

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

На правах рукописи

Жаворонков Михаил Ильич

**РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК
ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ФИБРОБЕТОНА**

Специальность 05.23.05 – Строительные материалы и изделия

Диссертация
на соискание ученой степени кандидата технических наук

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

Санкт-Петербург – 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1 СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ФИБРОБЕТОНАХ И МЕТОДАХ ИХ ИСПЫТАНИЯ.....	12
1.1 Общие сведения о фибробетоне и его применении	12
1.1.1 Краткая историческая справка о развитии фибробетонов.....	12
1.1.2 Области эффективного использования фибробетона	15
1.2 Влияние параметров дисперсного армирования на свойства фибробетона	18
1.2.1 Влияние дисперсного армирования на деформативные свойства фибробетона.....	19
1.2.2 Влияние дисперсного армирования на трещиностойкость фибробетона.....	21
1.3 Методы определения деформативных свойств и показателей трещиностойкости фибробетона.....	25
1.3.1 Методы определения модуля упругости фибробетона	25
1.3.2 Методы определения характеристик трещиностойкости фибробетона.....	29
Выводы по первой главе.....	37
2 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФОРМАТИВНЫХ СВОЙСТВ И ХАРАКТЕРИСТИК ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ФИБРОБЕТОНА.....	39
2.1 Исходные компоненты и составы смесей для изготовления экспериментальных образцов.....	39
2.1.1 Особенности получения и свойства аморфных металлов	40
2.1.2 Характеристика исходных компонентов и методики изготовления лабораторных образцов.....	45
2.2 Разработка методики испытания трещиностойкости фибробетонных образцов.....	48

2.2.1 Разработка устройства для испытания лабораторных образцов.....	48
2.2.2 Особенности определения модуля упругости фибробетона по экспериментальным данным	53
2.2.3 Методика определения коэффициента интенсивности напряжений и энергетических характеристик трещиностойкости по экспериментальным данным.....	56
Выводы по второй главе.....	59
3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ РАСЧЕТНЫХ ДИАГРАММ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ФИБРОБЕТОННЫХ ОБРАЗЦОВ ПОД НАГРУЗКОЙ.....	
3.1 Вывод теоретических зависимостей для построения диаграмм деформирования фибробетонных образцов.....	62
3.2 Примеры построения диаграмм деформирования и разрушения образцов, изготовленных с применением различной фибры	69
3.2.1 Построение расчетных диаграмм деформирования образцов, армированных стальной проволочной фиброй.....	69
3.2.2 Построение расчетных диаграмм деформирования образцов, армированных синтетической фиброй.....	73
3.2.3 Построение расчетных диаграмм деформирования образцов, армированных аморфной металлической фиброй.....	74
Выводы по третьей главе.....	83
4 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК ФИБРОБЕТОНОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗРАБОТАННОЙ МЕТОДИКИ.....	
4.1 Характеристики фибробетона, изготовленного с применением проволочной фибры.....	84
4.2 Характеристики фибробетона, изготовленного с применением синтетической фибры фибры	91
4.3 Характеристики фибробетона, изготовленного с применением аморфной металлической фибры.....	94

4.4 Сравнение полученных расчетных и экспериментальных данных.....	98
Выводы по четвертой главе.....	102
5 ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ДИСПЕРСНОГО АРМИРОВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ И КОНСТРУКЦИЙ С УЧЕТОМ ПОЛУЧЕННЫХ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ.....	104
5.1 Эффективность применения фибры в конструкции аэродромных покрытий.....	104
5.1.1 Предпосылки применения дисперсного армирования в конструкции аэродромных плит.....	105
5.1.2 Перспективы применения аморфнометаллической фибры для повышения прочности и долговечности аэродромных покрытий.....	109
5.2 Техничко-экономическая оценка использования фибры при производстве аэродромных плит.....	115
Выводы по пятой главе.....	126
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	128
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	130
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	142
<i>Приложение А. Описание конструкции прибора.....</i>	<i>142</i>
<i>Приложение Б. Обработка показаний.....</i>	<i>171</i>
<i>Приложение В. Проект стандарта организации.....</i>	<i>179</i>
<i>Приложение Г. Грамота.....</i>	<i>195</i>
<i>Приложение Д. Дипломы.....</i>	<i>196</i>

ВВЕДЕНИЕ

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 2011-2016г.

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., Коротышевым 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. Не смотря 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 упругопластическому 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 оборудования, 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-ой 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-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, Санкт-Петербург, 25-28 июня 2013 года), 69-ой межвузовской научно-практической конференции «Актуальные проблемы современного строительства» (6-8 апреля 2016г., СПбГАСУ); 70-й Всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы современного строительства» (5-7 апреля 2017г., СПбГАСУ).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 8 печатных работ, общим объемом 0,9 п.л., в т. ч. 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 так же 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.

1 СОВРЕМЕННЫЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ О ФИБРОБЕТОНАХ И МЕТОДАХ ИХ ИСПЫТАНИЯ.

1.1 Общие сведения о фибробетоне и его применении

1.1.1 Краткая историческая справка о развитии фибробетонов

Фибробетоном называют композиционный строительный материал, состоящий из цементной матрицы (плотной или пористой, с наполнителем или без него) с равномерным или заданным распределением по ее объему дискретных волокон (фибр) различной природы, размеров и формы.

Развитие теории, практики и технологии фибрового армирования происходило постепенно и рассматривалось в качестве альтернативы или дополнения к традиционному стержневому. Первые работы в России, посвященные получению и изучению свойств фибробетона, изготовленного с применением стальных волокон, ассоциируют с именем В.П. Некрасова[76], который в начале прошлого века провел исследования с использованием в качестве фибровой арматуры отрезков проволоки («железного волоса») и подробно изложил их результаты в своих публикациях. Тогда же был получен и первый в мире патент на фибробетонную конструкцию: Гарри Портер в 1910 году заявил о том, что при введении проволоки и гвоздей, механические характеристики бетона возрастают примерно в 8 раз [5].

Исследование фибробетона на современном уровне было начато в середине прошлого века и явилось свидетельством заинтересованности специалистов во всем мире в улучшении свойств традиционного бетона [25].

В 70–е годы XX века эти исследования приняли систематический характер с акцентом на практическое внедрение этого материала. При этом, большинство работ было связано с изучением именно сталефибробетона [8].

В настоящее время продвижение дисперсно-армированных бетонов в практику строительства связано в первую очередь с решением вопросов

получения многообразной фибровой арматуры необходимого качества, освоением технологических процессов на действующих предприятиях строительного комплекса, а также внедрением данного материала непосредственно на строительных площадках.

