

На правах рукописи

ПАНТЕЛЕЕВ Дмитрий Андреевич

**ПОЛИАРМИРОВАННЫЕ ФИБРОБЕТОНЫ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АМОРФНОМЕТАЛЛИЧЕСКОЙ
ФИБРЫ**

Специальность: **05.23.05 – Строительные материалы и изделия**

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2016

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет».

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

Официальные оппоненты: **Каприелов Семен Суренович**
доктор технических наук,
Научно-исследовательский, проектно-
конструкторский и технологический
институт бетона и железобетона
им. А.А. Гвоздева АО НИЦ «Строительство»,
г. Москва, заведующий лабораторией;

Коротких Дмитрий Николаевич
доктор технических наук, ФГБОУ ВО
«Воронежский государственный
архитектурно-строительный университет»,
кафедра технологии строительных
материалов, изделий и конструкций, доцент

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Белгородский
государственный технологический
университет имени В.Г. Шухова»

Защита диссертации состоится «24» мая 2016 г. в 14⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д **212.223.01** при ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4, зал заседаний диссертационного совета (аудитория 219).

Тел./ Факс: (812) 316-58-72
E-mail: rector@spbgasu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и на сайте www.spbgasu.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук

Конюшков Владимир Викторович

I ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность избранной темы. Все большее применение в строительстве находят фибробетоны, обладающие улучшенными физико-механическими и деформативными характеристиками. При этом, как правило, останавливаются на вариантах моноармирования, при которых возможности регулирования свойств бетонов достаточно ограничены, в то время как армирование одновременно несколькими видами волокон (полиармирование) позволяет управлять комплексом необходимых характеристик в одном композите. Однако, вопросы, посвященные полиармированию 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 полиармирования 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.

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., 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 фиброжелезобетонных 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.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

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 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 (патент на изобретение № 2575658 «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 сходимость 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».

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 п. 2 «Создание новых строительных материалов, обеспечивающих строительство быстровозводимых трансформируемых и долговечных зданий и сооружений», п. 6 «Создание теоретических основ получения строительных композитов гидратационного твердения и композиционных вяжущих веществ и бетонов».

Степень достоверности и апробация результатов. Основные положения диссертационной работы обсуждены и одобрены 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» (Россия, 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, патент на изобретение № 2575658.

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.

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

В первой главе приведен анализ литературных данных по теме диссертации, рассмотрено состояние вопроса, показана эффективность вариантов полиармирования при сочетании аморфнометаллической фибры с другими видами армирующих волокон.

Во второй главе приведены описания материалов и методик, использованных в диссертационной работе.

В третьей главе представлены результаты исследования и прогнозирования прочностных, деформативных и энергетических характеристик полиармированного фибробетона на основе предлагаемых математических моделей, характеризующих поведение композита под нагрузкой.

В четвертой главе приведены результаты экспериментальных исследований механических характеристик полиармированных фибробетонов с применением аморфной металлической фибры, включая показатели деформативности.

В пятой главе предложена методика проектирования и разработаны составы различных видов полиармированных фибробетонов с использованием аморфной металлической фибры, а также приведены результаты экспериментальной проверки полученных данных в условиях действующего производства путем выпуска опытной партии наземных резервуаров автозаправочных комплексов с технико-экономической оценкой.

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

II ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ДИССЕРТАЦИИ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

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

Основной задачей при разработке полиармированных фибробетонов является определение оптимального сочетания и составление комбинаций из двух или нескольких видов волокон с характеристиками, обеспечивающими получение композита, в полной мере отвечающего характеру и условиям его работы в конструкции. Определенный опыт армирования бетона одновременно несколькими видами волокон с целью комплексного управления его свойствами имеется и описан в технической литературе. Тем не менее, далеко не все вопросы решены, и поиск в этом направлении продолжается. В последние годы получает распространение фибра из аморфнометаллического сплава на основе системы Fe-C-P-Si (рисунок 1).



Рисунок 1 – Аморфнометаллическая фибра

При ее изготовлении расплавленный металл со скоростью 10^6 - 10^8 К/с выливается на охлаждаемую подложку и отверждается, не успевая приобрести упорядоченную кристаллическую решетку.

Предварительные испытания прочности фибробетонных образцов, армированных аморфной металлической фиброй в комбинации с другими видами волокон, показали, что наибольшего эффекта можно добиться, используя аморфнометаллическую фибру вместе со стальной (рисунок 2).

