

На правах рукописи

Жаворонков Михаил Ильич

**РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК
ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ФИБРОБЕТОНА**

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

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2017

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

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Пухаренко Юрий Владимирович

Официальные оппоненты: **Коротких Дмитрий Николаевич**
доктор технических наук, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», кафедра технологии строительных материалов, изделий и конструкций, профессор кафедры;

Лесовик Руслан Валерьевич
доктор технических наук, профессор, советник РААСН, ФГБОУ ВО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова», кафедра строительного материаловедения, изделий и конструкций, профессор;

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Казанский государственный архитектурно-строительный университет»

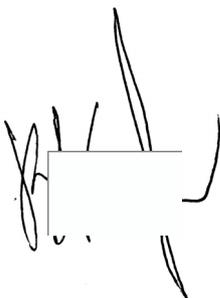
Защита диссертации состоится 19 декабря 2017 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д **212.223.01** при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4, зал заседаний диссертационного совета (аудитория 219).

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

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» и на сайте <http://dis.spbgasu.ru/specialtys/personal/zhavoronkov-mihail-ilich>

Автореферат разослан « _____ » _____ 2017 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук



Конюшков Владимир Викторович

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Современные тенденции развития архитектурно-планировочных и конструктивных решений зданий и сооружений, технологий возведения объектов различного назначения требуют коренного улучшения физико-механических и эксплуатационных характеристик изделий и конструкций при одновременном снижении материальных, трудовых и энергетических затрат. В связи с этим, особую актуальность приобретают теоретическое обоснование и разработка новых эффективных материалов, методов их испытаний, расчета и проектирования конструкций на их основе.

Одним из наиболее перспективных в ряду современных строительных материалов является фибробетон, все более активное использование которого способствует решению указанной проблемы. При этом, объемы практического применения этого композитного материала могут быть значительно увеличены в случае получения более подробной и достоверной информации о его разнообразных, в том числе особых, свойствах и характеристиках.

Многие показатели качества фибробетона можно определить экспериментально, хотя порой для этого требуется сложное и дорогостоящее оборудование, что, впрочем, не исключает ситуаций, когда численные значения некоторых исследуемых характеристик материала могут быть определены некорректно. Причина этого заключается в использовании методов испытаний обычных бетонов, которые не учитывают особенностей структуры композита, характера и степени взаимодействия бетонной матрицы с армирующими волокнами, и поэтому в ряде случаев оказываются неприменимыми к испытаниям фибробетонов. Это особенно заметно при исследовании трещиностойкости, энергетических характеристик, указывающих на высокую вязкость разрушения композита, то есть тех показателей, ради которых в первую очередь и разрабатываются новые составы фиброармированных бетонов. Учитывая это, особую актуальность приобретают вопросы совершенствования существующих, а также создания специальных методик и средств испытаний фибробетона как композиционного материала.

Об актуальности работы также 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 Минстроя РФ (План фундаментальных научных исследований РААСН, 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 2011-2016 г.

Степень разработанности темы исследования. В качестве теоретических основ диссертации использованы результаты исследований в области фибробетонов, полученные российскими и зарубежными учеными Боровских И.В., Волковым И.В., Голубевым В.Ю., Ковалевой А.Ю., Коротких Д.Н., Коротышевским О.В., Курбатовым Л.Г., Леоновичем С.Н., Лесовиком Р.В., Лобановым И.А.,

Пирадовым А.Б, Пухаренко Ю.В, Рабиновичем Ф.Н, Талантовой К.В., Янкеловичем Ф.Ц. и др. Несмотря на значимость выполненных работ, остаются не раскрытыми некоторые вопросы, в том числе связанные с определением характеристик трещиностойкости.

Цель исследования заключается в разработке методов определения силовых, энергетических и других характеристик трещиностойкости фибробетона, наиболее полно отражающих его поведение под нагрузкой.

Задачи исследования:

- критический анализ существующих методов определения характеристик трещиностойкости бетона и оценка возможности их применения при испытании фибробетонов;
- разработка методики определения деформативных свойств и характеристик трещиностойкости фибробетона;
- исследование механизма разрушения фибробетона и разработка теоретических зависимостей для прогнозирования его поведения под нагрузкой;
- исследование свойств фибробетонов, изготовленных с применением различных видов фибр, с использованием разработанной методики;
- определение эффективности применения отдельных видов фибры и фибробетона в производстве строительных конструкций.

Объект исследования – фибробетоны, изготовленные с применением различных видов фибр, в том числе аморфной металлической.

Предмет исследования – методы исследования силовых, энергетических характеристик трещиностойкости и деформативных свойств фибробетона.

Научная новизна исследования заключается в достижении следующих конкретных результатов:

1. Установлены ограничения существующих методов испытания трещиностойкости фибробетона, главным образом состоящие в том, что они не учитывают сложного характера взаимодействия бетонной матрицы с армирующими волокнами, который во многом определяет поведение композита под нагрузкой.

2. Разработана новая методика и устройство определения характеристик трещиностойкости фибробетонов, позволяющие производить испытания образцов с высокой точностью. Так, деформации изгибаемого образца контролируются в 20 раз точнее, чем при испытании стандартным методом, что позволяет однозначно определять точки перехода от упругого деформирования к упруго-пластическому и пластическому и точно устанавливать причины и характер разрушения фибробетона.

3. Предложены теоретические зависимости для построения диаграмм деформирования фибробетонных образцов, позволяющих прогнозировать поведение композита под нагрузкой вплоть до разрушения.

4. С помощью разработанной методики и устройства впервые определены модуль упругости, силовые и энергетические характеристики трещиностойкости фибробетонов, изготовленных с применением новой разновидности фибры – аморфной металлической. При этом показано, что численные значения измеряемых величин отличаются от полученных с применением стандартного метода.

Теоретическая значимость работы заключается в обосновании использования оценки условного критического коэффициента интенсивности напряжений (K^*_c) и условных удельных энергозатрат на упругопластическое деформирование (G^*_c) и статическое разрушение (G^*_i и G^*_f) в качестве критериев поведения фибробетона под нагрузкой и, соответственно, необходимости дальнейшего развития методов расчета и проектирования фибробетонных конструкций с учетом этих характеристик.

Практическая значимость диссертационного исследования заключается в апробировании разработанных методики и устройства с получением новых, более достоверных, данных о прочности и деформативности фибробетонов, изготовленных с использованием различных видов армирующих волокон, в результате чего разработан проект стандарта организации на проведение испытаний по определению характеристик трещиностойкости и модуля упругости фибробетона, а также обоснована технико-экономическая эффективность применения фибры при производстве строительных изделий и конструкций.

Методология и методы исследования. В диссертационном исследовании использовались труды ведущих ученых и специалистов Российской Федерации, а также других стран в области дисперсно армированных бетонов. В процессе исследования применялись методы, установленные требованиями ГОСТ 29167–91 «Методы определения характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении», ГОСТ 24452-80 «Методы определения призмочной прочности модуля упругости и коэффициента Пуассона» и другими нормативными документами.