В России разработки по созданию дисперсно - армированных бетонов и конструкций с их применением основываются в значительной мере на результатах фундаментальных исследований, относящихся к технологии изготовления, теории, расчету и проектированию железобетонных конструкций, в развитие которых большой вклад внесли известные ученые Ю.М. Баженов, В.Н. Байков, О.Я. Берг, В.М. Бондаренко, А.А. Гвоздев, Ю.В. Зайцев, Б.А. Крылов, К.В. Михайлов, А.В. Носарев, В.Б. Ратинов, Б.Г. Скрамтаев, М.М. Холмянский, А.Е. Шейкин и др.

Работы, относящиеся к исследованиям стеклоармированных композиций на основе цементных вяжущих, получили отражение в трудах К.Л. Бирюковича, П.П. Будникова, М.Т. Дулебы, М.А. Краснова, Т.Г. Маркаряна, Р.М. Мхикяна, А.А. Пашенко, Ф.Н.Рабиновича, В.М. Рудого, В.П. Сербина и др.

Большая заслуга в исследовании сталефибробетонных конструкций принадлежит Г.И. Бердичевскому, И.В. Волкову, Ф.А. Гофштейну, К.М. Королеву, О.В. Коротышевскому, Л.Г. Курбатову, И.А. Лобанову, В.И.Морозову, В.П. Романову, К.В. Талантовой, Г.К. Хайдукову, Г.А. Шикуну, В.В. Шугаеву, Ф.Ц. Янкеловичу и др.

При анализе результатов проведенных экспериментов и исследований можно сделать вывод о том, что дисперсное армирование обеспечивает повышение прочности сжатых, растянутых и изгибаемых элементов конструкций, увеличивает их трещиностойкость, ударную вязкость, термическое сопротивление и другие физико - механические показатели. При этом, как строительный материал, фибробетон дает так называемый отложенный экономический эффект за счет более высокой долговечности и эксплуатационной надежности, увеличения межремонтного ресурса и повышения безопасности сооружений.

Главным препятствием на пути массового индустриального применения сталефибробетона в строительстве до последнего времени являлось отсутствие норм и правил проектирования конструкций из него. На основе результатов исследований, опытного производства и применения сталефибробетонных конструкций в 1987 г. был разработан первый нормативный документ в этой области - «Рекомендации по проектированию и изготовлению сталефибробетонных конструкций» (Москва, НИИЖБ, 1987), ориентированный на применение определенных видов стальной фибры, которые в то время производились в опытном порядке.

Большой вклад в развитие нормативной базы и обеспечение массового внедрения сталефибробетона внесли производственные объединения ЗАО «Курганстальмост» и НПО «Магфибрастрой», впервые организовавшие производство стальной фибры в промышленно значимых объемах. В конце 90-х гг. XX в. - начале 2000-х гг. производственными объединениями ЗАО «Курганстальмост», НПО «Магфибрастрой» и ЗАО «Северсталь - Метиз» организовано устойчивое промышленное производство стальной фибры трех различных видов: фрезерованной из сляба по ТУ0991-125-46854090- 2001; резаной из тонкого стального листа по ТУ 0991-123-53832025-2001 и рубленой из проволоки по ТУ 1211-205-46854090-2005. НИИЖБ были разработаны технические условия на эти виды фибры и сертифицировано их производство, разработаны руководящие технические материалы (РТМ) по проектированию и применению сталефибробетонных конструкций соответственно для указанных видов фибры. Это позволило организовать опытно - промышленное производство и применение сталефибробетона с упорядочением проектирования и технологии производства.

Серьезным шагом в развитии отечественной науки и практики стало включение в новый СНиП 52-01-2003 «Бетонные и железобетонные конструкции» фибробетона, что окончательно узаконило его как разновидность железобетона с дисперсным армированием. Приложением к этому документу стала разработка «Свода правил по проектированию железобетонных дисперсно –

армированных конструкций», в том числе сталефибробетонных. В дальнейшем НИИЖБ выпустил свод правил СП–52–104–2006 «Сталефибробетонные конструкции», содержание и построение которого аналогично СП 52–101–2003 и СП 52–102–2004, но при этом учитывают особенности свойств и условия работы сталефибробетона в конструкциях.

1.1.2 Области эффективного использования фибробетона

В настоящее время существует большое количество волокон с различными характеристиками, которые при использовании в качестве фибры можно классифицировать в зависимости от модуля упругости и, таким образом, выделить две категории: низкокомодульные волокна, имеющие меньший чем у обычного бетона модуль упругости, и высококомодульные волокна – с более высоким по сравнению с бетоном модулем упругости. Введение в состав бетона низкокомодульных или высококомодульных волокон по-разному влияет на изменение его структуры и свойств.

Анализ технической литературы показывает, что сталефибробетон целесообразно применять при производстве конструкций и изделий, в которых наиболее эффективно могут быть использованы его преимущества: повышенные трещиностойкость, ударная прочность и вязкость разрушения, сопротивление истираемости и кавитации, непроницаемость и морозостойкость, пониженные усадка и ползучесть. При этом возможно снижение трудозатрат на арматурные работы при изготовлении конструкций сложной формы за счет сокращения распределительной и конструктивной арматуры, в результате чего повышается степень механизации и автоматизации производства. В результате введения фибры увеличивается связность смеси, в результате чего повышается эффективность применения таких технологий как торкретирование, роликовое прессование, погиб свежееотформованных плоских листов.

Перспективные области применения фибробетонов определены достаточно подробно и рассмотрены во множестве работ отечественных и зарубежных авторов[53, 56, 35, 90, 91, 95, 104, 105].

В ходе литературного обзора были обнаружены публикации, анализ которых позволяет выделить следующие группы изделий и конструкций, в которых применение фибрового армирования наиболее целесообразно[96, 44, 81, 71, 109, 112, 114]:

1. Тонкостенные конструкции и трубчатые элементы.

Существует опыт применения фибрового армирования при производстве тонкостенных элементов несъемной опалубки толщиной до 30 мм, а также крупноразмерных листов толщиной 8 мм для вентилируемых фасадов, при изготовлении лотков для возведения коммуникационных каналов различного назначения, складчатых покрытий и других подобных элементов зданий и сооружений. Применение фибры в таких изделиях позволило полностью отказаться от проведения арматурных работ, что значительно удешевило производство. При этом получила распространение новая технология - погип свежееотформованной плоской заготовки - позволившая значительно снизить металлоемкость производства и себестоимость изделий за счет сокращения парка и упрощения конструкции форм. Применение фибробетона в производстве колец колодцев по технологии немедленной распалубки позволило отказаться от арматурных каркасов, что значительно упростило и удешевило их производство;

2. Изгибаемые конструкции.