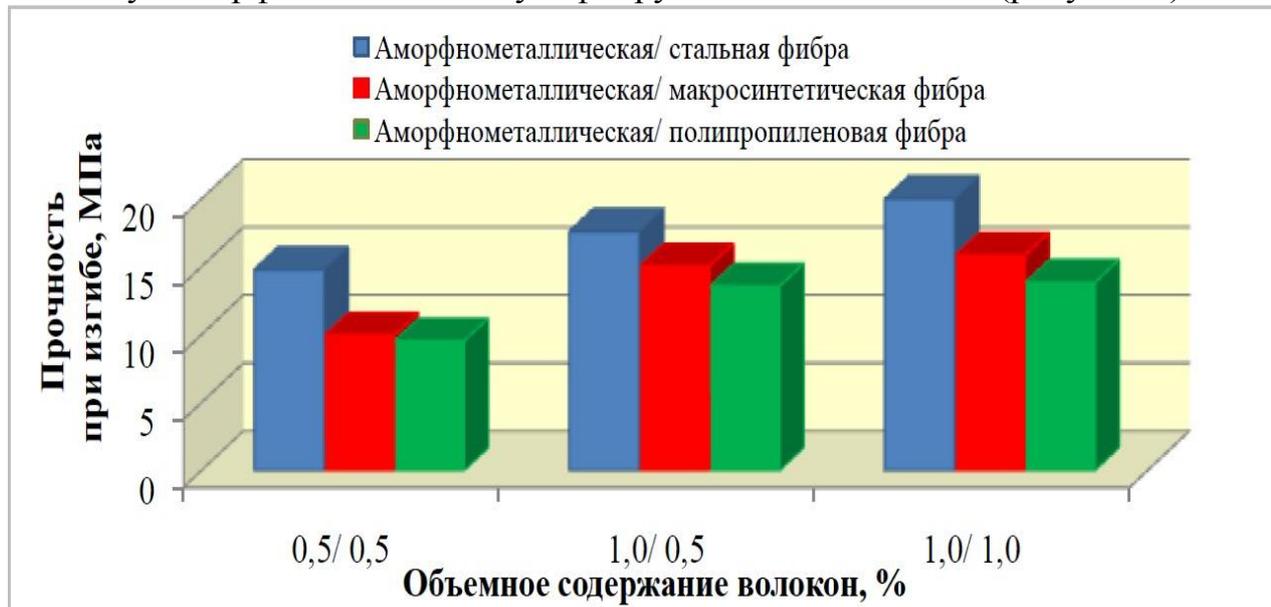


Рисунок 2 – Зависимость прочности на растяжение при изгибе от вида и содержания волокон

В таблице 1 представлены характеристики армирующих волокон, из которой видно, что боковая поверхность аморфнометаллической фибры в несколько раз превышает боковую поверхность, используемой в диссертационном исследовании, стальной фибры из проволоки эквивалентного диаметра. Предварительные расчеты показали, что при указанной длине стальной фибры в процессе разрушения композита будет происходить ее вытягивание из бетонной матрицы. В тех же условиях разрушение фибробетона, армированного аморфной металлической фиброй, будет происходить в результате разрыва волокон, даже при условии увеличения ее собственной прочности в несколько раз.

Таблица 1 – Характеристики армирующих волокон

Вид фибры	Эквивалентный диаметр, d , мм	Длина, l , мм	Плотность материала, ρ , г/см ³	Боковая поверхность, мм
Стальная	0,3	22	7,8	0,94
Аморфнометаллическая	0,3	30	7,8	6,06

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.

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.

Определяющее влияние на прочностные и деформативные характеристики фибробетона оказывает прочность и модуль упругости применяемой фибры.

а) Прочность аморфнометаллической фибры:

Чаще всего разрушение фибробетона происходит в результате нарушения связи волокон с матрицей с последующим их вытягиванием из бетона. При этом прочность фибры оказывается недоиспользованной. Для максимально возможной реализации прочностных свойств армирующего волокна, когда оно будет разрываться в процессе разрушения композита, необходимо обеспечить высокое сцепление с матрицей. Подобная ситуация характерна для вариантов взаимодействия аморфнометаллической фибры с цементным бетоном (рисунок 3).



Рисунок 3 – Поверхность разрушенного фиброцементного образца, армированного аморфнометаллической фиброй

Для определения собственной прочности аморфнометаллической фибры в бетоне был разработан метод, суть которого заключается в нахождении такого минимального количества волокон, до которого они практически не проявляют армирующего эффекта, но после которого наблюдается устойчивый рост прочности композита.

В процессе исследований из цементного теста нормальной плотности были изготовлены образцы размером 4x4x16 см, армированные аморфной металлической фиброй. Результаты испытаний прочности полученного фиброцемента представлены на рисунке 4.

По результатам испытаний рассчитано значение прочности аморфнометаллического волокна по следующей формуле:

$$R_{ам.ф.} = \frac{R_{фб} - 3,5R_{к.з.} \mu_{min} - (1 - 4,5\mu_{min}) \cdot R_{ц.к.}}{\mu_{min}} = 996 \text{ МПа}$$

где: $R_{фб}$, $R_{к.з.}$, $R_{ц.к.}$ – прочность фибробетона, контактной зоны и цементного камня; μ_{min} – минимальная объемная доля волокон.

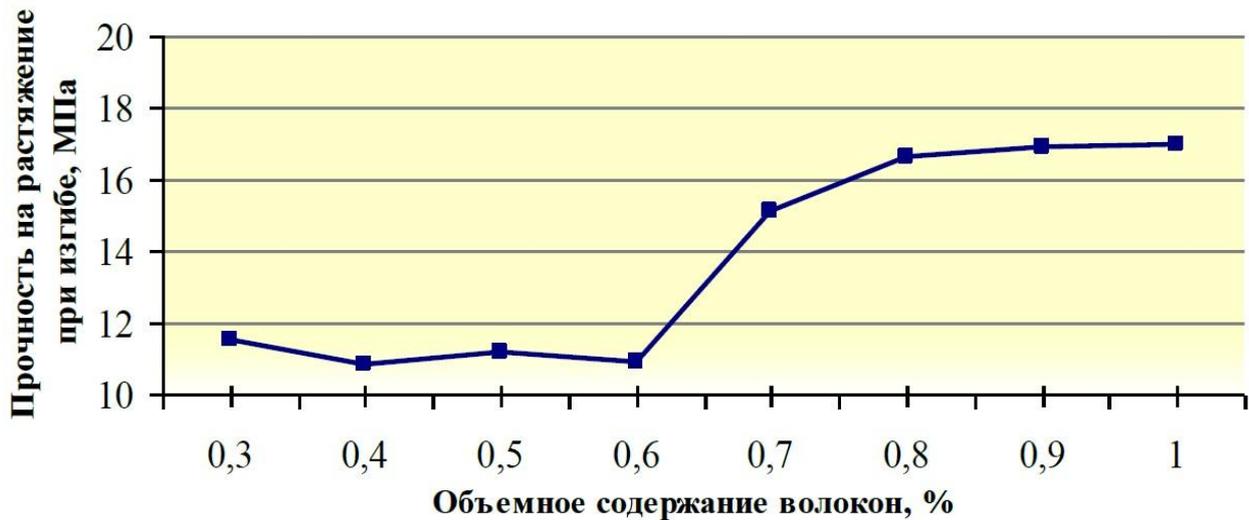


Рисунок 4 – Зависимость прочности фиброцементных образцов от содержания волокон

б) Модуль упругости аморфнометаллической фибры:

