированного фибробетона в следующем виде:

$$W_{фб} = \frac{1}{6} \mu \left( \frac{l_{ам.кр.}^2}{2l_{ам.ф.}} \sigma_{ам.ф.}^{max} n + \frac{l_{ст.ф.}^2}{d_{ст.ф.}} \tau_{ст.ф.} (1 - n) \right) \quad (3.26)$$

В таблице 3.4 приведены теоретические и экспериментальные результаты определения вязкости разрушения фибробетонных образцов.

Таблица 3.4 – Значения вязкости разрушения для моно- и полиармированных фибробетонных образцов

Доля аморфной металлической фибры в общем объеме армирования, $n$	Теоретические значения вязкости разрушения, $W_{фб}$ , Дж	Экспериментальные значения вязкости разрушения (критерий хрупкости), $X^c_F$ , м
0	1656,4	143,96
0,5	967,2	107,9
1,0	279,2	30,44

Следует заметить, что теоретические значения вязкости характеризуются – энергией разрушения, необходимой для вытягивания волокон из матрицы, а экспериментальные – критерием хрупкости, определяемым по графику зависимости прогиба от прилагаемых нагрузок, и являющимся отношением произведения модуля упругости фибробетона и удельных эффективных энергозатрат к квадрату прочности при осевом растяжении. Поэтому, для сопоставления этих величин введен коэффициент пропорциональности:

$$k_{np} = \frac{X_F^C}{W_{fb}} = 0,1,$$

значения которого, полученные по данным таблицы 3.4, представлены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Значения коэффициентов пропорциональности

Доля аморфной металлической фибры в общем объеме армирования, $n$	$k_{np}$
0	0,09
0,5	0,1
1,0	0,11

Из таблицы видно, что при разном соотношении между аморфнометаллической и стальной фиброй в комбинации, значения коэффициента практически не отличаются друг от друга, что свидетельствует о высокой сходимости теоретических и экспериментальных данных.

Таким образом, при помощи разработанных моделей (3.5), (3.13) и (3.26) можно рассчитывать значения модуля упругости, прочности на растяжение при изгибе и вязкости разрушения полиармированного фибробетона, прогнозируя его поведение под нагрузкой как до образования трещин, так и в процессе их развития при разрушении композита.

### **Выводы по третьей главе:**

В результате проведения теоретических и экспериментальных исследований разработаны основы получения дисперсно полиармированного

бетона с применением двух видов высокомодульных волокон: аморфнометаллической и стальной фибры. При этом могут быть сформулированы следующие выводы и результаты:

1) В процессе испытания образцов получили экспериментальное подтверждение предварительные выводы и, соответственно, положения рабочей гипотезы о том, что разрушение фибробетона, армированного стальной фиброй, сопровождается вытягиванием волокон из бетонной матрицы, тогда как при армировании аморфнометаллической фиброй происходит разрыв волокон;

2) Предложены и исследованы математические модели для прогнозирования деформативных, прочностных и энергетических характеристик полиармированного фибробетона с применением аморфнометаллической фибры, показавшие высокую сходимость в сравнении с экспериментальными результатами;

3) Определены и обоснованы значения величин и коэффициентов, входящих в уравнения для проведения теоретических расчетов модуля упругости, прочности и вязкости разрушения с целью прогнозирования поведения полиармированного фибробетона под нагрузкой.

## **4. ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОЛИАРМИРОВАННОГО ФИБРОБЕТОНА**

### **4.1 Определение предела насыщения бетона аморфнометаллической и стальной фиброй**

На предыдущих этапах диссертационного исследования в процессе приготовления смесей дисперсно-армированного бетона с применением аморфнометаллической фибры при определенном насыщении волокнами возникали проблемы, связанные с обеспечением равномерности их распределения по объему. Так как получение однородной фибробетонной смеси в процессе перемешивания является одной из основных задач технологии, необходимо выяснить, от каких параметров зависит максимально возможное насыщение бетонной смеси армирующими волокнами.

Анализ литературных источников по данному вопросу позволил установить, что чаще всего объемное содержание фибры в сталефибробетоне составляет 1,5-2,0 % [40]. Подобных работ, посвященных определению пределов насыщения бетона аморфнометаллической фиброй, обнаружено не было.

По «правилу смесей» зависимость прочности сталефибробетона от объемного процента армирования, носит линейный характер. Однако из технической литературы известно, что при повышении степени насыщения бетонной смеси армирующим волокном выше некоторого критического предела, характер зависимости изменяется, и прочность композита оказывается выше, чем рассчитанная по «правилу смесей». Так, в работах Пухаренко Ю.В. [90, 96] экспериментально установлено и теоретически обосновано нелинейное изменение прочности композита, в зависимости от предельного объемного насыщения бетона армирующим волокном. При этом на линии, характеризующей изменение прочности фибробетона при его

армировании волокнами в пределах от нуля до единицы, выделено 4 участка и, соответственно, 3 характерных значения пределов объемного армирования, представленных на рисунке 4.1.

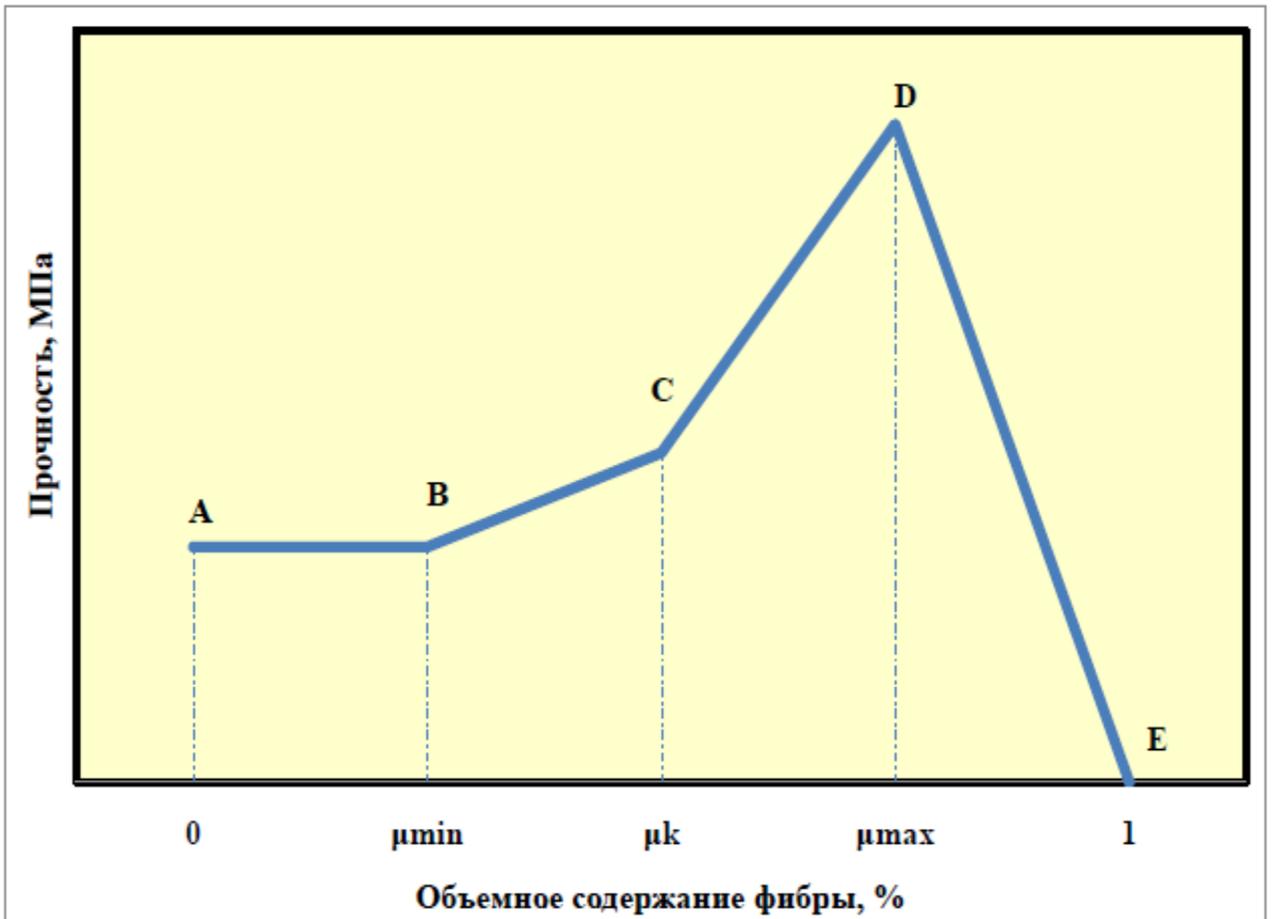


Рисунок 4.1 – Характер изменения прочности фибробетона в зависимости от объемного содержания фибры

Из приведенных данных следует, что в пределах участка АВ прочность дисперсно армированного бетона практически не отличается от прочности цементной матрицы, что определяется малым насыщением бетона волокнами, когда они достаточно далеко удалены друг от друга и практически не взаимодействуют. Этот участок образно может быть назван «зоной рассеянного армирования».

Точка В соответствует ситуации, когда с момента появления в бетонной матрице трещин, приложенную нагрузку воспринимает фибра и обеспечивает несущую способность.

Участок ВС определяет так называемую «зону сосредоточенного армирования», а точка С является моментом слияния контактных зон, возникших в процессе структурообразования вблизи поверхности раздела фибра – матрица, и образования таким образом объемного фиброцементного каркаса.

Участок CD характеризует дальнейшее, причем более интенсивное, повышение прочности фибробетона в «зоне каркасного армирования», что является результатом уплотнения цементного камня между волокнами. Точка D соответствует достижению максимальной прочности фибробетона, после которой наблюдается ее снижение, вызванное уменьшением толщины матричного слоя настолько, что материал проявляет склонность к расслоению даже при небольших нагрузках.

Очевидно, подобным образом должна изменяться и прочность полиармированного фибробетона. В этом случае местоположение точек на приведенном выше графике будет зависеть от вида и свойств бетона, применяемого в качестве матричного материала, количества, геометрических размеров и других характеристик фибр, составляющих комбинацию армирования, а также от соотношения между ними.

Для определения предельного насыщения бетона аморфнометаллической и стальной фиброй с обеспечением равномерности их распределения в получаемой структуре, были изготовлены серии полиармированных фибробетонных образцов с общим содержанием волокон 1%, 2% и 3% по объему.

При проведении исследований были использованы следующие материалы: портландцемент марки ПЦ 500 Д0 ОАО «Осколцемент»; кварцевый песок с модулем крупности  $M_{кр} = 2,34$ ; фибра стальная, волнового профиля из проволоки  $d_{ст.ф.} = 0,3$  мм,  $l_{ст.ф.} = 22$  мм; фибра металлическая, аморфная производства ООО «Химмет»  $d_{ам.ф.}^{экв} = 0,3$  мм,  $l_{ам.ф.} = 30$  мм, суперпластификатор *Schomburg Remicrete*.

В качестве матрицы для получения фибробетонных образцов использовался мелкозернистый бетон, который позволяет обеспечить высокую степень насыщения волокнами. Все образцы имели одинаковый состав матрицы: Ц:П = 1:2 при В:Ц = 0,32 и расходе добавки пластификатора 0,7 % от массы цемента.

В таблице 4.1 приведены результаты прочности на растяжение при изгибе образцов с разным количеством применяемых волокон и соотношением между ними. При этом, теоретические значения прочности получены расчетом по уравнению (3.13).

Таблица 4.1 – Прочность фибробетонных образцов с разным содержанием и соотношением волокон

Доля аморфнометаллической фибры в общем объеме армирования, $n$	Общее содержание волокон по объему, $\mu$ , %	Прочность на растяжение при изгибе, $R_{изг}$ , МПа	
		эксп.	теор.
0	1	17,7	18,11
	2	21,73	28,1
	3	19,67	38,09
0,3	1	16,84	16,11
	2	22,21	24,13
	3	20,45	32,13
0,4	1	16,3	15,44
	2	22,52	22,8
	3	20,29	30,14
0,5	1	15,81	14,78
	2	21,55	21,48
	3	20,86	28,16
0,6	1	15,53	14,12
	2	21,2	20,15
	3	20,9	26,17
0,7	1	14,27	13,46
	2	19,93	18,83
	3	20,44	24,19
1,0	1	12,4	11,46
	2	17,21	14,86
	3	20,75	18,23

На рисунке 4.2 представлено сравнение экспериментальных и теоретических результатов прочности на растяжение при изгибе

фибробетонных образцов с разным соотношением и количеством применяемых волокон.

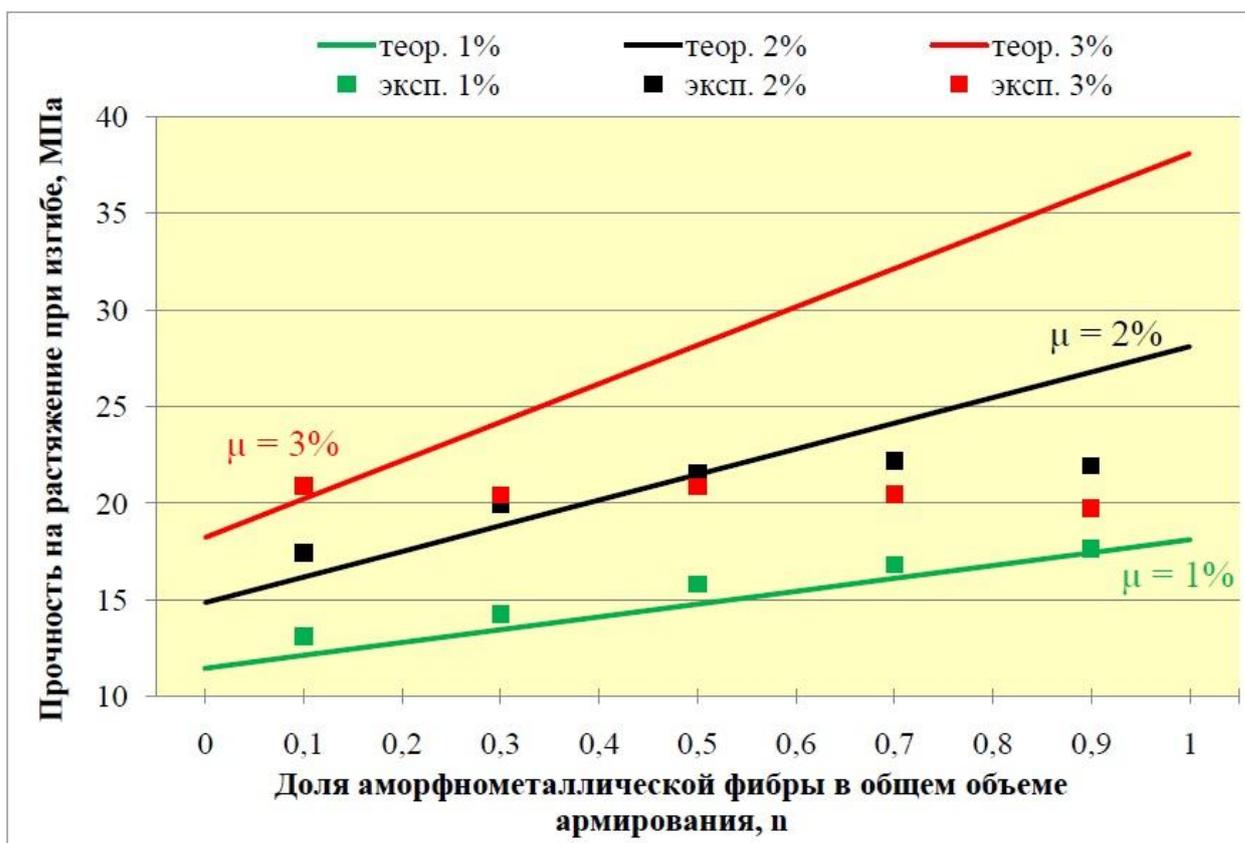


Рисунок 4.2 – Зависимость прочности полиармированного фибробетона от количества волокон и соотношения между ними

Из приведенных данных следует, что в рассматриваемой области экспериментирования, ограниченной видом и характеристиками используемых волокон с учетом принятой технологии, получение полиармированного фибробетона с прогнозируемыми свойствами возможно при общей степени насыщения фиброй до  $\mu = 2\%$  по объему. В дальнейшем наблюдается уменьшение прочности композита, сопровождающееся значительным расхождением между расчетными и экспериментальными характеристиками, что вызвано трудностью обеспечения равномерного распределения аморфнометаллического волокна в заданном объеме бетона и создания плотной упаковки составляющих в системе «дисперсная арматура-бетон» (рисунок 4.3).