Положения, выносимые на защиту:

- результаты анализа технической литературы с обоснованием необходимости совершенствования методов определения характеристик трещиностойкости фибробетонов;
- описание методики и устройства, разработанных в рамках проведения диссертационного исследования;
- результаты теоретического исследования поведения фибробетона под нагрузкой в зависимости от вида и характеристик фибр, используемых при его получении;
- результаты экспериментального исследования свойств фибробетонов, проведенного с применением разработанной методики;
- обоснование эффективности применения металлической фибры при производстве строительных изделий и конструкций.

Область исследования соответствует требованиям паспорта научной специальности ВАК: 05.23.05 – Строительные материалы и изделия, а именно п. 8. Развитие системы контроля и оценки качества строительных материалов и изделий.

Степень достоверности и апробация результатов.

Достоверность диссертационной работы обеспечивается применением общепринятых гипотез и допущений, апробированных методик проведения испытаний с использованием метрологически поверенного лабораторного оборудо-

вания, удовлетворительным согласием результатов экспериментальных и теоретических исследований, а также их повторяемостью.

Результаты диссертационного исследования использованы при составлении отчетов по НИР, выполненных в рамках госзадания Минобрнауки РФ и грантов Комитета по науке и высшей школе Правительства Санкт-Петербурга, докладывались на 64-й международной научно-технической конференции молодых ученых, посвященной 300-летию со дня рождения М. В. Ломоносова (Россия, Санкт-Петербург, 2011 год), Международной научно-практической конференции «Современные направления теоретических и прикладных исследований 2013» (Украина, Одесса, 19–30 марта 2013 года), II и III международном конгрессе молодых ученых «Актуальные проблемы современного строительства» (10–12 апреля 2013 г. и 9–11 апреля 2014 г., СПбГАСУ), V международной конференции «Актуальные проблемы архитектуры и строительства» (Россия, Санкт-Петербург, 25–28 июня 2013 года), 69-й межвузовской научно-практической конференции «Актуальные проблемы современного строительства» (6–8 апреля 2016 г., СПбГАСУ); 70-й Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы современного строительства» (5–7 апреля 2017 г., СПбГАСУ).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 8 печатных работ, общим объемом 0,9 п. л., в том числе 3 статьи опубликованы в научных журналах, включенных в перечень, утвержденный ВАК РФ.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация изложена на 199 страницах печатного текста, состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, включающего 114 источников, и 5 приложений на 58 страницах. В работе представлено 48 рисунков, 9 таблиц и 54 формулы.

Во введении сформулирована проблема и обоснована актуальность проводимых исследований, приведена краткая характеристика научной новизны и практической значимости работы.

В первой главе приведена общая характеристика фибробетона и некоторые области его эффективного применения по данным литературных источников. Рассмотрены стандартные методы испытаний свойств бетонов, устройства, разработанные для проведения испытаний по этим методикам и показаны недостатки этих методов.

Во второй главе содержится описание устройства и методики, разработанных специально для испытаний фибробетонов с целью определения их модуля упругости, силовых и энергетических характеристик трещиностойкости, а также перечислены использованные материалы, включая фибру, с характеристикой их особенностей и свойств.

В третьей главе предлагаются подходы и теоретические зависимости для построения диаграмм деформирования фибробетона, позволяющих прогнозировать поведение композита под нагрузкой вплоть до разрушения.

В четвертой главе приводятся результаты экспериментального определения характеристик трещиностойкости фибробетонных образцов, изготовленных с применением различных видов фибр, полученные с использованием разработанной методики, в сравнении с расчетными данными.

В пятой главе представлено обоснование эффективности применения фибробетона при производстве аэродромных плит покрытия с учетом полученных в диссертации результатов.

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

II. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ ДИССЕРТАЦИИ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Установлены ограничения существующих методов испытания трещиностойкости фибробетона, главным образом состоящие в том, что они не учитывают сложного характера взаимодействия бетонной матрицы с армирующими волокнами, который во многом определяет поведение композита под нагрузкой.

В ходе литературного обзора обнаружено множество работ по экспериментальной и расчетной оценке трещиностойкости, в большинстве случаев труды относятся к механике разрушения материалов. Практически во всех опубликованных работах трещиностойкостью называют способность материала сопротивляться образованию и развитию трещин. Численно такая величина определяется критическим коэффициентом интенсивности напряжений, повышение которого на практике означает увеличение нагрузки, вызывающей развитие в материале трещины. Для повышения стойкости бетона к образованию и развитию трещин рекомендуется применять фибровое армирование.

Существует несколько методов экспериментального определения критического коэффициента интенсивности напряжений, которые условно можно разделить на проводимые по равновесной и неравновесной схеме. Такие методы подразумевают наблюдение за поведением образца при его испытании на растяжение при изгибе. В ходе испытания происходит нагружение образца некоторой силой, которая вызывает его деформации. На стадии упругого деформирования в образце накапливается кинетическая энергия, то же происходит в узлах и механизмах нагружающей машины. В определенный момент накопленная кинетическая энергия может спровоцировать спонтанное разрушение образца, которое происходит лавинообразно. В таком случае принято считать, что моменты начала движения трещины и разрушения образца совпадают. Такая схема испытаний называется неравновесной.

На практике обеспечение равновесности достигается возможностью останавливать нагружение на любом этапе деформирования и разрушения образца. Одним из способов достижения равновесности может быть применение испытательных машин со следящей системой и быстродействующей обратной связью, которые имитируют бесконечно большую жесткость агрегатов. Недостатками таких систем является ограничения по степени хрупкости испытываемых материалов, и высокая стоимость такого оборудования.

При проведении диссертационных исследований был использован ГОСТ 29167 «Методы определения характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении», который требует испытывать образцы-балки на растяжение при трехточечном изгибе, при этом в ходе испытаний контролирую-

ется прогиб образца и прилагаемая нагрузка. По полученным данным строят диаграммы деформирования в осях нагрузка – прогиб, после чего производят дополнительные построения и расчетным путем определяют значения энергетических и силовых характеристик трещиностойкости. В указанном ГОСТе для обеспечения равновесности предлагается использовать стальное упругое кольцо, увеличивающее жесткость испытательной машины и воспринимающее кинетическую энергию, высвобождающуюся при разрушении образца.

Такой метод определения критического коэффициента интенсивности напряжений подразумевают контроль и наблюдение за работой материала в основном на стадии упругого деформирования и в процессе развития трещины. Однако фибробетон продолжает работать и после образования магистральной трещины, так как волокна, пересекающие эту трещину и заанкеренные в обеих условных половинах образца, удерживают его от разрушения. При этом прогибы образцов могут достигать 20 мм и более, что делает невозможным применение упругого кольца для обеспечения равновесности, так как максимальные перемещения будут ограничиваться не свойствами материала, а деформациями кольца.