Для определения модуля упругости аморфной металлической фибры были изготовлены образцы фибробетона размером 7x7x28 см на основе цементно-песчаной матрицы с соотношением цемента к песку Ц : П = 1:2. В результате испытания образцов по ГОСТ 24452-80 определены значения модуля упругости, представленные на рисунке 5.

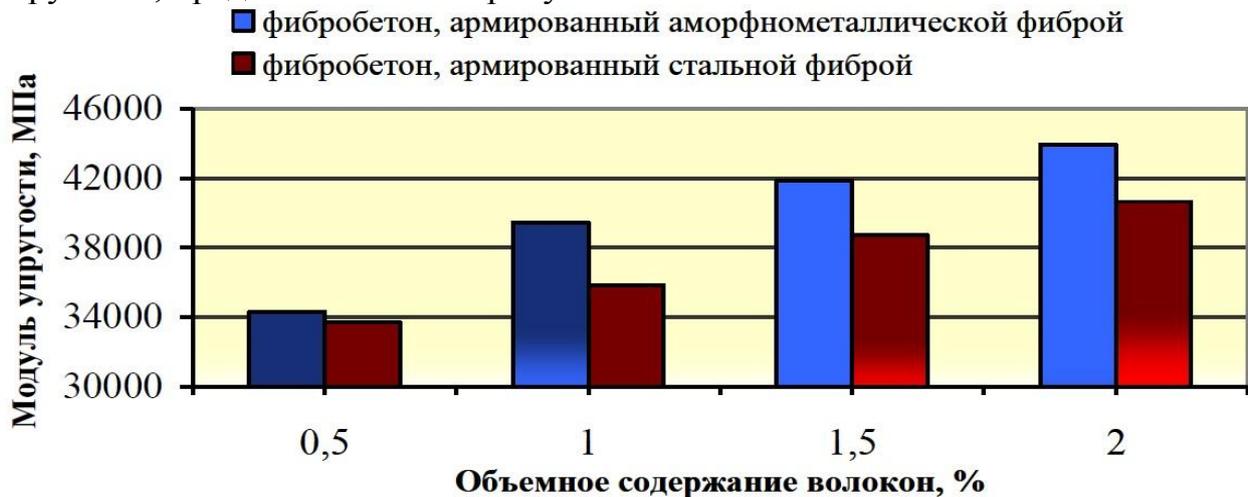


Рисунок 5 – Зависимость модуля упругости фибробетона от вида и количества волокон

Из приведенных данных следует, что модуль упругости фибробетона линейно возрастает по мере увеличения содержания волокон в смеси, при этом в большей степени при использовании фибры из аморфного металла. С учетом полученных результатов определено среднестатистическое значение коэффициента эффективности (отношение модуля упругости фибробетона с аморфной металлической фиброй к модулю упругости фибробетона со стальной фиброй), которое составило $K_{эф} = 1,07$. После этого, по известной характеристике стального волокна рассчитали модуль упругости аморфнометаллической фибры:

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

где: $E_{\text{ам.ф.}}$, $E_{\text{ст.ф.}}$ – модуль упругости аморфнометаллической и стальной фибры соответственно.

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.

Для экспериментальной оценки поведения аморфной металлической и стальной фибры в бетоне были изготовлены моно- и полиармированные образцы фибробетона, результаты испытаний которых представлены на рисунке 6.