С учетом данных обстоятельств, дальнейшая оценка эффективности дисперсного полиармирования проводилась на составах фибробетона с

общим расходом волокон, не превышающем 2% по объему, при различном сочетании стальной и аморфнометаллической фибры.



Рисунок 4.3 – Вид образца, армированного аморфнометаллической фиброй в объеме 3% после испытания на изгибе

#### **4.2 Определение модуля упругости, коэффициента Пуассона и призмочной прочности**

Несмотря на то, что область применения фибробетона в значительной степени зависит от его упругих свойств, деформационные характеристики фибробетона, в отличие от прочностных, изучены не столь подробно.

Определение модуля упругости, коэффициента Пуассона и призмочной прочности производилось на образцах-призмах квадратного сечения с размером 70\*70\*280 мм.

В процессе выполнения эксперимента количество стальной фибры в образцах от серии к серии уменьшалось за счет соответствующего увеличения количества аморфной металлической, при этом общий расход волокон оставался неизменным и составлял 2% по объему. Результаты испытаний фибробетонных образцов приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Результаты испытаний модуля упругости фибробетонных образцов, армированных комбинацией стальной и аморфнометаллической фиброй

Доля аморфной металлической фибры в общем объеме армирования, $n$	Средняя плотность, $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Призменная прочность, $R_{пр}$ , МПа	Модуль упругости, $E$ , МПа		Коэффициент Пуассона, $\nu$
			эксп.	теор.	
бетон без фибры	2249	45,5	31643	-	0,19
0	2388	52,3	40654	40503	0,158
0,1	2388	54,4	40952	40850	0,156
0,2	2382	57,5	41188	41198	0,148
0,3	2381	58,0	41527	41547	0,146
0,4	2377	60,2	41844	41895	0,138
0,5	2373	60,4	42000	42243	0,137
0,6	2370	61,3	42440	42591	0,135
0,7	2368	62,1	42776	42939	0,129
0,8	2360	62,4	43147	43288	0,126
0,9	2355	63,1	43627	43636	0,117
1,0	2351	62,9	43945	43984	0,119

Из таблицы следует, что при увеличении содержания в смеси аморфной металлической фибры, модуль упругости фибробетона повышается.

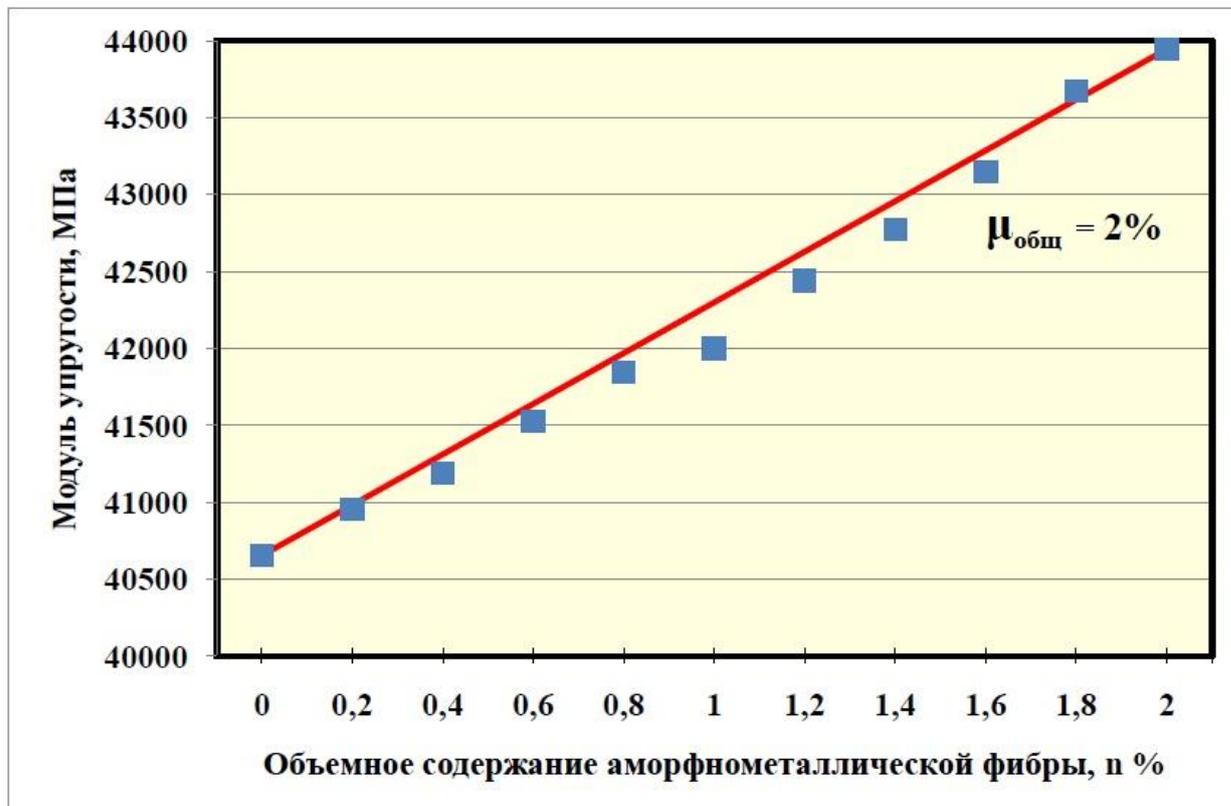


Рисунок 4.4 – Зависимость модуля упругости полиармированного фибробетона от содержания аморфнометаллической фибры в составе комбинации

На рисунке 4.4 представлен график зависимости модуля упругости полиармированного фибробетона от объемной доли аморфнометаллической фибры при общем содержании высокомодульных волокон в комбинации в размере 2 %.

При повышении количества аморфной металлической фибры и, соответственно, пропорциональном уменьшении стальной, происходит повышение призмной прочности, что следует из гистограммы зависимости призмной прочности полиармированного фибробетона от объемного соотношения стальной и аморфнометаллической фибры (рисунок 4.5).

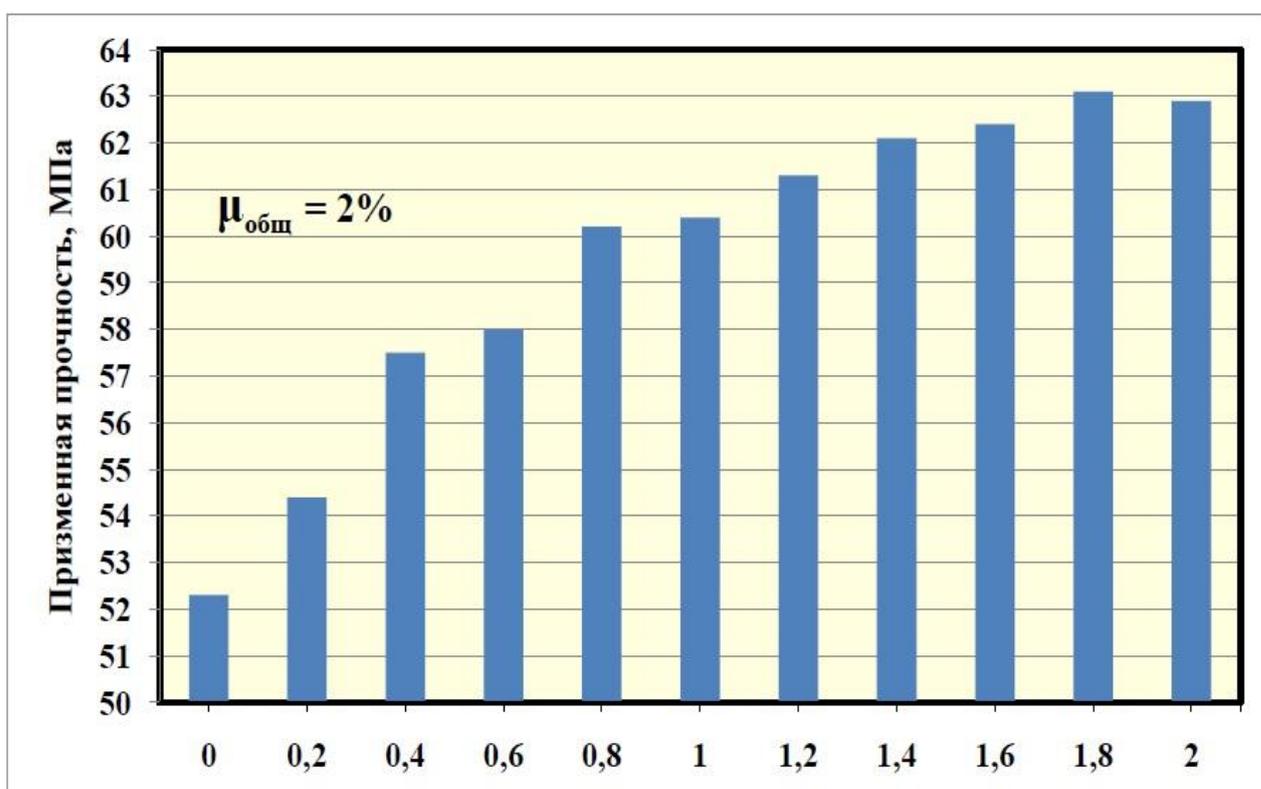


Рисунок 4.5 – Зависимость призмной прочности полиармированного фибробетона от содержания аморфнометаллической фибры в составе комбинации

Значения коэффициента Пуассона колеблются приблизительно между  $\nu = 0,158$  для фибробетонных образцов, армированных стальной фиброй, и  $\nu = 0,119$  для образцов, армированных аморфнометаллической фиброй. По полученным экспериментальным данным есть основания предполагать, что существует связь (практически линейная зависимость) между прочностью фибробетона и его коэффициентом Пуассона (рисунок 4.6). Таким образом,

чем ниже получается предельная деформация фибробетона в результате увеличения содержания в смеси аморфнометаллических фибр, тем выше его прочность.

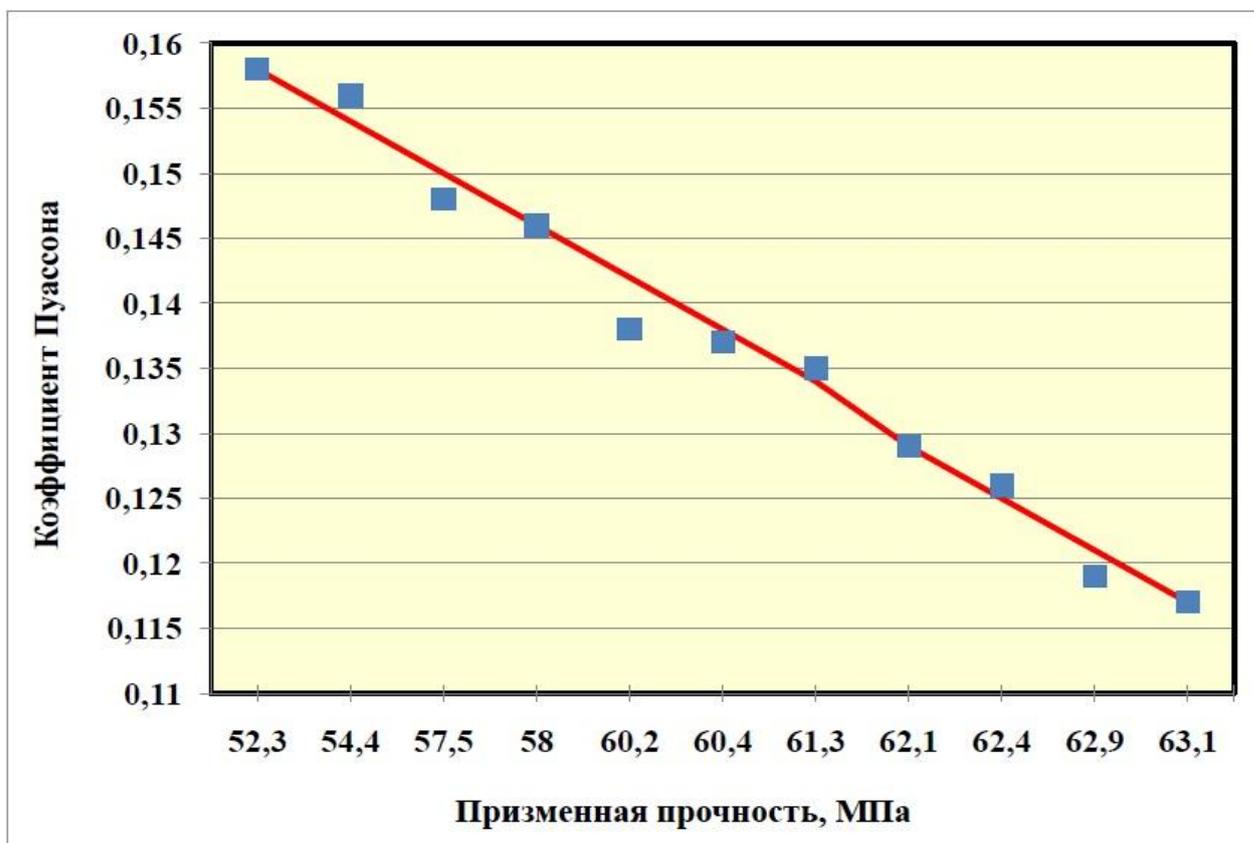


Рисунок 4.6 – Зависимость коэффициент Пуассона полиармированного фибробетона от призмочной прочности

Обобщая все результаты, полученные в ходе испытаний, можно сделать следующие выводы:

1) Наиболее распространенный в настоящее время вариант армирования бетона стальной фиброй (моноармирование) позволяет повысить модуль упругости в 1,08 раза, призмочную прочность в 1,2 раза и снизить коэффициент Пуассона в 1,33 раза;

2) В результате полиармирования аморфнометаллической и стальной фиброй в количестве 2% по объему модуль упругости и призмочная прочность бетона повышается соответственно в 1,38 и 1,39 раза, а коэффициент Пуассона снижается в 1,62 раза;

### 4.3 Определение энергических и силовых характеристик разрушения (прочность на растяжение при изгибе, трещиностойкость, вязкость разрушения)

Для определения энергических и силовых характеристик разрушения полиармированного фибробетона были изготовлены серии образцов с различным сочетанием аморфнометаллической и стальной фибры в составе смеси.

Испытания на трехточечный изгиб по неравновесной схеме производились на образцах-призмах квадратного сечения размером  $70 \times 70 \times 280$  мм, имеющих начальные надрезы: нижний  $a_0 = 25$  мм и верхний  $a_{0t} = 5$  мм (рисунок 4.7). В ходе испытания образцов получали не только прочностную характеристику материала, но и диаграмму зависимости прогибов от прилагаемых нагрузок.