В некоторых работах описывается оборудование, в котором для определения прогибов изгибаемых образцов – балок используются различные устройства, жестко закрепленные в конструкции используемой машины. Получается, что в ходе испытаний контролируется не прогиб образца, а изменение расстояния между неподвижной точкой испытательного механизма и подвижной точкой на образце. Важно заметить, что изменение этого расстояния включает не только прогиб образца, но и всевозможные механические уплотнения в конструкции испытательного оборудования и деформации, вызываемые вдавливанием изгибающих упоров в поверхность образца. В случае, когда прогибы на стадии упругого деформирования имеют большое значение, особую актуальность приобретает разработка точных методов контроля деформаций, исключающих возможное влияние посторонних факторов.

В работах многих ученых и специалистов особое внимание уделяется определению нагрузки, соответствующей началу движения магистральной трещины, и прогибу образца, вызванному действием этой нагрузки, поскольку по их значениям рассчитываются характеристики трещиностойкости. Эти величины при недостаточной точности измерительного оборудования могут быть определены некорректно, поскольку момент окончания действия упругих деформаций и начала движения магистральной трещины может быть неотличим от начального этапа развития пластических деформаций из-за особенностей разрушения фибробетонов.

Таким образом основными недостатками существующих методик испытаний характеристик трещиностойкости применительно к фибробетонам являются узкий диапазон контролируемых деформаций, недостаточно точный контроль прогибов образцов на стадии упругого деформирования, малая информативность получаемых данных, а также высокая стоимость и сложность испытательного оборудования.

2. Разработана новая методика и устройство определения характеристик трещиностойкости фибробетонов, позволяющие производить испытания образцов с высокой точностью. Так, деформации изгибаемого образца контролируются в 20 раз точнее, чем при испытании стандартным методом, что позволяет получать более детальную картину поведения фибробетона при нагружении и точно определять причины и характер его разрушения.

В ходе рассмотрения существующих методов экспериментального определения некоторых свойств фибробетонов и с учетом собственного опыта их проведения были определены направления, следуя которым, создано устройство и, соответственно, методика, позволяющие по результатам испытания одного фибробетонного образца определить его модуль упругости и характеристики трещиностойкости (рис. 1).

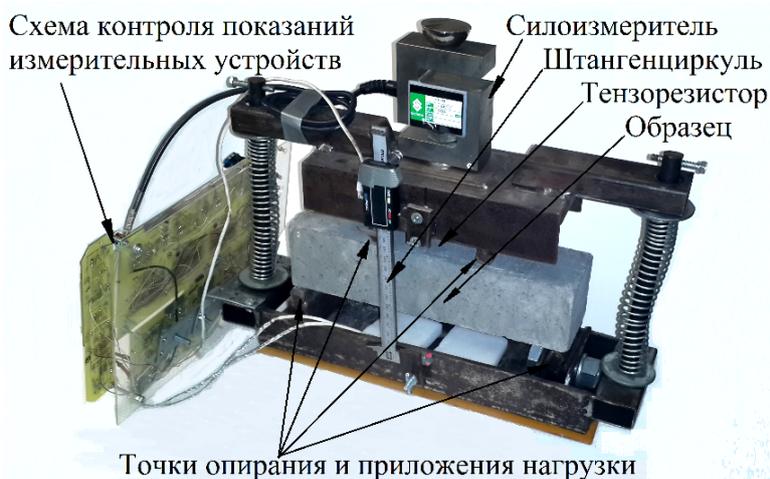


Рисунок 1 – Устройство для построения диаграмм деформирования фибробетонных образцов

В качестве основы разработанной методики использована расчетная схема, установленная ГОСТ 29167. При этом выбрана неравновесная схема испытания из-за простоты ее применения.

В целях минимизации влияния неровности граней образца в процессе испытания принято решение придать точкам опирания и приложения нагрузки некоторую степень свободы в виде возможности угловых перемещений в плоскости, перпендикулярной продольной оси образца. Исключено влияние вдавливания опор в его поверхность. Это достигается тем, что в качестве датчика, контролирующего перемещение образца в упругой стадии деформирования, применен тензорезистор, который приклеивается к одной из его граней. При обработке данных, полученных в ходе испытаний, показания тензорезистора преобразуются в величины прогибов. Следует отметить, что применение такого подхода позволило добиться высокой точности контроля значений прогибов, погрешность измерения которых на стадии упругого деформирования составляет 5×10^{-4} мм, что в 20 раз точнее стандартного метода.

Для контроля перемещений образца на стадии пластического деформирования использован цифровой штангенциркуль, в конструкции которого преду-

смотрено подключение к шине данных. Штангенциркуль имеет точность, составляющую 0,01 мм.

В качестве элемента, контролирующего прилагаемые нагрузки, использован тензометрический датчик силы, который обычно применяют в системах весового дозирования. Такой датчик представляет собой тензорезистор, закрытый в S-образном металлическом корпусе. Прилагаемая в процессе испытания нагрузка вызывает его упругие деформации, которые контролируются по величине электрического напряжения выходного сигнала. В лабораторных гидравлических прессах, имеющих электронную систему контроля и управления, подобный датчик установлен, однако он выполнен в виде мембраны и не является столь чувствительным.

Тензорезистор, силоизмеритель и штангенциркуль с помощью несложного схемотехнического решения опрашиваются попеременно несколько раз в секунду, полученные данные о деформациях и нагрузках отправляются в компьютер и далее с использованием некоторых возможностей таких широко распространенных программ, как например Microsoft Excel, преобразуются в диаграмму зависимости прогибов от прилагаемых нагрузок. Возможности этой программы позволили частично автоматизировать процесс расчета значений модуля упругости и характеристик трещиностойкости испытанных образцов.

На рис. 2 представлена диаграмма деформирования и разрушения фибробетона, построенная с применением описанного устройства в ходе испытания образца, армированного стальной проволочной фиброй при ее расходе, составляющем 2 % по объему.

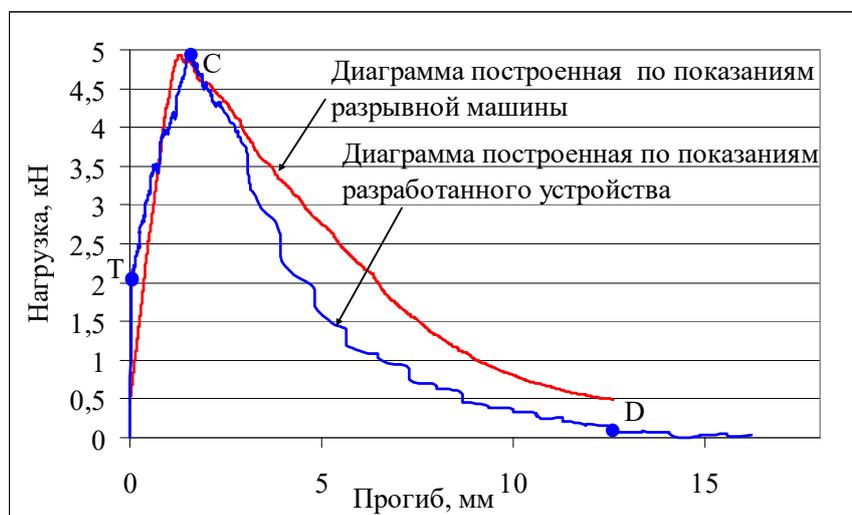


Рисунок 2 – Полные диаграммы зависимости прогибов фибробетонных образцов от прилагаемых нагрузок

Процесс испытания проходил следующим образом: вначале к образцу приклеивался тензорезистор, который подключался к измерительной схеме, после чего образец устанавливался в прибор и далее в пресс, который обеспечивал приложение нагрузки, а система упоров прибора – изгиб образца. На протяжении всего испытания силоизмеритель контролировал прилагаемую нагрузку, показания тензорезистора и штангенциркуля преобразовывались в прогибы соответственно в области упругого и пластического деформирования.