В данном случае фибра выполняет конструктивно – технологическую роль, заменяя различного рода распределительную арматуру, обеспечивая необходимые технологические свойства бетонной смеси и заданные прочностные характеристики бетона в процессе транспортирования и выполнения монтажных операций. Известен опыт применения сталефибробетона при производстве ребристых плит покрытий, в которых рабочая, в том числе напрягаемая, арматура в продольных в поперечных ребрах остается без изменений в соответствии с типовым проектом, а вся остальная заменяется фибровым армированием.

Проведенные расчеты и испытания позволили уменьшить толщину полки плиты до 20 мм, в результате чего ее масса сократилась на 17% при сохранении прочности, трещиностойкости и жесткости в соответствии с требованиями норм [42];

3. Ограждающие конструкции и теплоизоляционные изделия.

Как правило, при изготовлении изделий этой категории для армирования применяют низко модульные синтетические волокна, а матрицей служит ячеистый бетон. Как известно, традиционным недостатком ячеистых бетонов является значительная усадка, в ряде случаев приводящая к растрескиванию изделий в процессе их эксплуатации. Введение синтетической фибры позволяет добиться значительного уменьшения, а применение их в комбинации с высоко модульными, например базальтовыми, волокнами обеспечивает полное исключение усадочных трещин, повышая таким образом физико-механические характеристики материала и улучшая его эксплуатационные качества;

4. Ударостойкие конструкции.

Первый опыт применения фибробетона в таких конструкциях оказался вполне удачным и показательным [6,7,9]. В 1974 при возведении промышленного здания строители столкнулись со сложностями при забивке свай, обусловленными особенностями строения грунта. Оказалось невозможным забивать сваи до проектных отметок без разрушения и приходилось массово использовать сваи-дублиеры. Введение стальных фибр позволило предотвратить раскалывание оголовков свай. В результате такого опыта применения фибрового армирования появились данные исследований ударостойкости фибробетона, и были предложены технологии производства железобетонных свай со сталефибробетонными оголовками [57, 58].

Помимо этого известно применение фибробетона при проведении реставрационных работ и в производстве декоративных элементов, в которых применение традиционной стержневой или сетчатой арматуры нецелесообразно или просто невозможно.

1.2 Влияние параметров дисперсного армирования на свойства фибробетона

Огромное влияние на свойства получаемых фибробетонов оказывает расстояние между отдельными волокнами или, по-другому, дисперсность армирования, которая определяется длиной фибр, их диаметром или размерами поперечного сечения и количеством в смеси составляющих. При оптимальном сочетании именно этих параметров имеет место максимальная степень увеличения прочности, трещиностойкости, улучшения других физико-механических характеристик получаемого композита [4, 35, 45, 93, 92, 100].

На сегодняшний день предел насыщения бетона дисперсной арматурой чаще всего составляет 1-2 % по объему. В то же время приводятся результаты исследования [84], свидетельствующие о нелинейном изменении механических характеристик фибробетона при выходе за границы указанного интервала. При малых процентах армирования, когда волокна удалены друг от друга на значительные расстояния, прочность фибробетона характеризуется прочностью матрицы и практически не отличается от нее. При большем насыщении смеси фибрами в момент растрескивания матрицы, происходит перераспределение напряжений, при котором нагрузку воспринимают преимущественно волокна, обеспечивая несущую способность фибробетона. Этот эффект усиливается при дальнейшем увеличении количества волокон в смеси и будет продолжать усиливаться до тех пор, пока возникнет недостаток матричной составляющей композита, после чего его прочность станет уменьшаться. Таким образом, существует такое значение объемного армирования, которому, при определенных геометрических характеристиках фибр, соответствует максимальная прочность. Упомянутые параметры фибрового армирования позволяют производить не только статистическое описание, но и объяснять некоторые взаимодействия волокон и матрицы, а также анализировать механизмы разрушения фибробетонов, изготовленных с применением различных волокон.

1.2.1 Влияние дисперсного армирования на деформативные свойства фибробетона

В СП 52-104-2006 приводятся методы расчета сталефибробетонных конструкций по предельным состояниям первой и второй группы с применением таких величин, как сопротивление растяжению и сжатию фибры, бетона и фибробетона, которые определяются расчетным путем с учетом геометрических размеров конструкции и параметров армирования.

В случае расчета сталефибробетонных конструкций по предельным состояниям второй группы, ширина раскрытия трещин, вызванных действием внешней нагрузки, должна быть меньше предельно допустимой ширины, или прогиб конструкции от внешней нагрузки должен быть меньше предельно допустимого. При этом, в случае необходимости, СП допускает замену модуля упругости фибры и бетона значением модуля упругости фибробетона, который так же можно определить расчетным путем, используя формулу

$$E_{fb} = E_b(1 - \mu_{fv}) + E_f \mu_{fv}. \quad (1.1)$$

где E_{fb} – модуль упругости фибробетона, МПа; E_b – модуль упругости бетонной матрицы, МПа; E_f – модуль упругости материала волокон, МПа; μ_{fv} – объемное содержание волокон, %.

Данная формула представляет собой правило смесей применительно к модулю упругости фибробетона. Подобное выражение можно использовать и для расчета прочности фибробетона при изгибе или сжатии. Однако в ходе литературного обзора найдены работы, в которых указывается на неприемлемость данного подхода, поскольку получаемые таким образом величины далеки от реальных свойств композита [2, 102]. При этом отмечается немногочисленность и противоречивость имеющихся экспериментальных данных: в некоторых работах утверждается, что дисперсное армирование хаотично ориентированными волокнами влияет на упругие свойства бетонов [81] в пределах 3% на каждый процент армирования, в других показано, что модуль упругости бетона за счет введения фибры увеличивается до 10%. Арончик приводит экспериментальные

данные, в которых наблюдается увеличение модуля упругости за счет фибрового армирования на 40-60% [68, 50, 28, 12].

В [87] автор работы утверждает, что формула (1.1) отдельно учитывает упругие характеристики составляющих, но не учитывает взаимовлияния фибры и матрицы. При этом в публикации приводятся экспериментальные данные, подтверждающие справедливость формулы только в случае малого насыщения матрицы фибрами. В соответствии с правилом смесей прочность фибробетона на растяжение при изгибе возрастает линейно, пропорционально увеличению расхода волокон. Однако данные экспериментов показывают, что этот закон нарушается при высоком насыщении матрицы фибрами, и фактическая прочность превышает расчетную более чем в 2 раза. Кроме того, в работе представлены результаты исследования характеристик порового пространства фибробетонных образцов, которые демонстрируют уменьшение размеров и количества пор при увеличении содержания фибры. Таким образом, модификация структуры бетона и степень ее улучшения так же зависят от параметров дисперсности армирования. Приведенные данные демонстрируют влияние фибрового армирования и на структурообразование бетона в процессе схватывания и твердения: показано, что искусственные и естественные шероховатости на поверхности волокон выступают в роли центров кристаллизации цементного теста, упорядочивая и уплотняя его структуру. Автор работы, ссылаясь на источник [22], объясняет это особенностью воды, которая вблизи поверхности твердых частиц становится в 3-5 раз более вязкой, чем в объеме. Такое свойство воды обуславливает образование на контакте фибры и матрицы тончайшего слоя цементного камня, обладающего рядом особых свойств, в частности более высокой прочностью и плотностью. Такая зона формируется вдоль всей совокупной поверхности фибры, и таким образом, кроме каркаса хаотично распределенных волокон, в фибробетоне образуется еще и микрокаркас из контактных зон цементного камня улучшенного качества. Формирование такой структуры и ее влияние на свойства получаемого композита не учитывается расчетными методиками, в связи с чем представляется целесообразным экспериментальное определение модуля упругости фибробетона.