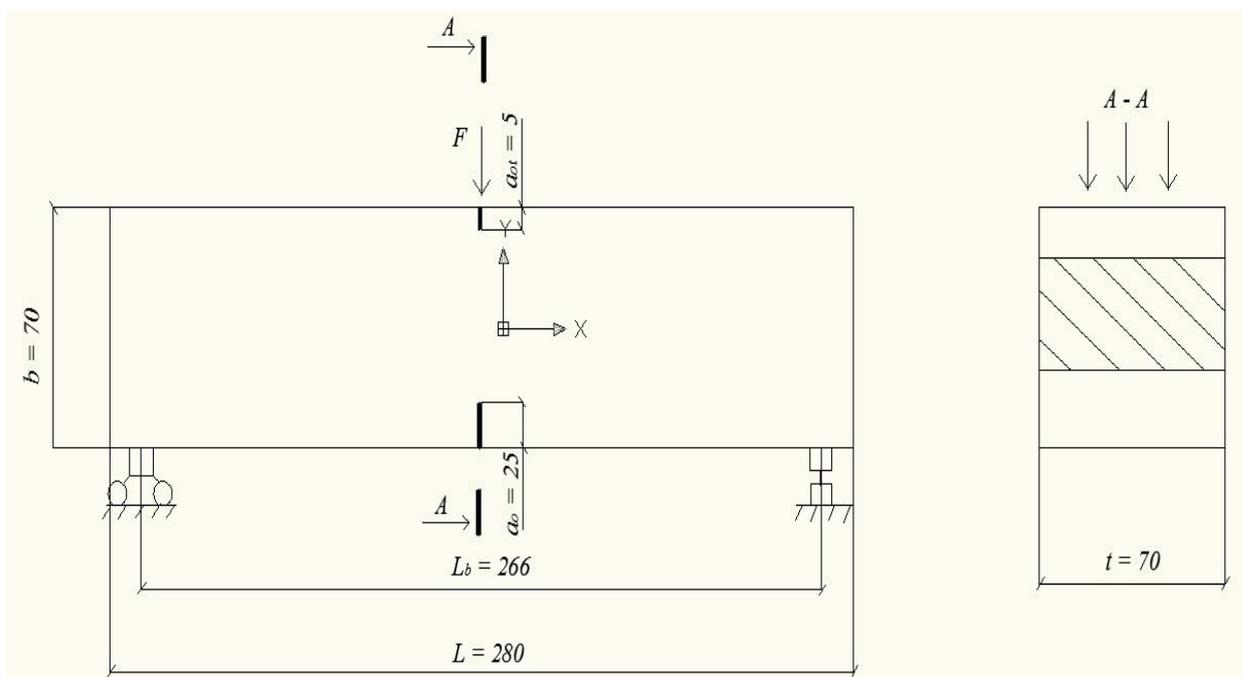


Рисунок 4.7 – Вид образца для испытания на трехточечный изгиб

Результаты экспериментов по определению энергических и силовых характеристик разрушения полиармированного фибробетона приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Результаты испытаний по определению энергетических и силовых характеристик разрушения

Энергетические и силовые характеристики разрушения	Содержание аморфнометаллической/стальной фибры, %											
	0	0/2	0,2/1,8	0,4/1,6	0,6/1,4	0,8/1,2	1/1	<b>1,2/0,8</b>	1,4/0,6	1,6/0,4	1,8 /0,2	2/0
Удельные энергозатраты на статическое разрушение до момента начала движения магистральной трещины, $G_i$ , Дж/м <sup>2</sup>	0,653	1,13	1,088	1,107	1,064	1,309	1,332	<b>1,39</b>	1,372	1,349	1,345	1,342
Удельные эффективные энергозатраты на статическое разрушение, $G_F$ , Дж/м <sup>2</sup>	1,7	3320	3297	3242	3056	2815	2698	<b>2552</b>	2246	1760	1151	761
Полные удельные упругие энергозатраты на статическое деформирование образцов до деления на части, $G_{ce}$ , Дж/м <sup>2</sup>	0,328	0,971	0,91	0,839	0,74	0,999	1,095	<b>1,191</b>	1,115	1,142	1,085	0,918
Статический джей-интеграл, $J_i$ , Дж/м <sup>2</sup>	0,457	0,861	0,832	0,775	0,745	0,916	0,932	<b>0,973</b>	0,96	0,944	0,942	0,939
Трещиностойкость (условный критический коэффициент интенсивности напряжений), $K_c$ , МПа·м <sup>0,5</sup>	0,388	0,821	0,844	0,855	0,949	1,01	1,028	<b>1,074</b>	1,06	1,042	1,038	1,036
Вязкость разрушения (критерий хрупкости), $X_F^c$ , м	0,1	143,9 6	131,8 8	129,6 8	122,2 4	112,6	107,9	<b>102,1</b>	89,84	70,4	46,04	30,44
Прочность на осевое растяжение, $R_{bt}$ , МПа	1,48	3,13	3,22	3,26	3,62	3,85	3,92	<b>4,09</b>	4,04	3,97	3,96	3,95
Прочность на растяжение при изгибе, $R_{изг}$ , МПа	8,1	17,2	17,7	17,9	19,9	21,2	21,6	<b>22,5</b>	22,2	21,9	21,8	21,7

Из таблицы следует, что в варианте моноармирования, образцы, армированные только аморфнометаллической фиброй в объеме 2% обладают прочностью на растяжение при изгибе в 1,26 раза большей, чем образцы, армированные равным количеством стальной фибры. Кроме того, армирование мелкозернистого бетона аморфной металлической фиброй позволяет повысить коэффициент интенсивности напряжений  $K_c$  (трещиностойкость), который определяет процесс разрушения фибробетона в вершине трещины, в 2,67 раза; применение в тех же условиях стальной фибры – только в 2,11 раза.

В то же время применение разработанного в диссертации варианта полиармирования позволило совместить положительные качества аморфной металлической и стальной фибры. Наибольшую эффективность показали образцы, армированные волокнами при их следующем соотношении: 60% аморфнометаллической фибры и 40% стальной фибры. В этом случае имеет место дальнейшее увеличение прочности на растяжение при изгибе, прочности на осевое растяжение и критического коэффициента интенсивности напряжений, а так же значительно, более чем в 3,3 раза, по сравнению с образцами, армированными только аморфной металлической фиброй, повышается критерий хрупкости (вязкость разрушения) композита. Таким образом, можно говорить о возникновении синергитического эффекта, обусловленного достижением тесного взаимодействия между аморфнометаллической и стальной фиброй, взятых в оптимальной пропорции.

Экспериментальные и теоретические (рассчитанные по формуле 3.26) значения характеристик, позволяющих судить о вязкости разрушения фибробетонов, приведены в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Результаты определения вязкости разрушения полиармированных фибробетонных образцов

Доля аморфной металлической фибры в общем объеме армирования, $n$	Вязкость разрушения		Критический коэффициент интенсивности напряжений, $K_c$ , МПа·м <sup>0,5</sup>
	Критерий хрупкости, $X^c_{F, м}$	Энергия разрушения, $W_{фб, Дж}$	
бетон без фибры	0,1	-	0,388
0	144,0	1656,4	0,821
0,1	131,9	1518,6	0,844
0,2	129,7	1380,9	0,855
0,3	122,2	1243,2	0,949
0,4	112,6	1105,5	1,01
0,5	107,9	967,8	1,031
<b>0,6</b>	<b>102,1</b>	<b>830,0</b>	<b>1,074</b>
0,7	89,8	692,3	1,06
0,8	70,4	554,6	1,046
0,9	46,0	416,9	1,041
1,0	30,4	279,2	1,036

Так как теоретическое значение вязкости разрушения характеризуется энергией, необходимой для вытягивания или разрыва волокна из матрицы композита, а экспериментальное – критерием хрупкости, определяемым, согласно ГОСТ 29167, по графику зависимости прогиба от прилагаемой нагрузки, требуется ввести коэффициент пропорциональности, по которому можно судить о сходимости экспериментального значения с теоретическим.



Рисунок 4.8 – Зависимость между критерием хрупкости и энергией разрушения

Коэффициент пропорциональности, который, как следует из рисунка 4.8, составляет

$$k_{пр} = \frac{X_F^C}{W_{фб}} = 0,1.$$

В процессе испытания еще раз было подтверждено, что разрушение образца, армированного стальной фиброй, сопровождается вытягиванием волокон из бетонной матрицы, тогда как разрушение образца, армированного аморфнометаллической фиброй, происходит в результате разрыва волокон.

На рисунке 4.9 представлена диаграмма зависимости прогибов моно- и полиармированных фибробетонных образцов от прилагаемых нагрузок, на которой видно, что при использовании двух видов высокомодульных волокон в виде аморфнометаллической и стальной фибры, взятых в оптимальном соотношении, позволяет управлять комплексом свойств фибробетона, изменяя требуемые характеристики в ту или иную сторону.

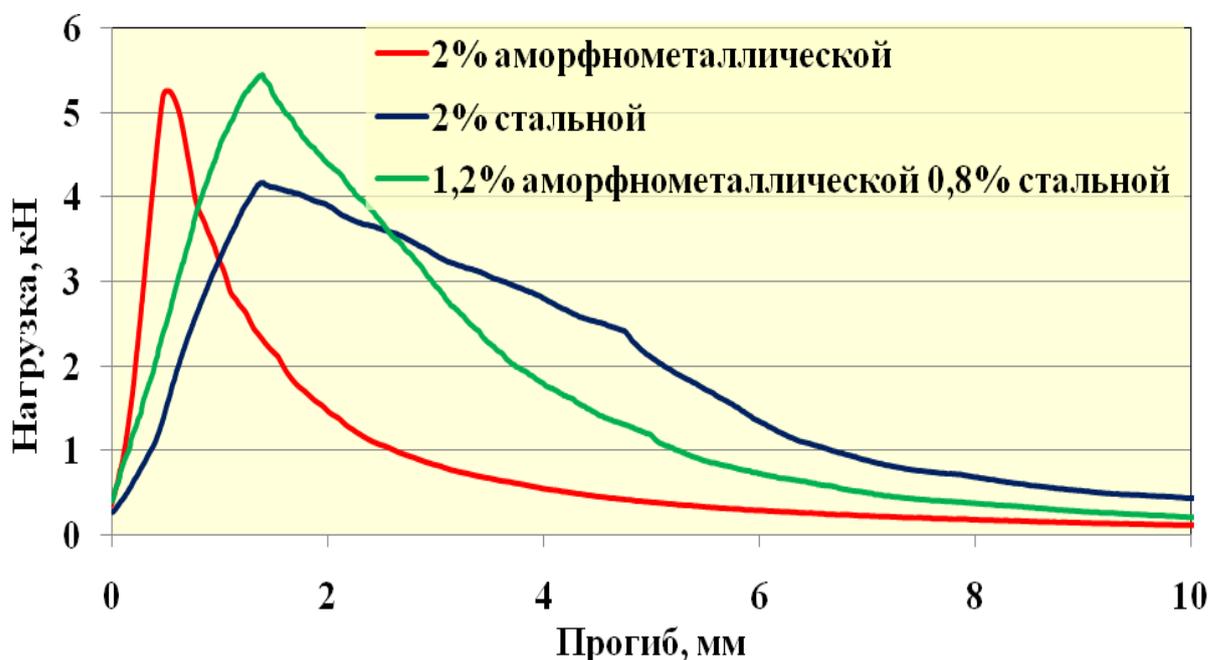


Рисунок 4.9 – Зависимость прогибов фибробетонных образцов от прилагаемых нагрузок

Так, введение аморфнометаллической фибры, имеющей высокое сцепление с матрицей, приводит к повышению прочностных и деформативных характеристик композита, а одновременное добавление

стальной фибры улучшает энергетические характеристики, такие как вязкость разрушения.

### **Выводы по четвертой главе:**

В результате проведенных исследований впервые установлены физико-механические, энергетические и деформативные характеристики полиармированного фибробетона с использованием аморфнометаллической фибры и получены следующие данные:

1) Показано, что степень изменения указанных характеристик зависит от соотношения между стальной и аморфнометаллической фиброй в составе полиармирования и, главным образом, от объемной доли последней;

2) В результате полиармирования аморфнометаллической и стальной фиброй в количестве 2% по объему модуль упругости бетона повышается в 1,38 раза, а коэффициент Пуассона снижается в 1,62 раза. По сравнению с этим наиболее распространенный в настоящее время вариант армирования бетона стальной фиброй (моноармирование) позволяет повысить модуль упругости в 1,08 раза и снизить коэффициент Пуассона в 1,33 раза;

3) Полидисперсное армирование позволяет повысить трещиностойкость бетона: коэффициент интенсивности напряжений ( $K_c$ ) увеличивается в 2,77 раза, в то время как при моноармировании стальной фиброй этот показатель возрастает только в 1,31 раза;

4) Призмная прочность и прочность на растяжение при изгибе бетона при полиармировании повышаются в 1,39 и 2,8 раза соответственно, при использовании только стальной фибры – в 1,2 и 2,13 раза.

## **5. ПРОЕКТИРОВАНИЕ СОСТАВОВ ПОЛИАРМИРОВАННЫХ ФИБРОБЕТОНОВ**

### **5.1 Принципы проектирования составов моноармированных фибробетонов**

Вопросами проектирования составов фибробетонов в разное время занимались Баженов Ю.М., Волков И.В., Каприелов С.С., Ковалева А.Ю., Коротких Д.Н., Коротышевский О.В., Крылов Б.А., Курбатов Л.Г., Лобанов И.А., Маилян Л.Р., Малышев В.Ф., Пухаренко Ю.В., Рабинович Ф.Н., Романов В.П., Талантова К.В., Шляхтина Т.Ф. и многие другие ученые [21, 23, 41, 56, 86, 96]. Однако, полностью решенной задачу считать нельзя, так как появляются все новые и новые виды бетонов и варианты армирования, а также новые требования к композитам, изделиям и конструкциям на их основе.

Немногочисленные нормативные документы содержат лишь поверхностные сведения о составах фибробетонов, а представленные в них методики основаны на эмпирическом подходе. Часто в постановке задания по проектированию фибробетонов не указывается ни прочность на растяжение при изгибе, ни вязкость разрушения или трещиностойкость, ни другие требования к композиту, для выполнения которых и осуществляется дисперсное армирование. Следовательно, уже с самого начала утрачивается целенаправленность процедуры подбора состава.

Следует подчеркнуть, что отличительной особенностью дисперсно армированных бетонов является наличие в их составе дискретных волокон, влияние которых на изменения, происходящие в структуре и свойствах материала, необходимо учитывать при назначении состава бетонной матрицы.

В СПбГАСУ сформулирован общий подход к проектированию составов и разработаны частные методики подбора состава некоторых видов

фибробетона: крупно- и мелкозернистого сталефибробетона, легкого и ячеистого фибробетона, армированного полимерными волокнами, и некоторых других.

Основополагающим принципом, который использовался при разработке частных методик, является представление о фибре, как о части своеобразного заполнителя, обладающего развитой поверхностью и оказывающего существенное влияние на технологические характеристики смеси составляющих. В ходе проделанного литературного обзора и экспериментальных исследований были получены следующие данные о структурообразующей роли армирующих волокон в фибробетоне:

- Дисперсная арматура является наиболее активной частью заполнителя, которая взаимодействуя с цементной матрицей, служит в качестве подложки для формирования контактных зон на границе раздела фаз;
- Из-за своей развитой поверхности дисперсная арматура создает некий поверхностный потенциал и оказывает влияние на величину адгезии цементных зерен;
- Дисперсная арматура при определенном объемном армировании образует пространственный каркас, тем самым формирует минимальную пустотность и сокращает расход вяжущего;
- За счет высокой степени дисперсности и непрерывного пространственного каркаса дисперсная арматура создает препятствие для возникновения и распространения трещин;
- Тесное взаимодействие дисперсной арматуры с матрицей на границе раздела фаз обеспечивает высокое сцепление между компонентами.

Большинство ученых, занимавшихся дисперсно армированными бетонами, сходятся во мнении, что ключевым фактором, определяющим свойства фибробетона, является прочность сцепления дисперсной арматуры с матрицей. Однако, характеристики, по которым можно судить о прочности

сцепления, а так же методики их определения, предлагают разные. Так, Лобановым И.А., предложен коэффициент использования прочностных характеристик армирующих волокон  $K_{исп}$ , который варьируется от 0 до 1:

$$K_{исп} = \frac{R_{\text{даб}} - R_m}{k_x \mu_0 R_a} \quad (5.1)$$

где:  $R_{\text{даб}}$  – предел прочности дисперсно армированного бетона;  $R_m$  – предел прочности матрицы;  $k_x$  – коэффициент ориентации волокон;  $\mu_0$  – степень насыщения бетонной матрицы волокнами;  $R_a$  – предел прочности арматуры.

Позже, Майга А.Х., предложил использовать формулу (5.2), которая учитывает геометрические характеристики используемой фибры:

$$\tau_{cy} = \frac{\Delta A}{k_x \frac{S}{2} \cdot \frac{\mu_0}{f}} \quad (5.2)$$

где:  $\Delta A$  – фактический вклад дисперсной арматуры;  $k_x$  – коэффициент ориентации фибр;  $S$  – боковая поверхность фибры;  $\mu_0$  – процент насыщения фибрами по объему;  $f$  – площадь сечения одной фибры.

Пухаренко Ю.В. была разработана методика (5.3) с помощью, которой рассчитывается характеристика сцепления фибр с цементным камнем из теста нормальной густоты:

$$(\varphi\tau) = \frac{R_{\text{фи}} - 3,5 \cdot R_{\text{кз}} \cdot \mu_{\text{min}} - (1 - 4,5 \cdot \mu_{\text{min}}) \cdot R_{\text{цк}}}{2 \cdot \frac{\ell}{d} \cdot \mu_{\text{min}}} \quad (5.3)$$

где:  $R_{\text{фи}}$  – прочность фиброцемента;  $R_{\text{кз}}$  – прочность контактной зоны;  $R_{\text{цк}}$  – цементного камня из теста нормальной густоты;  $\mu_{\text{min}}$  – минимальный коэффициент армирования.