Параллельно с этим проведены испытания и получены диаграммы разрушения аналогичных образцов при помощи лабораторной разрывной машины с применением специальной конструкции, обеспечивающей их изгиб. При этом, в разрывной машине имелась возможность производить непрерывную запись нагрузок и деформаций, для чего использовались специальные датчики, точность которых соответствовала требованиям ГОСТ 29167.

На представленном рисунке обозначены три ключевые точки диаграмм: Т, С и D, которые по ГОСТ 29167 определяют уровень силовых и энергетических характеристик трещиностойкости материала.

Сравнение полученных диаграмм показывает, что они имеют одинаковый характер, однако полностью не совпадают. Особенно заметны различия на участках, соответствующих началу и концу испытания. При этом, в представленном масштабе упругие деформации материала настолько малы по сравнению с деформациями в конце испытания, что соответствующий им участок диаграммы сливается с вертикальной осью. На рис. 3 представлены диаграммы разрушения тех же фибробетонных образцов с использованием полулогарифмической шкалы, что позволяет более детально рассмотреть процесс их деформирования в упругой стадии и сделать соответствующие выводы:

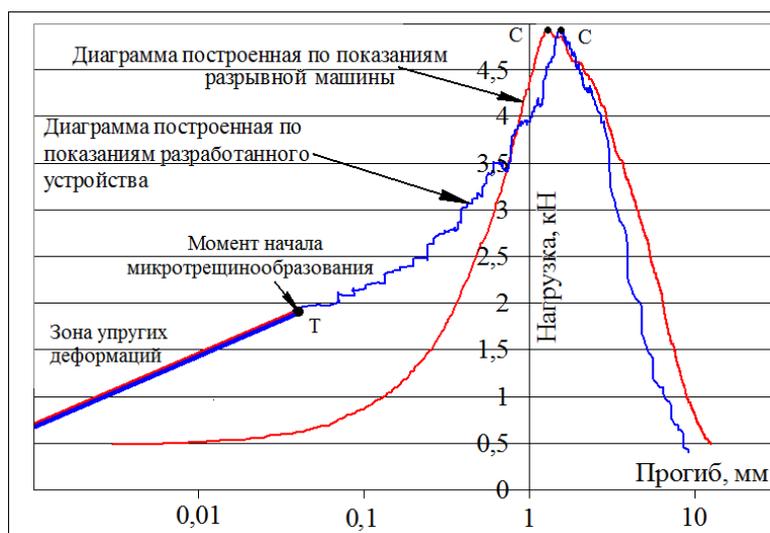


Рисунок 3 – Диаграммы деформирования фибробетонных образцов, построенные с применением различных устройств (шкала оси прогибов логарифмическая)

1. На диаграмме, построенной с помощью разработанного устройства, четко просматривается момент окончания действия упругих деформаций и начало микротрещинообразования – точка Т, тогда как по показаниям разрывной машины однозначно определить положение этой точки затруднительно. Это объясняется, как было отмечено ранее, несовершенством данной, равно как и других подобных методик, применительно к испытанию фибробетонных образцов.

2. Возможность точного контроля прогибов образца на участке ОТ позволяет достоверно определить такую важную характеристику фибробетона как модуль упругости, значения которого до сих пор (при использовании других методов) вызывали сомнение и поэтому принимались условно, несколько выше, чем модуль упругости неармированного бетона.

3. Численные значения модуля упругости бетона и фибробетона могут быть определены с помощью разработанной методики путем построения участка диаграммы зависимости прогибов от прилагаемых нагрузок, описывающего упругие деформации, и проведения соответствующих расчетов (рис. 4).

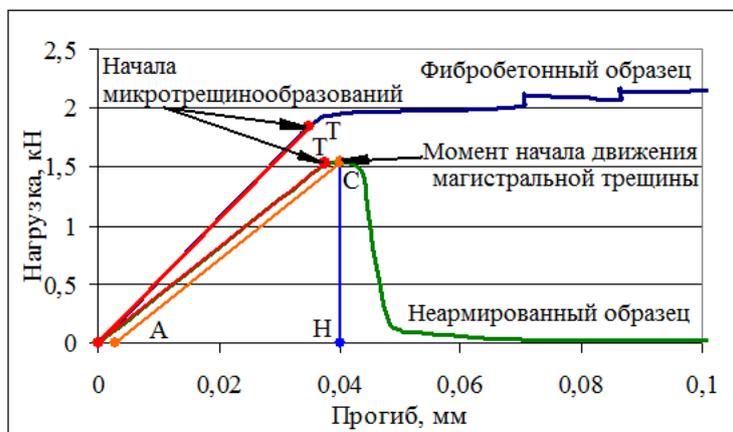


Рисунок 4 – Участки упругих деформаций диаграмм «нагрузка – прогиб» бетона и фибробетона

На диаграммах видно, что линии OT, описывающие упругие деформации различных образцов имеют разные углы наклона к горизонтальной оси, соответственно, при одинаковых нагрузках прогибы неармированного образца и изготовленного с применением проволочной фибры имеют разную величину. Данное положение наглядно демонстрирует разницу в значениях модулей упругости бетона и фибробетона: при испытании неармированного образца модуль упругости составил 30000 МПа, а армированного проволочной фиброй – 37 970 МПа. Дальнейшие исследования показали, что модуль упругости фибробетонных образцов, в зависимости от вида и расхода фибры, составляет 32 000–40 000 МПа.

Таким образом, разработанные методика и устройство в полной мере отвечает необходимым для выполнения поставленных целей и задач требованиям, что подтверждается повторяемостью получаемых результатов и их совпадением со справочными данными.

3. Предложены теоретические зависимости для построения диаграмм деформирования фибробетонных образцов, позволяющих прогнозировать поведение композита под нагрузкой вплоть до разрушения.

Проведенные исследования позволяют представить общий вид диаграммы деформирования фибробетонного образца под нагрузкой, обеспечивающей его изгиб вплоть до разрушения (рис. 5).