1.2.2 Влияние дисперсного армирования на трещиностойкость фибробетона

Важнейшей характеристикой качества фибробетона как композиционного материала является высокая трещиностойкость, то есть вязкость разрушения.

В ходе литературного обзора было обнаружено множество работ по экспериментальной и расчетной оценке трещиностойкости материалов, как правило, методами механики разрушения [46, 47, 48]. Практически во всех публикациях трещиностойкостью называют способность материала сопротивляться образованию и развитию трещин [83, 43, 75, 51, 52, 49, 62, 61].

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 армирование волокнами.

Дисперсное армирование высокомодульными волокнами, приводит к увеличению трещиностойкости бетона [1, 19, 24], поскольку в данном случае пересекающие трещину более жесткие включения препятствуют ее развитию при разрушении материала (рис. 1.1, 1.2). Из результатов, представленных в одной из работ [91] следует, что при введении стальных фибр диаметром 0,25 мм и длиной 25 мм в количестве 2,3% по объему нагрузка в момент образования магистральной трещины увеличивается вдвое, по сравнению с образцами из неармированного бетона, а при увеличении расхода волокон до 4% по объему нагрузка образования трещины возрастает примерно в 3 раза, а по данным другого исследования [101] - в 2,5 раза.

В [97, 99] показано увеличение нагрузки в момент образования трещины по сравнению с неармированными образцами на 40-80% по мере увеличения расхода волокон от 1,25% до 2,5% по объему. Подобные результаты представлены в [105, 33, 9], из которых следует, что трещиностойкость фибробетонного образца имеет в 1,5 – 2 раза большую величину, чем неармированного.

В работе Голубева В.Ю. [30], при использовании стальной фибры «Dramix» диаметром $d = 0,75$ мм и длиной $l = 60$ мм при общем содержании в смеси 2,9% по объему, вязкость разрушения, по сравнению с неармированным бетоном, повышается в 3,7 раза.



Рисунок 1.1 – Разрушение неармированного образца



Рисунок 1.2 – Блокирование трещины фибрами при разрушении фибробетонного образца

Показательными являются и результаты [33, 106], из которых следует, что трещиностойкость сталефибробетона при статическом нагружении примерно в 1,8-2 раза превосходит предел прочности неармированного бетона.

По приведенным данным можно сделать вывод о том, что применение фибрового армирования позволяет повысить стойкость материала к образованию и развитию трещин. Важно отметить, что на характеристики трещиностойкости большое влияние оказывают параметры дисперсного армирования, в частности, диаметр и длина используемых фибр. При прочих равных условиях, при армировании бетона стальными фибрами диаметром 0,3мм нагрузка, соответствующая образованию трещины, увеличивается в 1,25 раза по сравнению

с бетоном, армированным волокнами диаметром 1,25 мм, в связи с чем для конструкций, к которым предъявляются повышенные требования по трещиностойкости, рекомендуется применять фибровую арматуру небольших диаметров 0,2–0,5 мм [84, 54].

В [55] установлено влияние диаметра высокомодульных волокон на начальную ширину раскрытия трещин. Показано, что при использовании фибр диаметром 0,3 мм трещины в момент образования имели ширину 1,5 - 3мкм и длину 1-3мкм, а при использовании волокон диаметром 0,9мм ширина трещин составляла 7-10мкм.

Объясняя механизм повышения трещиностойкости при уменьшении диаметра фибр, в [94] приходят к выводу, что это происходит за счет увеличения количества волокон в единице площади сечения и связанного с этим существенного снижения податливости (стесненности) волокон в момент образования трещины.

Известно, что и неметаллические высокомодульные волокна, например, углеродные, также повышают трещиностойкость фибробетона [69, 74]. В то же время в [32, 39] описана методика определения трещиностойкости и приводятся следующие результаты экспериментов. Испытаниям подвергались фибробетонные образцы, изготовленные с применением стальной фибры с расходом 50 и 100 кг/м³ и низкомодульной полипропиленовой - с расходом 3 и 6 кг/м³. В ходе испытаний производилось ступенчатое нагружение образцов с фиксацией вертикальных перемещений. По результатам испытаний была установлена нагрузка трещинообразования и критический коэффициент интенсивности напряжений. При этом было достигнуто увеличение воспринимаемых напряжений до момента трещинообразования в 2-3 раза для стальной фибры и в 1,5-2 раза для полипропиленовой фибры, что также было подтверждено в работах [9, 20, 111]. Полученные значения критического коэффициента интенсивности напряжений фибробетонов различных составов показали, что он увеличивается при повышении количества фибры в бетонной матрице.

В статьях [39, 86] представлены результаты экспериментальных исследований по определению величины критического коэффициента интенсивности напряжений для образцов, изготовленных из фибробетона на основе стальной и полимерной фибры, которые почти полностью подтвердили приведенные выше результаты. Вместе с тем, в работе [72] утверждается, что при увеличении в бетоне количества синтетической низко модульной фибры, уменьшается коэффициент интенсивности напряжений, однако при увеличении длины синтетического волокна – его значение повышается.

То, что длина фибры влияет на вязкость разрушения композита, подтверждено и в работе [88]. Результаты исследований, посвященных изучению процесса разрушения фибробетонов с высоко модульными волокнами, показали, что создание композиционного материала с высокой вязкостью возможно, даже в случаях, когда волокна и матрица по своей природе хрупкие. Для этого необходимо выполнять армирование волокнами таких размеров, при которых они вытягиваются из матрицы в процессе трещинообразования. Показано, что для увеличения энергии вытягивания волокон необходимо стремиться к увеличению их длины. Исходя из этого, установлено, что отношение длины волокна к его диаметру оказывает значительное влияние на вязкость композита.

Таким образом, фибровое армирование позволяет добиться существенного увеличения трещиностойкости и энергии разрушения бетона при нагружении. Так в одной из работ, при использовании стальной фибры «Dramix» ($d = 0,75$ мм, $l = 60$ мм) в количестве 2,5% по объему, была построена диаграмма зависимости «нагрузка - относительная деформация», и с ее помощью рассчитана энергия, затраченная на разрушение образцов, которая оказалась в 137 раз больше, чем у обычного бетона [30].