Следовательно, задача проектирования составов фибробетонов сводится к рациональному выбору дисперсной арматуры, соответствующей условиям ее работы и назначению. Значит, при формулировании задания по проектированию составов фибробетонов, необходимо задаваться следующими сведениями:

- Размеры и вид изделия;

- Предел прочности на растяжение при изгибе, предел прочности при сжатии, трещиностойкость и вязкость разрушения;
- Удобоукладываемость смеси (жесткость или подвижность);
- В определенных случаях морозостойкость, истираемость, водонепроницаемость и другие характеристики.

Следует заметить, что разработанные методики проектирования составов были посвящены исключительно моноармированным фибробетонам. С учетом изложенного и в развитие проведенных исследований в диссертации разработана методика проектирования состава полиармированного фибробетона.

## 5.2 Проектирование составов полиармированных фибробетонов с использованием аморфнометаллической фибры

В соответствии с предложенной методикой, проектирование составов полиармированных фибробетонов с заданной прочностью и вязкостью разрушения выполняется в указанной ниже последовательности:

- 1) Определяется состав исходного бетона – матрицы композита по стандартной методике;
- 2) По результатам предварительных экспериментов или из имеющихся статистических данных выбирается эффективное соотношение между аморфнометаллической и стальной фиброй;
- 3) Рассчитывается общая объемная доля волокон, необходимая для обеспечения заданной прочности полиармированного фибробетона, по уравнению:

$$\mu = \frac{R_{фб} - R_{б}}{\left[ R_{ам.ф.} \cdot n + 2\tau_{см.ф.} \cdot \frac{\ell_{см.ф.}}{d_{см.ф.}} (1 - n) \right] + 3,5R_{к.з.} - 4,5R_{б}} ;$$

4) Рассчитывается объемная доля волокон, обеспечивающая получение полиармированного фибробетона с заданной вязкостью разрушения:

$$\mu = \frac{6 \cdot W_{фб}}{\left( \frac{\ell_{ам.кр.}^2 \cdot \sigma_{ам.ф.}^{max} \cdot n}{2 \ell_{ам.ф.}} + \frac{\tau_{ст.ф.} \cdot \ell_{ст.ф.}^2 \cdot (1-n)}{d_{ст.ф.}} \right)}$$

5) При выполнении дальнейших действий из двух полученных значений  $\mu$  используется наибольшее;

6) Определяются требуемые по заданию характеристики фибробетона путем изготовления и испытания опытной партии лабораторных образцов;

7) Производится корректировка состава фибробетонной смеси стандартными методами.

При помощи данной методики разработаны составы различных видов полиармированных фибробетонов с применением аморфнометаллической фибры, приведенные в таблице 5.1, один из которых использовался при производстве опытной партии наземных резервуаров автозаправочных комплексов.

Таблица 5.1 – Варианты составов различных видов фибробетона

Компоненты бетонной смеси	Виды бетона		
	Тяжелый бетон	Легкий бетон	Мелкозернистый бетон
Портландцемент	380	397	<b>650</b>
Кварцевый песок	730	-	<b>1450</b>
Керамзитовый песок	-	794	-
Щебень	1060	-	-
Фибра стальная из проволоки	102,8	32,1	<b>50</b>
Фибра аморфная металлическая	43,9	76,1	<b>76</b>
Пластификатор	-	1,98	<b>4,55</b>
Вода	195	159	<b>228</b>

### 5.3 Примеры разработки составов полиармированных фибробетонных смесей с использованием аморфнометаллической фибры

#### Пример №1

Задание: Разработать состав сталефибробетона для покрытий пола в производственных помещениях, класса В25, прочностью на растяжение при изгибе не менее 12 МПа и вязкостью разрушения  $W_{фб} = 400$  Дж. Удобоукладываемость смеси должна соответствовать марке П4. Для армирования использовать аморфнометаллическую фибру производства ООО «Химмет» и стальную проволочную фибру.

1. В качестве исходных компонентов выбираем портландцемент марки ПЦ400Д20; щебень гранитный с ограничением максимального размера до 20 мм, истинная плотность щебня  $2650 \text{ кг/м}^3$ , насыпная плотность щебня  $1400 \text{ кг/м}^3$ ; песок средней крупности  $M_{кр} = 2,1$ , насыпная плотность песка  $1480 \text{ кг/м}^3$ , истинная плотность  $2600 \text{ кг/м}^3$ , водопотребность 4 %.

2. При помощи метода абсолютных объемов определяем исходный состав исходной бетонной смеси:

– Водоцементное отношение:

$$B/C = \frac{A \cdot R_u}{(R_с + 0,8AR_u)} = \frac{0,6 \cdot 40}{(30 + 0,5 \cdot 0,6 \cdot 40)} = 0,57;$$

где:  $A$  – коэффициент, зависящий от качества материалов;  $R_u$  – активность портландцемента;  $R_с$  – прочность бетона.

– Расход воды с учетом требуемой подвижности, определенный по графикам, составил:  $B = 210 \text{ л/м}^3$ ;

– Расход портландцемента:

$$C = \frac{B}{B/C} = \frac{210}{0,57} = 368 \text{ кг/м}^3;$$

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

– Расход щебня:

$$Ш = \frac{1000}{\left( \alpha \cdot \frac{П_{ш}}{\rho_u^{ш}} + \frac{1}{\rho_n^{ш}} \right)} = \frac{1000}{\left( 1,4 \cdot \frac{0,45}{2,65} + \frac{1}{1,4} \right)} = 1050 \text{ кг/м}^3;$$

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

– Расход песка:

$$П = \rho_u^n \cdot \left( 1000 - \frac{Ц}{\rho_u^ц} - \frac{Ш}{\rho_u^{ш}} - В \right) = 2,6 \cdot \left( 1000 - \frac{368}{3,1} - \frac{1050}{2,65} - 210 \right) = 715 \text{ кг/м}^3.$$

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

В результате испытаний неармированных образцов установлены прочностные характеристики исходного бетона:  $R_{сж} = 32,4$  МПа,  $R_{изг} = 4,5$  МПа.

3. Рассчитываем объемную долю фибры, обеспечивающую получение фибробетона заданной прочности:

$$\mu = \frac{R_{фб} - R_{б}}{\left[ R_{ам.ф.} \cdot n + 2\tau_{см.ф.} \cdot \frac{\ell_{см.ф.}}{d_{см.ф.}} \cdot (1 - n) \right] + 3,5R_{к.з.} - 4,5R_{б}}$$

$$\mu = \frac{12 - 4,5}{\left[ 996 \cdot 0,3 + 334,68 \cdot (1 - 0,7) \right] + 3,5 \cdot 6,3 - 4,5 \cdot 4,5}$$

$$\mu = \frac{7,5}{401,3}$$

$$\mu = 0,0187\%$$

Отсюда следует, что общее объемное содержание волокон ( $\mu$ ) составляет 1,87 %.

4. Рассчитываем объемную долю фибры, обеспечивающую получение фибробетона заданной вязкости разрушения:

$$\mu = \frac{6 \cdot W_{фб}}{\left( \frac{\ell_{ам.кр.}^2 \cdot \sigma_{ам.ф.}^{max} \cdot n}{2\ell_{ам.ф.}} + \frac{\tau_{ст.ф.} \cdot \ell_{ст.ф.}^2 \cdot (1-n)}{d_{ст.ф.}} \right)}$$

$$\mu = \frac{6 \cdot 400}{386271}$$

$$\mu = 0,0062\%$$

Отсюда следует, что общее объемное содержание волокон ( $\mu$ ) составляет 0,62 %.

5. Для обеспечения заданных характеристик полиармированного фибробетона, выбираем наибольшее значение  $\mu$ , общее количество применяемой фибры в бетоне должно составлять 1,87 %. Комбинирование аморфной металлической фибры со стальной производилось при соотношении 0,3 к 0,7, Объемная доля аморфнометаллических волокон составит 0,56%, стальных – 1,31%.

6. Фактическая средняя плотность, измеренная при проведении пробных замесов, составила 2419 кг/м<sup>3</sup>. После произведенной корректировки, состав полиармированной фибробетонной смеси выглядит следующим образом, кг/м<sup>3</sup>:

- Портландцемент 380;
- Песок 730;
- Щебень 1060;
- Аморфная металлическая фибра 43,9;
- Стальная фибра 102,8;
- Вода 195.

### **Пример №2**

Задание: Разработать состав керамзитобетона для изготовления плит для пола, обладающего следующими характеристиками: класс бетона В20, прочность на растяжение при изгибе не менее 17 МПа, вязкость разрушения не менее 500 Дж. Размер плиты 500х500х40 мм, масса плиты не должна

превышать 15 кг. Для армирования использовать аморфнометаллическую и стальную фибру.

1. В качестве исходной матрицы для изделия принимаем мелкозернистый керамзитобетон. Используемые материалы:

- портландцемент марки М400 ДО;
- керамзитовый песок (насыпная плотность 650 кг/м<sup>3</sup>; насыпная плотность в уплотненном состоянии 820 кг/м<sup>3</sup>; плотность зерен в цементном тесте 1150 кг/м<sup>3</sup>, межзерновая пустотность 0,25).

В таблице 5.2 приведен гранулометрический состав керамзитового песка.

Таблица 5.2 – Характеристики зернового состава песка

Остатки на ситах	Размеры отверстий сит, мм							Удельная поверхность, м <sup>2</sup> /кг
	5,0	2,5	1,25	0,63	0,31	0,14	<0,14	
Частные, %	0,6	44,6	24,2	20,9	6,5	1,9	1,3	3,4
Полные, %	0,5	45,2	69,4	90,3	96,8	98,7	100	

2. Для определения наиболее эффективного соотношения между составляющими бетонной смеси был использован модуль эффективности. В процессе подбора состава керамзитобетонной смеси определялись следующие характеристики:

- Водоцементное отношение:

$$\frac{B}{Ц} = \frac{A \cdot R_y}{R_c + 0,8 \cdot A \cdot R_y} = \frac{0,6 \cdot 40}{40 + 0,8 \cdot 0,6 \cdot 40} = 0,4$$

- Модуль эффективности:

$$M_{эф} = \frac{\alpha}{\rho_{упл}} + \delta \cdot S_{уд} = \frac{0,25}{0,82} + 25 \cdot 10^{-5} \cdot 340 = 0,39 \text{ л/кг}$$

- Соотношение между цементом и керамзитовым песком:

$$Ц : П = 1 : \frac{1 + B/Ц}{M_{эф} \cdot \rho_{цм}} = 1 : \frac{1 + 0,4}{0,39 \cdot 1,8} = 1 : 2$$

– Расход керамзитового песка:

$$П = \frac{1000 \cdot \rho_3^{ум}}{1 + M_{эф} \cdot \rho_3^{ум}} = \frac{1000 \cdot 1,15}{1 + 0,39 \cdot 1,15} = 794 \text{ кг/м}^3$$

– Расход портландцемента:

$$Ц = 794 : 2 = 397 \text{ кг/м}^3$$

– Расход воды:

$$В = 0,4 \cdot 397 = 159 \text{ л/м}^3$$

По результатам испытаний неармированных контрольных образцов установлены следующие характеристики:

- марка по удобоукладываемости – Ж1;
- средняя плотность легкого бетона – 1280 кг/м<sup>3</sup>;
- прочность при сжатии – 25 МПа;
- прочность на растяжение при изгибе – 6 МПа.

3. Рассчитываем объемную долю фибры ( $\mu$ ), обеспечивающую получение фибробетона заданной прочности):

$$\mu = \frac{R_{фб} - R_{б}}{\left[ R_{ам.ф.} \cdot n + 2\tau_{см.ф.} \cdot \frac{\ell_{см.ф.}}{d_{см.ф.}} \cdot (1 - n) \right] + 3,5R_{к.з.} - 4,5R_{б}}$$

$$\mu = \frac{17 - 6}{\left[ 996 \cdot 0,7 + 334,68 \cdot (1 - 0,7) \right] + 3,5 \cdot 7,7 - 4,5 \cdot 6}$$

$$\mu = \frac{11}{797,75}$$

$$\mu = 0,0138\%$$

Отсюда следует, что общее объемное содержание волокон ( $\mu$ ) составляет 1,38 %.

4. Рассчитываем объемную долю фибры, обеспечивающую получение фибробетона заданной вязкости разрушения:

$$\mu = \frac{6 \cdot W_{фб}}{\left( \frac{\ell_{ам.кр.}^2 \cdot \sigma_{ам.ф.}^{max} \cdot n}{2\ell_{ам.ф.}} + \frac{\tau_{ст.ф.} \cdot \ell_{ст.ф.}^2 \cdot (1-n)}{d_{ст.ф.}} \right)}$$

$$\mu = \frac{6 \cdot 500}{238755}$$

$$\mu = 0,0126\%$$

Отсюда следует, что общее объемное содержание волокон ( $\mu$ ) составляет 1,26 %.

5. Для обеспечения заданных характеристик полиармированного фибробетона, общее количество применяемых волокон в бетоне должно составлять 1,38 %. При использовании комбинирования аморфной металлической фибры со стальной в соотношении 0,7 к 0,3, следовательно, объемная доля аморфнометаллических волокон составит 0,97 %, стальных – 0,41 %.

6. В ходе корректировки фиброкерамзитобетонной смеси устанавливаем, что для приведения в соответствие показателя удобоукладываемости при введении волокон необходима добавка суперпластификатора Schomburg Remicrete SP-10 (FM) в количестве 0,5 % от массы цемента.

При испытании неармированных контрольных образцов были установлены следующие характеристики:

- средняя плотность – 1390 кг/м<sup>3</sup>;
- прочность при сжатии – 32,4 МПа;
- прочность на растяжение при изгибе – 17,7 МПа.

При значении средней плотности в 1390 кг/м<sup>3</sup>, масса плиты для пола составит 13,9 кг, что соответствует нашему заданию.

7. Тогда расход компонентов фиброкерамзитобетонной смеси составляет, на м<sup>3</sup>:

- Портландцемент марки – 397 кг;
- Керамзитовый песок – 794 кг;

- Аморфная металлическая фибра 76,1 кг;
- Стальная фибра 32,1 кг;
- Вода – 159 л;
- Пластификатор – 1,98 кг.

#### **5.4 Опытнo-промышленная проверка результатов лабораторных исследований с технико-экономической оценкой**

С помощью предложенной методики проектирования составов полиармированных фибробетонных смесей, был разработан состав фибробетона с применением аморфнометаллической и стальной фибры класса В50, с прочностью на растяжение при изгибе не менее  $R_{изг} = 20$  МПа и вязкостью разрушения  $W_{фб} = 700$  Дж, для наземных резервуаров автозаправочных комплексов. Удобоукладываемость бетонной смеси должна соответствовать осадке конуса 15 см (П4).

1) В качестве матрицы фибробетона для изготовления тонкостенных изделий принимаем мелкозернистый бетон, который позволяет обеспечить высокую степень дисперсности армирования стальной фиброй.

2) Одной из важнейших характеристик заполнителя является его удельная поверхность, которая определяет расход цемента в составе, проектированного бетона. Определить удельную поверхность заполнителя можно при помощи формулы Ладинского А.С.:

$$S = \frac{16,5 \cdot K_{\phi}}{1000} (a + 2b + 4c + 8d + 16e + 32f) = 19,1 \text{ г/см}^2$$

где:  $K_{\phi}$  – коэффициент, учитывающий форму зерен заполнителя и находящийся в пределах от 1,3 до 2,1; а, в, с, d, e, f – частные остатки на ситах с размером отверстий соответственно 2,5; 1,25; 0,63; 0,315; 0,14 мм и количество заполнителя прошедшего через сито 0,14 мм.

3) Для определения оптимального соотношения между компонентами бетонной смеси, в качестве основной характеристики был

выбран модуль эффективности, показывающий, какое количество цементного теста необходимо для заполнения пустот и обволакивания поверхности зерен мелкого заполнителя. Модуль эффективности является наиболее точным критерием оценки слитности структуры получаемого бетона.

Расчет значения модуля эффективности осуществлен, исходя из следующей формулы:

$$M = \frac{\alpha}{\rho_{упл}} + \delta \cdot S_{уд} = \frac{0,25}{2,0} + 0,00013 \cdot 1910 = 0,37 \text{ л/кг}$$

где:  $\alpha$  и  $\rho_{упл}$  – пустотность и насыпная плотность отсева при уплотнении на виброударной площадке;  $\delta$  – толщина пленки цементного теста на поверхности зерен, принимаемая равной 13 мкм;  $S_{уд}$  – удельная поверхность песка.