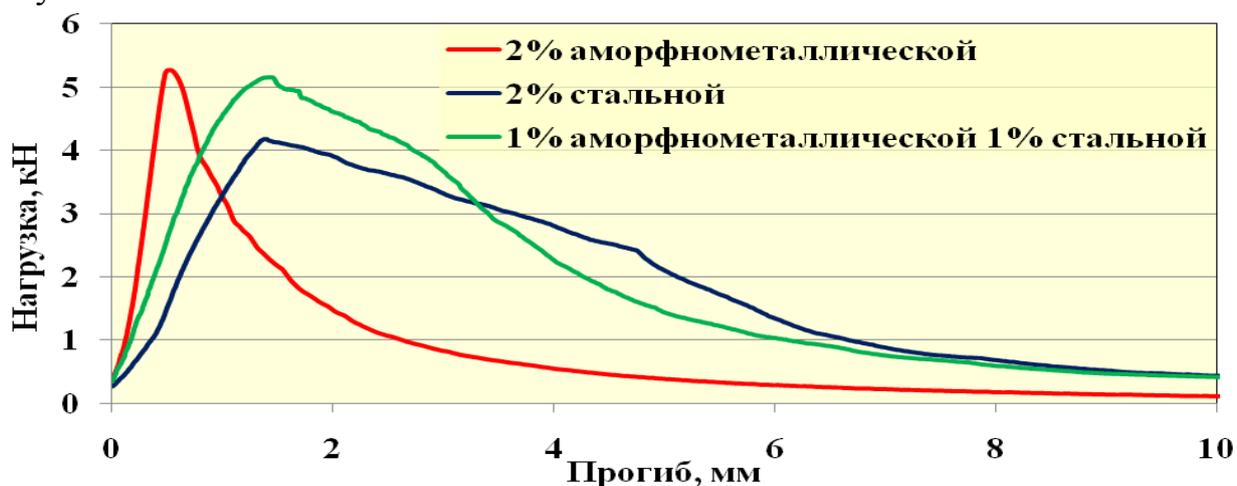


Рисунок 6 – Зависимость прогибов фибробетонных образцов от прилагаемых нагрузок

Из приведенных данных следует, что образцы, армированные аморфнометаллическим волокном, показывают самую высокую прочность, но при этом демонстрируют признаки хрупкого разрушения. Об этом свидетельствует стремительно нисходящая кривая на графике нагрузка – прогиб, а также разрыв аморфнометаллической фибры на рисунке 7.

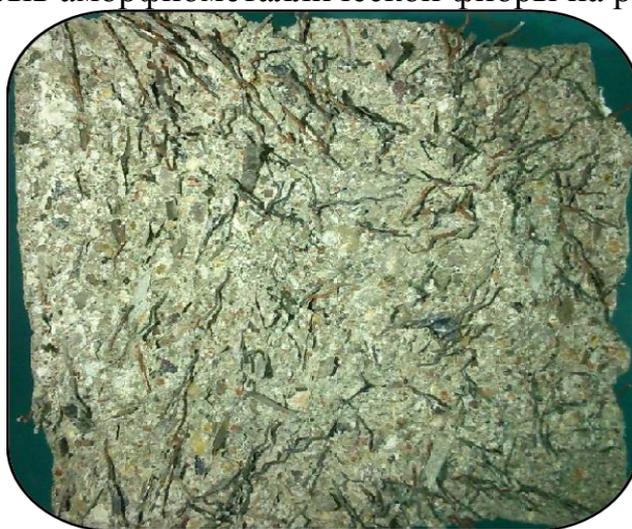


Рисунок 7 – Сечение полиармированного фибробетонного образца после испытания на изгиб

Прочность образцов, армированных стальной фиброй, ниже, однако их разрушение сопровождается вытягиванием волокон из матрицы и, поэтому, является более вязким. В определенной мере указанные недостатки моноармирования устраняет одновременное введение обоих видов фибр, то есть дисперсное полиармирование композита, что подтверждает положения рабочей гипотезы, сформулированной в главе 1.

На основе моделей, предложенных Ю.В. Пухаренко, характеризующих поведение моноармированных фибробетонов под нагрузкой, разработаны модели для прогнозирования деформативных, прочностных и энергетических характеристик полиармированного фибробетона.

а) Модуль упругости:

Для определения теоретических значений модуля упругости, использовались модели Рейсса, Фойхта и предлагаемая модель (1), которая продемонстрировала наибольшую сходимость с экспериментальными результатами, что видно на рисунке 8.

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

где: $E_{фб}$ и $E_б$ – модуль упругости фибробетона и бетона; n – доля аморфнометаллической фибры в общем объеме армирования; φ – коэффициент, зависящий от вида волокон, степени их взаимодействия друг с другом и матрицей. Для фибробетонов, армированных аморфной металлической фиброй $\varphi_{ам.ф.} = 1,33$, армированных стальной фиброй $\varphi_{ст.ф.} = 1,23$; μ – общая объемная доля волокон.

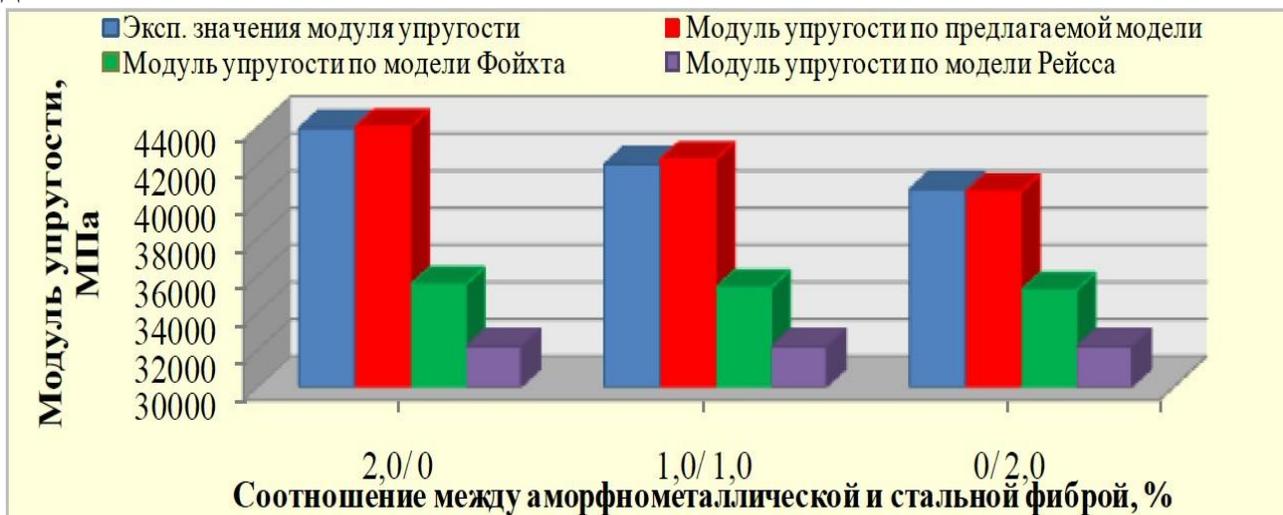


Рисунок 8 – Зависимость модуля упругости от соотношения аморфнометаллической и стальной фибры

б) Прочность:

В момент разрушения фибробетона волокна в композите ведут себя по-разному: разрываются в случае с аморфнометаллической фиброй и вытягиваются в случае со стальной. Для прогнозирования прочности фибробетона при полидисперсном армировании волокнами, обладающими прочной и не прочной связью с матрицей, предложена следующая модель:

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

где: $\frac{\ell_{ст.ф.}}{d_{ст.ф.}}$ – отношение длины стальной фибры к диаметру; $\tau_{ст.ф.} = 3,08$ МПа – прочность сцепления стальной фибры на границе раздела с матрицей.