Подводя некоторые предварительные итоги, можно сказать, что полученные экспериментальные данные не противоречат теоретическим основам и принципам дисперсного армирования бетона волокнами. Однако определенный разброс значений контролируемых величин требует внимательного отношения при разработке методов и инструмента для их определения.

1.3 Методы определения деформативных свойств и показателей трещиностойкости фибробетона

1.3.1 Методы определения модуля упругости фибробетона

Действующий ГОСТ 24452 «Методы определения призмочной прочности модуля упругости и коэффициента Пуассона» позволяет определить модуль упругости бетона расчетным путем с учетом величины продольных относительных деформаций образца.

В соответствии с данной методикой образец - балка, размеры которой подбираются исходя из максимальной крупности зерен заполнителя, устанавливается в прессе вертикально, и к нему прикладывается сжимающая нагрузка, которая контролируется в ходе испытания. Параллельно отмечается время и деформации образца. В качестве измерителей деформаций предлагается использовать механические тензометры Аистова (рис. 1.3) или тензорезисторы.

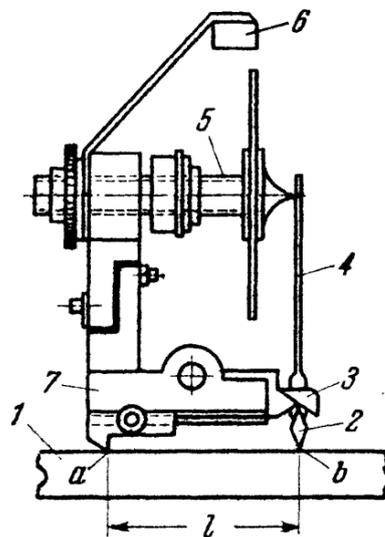


Рисунок 1.3 - Тензометр Аистова

Тензометр Аистова представляет собой микрометр особой конструкции, состоящей из станины 7, микрометрического винта 5, пера 4, ножа 2, вилки 3, визира 6. Тензометр устанавливается на поверхность образца 1 перед проведением испытания, и прижимается к ней струбциной таким образом, чтобы исключить проскальзывание опорных ножей в точках а и б. Опорный нож 2

представляет собой призму, два угла длинной диагонали которой имеют контакт с поверхностью образца и вилкой 3. Нож жестко соединен с пером 4. При деформировании образца изменяется расстояние между точками а и б, и за счет вилки 3 линейные деформации преобразуются в угловые перемещения ножа 2 и пера 4. Поскольку перо длиннее ножа в 10 раз, обеспечивается соответствующее масштабирование. В результате этих перемещений изменяется расстояние между пером и микрометрическим винтом, и его величину можно определить путем подсчета количества оборотов винта при вращения от положения условного нуля до касания пера. Отсчет количества оборотов удобно производить с помощью визира.

Тензометры устанавливаются на каждой из четырех продольных граней образца. Вначале испытания образец с установленными датчиками ставится в пресс, и с тензометров снимаются показания, представляющие собой начало отсчета или так называемый условный нуль, далее к образцу прикладывается нагрузка, соответствующая 5% предполагаемой разрушающей. Нагрузку следует стабилизировать и снять показания с тензометров. Если разница между условным нулем и показаниями тензометров неодинаковая, следует снять нагрузку и переместить образец в сторону наименьшего показания. Описанная операция представлена на рисунке 1.4 и называется центрованием.



Рисунок 1.4 – Процесс испытания модуля упругости образца с использованием тензометров Аистова

В случае, если после пяти попыток отцентровать образец не удастся его следует отбраковать. В случае успешной центровки испытание продолжается. При этом следует увеличить нагрузку до 30% от предполагаемой разрушающей, стабилизировать ее на этом уровне на 5 минут и далее снять показания тензометров. После этого тензометры снимаются с образца, и нагрузку увеличивают до разрушения. Расчетным путем разрушающая нагрузка преобразуется в значение призмической прочности. Разница в показаниях тензометров до и после приложения нагрузки, также расчетным путем, преобразуется в величины продольных деформаций.

При расчете модуля упругости следует определить среднее значение деформаций по всем тензометрам с четырех граней образца. Таким образом, если по регламенту в ходе испытания одного образца показания четырех тензометров требуется снимать не менее трех раз, образцов должно быть по четыре в серии, а серий, как правило, несколько, показаний становится так много, что процесс безошибочного контроля деформаций оказывается достаточно трудоемким.

Учитывая это, при проведении предварительных испытаний по программе данного диссертационного исследования в целях упрощения контроля деформаций был изготовлен прибор оригинальной конструкции с заменой тензометров Аистова на тензорезисторы, позволяющий автоматически переводить запись деформаций в память компьютера (рис.1.5).



Рисунок 1.5 – Внешний вид опытного прибора с автоматической записью деформаций

Каждый из тензорезисторов, приклеенных к образцу, подключается к своему электронному усилителю, несложное схемотехническое решение позволяет опрашивать эти усилители и отправлять данные о деформациях в компьютер. Регистрацию показаний можно производить как в непрерывном режиме, так и периодически, в определенные методикой моменты времени. Полученные таким образом данные автоматически обрабатываются и преобразуются в величины деформаций. Все остальные расчеты производятся в соответствии с ГОСТ 24452.

Следует отметить, что в сконструированном устройстве предусмотрен специальный передатчик, позволяющий отправлять данные не только по шине USB, но и по беспроводному каналу Bluetooth. Таким образом, данные о деформациях могут быть приняты не только компьютером, но и любым другим цифровым устройством, поддерживающим данный способ передачи информации. Общий вид оборудования для проведения испытания представлен на рисунке 1.6.



Рисунок 1.6 – Процесс проведения испытаний модуля упругости

Лабораторные испытания модуля упругости бетонных и фибробетонных образцов, проведенные по данной методике как с использованием тензометров Аистова, так и с применением тензорезисторов, показали значительный разброс

данных не только между образцами одной серии, но и между деформациями граней одного и того же образца.

В связи с этим было принято решение о необходимости совершенствования существующих методов испытаний модуля упругости фибробетонных образцов.

1.3.2 Методы определения характеристик трещиностойкости фибробетона

Существует несколько экспериментальных методов определения критического коэффициента интенсивности напряжений, которые можно условно разделить на проводимые по равновесной и неравновесной схеме. В обоих случаях в ходе испытания производят нагружение образца некоторой силой, вызывающей 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, и контролировать его в такой ситуации оказывается весьма затруднительным. Такая схема испытаний называется неравновесной. На практике обеспечение равновесности достигается возможностью останавливать нагружение на любом этапе деформирования и разрушения.