4) Определяем водоцементное отношение, необходимое для получения заданных характеристик:

$$\frac{B}{Ц} = \frac{A \cdot R_{ц}}{R_{\sigma} + 0,8 \cdot A \cdot R_{ц}} = \frac{0,75 \cdot 500 \cdot 0,1}{50 + 0,75 \cdot 500 \cdot 0,8 \cdot 0,1} = 0,47$$

4.1) С учетом полученного значения  $M_{эф}$  определено соотношение между цементом и песком, а также расход материалов на 1 м<sup>3</sup> бетона:

$$Ц : П = 1 : \frac{1 + B/Ц}{M_{эф} \cdot \rho_{цт}} = 1 : \frac{1 + 0,47}{0,37 \cdot 1,8} = 1 : 2,2$$

где:  $\rho_{цт}$  – плотность цементного теста.

$$4.2) П = \frac{1000 \cdot \rho_{ц}}{1 + M_{эф} \cdot \rho_{ц}} = \frac{1000 \cdot 2,65}{1 + 0,37 \cdot 2,65} = 1338 \text{ кг};$$

$$4.3) Ц = \frac{П}{n} = \frac{1338}{2,2} = 608 \text{ кг};$$

$$4.4) B = Ц \cdot B/Ц = 608 \cdot 0,47 = 285 \text{ л}.$$

В результате испытания контрольных образцов установлены прочностные характеристики исходного бетона:  $R_{сж} = 56,8$  МПа,  $R_{изг} = 8,12$  МПа, а так же были выявлены признаки расслоения бетонной смеси.

5) Рассчитываем объемную долю волокон, необходимых для обеспечения заданной прочности на растяжение при изгибе полиармированного фибробетона:

$$\mu = \frac{R_{фб} - R_{\sigma}}{\left[ R_{ам.ф.} \cdot n + 2\tau_{см.ф.} \cdot \frac{\ell_{см.ф.}}{d_{см.ф.}} \cdot (1-n) \right] + 3,5R_{к.з.} - 4,5R_{\sigma}}$$

$$\mu = \frac{20 - 8,1}{\left[ 996 \cdot 0,6 + 334,68 \cdot (1 - 0,6) \right] + 3,5 \cdot 11,34 - 4,5 \cdot 8,1}$$

$$\mu = \frac{11,9}{735}$$

$$\mu = 1,6\%$$

б) Рассчитываем объемную долю волокон, обеспечивающих получение полиармированного фибробетона заданной вязкости разрушения:

$$\mu = \frac{6 \cdot W_{фб}}{\left( \frac{\ell_{ам.кр.}^2 \cdot \sigma_{ам.ф.}^{max} \cdot n}{2\ell_{ам.ф.}} + \frac{\tau_{см.ф.} \cdot \ell_{см.ф.}^2 \cdot (1-n)}{d_{см.ф.}} \right)}$$

$$\mu = \frac{6 \cdot 700}{267005}$$

$$\mu = 1,57\%$$

7) Для обеспечения заданных характеристик полиармированного фибробетона, общее количество применяемых волокон в бетоне должно составлять 1,6 %. Экспериментальные данные, полученные в ходе выполнения диссертационной работы, показали, что наибольшей эффективности можно добиться при использовании комбинирования аморфной металлической фибры со стальной в соотношении 0,6 к 0,4, следовательно, объемная доля аморфнометаллических волокон составит 0,96%, стальных – 0,64%.

8) Корректировка состава фибробетонной смеси:

8.1) На пробных замесах устанавливаем, что для приведения в соответствие показателя удобоукладываемости требуется понижение расхода

воды и введение добавки суперпластификатора Schomburg Remicrete SP-10 (FM) в количестве 0,7 % от массы цемента.

8.2) Расчетная средняя плотность фибробетонной смеси:

$$\rho = \frac{\sum m}{\sum V} = \frac{1338 + 608 + 126 + 228}{0,505 + 0,196 + 0,016 + 0,228} = 2433 \text{ кг/м}^3$$

8.3) Фактическая средняя плотность, измеренная при проведении пробных формовок, составляет 2352 кг/м<sup>3</sup>.

9) Таким образом, окончательно состав полиармированной фибробетонной смеси выглядит следующим образом, на 1 м<sup>3</sup>:

- Портландцемент – 650 кг;
- Кварцевый песок – 1450 кг;
- Аморфнометаллическая фибра – 76;
- Стальная фибра – 50;
- Суперпластификатор – 4,55;
- Вода – 228.

В результате испытаний образцов установлено, что прочность на сжатие составляет  $R_{сж} = 60,1$  МПа; прочность на растяжение при изгибе  $R_{изг} = 20,2$  МПа; вязкость разрушения, определенная экспериментальным путем и выраженная критерием хрупкости,  $X^c_F = 86$  м; при помощи результатов, полученных в ходе диссертационного исследования, зная значение критерия хрупкости  $X^c_F$ , можно определить значение энергии затрачиваемой на разрушение композита  $W_{фб} \approx 860$  Дж.

Так же были определены такие характеристики, как морозостойкость, водонепроницаемость и ударостойкость материала. В процессе испытаний ударостойкости образец-призма устанавливался вертикально на основании копра, и по нему ударял молот массой 50 кг, свободно падающий с высоты равной 100 см (высота подбиралась экспериментально, таким образом, что бы неармированный образец разрушался за 3-4 удара). При испытании особое значение имели величины: высота сбрасывания молота, количество

ударов, средняя величина трещин. Значение ударостойкости фибробетона определялось по следующей формуле [97]:

$$K_{эф} = \frac{A_{фб}^{y\partial}}{A^{y\partial}} = \frac{2375,8}{261,1} = 9,1$$

Морозостойкость и водонепроницаемость определялись по стандартным методикам, изложенным в ГОСТ 10060 и ГОСТ 12730.5 соответственно. Морозостойкость составила F400, водонепроницаемость W12.

Для изготовления и поставки контейнерных автозаправочных станций для обеспечения заправки ГСМ на объектах Олимпийских и Паралимпийских игр в г. Сочи согласно с (Приложение Б), разработаны технические условия на наземные резервуары (Приложение В), чертежи изделия (Приложении Г), а так акт о внедрении и протокол испытаний (Приложение Д).

На рисунке 5.1 представлен проект заправочной станции с наземными резервуарами.

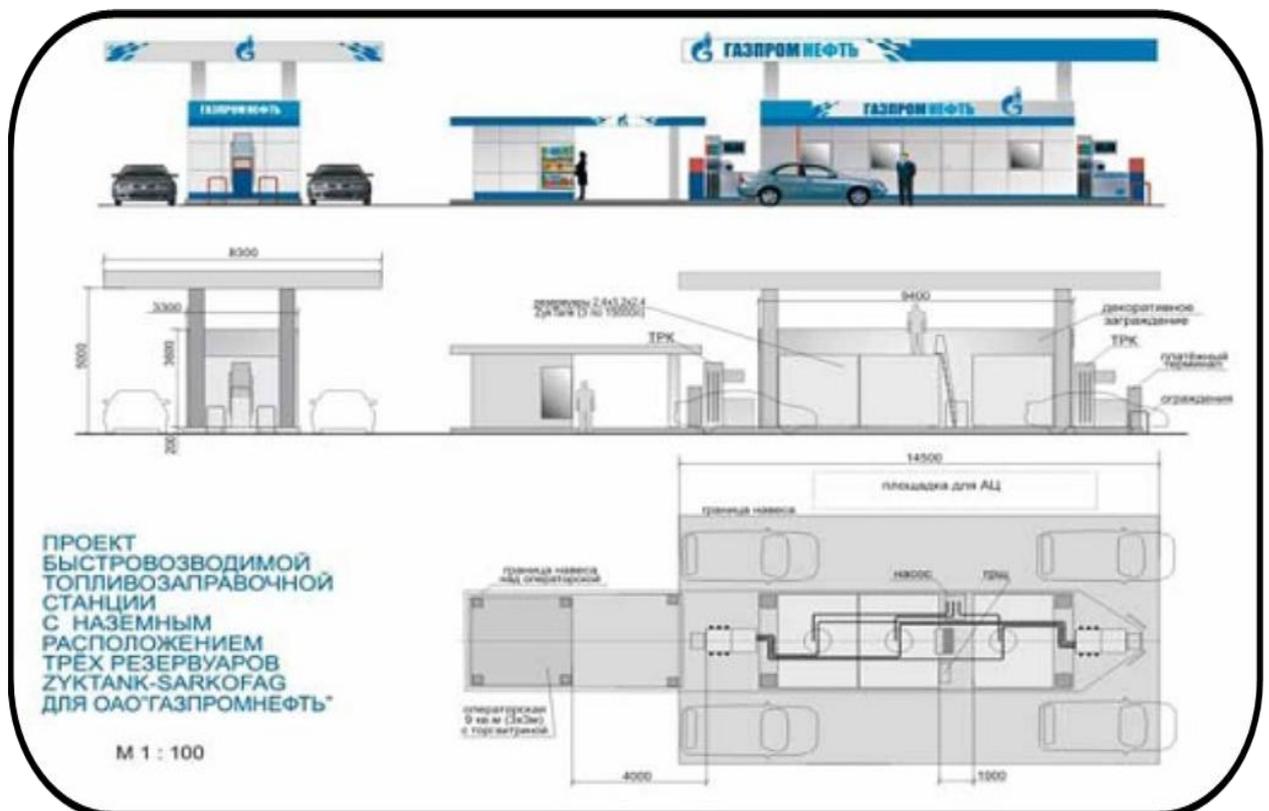


Рисунок 5.1 – Проект заправочной станции с наземными резервуарами

Наземные резервуары (рисунок 5.2) относятся к элементам конструкций 3-го класса ответственности с нормируемой степенью огнестойкости и представляют собой многослойную конструкцию, имеющую пять степеней защиты. Внутренняя часть резервуара изготовлена из 4-х миллиметрового стального листа и является несъемным элементом общей опалубки, имеет непрерывную сварку на всех швах и покрыта с обеих сторон фторэпоксидным лаком, служащим термо-, морозо-, радиационно-, коррозионно стойким элементом защиты.



Рисунок 5.2 – Фиброжелезобетонный резервуар

Основу всего контейнера представляет монолитное изделие, изготовленное из 80 – миллиметрового слоя фиброжелезобетона, армированного стальной и аморфнометаллической фиброй, а так же арматурной сталью класса А III диаметром 10 мм по ГОСТ 5781.

Для обоснования технико-экономической эффективности, поставлена задача сравнить фиброжелезобетонный резервуар, приготовленный на спроектированном в главе 5.3. составе, с резервуаром уже использовавшимся у ООО «НТЦ ИСТ» ранее.

Основные параметры и размеры наземных резервуаров АЗК приведены в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – Параметры и размеры наземных резервуаров АЗК

Фиброжелезобетонный резервуар	Внутренний объем резервуара, м <sup>3</sup>	Габаритные размеры, мм			Толщина стенки, мм	Объем бетона, м <sup>3</sup>
		$\ell$	$b$	$h$		
1	14,4	3200	2400	2400	100	4,3
2	15,3	3200	2400	2400	80	3,38

Составы фиброжелезобетонных наземных резервуаров АЗК приведены в таблице 5.4.

Таблица 5.4 – Составы фиброжелезобетонных резервуаров

Наименование материала	Фиброжелезобетонный резервуар №1	Фиброжелезобетонный резервуар №2
Портландцемент М500, кг/м <sup>3</sup>	450	650
Кварцевый песок, кг/м <sup>3</sup>	790	1450
Щебень, кг/м <sup>3</sup>	1000	-
Арматурная сталь, кг/шт	28,8	28,8
Стальная фибра, кг/м <sup>3</sup>	235,5	50,0
Аморфнометаллическая фибра, кг/м <sup>3</sup>	-	76,0

Опытная проверка полученных результатов в условиях реального строительства показывает, что экономия средств на одном изделии, за счет уменьшения толщины стенки и применения полидисперсного армирования, составляет 11370 рублей. Экономическая составляющая фиброжелезобетонных резервуаров представлена в таблице 5.5.

Таблица 5.5 – Экономическая составляющая фиброжелезобетонных резервуаров

Наименование материала	Ед. изм.	Цена ед-цы, руб.	Фиброжелезобетонный резервуар			
			№1		№2	
			Расход, т/шт.	Цена, руб.	Расход, т/шт.	Цена, руб.
Портландцемент М500	т	4000	1,94	7760	2,2	8800
Кварцевый песок	т	450	3,4	1530	4,9	2205
Щебень	т	1000	4,3	4300	-	-
Арматурная сталь	т	25000	0,0288	720	0,0288	720
Стальная фибра	т	55000	0,796	43780	0,169	9295
Аморфнометаллическая фибра	т	100000	-	-	0,257	25700
<b>ИТОГО</b>				58090		46720

Разработанный вид резервуаров применялся в 2014 году на олимпийских объектах в Сочи (рисунок 5.3).



Рисунок 5.3 – Наземный фиброжелезобетонный резервуар в г. Сочи

#### **Выводы по пятой главе:**

По итогам выполненных исследований и работ могут быть сформулированы следующие результаты:

1) Предложена методика проектирования составов полиармированных фибробетонов с использованием аморфнометаллической фибры. Разработаны варианты составов различных видов фибробетона;

2) Разработаны проекты технических условий и технологического регламента на производство наземных резервуаров для автозаправочных комплексов (АЗК), утвержденные ООО «НТЦ Инновационные Строительные Технологии»;

3) Достоверность полученных результатов подтверждена изготовлением и проведением натурных испытаний в условиях действующего производства. Произведена технико-экономическая составляющая фиброжелезобетонных резервуаров, армированных стальной и аморфнометаллической фиброй, а так же арматурной сталью. Экономическая эффективность по результатам выпуска опытной партии составила 11370 рублей на одно изделие.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных исследований теоретически обоснованы и экспериментально продемонстрированы преимущества полиармированного фибробетона при его использовании в качестве конструкционного материала. При этом получены следующие теоретические и практические данные:

1) На основе литературного обзора и предварительных экспериментов, посвященных исследованиям моно- и полиармированным фибробетонам с использованием различных видов волокон, теоретически обоснована эффективность использования аморфнометаллической фибры в составе полидисперсного армирования;

2) Разработана оригинальная методика, в соответствии с которой определена прочность  $R_{ам.ф} = 996$  МПа и модуль упругости  $E_{ам.ф} = 224700$  МПа аморфной металлической фибры;

3) Предложены и исследованы математические модели для прогнозирования деформативных, прочностных и энергетических характеристик полиармированного фибробетона с применением аморфнометаллической фибры, показавшие высокую сходимость в сравнении с экспериментальными результатами;

4) Впервые исследованы физико-механические, энергетические и деформативные характеристики полиармированного фибробетона с использованием аморфнометаллической фибры. Установлено, что степень изменения указанных характеристик зависит от соотношения между стальной и аморфнометаллической фиброй в составе полиармирования и, главным образом, от объемной доли последней. В результате полиармирования аморфнометаллической и стальной фиброй в количестве 2% по объему модуль упругости и призмочная прочность бетона повышается соответственно в 1,38 и 1,39 раза, а коэффициент Пуассона снижается в 1,62 раза. По сравнению с этим наиболее распространенный в настоящее время вариант армирования бетона стальной фиброй (моноармирование) позволяет

повысить модуль упругости в 1,08 раза, призмную прочность в 1,2 раза и снизить коэффициент Пуассона в 1,33 раза. Применение полидисперсного армирования позволяет повысить трещиностойкость (коэффициент интенсивности напряжений  $K_c$ ) и прочность на растяжение при изгибе бетона в 2,77 и 2,8 раза соответственно, применение только стальной фибры – в 2,1 и 2,13 раза;

5) Предложена методика проектирования составов полиармированных фибробетонов с использованием аморфнометаллической фибры. Разработаны варианты составов различных видов фибробетона;

6) На основе теоретических, экспериментальных и производственных исследований разработана сырьевая смесь для изготовления полиармированного фибробетона, позволяющая повысить прочность и трещиностойкость композита при одновременном повышении вязкости разрушения. Установлено оптимальное соотношение компонентов для изготовления полиармированных фибробетонов (получено положительное решение на заявку № 2014151260 на изобретение «Фибробетонная смесь»), обладающих следующими характеристиками:  $R_{изг} = 22,5$  МПа ;  $R_{np} = 61,3$  МПа;  $X_F^c = 102,1$  м;  $K_c = 1,074$  МПа·м<sup>0,5</sup>;  $E = 42440$  МПа;  $\nu = 0,135$ ;

7) Достоверность полученных результатов подтверждена изготовлением и проведением натурных испытаний в условиях действующего производства. Разработаны проекты технических условий и технологического регламента на производство наземных резервуаров АЗК. Экономическая эффективность по результатам выпуска опытной партии составила 11370 рублей на одно изделие.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bernard, E.S.* Influence of Test Machine Control Method on Flexural Performance of Fiber Reinforced Concrete Beams// Journal of ASTM International. 2009. – Vol. 6. No. 9
2. *Bhikshma, V.* Investigations on mechanical properties of recycled aggregate concrete containing steel fibers/ V. Bhikshma, J.L. Singh// Indian Concrete Institute Journal. 2010 – 4-9 (10), p. 15-19
3. *Hannant, D.J.; Zonsveld, J.J. and Hughes, D.C./* Composites. №1 – 1978.
4. *Irwin, G.R.* Analysis of stresses and strain near the end of a crack traversing a plate // J. Appl. Mech. – 1957. – V. 24, No 3. – p. 361-364
5. *Klyuyev, A.V* Combined disperse reinforcement of finegrained concrete with steel and polypropylene fiber on technogenic materials and nanodispersed modifier/ R.V. Lesovik, S.V. Klyuyev, A.V. Klyuyev, A.V. Netrobenko, N.V. Kalashnikov// World Applied Sciences Journal. T. 30, №8. – 2014. С. 964-969
6. *Kretsis, G.* A review of the tensile, compressive, flexural and shear of hybrid fibre-reinforced plastics// Composites. №1. – 1987. – p. 13-23
7. *Mangat, P.S.; Swamy, R.N.* Compactibility of steel fibre reinforced concrete// Concrete. 1974. № 5. – p. 34-35
8. *Porter, H.F.* Preparation of Concrete from selection of materials to final disposition. Proceedings of the National Association of Cement Users, ACJ, Vol 6. 1910
9. *Rasheed, M.H.F.; Agha, A.Z.S.* Analysis of Fibrous Reinforced Concrete Beams// Engineering and Technical Journal. 2012, №30 (6). – p. 974-987
10. *Shah, P.S.; Rangan, V.K.* Effect of fiber addition on concrete strength/ Indian Concrete Journal. 1994, vol. 5, №2-6 (5). – p. 13-21
11. *Shah, S.P.; Rangan, V.K.* Fiber Reinforced Concrete Properties/ ACJ, №2. 1971.