На рисунке видно, что диаграмма имеет три характерных участка в пределах соответствующих отрезков OT, TC и CD. При этом, точка T ограничивает зону упругих деформаций, точка C соответствует максимальному значению по оси нагрузок, при котором заканчивается процесс образования и слияния микротрещин и начинается движение магистральной трещины, точка D определяет величину прогиба образца в момент разрушения (конец испытания). Подобные диаграммы могут быть получены экспериментально в ходе испытаний фибробетонных образцов по разработанной в диссертации методике, однако для

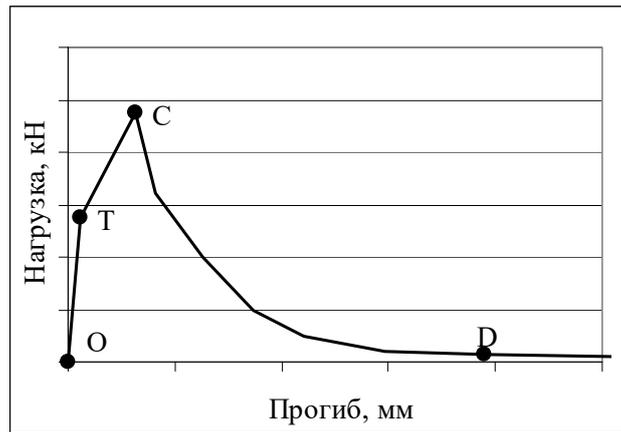


Рисунок 5 – Общий вид диаграммы деформирования фибробетонного образца

формирования таким образом полного представления о влиянии вида, свойств и расхода различных волокон на механизм разрушения и характеристики фибробетонов порой требуется значительное время и средства. Дело в том, что волокна могут быть низко модульные (например, полимерные) и высоко модульные (например, стальные), параметры армирования бетона могут изменяться в широких пределах, а разрушение образцов наступать в результате разрыва волокон или сопровождаться их вытягиванием из матрицы. При этом, одни и те же волокна могут и разрываться при достижении предельных нагрузок и вытягиваться, что зависит от их длины и диаметра, а также прочности сцепления с бетонной матрицей. Таким образом, вид и расход волокон оказывает решающее влияние на координаты ключевых точек получаемых диаграмм, которые предварительно, для облегчения задачи, предлагается определить расчетным путем.

Для этого предполагается, что микротрещинообразование в фибробетоне начинается при одинаковых с неармированным образцом прогибах, которые по имеющейся информации колеблются в интервале 0,03–0,04 мм. В этом случае нагрузку, и соответственно местоположение точки Т, можно определить по формуле (1):

$$P_T = \frac{f_T 48 E_{fb} I}{l_o^3} \quad (1)$$

где P_T – нагрузка, действующая на образец; f_T – прогиб, соответствующий точке Т; I – момент инерции; l_o – база образца (расстояние между опорами), E_{fb} – модуль упругости фибробетона, который можно рассчитать по правилу смесей

$$E_{fb} = \mu_b E_b + \varphi \mu_f E_f \quad (2)$$

где E_b и E_f – модули упругости бетона и фибры; μ_b и μ_f – объемные доли бетона и фибры; φ – экспериментальный комплексный коэффициент.

Нагрузку в точке С можно найти, выражая из известной формулы прочности бетонного образца на растяжение при изгибе

$$P_c = \frac{2bh^2 R_{fb}}{3l_o} \quad (3)$$

где R_{fb} – прочность фибробетона; b и h – ширина и высота образца.

Для расчета прочности фибробетона при использовании высокомодульной фибры, в зависимости от характера разрушения композита, могут применяться формулы (4) или (5):

– если разрушение происходит в результате нарушения сцепления и последующего вытягивания волокон из матрицы

$$R_{fb} = \frac{2\tau l_f \mu_f}{d} + 3,5R_{кз} \mu_f + R_b(1 - 4,5\mu_f) \quad (4)$$

– при разрушении образца в результате разрыва волокон

$$R_{fb} = R_f \mu_f + 3,5R_{к.з.} \mu_f + R_b(1 - 4,5\mu_f), \quad (5)$$

где τ – прочность сцепления волокон с матрицей; l_f – длина фибры; μ_f – объемная доля фибры; d – диаметр фибры; R_b , R_f и $R_{кз}$ – прочность бетона, фибры и контактной зоны на границе раздела «волокно-матрица».

В случае, когда в качестве дисперсной арматуры используются низко-модульные волокна, в приведенных формулах следует исключить слагаемое, определяющее вклад фибры, поскольку он исчерпывается только модификацией структуры цементного камня в пределах контактной зоны:

$$R_{fb} = 3,5R_{кз} \mu_f + R_b(1 - 4,5\mu_f). \quad (6)$$

Для определения координаты, соответствующей точке С по оси прогибов, предлагается формула (7), полученная путем выражения этой величины из уравнения (1) после внесения некоторых изменений, связанных с тем, что в данный момент рассматривается зона пластического деформирования:

$$f_C = \frac{P_C l_o^3}{48E_{fb}^1 I}, \quad (7)$$

где E_{fb}^1 – модуль деформации фибробетона, определяемый по формуле (8)

$$E_{fb}^1 = \nu_f E_{fb}, \quad (8)$$

где E_{fb} – модуль упругости фибробетона, ν_f – коэффициент упругопластичности в момент, предшествующий разрушению фибробетона.

При построении линии CD необходимо учитывать, что при достижении максимальной нагрузки в точке С магистральная трещина в образце проходит через все рабочее сечение, и участие матрицы в дальнейшем процессе практически прекращается. Восприятие нагрузок в нисходящей части диаграммы обеспечивается только прочностью сцепления волокон с матрицей в процессе их вытягивания.

Для построения нисходящего участка диаграммы, в зависимости от длины фибры, следует применить формулы (9) или (10), которые позволяют определить прогиб в точке D:

– при длине фибры меньше критической, когда вытягиваются все волокна

$$f_D = 2 \frac{l_f^2 \tau b h \mu_f}{P_C} + f_C, \quad (9)$$

– при длине фибры больше критической, когда волокна при разрушении композита в основном разрываются, и вытягивается из матрицы лишь некоторая их часть, имеющая в ней неглубокую заделку

$$f_D = 2 \frac{l_c^4 d t b h \mu_f}{12 l_f^2 P_C} + f_C, \quad (10)$$

где l_c – критическая длина фибры

Выше указывалось, нагрузка, соответствующая точке D, равна нулю. Соединив точки C и D, получим под линией CD прямоугольный треугольник, площадь которого равна энергетическим затратам на статическое разрушение композита в результате движения магистральной трещины, то есть вязкости разрушения фибробетона (W_{fb}). Следует заметить, что правая ветвь на экспериментальных диаграммах имеет вид плавно нисходящей линии. Для достижения удовлетворительного согласия между расчетными и экспериментальными диаграммами, можно путем последовательного приближения, в результате логарифмической аппроксимации полученного отрезка CD и увеличения прогиба в точке D, добиться равной с треугольником площади.