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.

Другим способом достижения равновесности является использование испытательного оборудования большой жесткости, при соблюдении равенства потенциальных энергий машин и образца. Однако такой метод требует использования крупноразмерных образцов, что в ряде случаев может оказаться неудобным.

Существует и более простая методика определения коэффициента интенсивности напряжений, при которой испытанию подвергаются образцы-кубы, с двумя начальными надрезами, инициаторами трещины. Испытания проводятся по схеме внецентренного сжатия при помощи прессы с металлическими опорами. Величина коэффициента интенсивности напряжений определяется расчетным путем с использованием результатов испытаний. Автор методики предлагает формировать инициаторы трещин на стадии изготовления образцов. В методических указаниях [60] описан процесс изготовления образцов, приведены некоторые требования к материалу формы, достаточно подробно представлен ход испытаний. Однако в ряде публикаций обнаруживаются некоторые недостатки этого метода. Так, автор работы [30] указывает на невозможность изготовления бездефектных образцов, так как вставки – образователи инициаторов трещин - не позволяют произвести распалубку форм, и в процессе совершенствования данной методики было предложено несколько изменить их конфигурацию.

Кроме описанных выше существует методика, представленная ГОСТ 29167 «Методы определения характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении». Установленные по данному стандарту характеристики трещиностойкости бетона, наряду с другими показателями механических свойств, используют для:

- сравнения различных вариантов состава, технологических процессов изготовления и контроля качества бетонов;
- сопоставления бетонов при обосновании их выбора для тех или иных конструкций;
- расчетов конструкций с учетом их дефектности и условий эксплуатации;
- анализа причин разрушений конструкций.

В указанном стандарте описывается методика выбора образцов, проведения испытаний, как по равновесной так и по неравновесной схеме, предлагается способ обработки данных, полученных в ходе испытаний. В данном случае образец – балка, размеры которой выбираются, исходя из значений максимальной

крупности заполнителя, подвергается испытанию на растяжение при трехточечном изгибе, в ходе которого непрерывно контролируется прилагаемая нагрузка и прогиб образца, вызванный действием этой нагрузки. После проведения испытания строится диаграмма зависимости прогибов от прикладываемых нагрузок, и далее по полученной диаграмме расчетным путем определяются энергетические и силовые характеристики трещиностойкости.

В ГОСТ подробно описано оборудование, позволяющее строить полностью равновесные диаграммы деформирования материала. Основным элементом этого оборудования является стальное кольцо, обеспечивающее равновесный характер разрушения за счет увеличения жесткости испытательной машины и восприятия избытка кинетической энергии, высвобождающейся при разрушении материала (рис. 1.7).

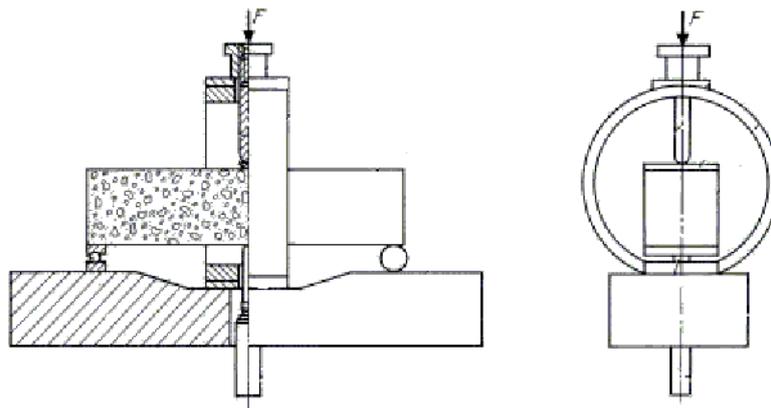


Рисунок 1.7 – Схема испытаний трещиностойкости материалов при равновесном характере прикладываемой нагрузки с применением распределительного кольца

Для получения диаграмм зависимостей прогибов от прикладываемых нагрузок используются датчики, которые позволяют контролировать нагрузку, прикладываемую к образцу, и прогиб, вызываемый действием этой нагрузки.

Требованиями ГОСТ 29167 так же предусматривается формирование начальных надрезов – концентраторов напряжений, которые допускается образовывать их с помощью режущего инструмента после того как образец наберет некоторую прочность.

Испытания, проводимые по неравновесной схеме подразделяются на происходящие с устойчивым ростом трещины, когда она развивается с

увеличением внешней нагрузки постепенно, и с неустойчивым, когда моменты начала движения трещины и разрушения образца совпадают. В первом случае контролируется скорость роста трещины, а во втором – прогиб образца.

На момент начала проведения экспериментальных работ в рамках данного диссертационного исследования в СПбГАСУ отсутствовало оборудование, необходимое для проведения испытаний в соответствии с требованиями ГОСТ 29167. В связи с этим было изготовлено устройство собственной конструкции, позволяющее контролировать величины, необходимые для построения диаграмм зависимостей прогибов от прилагаемых нагрузок. При этом предусмотрена неравновесная схема испытаний с неустойчивым ростом трещины.

В ходе исследования создано несколько устройств, при разработке которых были опробованы различные конструктивные и технические решения [37]. Один из наиболее удачных вариантов конструкции устройства (рис.1.8) применялся при проведении испытаний на предварительном этапе проведения исследований.

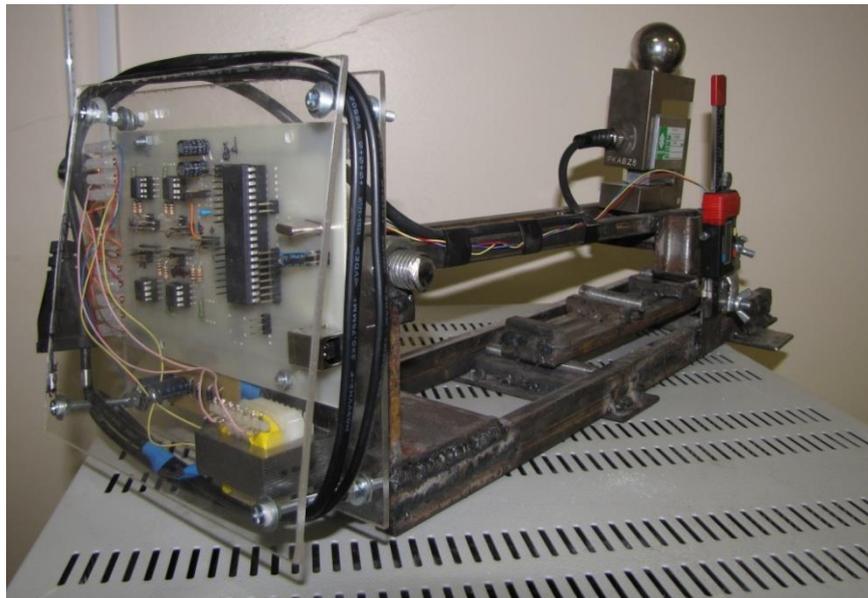


Рисунок 1.8 – Вариант прибора для проведения испытаний трещиностойкости материалов

Некоторые из диаграмм деформирования, полученных с применением данного прибора в ходе испытаний фибробетонных образцов, армированных волокнами в количестве 1% по объему, представлены на рисунке 1.9. На этом же рисунке представлена диаграмма разрушения неармированного бетонного образца.