12. *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
13. *Wilton, P.I.; Majumdar, A.I.*// Composites. – №5. – 1975. – p. 208-209
14. *Аболиньш, Д.С.* Сопротивление фибробетона изгибу и растяжению/ Д.С. Аболиньш, В.К. Кравинскис// Расчет и оптимизация строительных конструкций. – Рига, 1974. – С. 47-54
15. *Арончик, В.Б.* Определение модуля упругости дисперсно-армированных материалов с учетом произвольной ориентации и конечной длины армирующих волокон: В книге: Вопросы строительства. Вып.4. Рига, 1975. – с. 167-174
16. *Ахмеднабиев, Р.М.* Влияние различных волокон на свойства фибробетонов «Технические науки – от теории к практике»: материалы 22 международной заочной научно-практической конференции. (11 июня 2013 г.); Новосибирск: Изд. «СибАК», 2013. – с. 34-43
17. *Бабков, В.В.* Технологические возможности повышения ударной выносливости цементных бетонов/ В.В. Бабков, В.Н. Мохов, М.Б. Давлетшин// Строительные материалы, 2003, №10. – С. 19-20
18. *Бадертдинов, И.Р.* Влияние одно и двухуровневого армирования стальной и стеклянной фиброй на время начала трещинообразования бетона класса В45// И.Р. Бадертдинов, М.Г. Габидуллин, Р.З. Рахимов, М.А. Балтанов, Б.А. Евсеев, М.М. Рахимов, А.Ш. Низембаев, Н.М. Хорев/ Известия КазГАСУ. №4. – 2012. С. 270-278
19. *Богданова, Е.Р.* Экспериментальные исследования бетона, дисперсно армированного синтетической полипропиленовой фиброй/ Известия Петербургского университета путей сообщения// 2015. – №2 (43). – С. 91-98
20. *Буторов, И.А.* Анализ прочности композиционных материалов армированных дискретными волокнами/ Современные научные исследования и инновации// 2015. – №8-1 (52). – С. 55-59

21. *Войлоков, И.А.* Подбор состава сталефибробетона/ И.А. Войлоков, А.Ю. Ковалева// ALITinform: Цемент. Бетон. Сухие смеси. 2009.
22. *Войлоков, И.А.* Фибробетон – история вопроса. Нормативная база, проблемы и решения/ ALITinform: Цемент. Бетон. Сухие смеси. 2009. – №2. С. 44-53
23. *Волков, И.В.* Инженерные методы проектирования фибробетонных конструкций/ И.В. Волков, Э.М. Газин, В.В. Бебекин// Бетон и железобетон. – 2007. № 4. – С. 20-22
24. *Габидуллин, М.Г.* Исследование влияния характеристик стеклофибры на физико-механические свойства стеклофибробетона/ М.Г. Габидуллин, Р.Т. Багманов, А.Я. Шангараев// Строительные материалы и изделия. – С. 268-273
25. *Голанцев, В.А.* Свойства и особенности полиармированных фибробетонов: дис. ... канд. техн. наук/ В. А. Голанцев. – Л., 1990. – 214 с.
26. *Голубев, В.Ю.* Высокопрочный бетон повышенной вязкости разрушения: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / В.Ю. Голубев. – СПб., 2009. – 183 с.
27. *Горохов, М.С.* Трещиностойкость фибробетона со стальной анкерной фиброй/ Вестник государственного университета морского и речного флота им. С.О. Макарова. №5 (27). – 2014. С. 47-53
28. *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.
29. *Гуняев, Г.М.* Поликомпонентные высококомодульные композиты// Механика полимеров. – 1977. №5, с. 819-826
30. *Драган, В.И.* Методика исследования механических свойств материалов с использованием разрывной машины ИР 5.145-500-10/

- В.И. Драган, С.В. Загуляев// Вестник БГТУ. Строительство и архитектура. – 2002. №1. – С. 25-29
31. *Жаворонков, М.И.* Свойства сталефибробетона, армированного аморфнометаллической фиброй// Научно-исследовательская работа студентов, аспирантов и молодых ученых СПбГАСУ: Сб. научных трудов студентов, аспирантов и молодых ученых победителей конкурсов 2011 г. Вып. 7/ СПбГАСУ. – СПб., 2012. – С. 120-129
32. *Зайцев, Ю.В.* Моделирование деформаций и прочности бетона методами механики разрушения. – М., Стройиздат. 1982. 196 с.
33. *Зерцалов, М.Г.* Экспериментальное определение характеристик трещиностойкости фибробетона/ М.Г. Зерцалов, Е.А. Хотеев// Вестник МГСУ. 2014. № 5. – С. 91-99
34. *Золотухин, И.В.* Аморфные металлические материалы// Соросовский образовательный журнал. – 1997. №4. – с. 73-78
35. *Зотов, А.Н.* Исследование прочностных свойств мелкозернистых бетонов с полипропиленовой фиброй для дорожного строительства/ Промышленное и гражданское строительство// 2015. №8. – С. 42-46
36. *Калашников, В.И.* Геометрические параметры фибры для высокопрочных бетонов/ В.И. Калашников, Ю.П. Скачков, С.В. Ананьев, И.Ю. Троянов// Региональная архитектура и строительство. 2011. №1. – с. 27-33
37. *Калашников, В.И.* Исследование влияния фибры на прочность бетона для дорожных покрытий// В.И. Калашников, Е.Ю. Миненко, Ю.В. Грачева, Т.С. Кижватова/ Вестник ВолгГАСУ. Серия: Строительство и архитектура. 2013. №32(51). – 2013. С. 55-59
38. *Каприелов, С.С.* Исследование физико-механических и реологических свойств высокопрочного сталефибробетона// Н.И. Карпенко, В.И. Травуш, А.В. Мишина, А.А. Андрианов, И.М. Безгодов, С.С. Каприелов/ АСADEMIA. АРХИТЕКТУРА И СТРОИТЕЛЬСТВО №1. – 2013. – С. 106-113

39. *Клюев, А.В.* Мелкозернистый фибробетон армированный полипропиленовым волокном// А.В. Клюев, С.В. Клюев, А.В. Дураченко, А.В. Нетребенко/ Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. №4. 2014. – С. 67-72
40. *Клюев, А.В.* Расчет процента армирования фибробетонных композитов// Международный научно-исследовательский журнал. №5-2 (36). – 2015. С. 74-77
41. *Клюев, А.В.* Расчет фибробетонных композитов/ А.В. Клюев, А.А. Митрохин, Ю.Н. Черкашин, Р.В. Лесовик// Научные труды SWorld, Т. 18, №3. – 2014. С. 61-65
42. *Клюев, А.В.* Усиление изгибаемых конструкций композитами на основе углеволокна/ Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова. №3. – 2011. С. 38-41
43. *Клюев, С.В.* К вопросу применения нескольких видов фибр для дисперсно армированных бетонов// С.В. Клюев, Р.В. Лесовик, А.В. Клюев, Д.О. Бондаренко/ Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. №4. – 2012. С. 81-83
44. *Клюев, С.В.* Мелкозернистый фибробетон с использованием полипропиленового волокна для покрытия автомобильных дорог// С.В. Клюев, Е.Н. Авилова/ Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. №1. – 2013. С. 37-40
45. *Клюев, С.В.* Особенности формирования фибробетонных композитов// Вестник Белгородского государственного технического университета им. В.Г. Шухова. №5. – 2015. С. 32-35
46. *Клюев, С.В.* Тяжелонагруженные полы на основе мелкозернистых фибробетонов// С.В. Клюев, А.В. Клюев, Д.М. Сопин, С.А. Казлитин, А.В. Нетребенко/ Инженерно-строительный журнал. №3(38). – 2013. С. 7-14
47. *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
48. *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
49. *Коротких, Д.Н.* Трещиностойкость современных цементных бетонов (проблемы материаловедения и технологии)/ Монография. – Воронеж: Воронежский ГАСУ, 2014. – 141 с.
50. *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
51. *Курбатов, Л.Г.* Некоторые вопросы технологии и технико-экономической эффективности сталефибробетона// Производство строительных изделий и конструкций: Межвуз. темат. сб. тр. / ЛИСИ, Л., 1979. – с. 38-42
52. *Курбатов, Л.Г.* Об эффективности бетонов, армированных стальными фибрами/ Л.Г. Курбатов, Ф.Н. Рабинович// Бетон и железобетон. – 1980. №3. – с. 6-8
53. *Курбатов, Л.Г.* Трещиностойкость и раскрытие трещин в изгибаемых сталефибробетонных элементах/ Л.Г. Курбатов, В.Н. Попов// Пространственные конструкции в гражданском строительстве. – Л.: 1982. – С. 33-42
54. *Курбатов, Л.Г.* Эффективность бетонов, армированных стальными фибрами. Бетон и железобетон. – 1980. № 2.- С. 8-10
55. *Курбатов, Л.Г.* Опыт применения сталефибробетона в инженерных сооружениях/ Л.Г. Курбатов, М.Я. Хазанов// Л.: ЛДНТП, 1982. – 28 с.

56. Курбатов, Л.Г. Особенности проектирования и технологии изготовления сталефибробетонных конструкций/ Л. Г. Курбатов, И. А. Лобанов// Л.: ЛДНТП, 1978. – 26 с.
57. Ледовской, И.В. Метод определения упругих характеристик неоднородных сред/ И.В. Ледовской, Т.С. Русаков// Вестник гражданских инженеров. – 2012. №6 (35). – с. 39-46
58. Леонович, И.А. Применение фибробетона в строительстве и его упругие свойства/ И.А. Леонович, Т.С. Самолыго// Проблемы современного бетона и железобетона: сб. трудов: в 2 ч. Ч. 1. Бетонные и железобетонные конструкции: ред. кол.: М.Ф. Марковский и др. – Минск: Стринко, 2007. – С. 239-249
59. Леонович, И.А. Прочностные свойства фибробетонов с заполнителем из микросфер при ударном нагружении// Вестник Белорусско-Российского университета. 2008. №2 (19). С. 129-136
60. Леонович, И.А. Влияние упругих характеристик композитного материала на свойства фибробетона/ И.А. Леонович, А.А. Леонович// Вестник Белорусско-Российского университета. 2007. №3 (16). С. 148-155
61. 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.
62. 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

63. *Лобанов, И.А.* Особенности структуры и свойства дисперсно – армированных бетонов// Технология изготовления и свойства новых композиционных строительных материалов. – Л., 1986. – С. 3-10
64. *Лобанов, И.А.* А.с. №1203065А СССР, МКИ С 04 В 28/00. Способ приготовления сталефибробетона/ Лобанов И.А., Пухаренко Ю.В., Малышев В.Ф. Оpubл. в БИ. 1986. №1
65. *Лобанов, И.А.* А.с. №1701673А1 СССР, МКИ С 04 В 14/38. Фибробетонная смесь/ Лобанов И.А., Пухаренко Ю.В., Голанцев В.А. Оpubл. в БИ. 30.12.1991. №48
66. *Лобанов, И.А.* Ударостойкость фибробетонов, армированных низко модульными синтетическими волокнами/ И.А. Лобанов, Ю.В. Пухаренко, Ю.А. Гурашкин// Технология и долговечность дисперсно-армированных бетонов. – Л.: ЛенЗНИИЭП, 1984. – с. 92-96
67. *Лобанов, И.А.* Эффективность использования синтетических волокон для армирования бетонов различного назначения/ И.А. Лобанов, Ю.В. Пухаренко, Т.Ф. Шляхтина// Оценка и обеспечение надежности и долговечности железобетонных конструкций зданий и сооружений промышленных предприятий при их реконструкции и восстановлении/ УДНТП. Челябинск. 1984. с. 90-91
68. *Лобанов, И. А.* О структуре дисперсно-армированных мелкозернистых бетонов/ И.А. Лобанов, А.В. Копацкий// Технология строительных изделий и конструкций: кр. содержание доклада: Л., 1972. – С. 13-16
69. *Макридин, Н.И.* Механика разрушения песчаного бетона и фибробетона/ Н.И. Макридин, О.В. Тараканов, И.Н. Максимова, И.А. Суров// Известия КГАСУ. 2014, №3 (29) – С. 122-126
70. *Максимов, А.Н.* Фибробетон, армированный волокнами минеральной ваты// Фибробетон и его применение в стр-ве. / М., 1979. с. 46-51
71. *Мещерин, В.* Предупреждение трещинообразования в бетоне с помощью фиброармирования// Бетон и железобетон. 2012. №1 (6). – 50-57 с.