При моделировании диаграмм деформирования фибробетонов важно учитывать специфичность некоторых видов волокон. Так, например, примененная в диссертационном исследовании проволочная фибра имеет волновой профиль, который на отрезке TC, частично распрямляется, что было учтено в процессе моделирования соответствующей диаграммы.

Примеры диаграмм, полученных расчетным путем с применением предлагаемых теоретических зависимостей, представлены на рис. 6.

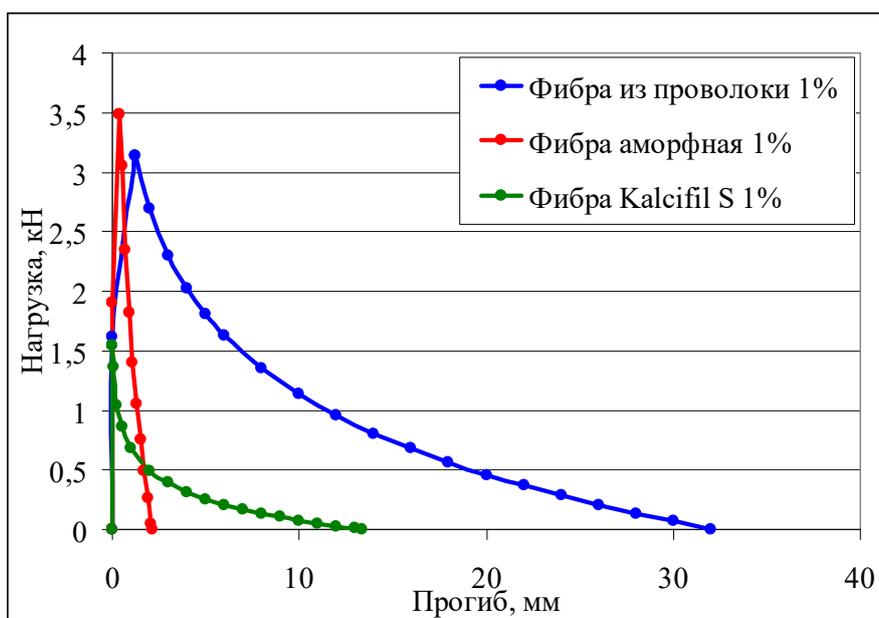


Рисунок 6 – Примеры расчетных диаграммы разрушения фибробетонных образцов

4. С помощью разработанной методики и устройства впервые определены модуль упругости, силовые и энергетические характеристики трещиностойкости фибробетонов, изготовленных с применением новой разновидности фибры – аморфной металлической. При этом показано, что численные значения измеряемых величин отличаются от полученных с применением стандартного метода.

Для изготовления образцов размером $7 \times 7 \times 28$ см применялась мелкозернистая бетонная смесь состава цемент : песок = 1:2 с водоцементным отношением $V/C = 0,37$. Неизменность состава бетонной матрицы позволила оценивать исключительно влияние параметров армирования (вида, характеристик или расхода волокон) на свойства получаемых композитов.

В качестве дисперсной арматуры использовались:

- фибра стальная проволочная круглого сечения волнового профиля диаметром 0,3 мм и длиной 22 мм;
- фибра металлическая аморфная длиной 40 мм;
- фибра синтетическая полипропиленовая «Kalcifil S» длиной 12 мм и диаметром 25 мкм.

Аморфная металлическая фибра является сравнительно новым видом дисперсной арматуры и представляет собой отрезки лент определенной длины толщиной 20–30 мкм и шириной 2–3 мм. Такая фибра получается путем сверхбыстрого охлаждения расплава, которой, отверждаясь на подложке, не успевает сформировать упорядоченную кристаллическую решетку. Приобретенная таким образом структура обуславливает особые физические и механические свойства аморфнометаллических волокон, введение которых в состав бетона, так или иначе влияет на свойства получаемого композита и изменяет характер его деформирования и разрушения под нагрузкой.

На рис. 7 и 8 представлены диаграммы деформирования фибробетонов, полученные по разработанной методике в ходе испытаний образцов, изготовленных с применением различных видов фибр. Объемное насыщение матрицы волокнами составляло 1 % по объему.

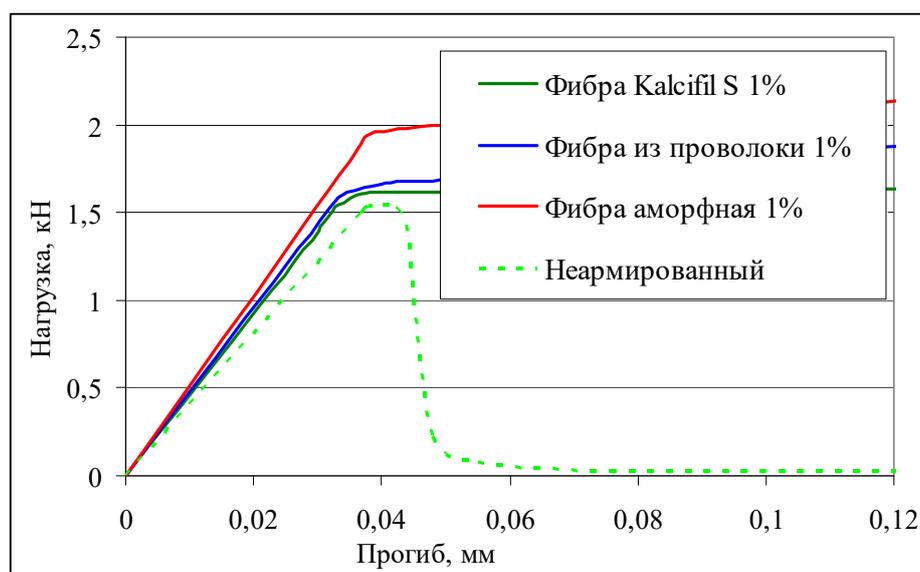


Рисунок 7 – Зона упругих деформаций диаграмм, полученных при испытании образцов с различными видами фибры

Представленные диаграммы наглядно демонстрируют влияние вида волокон на механизм работы и разрушения фибробетонных образцов.

Так, на стадии упругого деформирования (см. рис. 7) прогибы образцов при равных нагрузках оказываются разными, что свидетельствует о влиянии вида и характеристик фибр на модуль упругости получаемого композита. Это объясняется присутствием на макроструктурном уровне включений в виде волокон, хаотично ориентированных по объему бетона и в той или иной степени (в зависимости от собственного модуля упругости) ограничивающих его деформации. Кроме того, на весьма протяженной поверхности волокон формируется слой цементного камня (контактная зона) с более высокой плотностью и прочностью, что также ограничивает деформации материала и повышает его жесткость. Таким образом, модификация микроструктуры цементного камня оказывает определенное влияние на модуль упругости и другие свойства фибробетона, причем тем значительнее, чем больше суммарная поверхность волокон и их объемная доля в составе композита.