Полученное уравнение позволяет учитывать вклад каждого вида волокон в составе композита в формирование прочности фибробетона с достаточно высокой схожимостью в сравнении с экспериментальными данными, что видно на рисунке 9.



Рисунок 9 – Зависимость прочности на растяжение при изгибе от соотношения аморфнометаллической и стальной фибры

в) Вязкость разрушения:

При разработке модели, с помощью которой можно судить о вязкости разрушения полиармированного фибробетона по его энергетическим характеристикам, также учитывали разницу в поведении стальных и аморфнометаллических фибр в момент возникновения максимальных напряжений.

Энергия разрушения фибробетона определяется по следующей формуле:

$$W_{фб} = W_{ам.ф.} + W_{ст.ф.}$$

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, длина которой больше критической ($l_{ам.ф.} > l_{ам.кр.}$), оценивается выражением:

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

где: $\sigma_{ам.ф.}^{\max}$ – максимальное нормальное напряжение в аморфнометаллической фибре, $\sigma_{ам.ф.}^{\max} = 0,87R_{ам.ф.} = 870$ МПа; $l_{ам.кр.} = 7,6$ мм – критическая длина

аморфной металлической фибры; $l_{ам.ф.}$ – длина аморфной металлической фибры.

Разрушение фибробетона при армировании стальной фиброй происходит в результате вытягивания волокон из бетонной матрицы композита при $l_{ст.ф.} < l_{ст.кр.}$:

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

После подстановки и преобразований получаем уравнение, позволяющее оценивать вязкость разрушения композита, дисперсно полиармированного аморфнометаллическими и стальными волокнами:

$$W_{фб} = \frac{1}{6} \mu \left(\frac{\ell_{ам.кр.}^2}{2\ell_{ам.ф.}} \sigma_{ам.ф.}^{max} n + \frac{\ell_{ст.ф.}^2}{d_{ст.ф.}} \tau_{ст.ф.} (1 - n) \right) \quad (3)$$

Таким образом, при помощи разработанных моделей (1), (2) и (3) можно рассчитывать значения и осуществлять прогноз изменения модуля упругости, прочности на растяжение при изгибе и вязкости разрушения полиармированного фибробетона, в зависимости от количества, характеристик волокон и соотношения между ними.

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.

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» $d_{ам.ф.}^{экс} = 0,3$ мм, $l_{ам.ф.} = 30$ мм, пластификатор *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. 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. На рисунке 10 приведены результаты прочности на растяжение при изгибе образцов с разным количеством применяемых волокон и соотношением между ними.

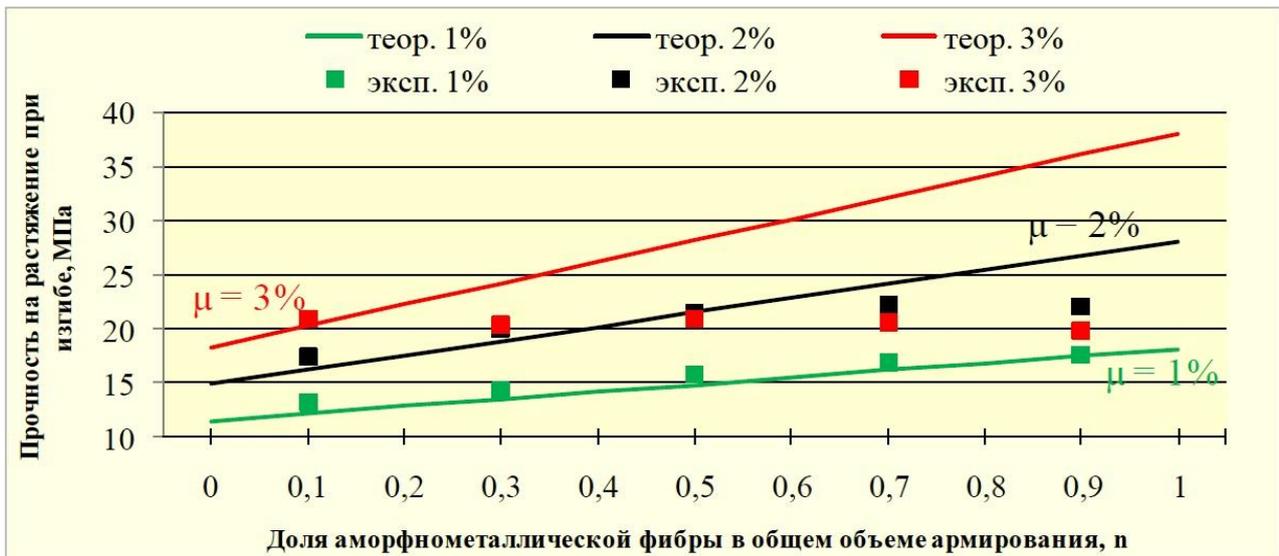


Рисунок 10 – Зависимость прочности полиармированного фибробетона от количества волокон и соотношения между ними

Из полученных данных следует, что в рассматриваемой области экспериментирования, ограниченной видом и характеристиками используемых волокон и 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 11).