72. *Миненко, Е.Ю.* Оценка энергетических характеристик дисперсно-армированного бетона в дорожном строительстве/ Е.Ю. Миненко, Ю.В. Грачева, О.И. Шлапакова// Вестник ВолгГАСУ. Сер.: Строительство и архитектура. 2013. Вып. 32(51). С. 66-70
73. *Михайлов, В.В.* Влияние дисперсного армирования минеральными волокнами на свойства напрягающего бетона/ В.В. Михайлов, О.А. Звездин// Исследование и применение напрягающего бетона и самоупроченных железобетонных конструкций: М., Стройиздат. 1984. с. 39-47
74. *Морозов, В.И.* Эффективность применения фибробетона в конструкциях при динамических воздействиях/ В.И. Морозов, Ю.В. Пухаренко// Вестник МГСУ. – 2014. №3. С. 189-196
75. *Некрасов, В. П.* Метод косвенного вооружения бетона / В. П. Некрасов. – М., Транспечать, 1925. – 255 с.
76. *Николаева, Е.А.* Основы механики разрушения/ Пермский государственный технический университет. – 2010. С. 103
77. *Павленко, В. И.* Свойства фибробетона и перспективы его применения/ В.И. Павленко, В.Б. Арончик// Аналитический обзор: ЛатНИИНТИ. – Рига, 1978. – 56 с.
78. *Павлов, А.П.* Развитие и экспериментально теоретическое исследование сталефибробетона// Исследование в области железобетонных конструкций: Л., 1976. – С. 3-13
79. *Панин, А.Н.* К определению деформационных и прочностных характеристик при исследовании фибробетонных оболочек// Новые идеи нового века: материалы международной научной конференции ФАД ТОГУ. 2013. Т. 2 – С. 404-408
80. *Пантелеев, Д.А.* Деформативные и прочностные характеристики полиармированного фибробетона/ Д.А. Пантелеев// Известия КГАСУ. – 2015 – № 3 (33). – с. 133-139

81. *Пантелеев, Д.А.* Исследование свойств сталефибробетона на основе аморфной металлической фибры/ У. Х. Магдеев, Ю. В. Пухаренко, В. И. Морозов, Д. А. Пантелеев, М. И. Жаворонков// Вестник ВолгГАСУ. Сер.: Строительство и архитектура 2013. Выпуск 31(50). 4.2. Строительные науки. – с. 132-135
82. *Пантелеев, Д.А.* Оценка эффективности полиармирования фибробетона/ Д. А. Пантелеев// Вестник гражданских инженеров. – 2013. № 6(41). – с. 102-108
83. *Парфенов, А.В.* Ударная выносливость бетонов на основе стальной и синтетической фибры: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05/ А.В. Парфенов. – Уфа, 2004. – 22 с.
84. *Перфилов, В.А.* Пат. РФ № 2267767. Способ определения характеристики трещиностойкости материалов/ В.А. Перфилов. Зарег. 10.01.2006
85. *Перфилов, В.А.* Прочность и трещиностойкость жаростойких бетонов/ Вестник ВолгГАСУ. Серия: Строительство и архитектура. №30 (49). – 2013. С. 148-153
86. *Пухаренко, Ю.В.* Вопросы и решения в проектировании состава фибробетона/ Ю.В. Пухаренко, А.Ю. Ковалева// ALITinform: Цемент. Бетон. Сухие смеси. 2009. №1. – С. 50-55
87. *Пухаренко, Ю.В.* Высокопрочный сталефибробетон/ Ю.В. Пухаренко, В.Ю. Голубев// Промышленное и гражданское строительство. – 2007. №9. – с. 40-41
88. *Пухаренко, Ю.В.* Железобетонные изделия и конструкции: Научно-технический справочник/ Под ред. Ю.В. Пухаренко, Ю.М. Баженова, В.Т. Ерофеева. – СПб: НПО «Профессионал», 2013. – с. 1045
89. *Пухаренко, Ю.В.* Моделирование микротрещинообразования фибробетона методами механики разрушения/ Ю.В. Пухаренко, В.И. Морозов, А.О. Хегай// Современное промышленное и гражданское строительство. – 2011. Т. 7. №3. – с. 125-134

90. *Пухаренко, Ю.В.* Научные и практические основы формирования структуры и свойств фибробетонов: Дис. ... д-ра техн. наук/ Ю.В. Пухаренко: СПбГАСУ. – СПб, 2005. – 315 с.
91. *Пухаренко, Ю.В.* О вязкости разрушения фибробетона/ Ю.В. Пухаренко, В.Ю. Голубев// Вестник гражданских инженеров. – 2008. №3. – с. 80-83
92. *Пухаренко, Ю.В.* О применении высокопрочной арматуры в изгибаемых железобетонных элементах без предварительного напряжения/ Вестник гражданских инженеров. 2012. №1. – С. 87-89
93. *Пухаренко, Ю.В.* Об оценке трещиностойкости сталефибробетона ультразвуковым методом/ Ю.В. Пухаренко, В.Ю. Голубев, А.О. Хегай// Промышленное и гражданское строительство. – 2009. №9. – с. 50-51
94. *Пухаренко, Ю.В.* Полидисперсное армирование строительных композитов – фибробетонов// Ю.В. Пухаренко, И.У. Аубакирова/ Технологии бетонов. 2011. №1-2. – С. 28-29
95. *Пухаренко, Ю.В.* Полидисперсное армирование строительных композитов// Ю.В. Пухаренко, И.У. Аубакирова/ Строительные материалы, оборудование, технологии 21 века. 2011. №2. – С. 25-26
96. *Пухаренко, Ю.В.* Принципы формирования структуры и прогнозирование прочности фибробетонов/ Вестник гражданских инженеров. – 2004. №1. – с. 98-103
97. *Пухаренко, Ю.В.* Эффективность применения фибробетона в конструкциях при динамических воздействиях/ Ю.В. Пухаренко, В.И. Морозов// Вестник МГСУ. – 2014. №3. – с. 189-196
98. *Пухаренко, Ю.В.* Эффективные области использования различных армирующих волокон в бетонах и растворах/ Стройпрофиль. – 2003. №6. – с. 95
99. *Пухаренко, Ю.В.* Принципы формирования структуры и прогнозирование прочности фибробетонов// Строительные материалы. – 2004. №10. – с. 47-50

100. *Пухаренко, Ю.В.* Эффективные фиброжелезобетонные конструкции на основе высокопрочного фибробетона для высотного строительства/ Ю.В. Пухаренко, В.И. Морозов// Бетон и железобетон – взгляд в будущее: научные труды III Всероссийской (II Международной) конференции по бетону и железобетону (Москва, 12-16 мая 2014 г.): в 7 т. Т. 3. Арматура и системы армирования. Фибробетоны и армоцементы. Проблемы долговечности. Москва: МГСУ, 2014. – С. 186-195
101. *Рабинович, Ф.Н.* Бетоны, дисперсно-армированные волокнами// Строительные материалы. 1975. № 4. – С. 36-37
102. *Рабинович, Ф.Н.* Дисперсно – армированные бетоны. – М.: Стройиздат, 1989. – 176 с.
103. *Рабинович, Ф.Н.* Композиты на основе дисперсно армированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технология, конструкции: Монография – М.: Издательство АСВ, 2004. – с. 201
104. *Рабинович, Ф.Н.* Эффективность применения полимерных фибр для дисперсного армирования бетона/ Ф.Н. Рабинович, С.М. Баев// Промышленное и гражданское строительство. – 2009. №8. – с. 28-31
105. *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
106. *Рабинович, Ф.Н.* Романов В.П. О пределе трещиностойкости мелкозернистого бетона, армированного стальными фибрами// Механика комп. материалов: 1985. № 2 – С. 277-283
107. *Романов, В.П.* Исследование прочности и деформативности сталефибробетона при статических и динамических растяжениях/ В.П. Романов, В.И. Григорьев// Пространственные конструкции в гражданском строительстве: сборник научных трудов/ ЛенЗНИИЭП: Л., 1982. – с. 66-71

108. *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
109. *Рыбасов, В.П.* Исследование свойств бетона, армированного стальными волокнами// Новые материалы и изделия в строительстве. – М., 1982. – С. 36-38
110. *Смирнов, Д.А.* Упругость и ползучесть сталефибробетона: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.17/ Д.А. Смирнов. – СПб., 2011. – 106 с.
111. *Ставров, Г.Н.* Состояние и перспективы применения сталефибробетона в конструкциях, подверженных динамическим воздействиям/ Г.Н. Ставров, В.П. Романов, И.Д. Захаров// Применение сталефибробетона в строительстве. – Л.: 1985. – С. 55-58
112. *Трапезников, Л.П.* А.с. № 819618. Способ определения характеристики трещиностойкости материалов/ Л.П. Трапезников, В.И. Пашенко, А.П. Пак., Оpubл. 07.04.1981
113. *Турба, Ю.В.* Экспериментально-статистическое моделирование трещиностойкости бетона, армированный полипропиленовой фиброй// Ю.В. Турба, С.И. Солодкий/ Наукові нотатки. №46. – 2014. С. 512-515
114. *Туровинин, А.В.* Оценка эффективности армирования бетона аморфнометаллической фиброй/ А.В. Туровинин, А.С. Доржу, М.И. Жаворонков// 64-я Международная научно-техническая конференция молодых ученых, посвященная 300-летию со дня рождения М.В. Ломоносова/ СПбГАСУ. В 3 ч. Ч. II. – СПб., 2011. – 228-230 с.
115. *Харлаб, В.Д.* Упругость сталефибробетона/ В.Д. Харлаб, Д.А. Смирнов// Вестник гражданских инженеров. – 2010. №4 (25) – С. 56-60
116. *Хвастунов, В.Л.* Прочностные и деформационные характеристики высокопрочных бетонов и фибробетонов с низким удельным расходом цемента на единицу прочности/ В.Л. Хвастунов, А.В. Хвастунов, В.В. Пауск// Региональная архитектура и строительство. 2014. №4. – с. 15-23

117. *Хвастунов, В.Л.* Связь прочностных и деформационных свойств бетонов и фибробетонов с параметрами продавливания железобетонных плит/ В.Л. Хвастунов, А.В. Хвастунов, Ю.П. Скачков// Региональная архитектура и строительство. – 2015. №1. – с. 93-100
118. *Чернышов, Е.М.* Развитие теории системно-структурного материаловедения и высоких технологий строительных композитов нового поколения/ Е.М. Чернышов// Строительные материалы. – 2011. №7. – С.54-60
119. *Шкода, Г.Г.* Оценка влияния структурообразующих параметров на прочность сталефибробетона при сжатии/ Технологии бетонов. 2011. №3-4. – С. 27-29

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ А

ДИПЛОМЫ ПОБЕДИТЕЛЯ КОНКУРСА ГРАНТОВ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА





## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

ПРОТОКОЛ СОВЕЩАНИЯ ОБ ИЗГОТОВЛЕНИИ КОНТЕЙНЕРНЫХ  
АВТОЗАПРАВОЧНЫХ СТАНЦИЙ

РОСНЕФТЬ

НЕФТЯНАЯ КОМПАНИЯ

ОТКРЫТОЕ АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО

<b>Протокол</b>	<b>Совещание</b> Изготовление и поставка модульных (контейнерных) автозаправочных станций для обеспечения заправки ГСМ подвижного состава специализированных автопарков по обслуживанию пассажирского автомобильного транспорта для перевозки участников и гостей XXII Олимпийских зимних игр и XI Паралимпийских зимних игр 2014 года в г. Сочи. 02.04.2012 г. 10 ч. 00 мин г. Москва, ОАО «НК «Роснефть», ул. Дубнинская д. 31 А, Каб. №1403.	
<b>Председательствующий:</b>	<b>С.К. Шрейдер</b>	
<b>Участники:</b>	От Департамента нефтепродуктообеспечения: Рыпневский Э.В., Белохвостов В.В. От ООО «УИД»: Зыков В.В., Кочерян А.Ю.	
<b>Обсуждаемые вопросы</b>		
<b>Возможность изготовления и поставки силами ООО «УИД» модульных (контейнерных) автозаправочных станций для обеспечения заправки ГСМ подвижного состава специализированных автопарков по обслуживанию пассажирского автомобильного транспорта для перевозки участников и гостей XXII Олимпийских зимних игр и XI Паралимпийских зимних игр 2014 года в г. Сочи</b>		
<b>По итогам совещания решили:</b>	<b>Ответственный:</b>	<b>Срок:</b>
1. Подготовить и представить в Департамент нефтепродуктообеспечения ОАО «НК «Роснефть» коммерческое предложение от ООО «УИД» по подряду на изготовление и поставку модульных (контейнерных) автозаправочных станций с последующей их установкой в автопарках и местах размещения спецтехники для обеспечения нефтепродуктами пассажирского автомобильного транспорта для перевозки участников и гостей XXII Олимпийских зимних игр и XI Паралимпийских зимних игр 2014 года в г. Сочи. В указанном коммерческом предложении обязательно предусмотреть: все возможные варианты изготовления модульных (контейнерных) АЗС (в т.ч. наиболее экономичный вариант); основные их технические характеристики; необходимые размеры площадок для монтажа и эксплуатации (в т.ч. с учетом экологических, санитарных и пожарных норм); время, необходимое для изготовления контейнерных (модульных) АЗС, их установки и монтажа оборудования, основные стоимостные показатели.	Зыков В.В.	до 27.04.2012 г.

2. Проработать возможность проведения презентации для представителей ОАО «НК «Роснефть» по оборудованию и организации работы контейнерных (модульных) АЗС типа «саркофаг».	Зыков В.В.	до 27.04.2012 г.
3. Организовать показ образцов контейнерных (модульных) АЗС, построенных по технологии «саркофаг».	Зыков В.В.	до 27.04.2012 г.
4. Подготовить исходную информацию на изготовление и поставку модульных (контейнерных) автозаправочных станций, планируемых к установке в автопарках и местах размещения спецтехники для обеспечения нефтепродуктами пассажирского автомобильного транспорта для перевозки участников и гостей XXII Олимпийских зимних игр и XI Паралимпийских зимних игр 2014 года в г. Сочи.	Рыпневский Э.В.	По результатам рассмотрения коммерческого предложения, представленного ООО «УИД»

Председательствующий -

Начальник Управления эксплуатации сети АЗС  
Департамента нефтепродуктообеспечения

С.К. Шрейдер

Секретарь

В.В. Белохвостов

**ПРИЛОЖЕНИЕ В**  
**ТЕХНИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ НА НАЗЕМНЫЕ РЕЗЕРВУАРЫ АЗК**



ООО Научно-Технический Центр  
«ИННОВАЦИОННЫЕ СТРОИТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ»

ОКП 58 6100

УТВЕРЖДАЮ:  
Президент ООО «НТЦ ИСТ»  
Зыков В.В.  
«23» октября 2013 г.

**Наземный резервуар для автозаправочных комплексов  
«ZykTank-Sarkofag»**

**Технические условия**

**ТУ 5861-001-66005714-2013**

Разработчики:  
д.т.н., профессор  
инженер

Ю.В. Пухаренко  
Д.А. Пантелеев

Санкт-Петербург  
2013 г.

Настоящие технические условия распространяются на наземные резервуары для автозаправочных комплексов «ZykTank-Sarkofag» из полиармированного фибробетона для хранения нефтепродуктов, сжиженного и сжатого природного газа.

Полиармированный фибробетон – это композиционный материал, содержащий два и более разных по составу или (и) геометрическим параметрам армирующих компонента, равномерно распределенных в матрице относительно друг друга. Целью полиармирования является создание такого материала, который бы сохранял преимущества и исключал недостатки композита при моноармировании.

Наземные резервуары относятся к элементам конструкций 3-го класса ответственности с нормируемой степенью огнестойкости.

Грунтовые воды и сточная жидкость не агрессивны к материалу резервуаров.

Резервуар «Sarkofag» представляет собой многослойную конструкцию, имеющую пять степеней защиты. Внутренняя часть резервуара изготовлена из 4-х миллиметрового стального листа и является несъемным элементом общей опалубки, имеет непрерывную сварку на всех швах и покрыта с обеих сторон фторэпоксидным лаком, служащим термо-, морозо-, радиационно-, коррозионно стойким элементом защиты. Основу всего контейнера представляет монолитное изделие, изготовленное из 80 - миллиметрового слоя фиброжелезобетона.

Резервуары обозначаются марками, состоящими из буквенно-цифровых групп, разделенных дефисами. Буквы обозначают внутренний объем конструкции, цифры после букв (округленные до целого числа) обозначают высоту, ширину и длину.

Пример условного обозначения резервуара внутренним объемом 15,3 м<sup>3</sup>, внутренними размерами 3040; 2240 и 2240 мм:

Резервуар «ZykTank-Sarkofag» 15,3 – 3040x2240x2240 по ТУ 5861-001-66005714-2013.

В настоящих технических условиях применяют термины по нормативной документации, указанной в приложении 1.

## 1. ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ

1.1. Резервуары должны соответствовать требованиям технического регламента и изготавливаться по технической документации, утвержденной в установленном порядке.

1.2. Основные параметры и размеры:

1.2.1. Чертежи изделия приведены в приложении 2;

1.2.2. Основные параметры и размеры изделий приведены в таблице 1.

Отклонения от номинальных размеров не должны превышать, (мм):

- по внутреннему сечению  $\pm 6$ ;
- по высоте  $\pm 10$ ;
- по толщине стенок  $\pm 5$ .

Таблица 1

Марка изделия	Габаритные размеры, мм			Количество каркасов, шт	Объем бетона, м <sup>3</sup>	Масса изделия, кг
	длина	ширина	высота			
15,3	3200	2400	2400	1	3,38	9000

1.3. Характеристики:

1.3.1. Резервуары изготавливаются из фиброжелезобетона классов *B* 50, *B<sub>ib</sub>* 18 по ГОСТ 26633;

1.3.2. Значение нормируемой отпускной прочности должно быть не менее 70% от класса бетона на сжатие в теплый период года и не менее 90% в холодный;

1.3.3. Марка бетона по морозостойкости должна быть не ниже *F*400 согласно ГОСТ 10060.0 - 10060.3;

1.3.4. Марка бетона по водонепроницаемости должна быть не ниже *W*8 в соответствии с ГОСТ 12730.5;

1.3.5. Ударостойкость (коэффициент эффективности при ударе  $(K_{эф} = \frac{A_{фб}^{y0}}{A^{y0}})$ ) – не менее 7 (справочный);

1.3.6. Вязкость разрушения по ГОСТ 29167 (критерий хрупкости,  $X^c_F$ , м) – не менее 70;

1.3.7. Для армирования резервуаров следует применять арматурную сталь класса А III диаметром 10 мм по ГОСТ 5781;

1.3.8. Требования к качеству поверхностей и внешнему виду конструкций – по ГОСТ 13015. Качество поверхностей должно удовлетворять требованиям, установленным для категории Аб.