На рис. 8 видно, что нагрузка, соответствующая точке С, по которой определяется условный критический коэффициент интенсивности напряжений, для разных образцов различна. Наибольшее влияние на условный критический коэффициент интенсивности напряжений оказывает аморфная металлическая фибра, которая за счет своей геометрии и развитой боковой поверхности имеет значительную анкеровку в бетоне, и существенно модифицирует его структуру, имеет более высокий модуль упругости, чем бетонная матрица и обладает высокой прочностью.

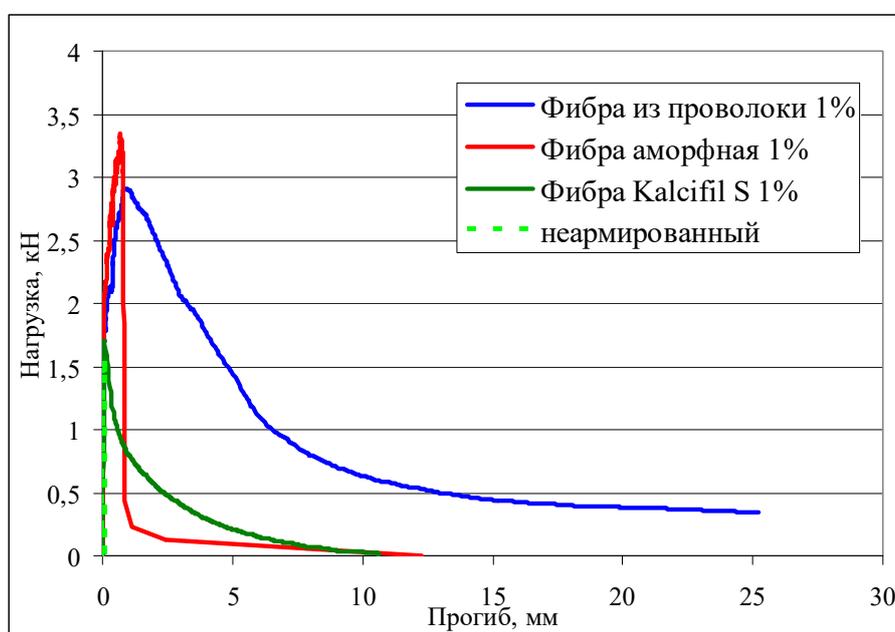


Рисунок 8 – Диаграммы деформирования и разрушения, полученные при испытании образцов с различными видами фибры

То же можно сказать и о фибробетоне, армированном стальной проволочной фиброй, однако указанные эффекты проявляются в меньшей степени, поскольку суммарная поверхность таких волокон существенно меньше, чем

у аморфнометаллических. Образование магистральной трещины в образце, изготовленном с применением синтетической фибры, происходит при нагрузке, близкой к неармированному образцу. Это объясняется тем, что синтетические волокна имеют меньший, чем у матрицы, модуль упругости, и, таким образом, на стадии упругого деформирования работает преимущественно высококомодульная бетонная составляющая. Согласно приведенным данным, низкокомодульная фибра все-таки позволяет увеличить модуль упругости фибробетона за счет модификации структуры цементного камня вблизи поверхности волокон.

Значения модуля упругости и условного критического коэффициента интенсивности напряжений, наряду с другими характеристиками трещиностойкости фибробетонов, представлены в таблице 1. При этом, кроме показателей,

Таблица 1 – Численные значения характеристик трещиностойкости и модуля упругости, полученные в процессе испытаний фибробетонных образцов, армированных различными видами фибры

Характеристика трещиностойкости		Неармированный образец, эксп.	Вид фибры / объемное содержание					
			Kalcifil S / 0,5 %	Kalcifil S / 1 %	Аморфная / 1 %	Аморфная / 1,5 %	Проволоочная / 1 %	Проволоочная / 2 %
G_c^* – условные удельные энергозатраты на упругопластическое деформирование до образования магистральной трещины, Дж/м ²	Эксп.	1,58	2,7	6,2	526	593	588	1571
	Расч.		0,28	0,38	310	509	926	1191
G_i^* – условные удельные энергозатраты на статическое разрушение до момента начала движения магистральной трещины, Дж/м ²	Эксп.	10	11,12	12,91	537	605	597	1581
	Расч.		8,55	8,87	321	521	935	1278
G_f^* – условные удельные эффективные энергозатраты на статическое разрушение, Дж/м ²	Эксп.	14	604	1077	706	913	6425	13236
	Расч.		666	1186	852	1200	8391	17412
K_c^* – условный критический коэффициент интенсивности напряжений, МПа·м ^{0,5}	Эксп.	0,34	0,37	0,38	0,74	0,93	0,84	1,09
	Расч.		0,3	0,39	0,77	0,86	0,69	1,05
Прочность на растяжение при изгибе, МПа	Эксп.	4,34	4,7	4,81	9,38	10,5	8,21	13,87
	Расч.		5,03	3,85	9,79	10,98	8,85	13,38
Модуль упругости, МПа*10 ³	Эксп.	30	32	34	38	40	37	39
	Расч.		32	34	37	40	32	34

определяемых по ГОСТ 29167, предлагается ввести еще одну величину, учитывающую условные удельные энергозатраты, начиная с момента перехода системы в упругопластическое состояние до образования магистральной трещины (G_c^*). Судя по полученным численным значениям, такая характеристика позволяет детализировать оценку эффективности применения того или иного вида фибры по результатам испытаний или расчета.

В целом можно отметить хорошую сходимость полученных расчетных и экспериментальных данных, подтверждающую справедливость примененных подходов и допущений.

Из приведенных данных следует, что введение стальной проволочной фибры приводит к увеличению модуля упругости композита, повышению критического коэффициента интенсивности напряжений и энергозатрат на образование и раскрытие трещин. Уровень улучшения указанных свойств фибробетона определяется собственными характеристиками используемых волокон и их количеством в бетоне.

Синтетические волокна практически не оказывают влияния на прочностные и деформативные свойства бетона, их воздействие ограничивается повышением вязкости разрушения, о чем свидетельствует заметное увеличение значения G_f^* .

Аморфная металлическая фибра принципиально отличается от перечисленных тем, что почти не оказывает влияния на процесс пластического деформирования, поскольку после образования трещин происходит разрыв большей части волокон. Однако, такая фибра значительно увеличивает модуль упругости, критический коэффициент интенсивности напряжений и повышает условные энергозатраты на деформирование и разрушение до начала движения магистральной трещины (G_i^*).

Важно подчеркнуть, что значения энергозатрат и коэффициента интенсивности напряжений вычисляются с учетом координат точек Т и С на диаграммах разрушения фибробетонных образцов, точность определения которых стандартными методами вызывает серьезные затруднения.