С учетом данных обстоятельств дальнейшая оценка эффективности дисперсного полиармирования проводилась на фибробетонах с общим расходом волокон, не превышающем 2% по объему при различном сочетании стальной и аморфнометаллической фибры.



Рисунок 11 – Образец, армированный 3% аморфнометаллической фибры по объему, после испытания прочности при изгибе

а) Модуль упругости, коэффициент Пуассона, призмная прочность:

Определение указанных характеристик производилось на образцах размером 70x70x280 мм в соответствии с ГОСТ 24452-80. Результаты испытаний фибробетонных образцов приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты испытаний фибробетонных образцов

Доля аморфной металлической фибры в общем объеме армирования, n	Призмная прочность, R_{np} , МПа	Модуль упругости, E , МПа		Коэффициент Пуассона, ν
		эксп.	теор.	
бетон без фибры	45,5	31643	-	0,19
0	52,3	40654	40503	0,158
0,1	54,4	40952	40850	0,156
0,2	57,5	41188	41198	0,148
0,3	58,0	41527	41547	0,146
0,4	60,2	41844	41895	0,138
0,5	60,4	42000	42243	0,137
0,6	61,3	42440	42591	0,135
0,7	62,1	42776	42939	0,129
0,8	62,4	43147	43288	0,126
0,9	63,1	43627	43636	0,117
1,0	62,9	43945	43984	0,119

По результатам испытаний могут быть сделаны следующие выводы:

1) 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;

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

3) Степень изменения указанных характеристик зависит от соотношения между стальной и аморфнометаллической фиброй в составе полиармирования и, главным образом, от объемной доли последней.

б) Прочность на растяжение при изгибе, трещиностойкость, вязкость разрушения:

Испытания прочности проводили в соответствии с ГОСТ 10180-2012, значения энергетических и силовых параметров, позволяющих судить о трещиностойкости и вязкости разрушения фибробетонов, определяли в соответствии с ГОСТ 29167-91. Результаты испытаний приведены в таблице 3.

Применение полидисперсного армирования, позволило совместить положительные качества аморфной металлической и стальной фибры. Наибольшую эффективность показали образцы, армированные при следующем соотношении волокон: 60% аморфнометаллической фиброй и 40% стальной фиброй, обладающие наибольшей прочностью на растяжение при изгибе и трещиностойкостью (критическим коэффициентом интенсивности

напряжений). А так же удалось добиться значительного, более чем в 3,3 раза, по сравнению с образцами, армированными только аморфной металлической фиброй, повышения вязкости разрушения (критерия хрупкости) композита.

Таблица 3 – Результаты испытаний фибробетонных образцов

Доля аморфной металлической фибры в общем объеме армирования, n	Прочность при изгибе, $R_{изг}$, МПа		Вязкость разрушения		Критический коэффициент интенсивности напряжений, K_c , МПа·м ^{0,5}
	эксп.	теор.	Критерий хрупкости, X_F^c , м	Энергия разрушения, $W_{фб}$, Дж	
бетон без фибры	8,1	-	0,1	-	0,388
0	17,2	14,9	144,0	1656,4	0,821
0,1	17,7	16,2	131,9	1518,6	0,844
0,2	17,9	17,5	129,7	1380,9	0,855
0,3	19,9	18,8	122,2	1243,2	0,949
0,4	21,2	20,2	112,6	1105,5	1,01
0,5	21,6	21,5	107,9	967,8	1,031
0,6	22,5	22,8	102,1	830,0	1,074
0,7	22,2	24,1	89,8	692,3	1,06
0,8	21,9	25,5	70,4	554,6	1,046
0,9	21,8	26,8	46,0	416,9	1,041
1,0	21,7	28,1	30,4	279,2	1,036

На рисунке 12 приведен график зависимости прогибов от прилагаемых нагрузок.