1.4. Требования к сырьевым материалам:

1.4.1. Наземные резервуары должны изготавливаться из материалов, которые по качеству должны удовлетворять требованиям нормативных документов, указанных в конструкторской документации изделия;

1.4.2. Для изготовления наземных резервуаров из фиброжелезобетона для автозаправочных комплексов применяются:

- портландцемент без добавок, марки не ниже 500 по ГОСТ 10178 или класса 42,5 по ГОСТ 31108;
- мелкий заполнитель (песок с  $M_{кр} = 2,4$ ) по ГОСТ 8736;
- фибра аморфнометаллическая ( $d_{экс} = 0,3$  мм,  $\ell = 30$  мм), фибра стальная из проволоки ( $d = 0,3$  мм,  $\ell = 22$  мм);
- пластифицирующая добавка по ГОСТ 24211;
- вода по ГОСТ 23732.

Все компоненты должны иметь заключения, подтверждающие их безопасность.

1.5. Маркировка:

1.5.1. Маркировка конструкций в соответствии с ГОСТ 13015;

1.5.2. Маркировочные надписи наносят на наружную поверхность резервуаров;

1.5.3. Маркировка должна быть четкой и несмываемой.

## **2. ТРЕБОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ И ОХРАНЫ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ**

2.1. Резервуары являются негорючими, пожаро-взрывобезопасными изделиями.

2.2. Санитарно- и радиационно-гигиеническую безопасность изделий устанавливают оценкой безопасности их составляющих.

2.3. К работе с изделиями допускаются лица не моложе 18 лет, прошедшие медицинское освидетельствование и соответствующий инструктаж по технике безопасности.

2.4. При производстве изделий все помещения должны быть оборудованы приточно-вытяжной вентиляцией по ГОСТ 12.4.021, обеспечивающей состояние воздуха рабочей зоны по ГОСТ 12.1.005.

2.5. В помещениях, в которых производится изготовление изделий, должны быть вывешены правила техники безопасности.

2.6. При организации и проведении производственного контроля необходимо соблюдать требования СП 1.1.1058-01.

2.7. При производстве фибробетонных изделий возможно образование:

- слабоконцентрированных цементных растворов от промывки технологического оборудования. При этом предусматривается очистка воды и ее повторное использование;
- пыли в результате выполнения транспортных и погрузочно-разгрузочных работ с цементом и другими дисперсными материалами;
- некондиционной продукции, которая используется предприятием в собственных целях.

Таким образом, производство наземных резервуаров для автозаправочных комплексов является безотходным и не загрязняющим окружающую среду.

### 3. ПРАВИЛА ПРИЕМКИ

3.1. Резервуары должны быть приняты службой технического контроля предприятия-изготовителя в соответствии с ГОСТ 13015 и настоящих ТУ.

3.2. Резервуары принимают партиями по результатам приемосдаточных и периодических испытаний.

3.3. Резервуары предъявляют к приемке партиями. За партию принимают количество изделий одного типоразмера при неизменном качестве составляющих материалов, изготовленные по единой технологии в течение одной недели и оформленные одним документом о качестве в соответствии с ГОСТ 13015.

3.4. Документ о качестве резервуаров должен содержать следующие данные:

- наименование предприятия-изготовителя и его товарный знак, адрес;
- наименование и адрес получателя;
- наименование и марку резервуаров;
- дату изготовления;
- номер партии;
- результаты приемочных и периодических испытаний (классы прочности при сжатии и изгибе, отпускную прочность, марку по морозостойкости, марку по водонепроницаемости, ударостойкость, вязкость разрушения).

Документ о качестве должен быть подписан лицом, ответственным за технический контроль предприятия-изготовителя.

3.5. Приемосдаточные испытания проводят по показателям: прочность бетона, соответствие арматурных элементов, точность геометрических размеров, качество поверхностей.

3.6. Приемочный контроль прочности бетона производят по ГОСТ Р 53231.

3.7. Периодические испытания проводят по показателям морозостойкости, водонепроницаемости, ударостойкости и вязкости разрушения не реже 1 раза в год, а также при постановке продукции на производство, при изменении технологии, состава бетона или вида сырьевых материалов.

3.8. Если при проверке качества резервуаров выявится несоответствие хотя бы одному из технических требований настоящих ТУ, эту партию изделий предъявляют повторной приемке на удвоенном количестве изделий. Если при повторной приемке выявится несоответствие, то всю партию бракуют.

3.9. Потребитель имеет право осуществлять контрольную проверку качества изделий в соответствии с требованиями настоящих ТУ.

#### **4. МЕТОДЫ ИСПЫТАНИЙ**

4.1. Прочность бетона определяют по ГОСТ 10180 на серии образцов, изготовленных из бетонной смеси рабочего состава. Контроль и оценку проектной и отпускной прочности следует производить по ГОСТ Р 53231.

4.2. Внешний вид изделий, размеры, отклонение от плоскости, категорию лицевой поверхности, толщину защитного слоя бетона проверяют по ГОСТ 26433.0 и ГОСТ 26433.1.

4.3. Среднюю плотность определяют согласно ГОСТ 12730.1.

4.4. Определение морозостойкости определяют по ГОСТ 10060.0, ГОСТ 10060.3.

4.5. Определение водонепроницаемости производят по ГОСТ 12730.5.

4.6. Определение качества арматурных элементов производят по ГОСТ 10922.

4.7. Вязкость разрушения (критерий хрупкости,  $X_{F,M}^c$ ) – по ГОСТ 29167.

4.8. Отклонения от номинальных размеров и показатели внешнего вида изделий проверяют методами по ГОСТ 13015, ГОСТ 26433.0, ГОСТ 26433.1.

## **5. ТРАНСПОРТИРОВАНИЕ И ХРАНЕНИЕ**

5.1. Транспортирование и хранение резервуаров осуществляют всеми допустимыми видами транспорта.

5.2. Резервуары транспортируют и хранят в рабочем положении.

5.3. Подъем, погрузка и разгрузка резервуаров должны производиться краном со специальными приспособлениями (захватами).

5.4. При выполнении погрузочно-разгрузочных работ, а также при транспортировании и хранении изделий, должны предусматриваться меры, исключающие возможность их повреждения.

## **6. ГАРАНТИИ ИЗГОТОВИТЕЛЯ**

6.1. Изготовитель гарантирует соответствие изделий требованиям настоящего технологического регламента при соблюдении потребителем правил их транспортирования, хранения и условий применения.

6.2. Гарантийный срок хранения и эксплуатации резервуаров, в течение которого изготовитель обязан устранить обнаруженные скрытые дефекты – два года со дня отгрузки потребителю, но не более 2,5 лет с момента изготовления.

6.3. Скрытыми дефектами следует считать такие, которые не могли быть обнаружены при приемке резервуаров и выявились в процессе транспортирования, хранения, монтажа и эксплуатации.

**Перечень  
нормативных документов, на которые даны ссылки в данных ТУ**

Обозначение документа	Название нормативного документа
ГОСТ 12.1.005	ССБТ. Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны.
ГОСТ 12.4.021	ССБТ. Системы вентиляционные. Общие требования.
ГОСТ 6727	Проволока из низкоуглеродистой стали холоднотянутая для армирования железобетонных конструкций. Технические условия.
ГОСТ 5781	Сталь горячекатаная для армирования железобетонных конструкций.
ГОСТ 8736	Песок для строительных работ. Технические условия.
ГОСТ 10060.0 ГОСТ 10060.3	Бетоны. Методы определения морозостойкости.
ГОСТ 10178	Портландцемент и шлакопортландцемент. Технические условия.
ГОСТ 31108	Цементы общестроительные. Технические условия.
ГОСТ 10180	Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам.
ГОСТ 10922	Арматурные и закладные изделия сварные, соединения сварные арматуры и закладных изделий железобетонных конструкций. Общие технические условия.
ГОСТ 12730.5	Бетоны. Методы определения водонепроницаемости.
ГОСТ 29167	Бетоны. Методы определения характеристики трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении.
ГОСТ 13015	Изделия железобетонные и бетонные для строительства. Общие технические требования. Правила приемки, маркировки, транспортирования и хранения.
ГОСТ Р 53231	Бетоны. Правила контроля прочности.
ГОСТ 23009	Конструкции и изделия бетонные и железобетонные сборные, условные обозначения (марки).
ГОСТ 23732	Вода для бетонов и растворов. Технические условия.
ГОСТ 24211	Добавки для бетонов и строительных растворов. Общие технические условия.
ГОСТ 26633	Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия.
ГОСТ 26433.0	Система обеспечения точности геометрических параметров в строительстве. Правила выполнения измерений. Общие положения.
ГОСТ 26433.1	Система обеспечения точности геометрических параметров в строительстве. Правила выполнения измерений. Элементы

	заводского изготовления.
СП 1.1.1058	Организация и проведение производственного контроля за соблюдением санитарных правил и выполнением санитарно-противоэпидемических (профилактических) мероприятий.





**ПРИЛОЖЕНИЕ Г**  
**ТИТУЛЬНЫЙ ЛИСТ РАБОЧЕГО ПРОЕКТА НАЗЕМНОГО**  
**РЕЗЕРВУАРА**

*Санкт-Петербургский  
государственный архитектурно-строительный университет*



*Рабочий проект*

*Наземный топливный 2-х-камерный резервуар  
"ZykTank-Sarkofag"  
для хранения светлых нефтепродуктов емкостью 15,3 м<sup>3</sup>  
(для Олимпийских Игр "Сочи-2014")*

*Шифр 221/933-1.2013*

*Комплект чертежей марки - КЖМД  
(конструкции железобетонные и металлические. Детализовка)*

*ГИП*

*Гл. конструктор*

*Гл. технолог*

*Морозов В.И.*

*Шмидт А.Б.*

*Пухаренко Ю.В.*

*Санкт-Петербург  
2013*

**ПРИЛОЖЕНИЕ Д**  
**ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЙ И АКТ О ВНЕДРЕНИИ НАЗЕМНЫХ**  
**РЕЗЕРВУАРОВ АЗК**

<b>Испытательный центр «СПбГАСУ»</b> 190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская, д.4 Тел./факс 316 40 96
<b>СИСТЕМА СЕРТИФИКАЦИИ ГОСТ Р</b> Аттестат аккредитации № РОСС RU.0001.21 СЛ 44 Срок действия с 09 марта 2010 г. по 09 марта 2015 г.

**ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЙ № 3893 от 16 декабря 2013 г.**

**Предъявитель продукции** – ООО «НТЦ ИСТ»

**Наименование продукции** – образцы сталефибробетона с использованием фибры стальной волнового профиля и фибры аморфнометаллической

**Состав бетона** (на 1 м<sup>3</sup>):

Цемент ПЦ 500 Д0	650 кг
Песок кварцевый М <sub>кр</sub> =2,3	1450 кг
Фибра стальная волнового профиля из проволоки (d=0,3 мм, l=30 мм)	76 кг
Фибра аморфнометаллическая (d <sub>эск</sub> =0,3 мм, l=30 мм)	50 кг
Добавка пластифицирующая Shomburg Remicrete SP-10 (FM)	4,55 кг
Вода	228 кг

**Дата испытаний:** 02.12.2013-13.12.2013

Дата изготовления	Измеряемый параметр	Методика испытаний	Требования НД	Результаты испытаний
Ноябрь 2013	Предел прочности при сжатии, МПа	ГОСТ 10180-2012	Не менее В50	60,1
	Предел прочности при изгибе, МПа		Не менее В <sub>тб</sub> 18	20,2
	Морозостойкость, марка	ГОСТ 10060.0-95- ГОСТ 10060.3-95	Не менее F300	F400
	Водонепроницаемость, марка	ГОСТ 12730.5-84	Не менее W8	W12
	Ударостойкость (коэффициент эффективности при ударе $K_{эф} = A_{фб}^{уд} / A^{уд}$ )	-	Не менее 7,0	9,1
	Вязкость разрушения (критерий хрупкости, X <sub>Г,М</sub> )	ГОСТ 29167-91	Не менее 70	86

Зам. руководителя ИЦ «СПбГАСУ», к.т.н.

И.У. Аубакирова

ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЙ РАСПРОСТРАНЯЕТСЯ ТОЛЬКО НА ОБРАЗЦЫ, ПРОШЕДШИЕ ИСПЫТАНИЯ.

**ПЕРЕПЕЧАТКА ПРОТОКОЛА ЗАПРЕЩЕНА**

Лист 1 / Листов 1

УТВЕРЖДАЮ:

УТВЕРЖДАЮ:

Президент  
ООО «НТЦ ИСТ»

Зыков В.В.

«14» марта 2014 г

Проректор по научной работе  
СПбГАСУ, д.э.н., профессор

Смирнов Е.Б.

«14» марта 2014 г

## АКТ

Мы, нижеподписавшиеся, со стороны ООО «НТЦ Инновационные Строительные Технологии» технолог Фильчев Д.П., и со стороны ФГБОУ ВПО «СПбГАСУ» заведующий кафедрой технологии строительных материалов и метрологии, д.т.н., профессор Пухаренко Ю.В. и аспирант Пантелеев Д.А., составили настоящий акт о том, что в течение 2013 года сотрудники кафедры участвовали в реализации комплексной программы по разработке конструкции, состава смеси и технологии изготовления опытно-промышленной партии фиброжелезобетонных резервуаров наземного размещения для автозаправочных комплексов (АЗК) «ZykTank-Sarkofag».

Резервуар «ZykTank-Sarkofag» представляет собой многослойную конструкцию, имеющую пять степеней защиты. Внутренняя часть резервуара изготовлена из стального листа толщиной 4 мм и является несъемным элементом общей опалубки, имеет непрерывную сварку на всех швах и покрыта с обеих сторон фторэпоксидным лаком, служащим термо-, морозо-, радиационно-, коррозионно стойким элементом защиты. Основу всего контейнера представляет монолитное изделие, изготовленное из 80 – миллиметрового слоя фиброжелезобетона. Характеристики резервуара приведены в таблице 1.

Таблица 1

Марка изделия	Габаритные размеры, мм			Количество каркасов, шт	Объем бетона, м <sup>3</sup>	Масса изделия, кг
	длина	ширина	высота			
15,3	3200	2400	2400	1	3,38	9000

Результатом работы является выпуск опытных изделий в количестве четырех штук, размещенных на АЗК г. Сочи.

При выпуске опытно-промышленной партии использовались материалы и состав полиармированной фибробетонной смеси, разработанный в СПбГАСУ (табл. 2).

Таблица 2

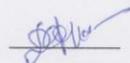
Наименование материала	Изготовитель	Расход, кг/м <sup>3</sup>
Цемент ПЦ500Д0	ОАО «Осколцемент»	650
Песок кварцевый $M_k = 2,2 \dots 2,4$	ОАО «Рудас Северо-Запад»	1450
Фибра стальная волнового профиля из проволоки ( $d = 0,3$ мм, $l = 22$ мм)	РУП «Белорусский металлургический завод»	76
Фибра аморфнометаллическая ( $d_{экр} = 0,3$ мм, $l = 30$ мм)	ООО «Химмет»	50
Добавка пластифицирующая Schomburg Remicrete SP-10 (FM)	ООО «ШОМБУРГ-ЕР Лтд»	4,55

Полученные фибробетонные изделия в возрасте 28 суток имеют следующие характеристики:

- средняя плотность 2352 кг/м<sup>3</sup>;
- прочность при сжатии 60,1 МПа;
- прочность на растяжение при изгибе 20,2 МПа;
- марка по морозостойкости F400;
- марка по водонепроницаемости W12;
- ударостойкость (коэф. эффективности при ударе  $K_{эф} = A_{фс}/A$ ) 9,1;
- вязкость разрушения (критерий хрупкости,  $X_{FR}^c$ ) 86 м.

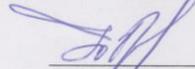
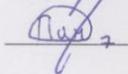
Масса указанных изделий составила 9 т, что на 30 % меньше массы применяемых в настоящее время наземных резервуаров для АЗК. При этом зафиксировано 9-кратное увеличение ударостойкости, 85-кратное – вязкости разрушения и 2,5-кратное – прочности на растяжение при изгибе сталефибробетонных образцов по сравнению с неармированным бетоном аналогичных составов.

От ООО «НТЦ ИСТ»



Фильченков Д.П.

От ФГБОУ ВПО «СПбГАСУ»

Пухаренко Ю.В.

Пантелеев Д.А.