Таким образом, проведенные исследования позволили разработать методику и устройство для получения новых, более достоверных, данных о прочности и деформативности фибробетонных образцов, изготовленных с использованием различных видов армирующих волокон, и обосновать технико-экономическую эффективность их применения при производстве строительных изделий и конструкций. Так, в качестве перспективной области применения фибробетона с высокомодульной металлической фиброй с учетом данных, полученных в результате диссертационного исследования, предлагается рассмотреть производство железобетонных плит сборных аэродромных покрытий ПАГ-20. В результате расчета по деформациям, проведенного в соответствии с положениями СП 52-102 и СП 52-104, установлено, что предлагаемый вариант дисперсного армирования в составе фиброжелезобетона при расходе стальной проволочной или аморфнометаллической фибры, составляющем 0,8–1 % об, позволяет получить эквивалентное по физико-механическим характеристикам изделие, в котором толщина может быть уменьшена с 200 мм до 156–153 мм.

С учетом результатов диссертационных исследований разработан проект стандарта организации на проведение испытаний по определению характеристик трещиностойкости и модуля упругости фибробетона с применением разработанной методики.

III. ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

По итогам работы над диссертацией получены следующие результаты:

1. На основе литературного обзора и предварительных экспериментов установлены недостатки существующих методов испытаний материалов применительно к фибробетонам, показана необходимость их дальнейшего развития и разработки соответствующих устройств для более точной и объективной оценки характеристик трещиностойкости подобных композиционных материалов.

2. Разработана новая методика, создана инструментальная и расчетная база для ее использования, которые позволяют проводить испытания образцов с высокой точностью, определять ключевые точки диаграмм их деформирования под нагрузкой вплоть до полного разрушения и по получаемым данным однозначно судить о причинах и характере разрушения фибробетона, а также с высокой степенью достоверности определять такую важную его характеристику как модуль упругости.

3. Предложены теоретические зависимости для построения диаграмм деформирования фибробетонных образцов, позволяющие прогнозировать поведение композита под нагрузкой вплоть до разрушения. При этом, следует отметить хорошую сходимость полученных расчетных и экспериментальных данных, подтверждающую справедливость примененных подходов и допущений.

4. С помощью разработанной методики и устройства построены диаграммы зависимостей прогибов фибробетонных образцов от прилагаемых нагрузок /в процессе их испытаний на растяжение при изгибе, и впервые определены модуль упругости, силовые и энергетические характеристики трещиностойкости фибробетонов, изготовленных с применением новой разновидности фибры – аморфной металлической.

5. Обосновано использование условного критического коэффициента интенсивности напряжений (K^*_c) и условных удельных энергозатрат на упруго-пластическое деформирование (G^*_c) и статическое разрушение (G^*_i и G^*_f) в качестве критериев оценки поведения фибробетона под нагрузкой и, соответственно, необходимость дальнейшего развития методов расчета и проектирования фибробетонных конструкций с учетом этих характеристик.

6. На основе анализа и сравнения диаграмм и численных значений характеристик трещиностойкости, полученных в ходе испытаний фибробетонных образцов, установлена целесообразность и обоснована технико-экономическая эффективность применения металлической фибры при производстве строительных изделий и конструкций на примере аэродромной плиты ПАГ-20. Разработан проект стандарта организации на проведение испытаний по определению характеристик трещиностойкости и модуля упругости фибробетона с применением разработанной методики.

Перспективы дальнейшей разработки темы

Планируется дальнейшее совершенствование методики испытаний характеристик трещиностойкости, в том числе с использованием равновесной схемы испытаний, и более детальное исследование свойств фибробетона, изготовленного с применением различных видов фибр.

IV. ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. **Жаворонков, М.И.** Определение вклада фибры в формирование прочности сталефибробетона [Текст] / М.И. Жаворонков, Ю.В. Пухаренко, Д.А. Пантелеев // Вестник гражданских инженеров. – 2017. – № 1(60). – С. 172-176. (0,1/0,033 п. л.)

2. **Жаворонков, М.И.** Методика определения энергетических и силовых характеристик разрушения фибробетона [Текст] / М.И. Жаворонков // Вестник гражданских инженеров. – 2014. – № 6(47). – С. 155-160. (0,16 п. л.)

3. **Жаворонков, М.И.** Определение характеристик разрушения и модуля упругости фибробетона [Текст] / М.И. Жаворонков // Известия КГАСУ. – 2015. – № 3(33). – С. 114-120. (0,32 п. л.)

Публикации в других изданиях:

4. Жаворонков, М.И. Оценка эффективности армирования аморфной металлической фиброй [Текст] / А. В. Туровинин, А. С. Доржу, М. И. Жаворонков // В 3 ч. Ч. II. – Актуальные проблемы современного строительства: 64-я международная научно-техническая конференция молодых ученых. СПбГАСУ. СПб., 2011. – С.228-230. (0,075/ 0,025 п. л.)

5. Жаворонков, М.И. Свойства сталефибробетона, армированного аморфнометаллической фиброй [Текст] / М. И. Жаворонков // Научно-исследовательская работа студентов, аспирантов и молодых ученых СПбГАСУ. СПбГАСУ. СПб., 2012. – С.120-129 (0,24 п. л.)

6. Жаворонков, М.И. Исследование свойств полиармированного фибробетона [Текст] / Ю. В. Пухаренко, И. У. Аубакирова, Д. А. Пантелеев, М. И. Жаворонков // Актуальные проблемы архитектуры и строительства: материалы 5-й Международной конференции. 25-28 июня 2013 г. / под общ. редакцией Е. Б. Смирнова; Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет. – В 2 ч. Ч. 1. – СПб., 2013 – С. 390-395. (0,18/ 0,05 п. л.)

7. Жаворонков, М.И. Эффективность полиармирования фибробетона стальной фиброй разного типоразмера [Текст] / Ю. В. Пухаренко, Д. А. Пантелеев, М. И. Жаворонков // Сборник научных трудов SWorld. Материалы международной научно-практической конференции “Современные направления теоретических и прикладных исследований 2013”. – Выпуск 1. Том 43. – Одесса: КУПРИЕНКО, 2013 – С. 60-64. (0,19/ 0,06 п. л.)

8. Жаворонков, М.И. Особенности использования аморфнометаллической фибры в железобетонных конструкциях [Текст] / Ю.В. Пухаренко, В.И. Морозов, У.Х. Магдеев, М.И. Жаворонков // Фундаментальные, поисковые и прикладные исследования РААСН по научному обеспечению развития архитектуры, градостроительства и строительной отрасли Российской Федерации в 2015 году: Сб. науч. тр. РААСН. – М.: Издательство АСВ, 2016. – С. 565–570. (0,075/ 0,025 п. л.)

Компьютерная верстка И. А. Яблоковой

Подписано к печати 12.10.2017. Формат 60×84 1/16. Бум. офсетная.

Усл. печ. л. 1,4. Тираж 120 экз. Заказ 100.

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

Отпечатано на ризографе. 190005, Санкт-Петербург, ул. Егорова, д. 5/8, лит. А.