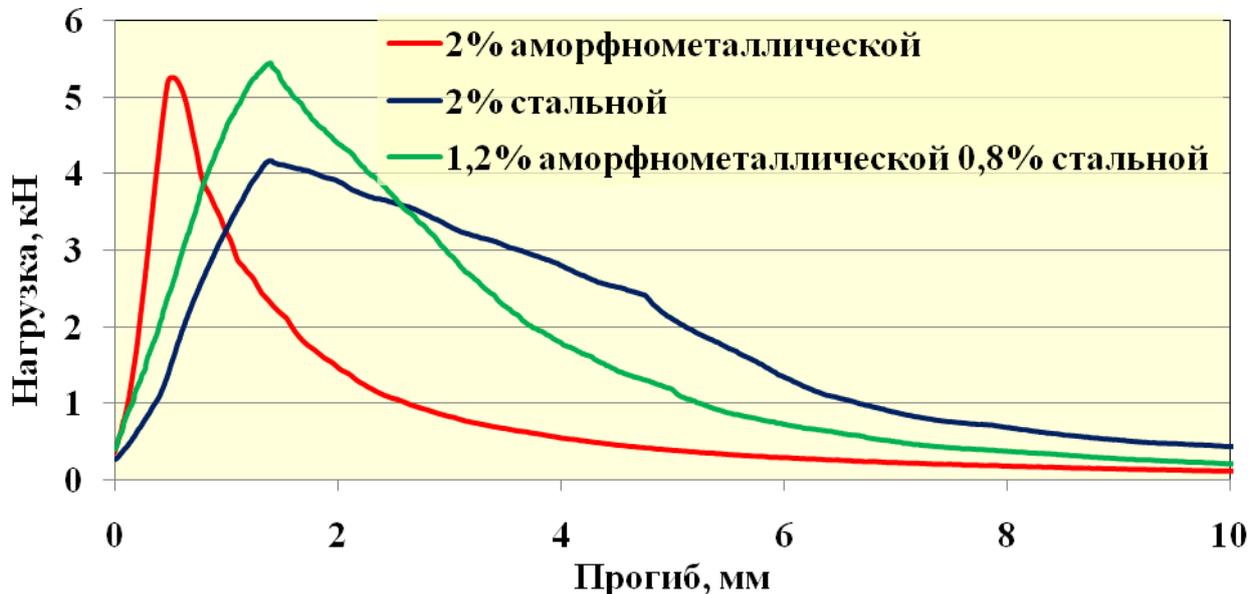


Рисунок 12 – Зависимость прогибов от прилагаемых нагрузок фибробетонных образцов

Применение аморфной металлической фибры позволяет повысить трещиностойкость (коэффициент интенсивности напряжений K_c), который определяет процесс разрушения фибробетона в вершине трещины, в 2,67 раза; применение стальной фибры – в 2,11 раза.

Так как теоретическое значение вязкости разрушения характеризуется энергией, необходимой для вытягивания волокон из матрицы или их разрыва, а экспериментальное – критерием хрупкости, определяемым по ГОСТ 29167, для оценки сходимости указанных характеристик требуется ввести коэффициент пропорциональности, который, как следует из рисунка 13, составляет

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

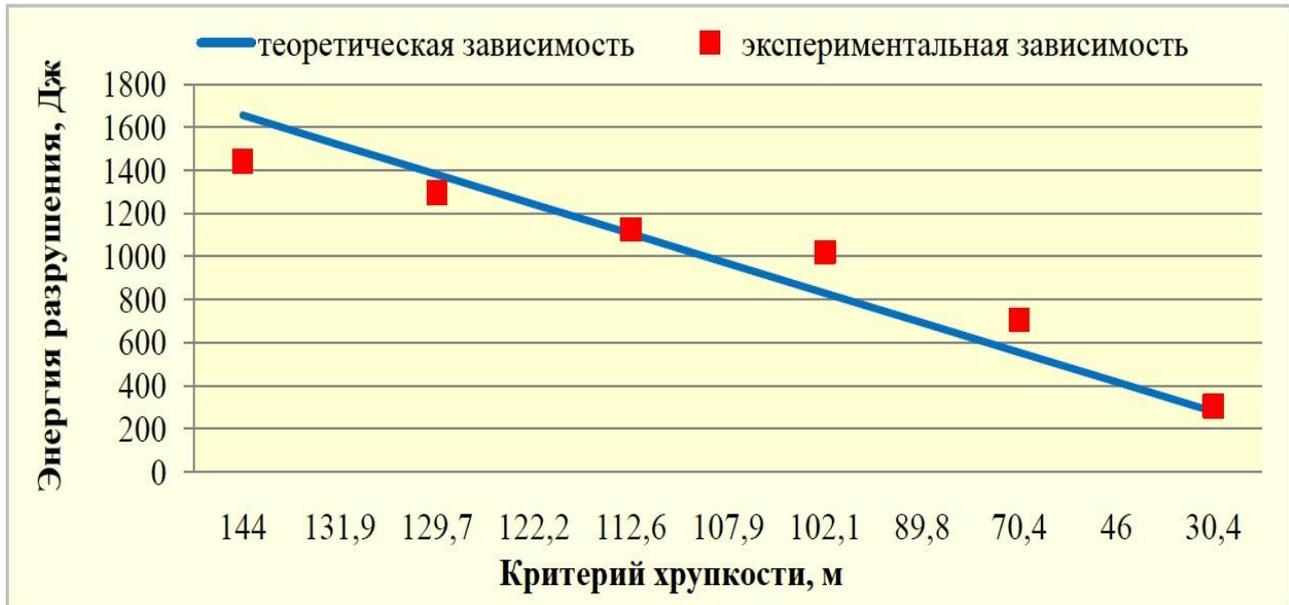


Рисунок 13 – Зависимость между критерием хрупкости и энергией разрушения

Таким образом, использование полидисперсного армирования, волокнами с различными свойствами, позволяет управлять комплексом свойств фибробетона, изменяя требуемые характеристики в ту или иную сторону. 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.

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

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) Выбирается эффективное соотношение между аморфнометаллической и стальной фиброй и из уравнения (2) рассчитывается общая объемная доля волокон, необходимая для обеспечения заданной прочности на растяжение при изгибе полиармированного фибробетона;

3) По уравнению (3) рассчитывается объемная доля волокон, обеспечивающая получение полиармированного фибробетона с заданной вязкостью разрушения;

4) При выполнении дальнейших действий из двух полученных значений μ используется наибольшее;

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

6) Производится корректировка состава фибробетонной смеси.

По данной методике разработаны составы различных видов полиармированных фибробетонов с применением аморфнометаллической фибры, один из которых использовался при производстве опытной партии наземных резервуаров автозаправочных комплексов (рисунок 14).



Рисунок 14 – Наземный фиброжелезобетонный резервуар в г. Сочи

Основные параметры и размеры наземных резервуаров АЗК представлены в таблице 4, расход сырьевых материалов для изготовления фиброжелезобетонных резервуаров приведен в таблице 5.