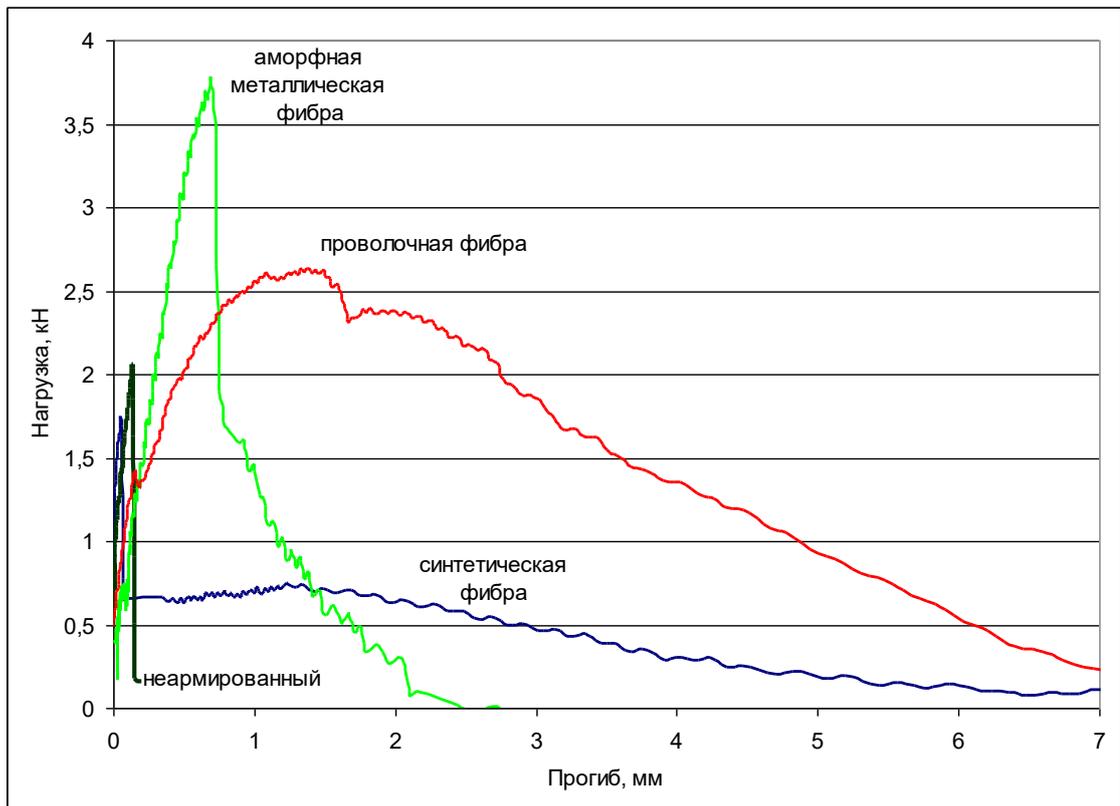


Рисунок 1.9 – Диаграммы деформирования и разрушения фибробетонных образцов

Анализ полученных данных показывает, что использованные волокна по-разному влияют на свойства фибробетона. Аморфная металлическая фибра позволяет добиться значительного повышения прочности на растяжение при изгибе. Стальная проволоочная фибра так же способствует повышению прочности, но в меньшей степени. Следует отметить, важные особенности механизма разрушения фибробетонов, изготовленных с применением различных видов фибр. Так, при достижении нагрузкой максимальной величины фибробетонный образец, изготовленный с применением аморфной металлической фибры, резко разрушается, разделяясь на условные половинки. Проволоочная фибра продолжает удерживать образец от разрушения, обеспечивая восприятие нагрузки даже после образования и раскрытия магистральной трещины. Синтетическая фибра работает аналогично проволоочной, но в силу низкого собственного модуля упругости не приводит к заметному повышению прочности.

Один из важных результатов проведенных испытаний заключается в том, что в случае применения точного измерительного оборудования установлено множество факторов, оказывающих негативное влияние на достоверность

получаемых данных. В результате действия этих факторов определение большинства характеристик трещиностойкости может оказаться некорректным.

С целью подтверждения данного положения был испытан неармированный образец, диаграмма разрушения которого представлена на рисунке 1.10. На начальном этапе нагружения образец деформируется упруго. На диаграмме виден восходящий участок, описывающий упругие деформации. Зная геометрические размеры образца, схему нагружения, величины прилагаемой нагрузки и прогиба в момент действия упругих деформаций, можно методами сопротивления материалов определить модуль упругости.