Таблица 4 – Параметры и размеры наземных резервуаров АЗК

Фиброжелезобетонный резервуар	Внутренний объем резервуара, м ³	Габаритные размеры, мм			Толщина стенки, мм	Объем бетона, м ³
		длина	ширина	высота		
1	14,4	3200	2400	2400	100	4,3
2	15,3	3200	2400	2400	80	3,38

Таблица 5 – Расход материалов для фиброжелезобетонных резервуаров

Наименование материала	Фиброжелезобетонный резервуар №1	Фиброжелезобетонный резервуар №2
Портландцемент, кг/м ³	450	650
Кварцевый песок, кг/м ³	790	1450
Щебень, кг/м ³	1000	-
Арматурная сталь, кг/шт	28,8	28,8
Стальная фибра, кг/м ³	235,5	50,0
Аморфнометаллическая фибра, кг/м ³	-	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 6.

Таблица 6 – Экономическая составляющая фиброжелезобетонных резервуаров

Наименование материала	Ед. изм.	Цена ед-цы, руб.	Фиброжелезобетонный резервуар №1		Фиброжелезобетонный резервуар №2	
			Расход, т/шт.	Цена, руб.	Расход, т/шт.	Цена, руб.
Портландцемент	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
Аморфная металлическая фибра	т	100000	-	-	0,257	25700
ИТОГО				58090		46720

III ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Итогом диссертационного исследования являются следующие результаты:

1. На основе литературного обзора и предварительных экспериментов, посвященным 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 призмная 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 (получен патент на изобретение № 2575658 «Фибробетонная смесь»), обладающих следующими характеристиками: $R_{изг} = 22,5$ МПа; $R_{пр} = 61,3$ МПа; $X^c_F = 102,1$ м; $K_c = 1,074$ МПа·м^{0,5}; $E = 42440$ 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.

Перспективы дальнейшей разработки темы:

– изучение на микро - и макроуровнях процессов формирования структуры и свойств полиармированного фибробетона с использованием сочетания высокомодульной аморфнометаллической фибры и низко модульных полимерных волокон;

– совершенствование технологий, позволяющих увеличить объемное содержание аморфнометаллической фибры, с целью дальнейшего улучшения прочностных и деформативных характеристик композита.

IV ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ:

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. **Пантелеев, Д.А.** Исследование свойств сталефибробетона на основе аморфной металлической фибры/ У.Х. Магдеев, Ю.В. Пухаренко, Д.А. Пантелеев, М.И. Жаворонков// Вестник ВолгГАСУ. Сер.: Стр-во и архитектура 2013. Выпуск 31 (50). 4.2. Строительные науки. 132–135. (0,22/ 0,045 п.л.)
2. **Пантелеев, Д.А.** Оценка эффективности полиармирования фибробетона/ Д.А. Пантелеев// Вестник гражданских инженеров. - 2013. - № 6(41). – с. 102-108. (0,34 п.л./ 0,34 п.л.)
3. **Пантелеев, Д.А.** Деформативные и прочностные характеристики полиармированного фибробетона/ Д.А. Пантелеев// Известия КГАСУ. – 2015. № 3 (33). – с. 133-139. (0,35 п.л./ 0,35 п.л.)

Патенты:

4. Пат. № 2575658 РФ, МПК С04В 28/04, С04В 111/20. Фибробетонная смесь/ Пухаренко Ю.В., **Пантелеев Д.А.**, Жаворонков М.И., Карамышев С.В.; опубл. 20.02.2016, Бюл. № 5.

Публикации в других изданиях:

5. **Пантелеев, Д.А.** Влияние фуллеренола-d на свойства сталефибробетона/ В.А. Скобликов, А.Л. Косюк, Д.А. Пантелеев// Актуальные проблемы современного строительства: 64-я меж. науч.-техн. конференция молодых ученых/ СПб ГАСУ. – в 3 ч. Ч. II. – СПб., 2011. – с. 216–219. (0,11/ 0,05 п.л.)

6. **Пантелеев, Д.А.** Исследование сталефибробетона модифицированного наноструктурами типа «фуллеренол»/ В.А. Скобликов, А.Л. Косюк, Д.А. Пантелеев// Сб. науч. трудов студентов победителей конкурса грантов 2010-2011 г. Вып. 6/ СПбГАСУ. – СПб., 2011. – с. 38–46. (0,29/ 0,15 п.л.)

7. **Пантелеев, Д.А.** Свойства полиармированного фибробетона/ Д.А. Пантелеев, М.П. Кострикин// Актуальные проблемы строительства: Межд. научно-практическая конференция студентов, аспирантов, молодых ученых и докторантов/ СПбГАСУ. – СПб., 2013 – с. 164-166. (0,14/ 0,07 п.л.)

8. **Пантелеев, Д.А.** Исследование свойств полиармированного фибробетона/ Ю.В. Пухаренко, И.У. Аубакирова, Д.А. Пантелеев, М.И. Жаворонков // Актуальные проблемы архитектуры и строительства: материалы 5-ой межд. конференции. 25-28 июня 2013 г./ под общей редакцией Е.Б. Смирнова; СПбГАСУ. – в 2 ч. Ч. 1. – СПб., 2013 – с. 390-395. (0,18/ 0,05 п.л.)

9. **Пантелеев, Д.А.** Эффективность полиармирования фибробетона стальной фиброй разного типоразмера/ Ю.В. Пухаренко, Д.А. Пантелеев, М.И. Жаворонков// Сборник научных трудов SWorld. – Выпуск 1. Том 43. – Одесса: КУПРИЕНКО, 2013 – с. 60-64. (0,19/ 0,06 п.л.)

10. **Пантелеев, Д.А.** Разработка вариантов армирования бетона различными видами фибр и их комбинациями/ Д.А.Пантелеев, М.П. Кострикин// 3-й международный конгресс «Актуальные проблемы современного строительства»/ СПбГАСУ. – СПб., 2014 – с. 206-210. (0,12/ 0,06 п.л.)