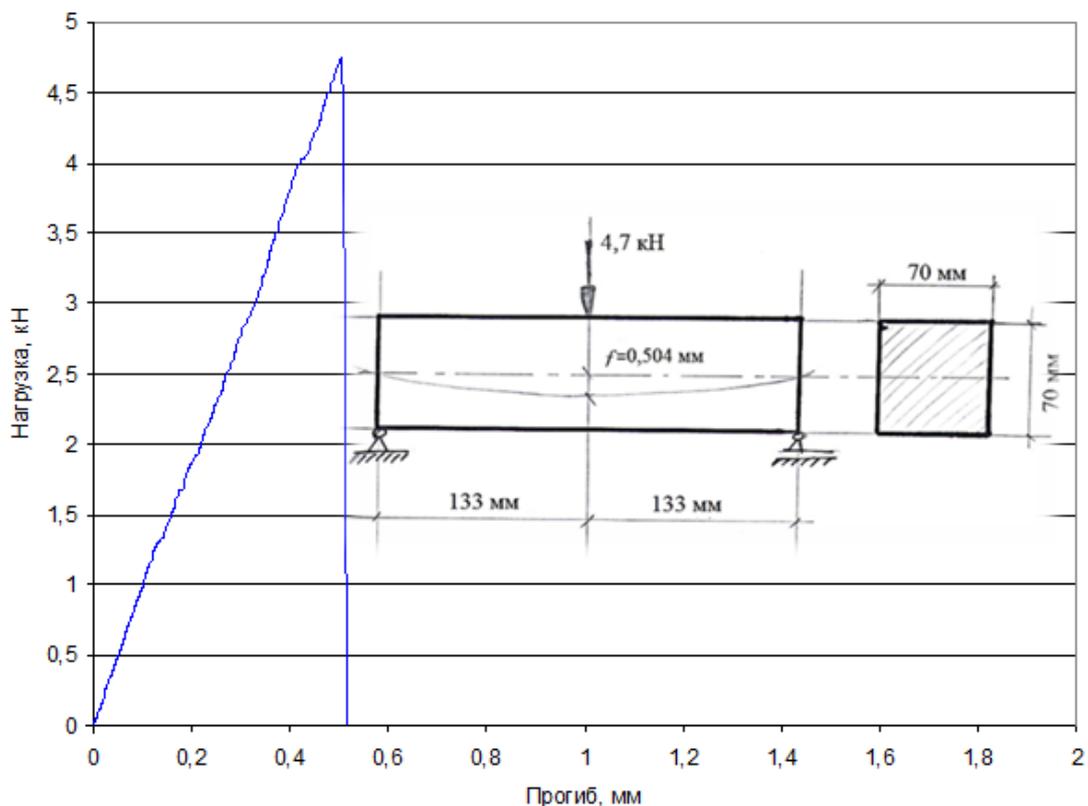


Рисунок 1.10 – Диаграмма разрушения и схема испытания неармированного образца

Поскольку речь идет об определении модуля упругости неармированного образца мелкозернистого бетона, то в соответствии со справочником [103], он должен оказаться приблизительно равным 30000 МПа.

Прогиб в середине балки можно рассчитать по формуле 1.2 [18, 10]:

$$f_{\max} = \frac{Pl^3}{48EI} \quad (1.2)$$

где, P – нагрузка (кН), действующая на образец и вызывающая его упругие деформации, которую можно определить по диаграмме; l – база испытаний (см) в соответствии с требованиями ГОСТ 29167; f_{max} – максимальный прогиб в середине пролета, определяемый по диаграмме, E – модуль упругости материала; I – момент инерции сечения

$$I = \frac{a^4}{12} \quad (1.3)$$

где a – высота сечения, см.

Выражая из формулы (2) модуль упругости, получаем

$$E = \frac{P\ell^3}{48f_{max}I} \quad (1.4)$$

Расчет показывает, что модуль упругости материала оказывается равным 1620 МПа. Несоответствие справочного и расчетно-экспериментального значений можно объяснить тем, что, как и в случае применения ГОСТ 24452, большое влияние оказывают отклонения в геометрии образца. При приложении значительной нагрузки образец не только прогибается, но перемещается в произвольном направлении. Эти паразитные перемещения вызваны неровностями граней образца, уплотнениями в конструкции испытательного механизма. Кроме того, при нагружении отчетливо наблюдается вдавливание в образец упоров, обеспечивающих изгиб. Таким образом, в сконструированном устройстве, также как и в других подобных, измеряется не прогиб, а изменение расстояния между этими упорами, и вышеописанные особенности вносят существенную неточность в картину упругого деформирования. Поскольку методикой обработки данных, предлагаемой ГОСТ 29167, предусматривается оперирование площадями под графиками, характеризующими разные этапы деформирования и разрушения, неточности в измерении прогибов крайне нежелательны.

Кроме того, точность измерения прогибов (0,01мм), в ряде случаев оказывается недостаточной. В процессе работы с данным прибором наблюдался значительный разброс сведений о нагрузке, прилагаемой к образцам одной серии.

Вероятно, это вызвано особенностями работы фибробетона при изгибе по трехточечной схеме.

Следует отметить, что обнаруженные недостатки имеют место и при использовании других устройств, в частности, разрывной машины, в конструкции которой предусмотрено специальное устройство для обеспечения трехточечного изгиба бетонных образцов. При проведении лабораторных испытаний были задействованы такие штатные возможности разрывной машины, как контроль перемещений образца и прилагаемых нагрузок. По полученным данным построена диаграмма разрушения изгибаемого фибробетонного образца с точностью, соответствующей требованиям ГОСТ 29167 (рис.1.11). Армирование бетона осуществлялось фиброй из проволоки в количестве 1% по объему.

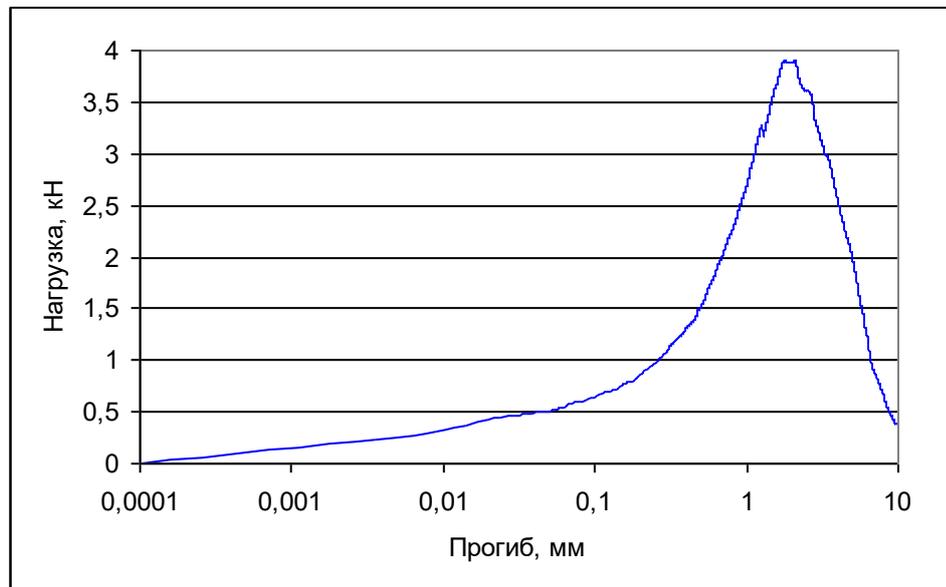


Рисунок 1.11 – Диаграмма разрушения фибробетонного образца, построенная по показаниям разрывной машины

По полученной диаграмме, также как и в предыдущем случае, не удалось получить адекватных значений модуля упругости. Однако следует отметить и положительный опыт проведенной работы как с собственным прибором, так и с разрывной машиной. Дело в том, что описанные ранее методики подразумевают контроль и наблюдение за работой материала в основном на стадии упругого деформирования и в процессе развития трещины, когда конструктивные особенности оборудования (например, распределительное упругое кольцо,

предусмотренное ГОСТ 29167) не ограничивают перемещения образца, но становятся неприемлемыми при испытании фибробетона, прогибы которого, как это следует из представленных диаграмм, приобретают значительную величину. Это обуславливается особенностями фибрового армирования, при котором даже после того как магистральная трещина достигла максимальной длины, волокна, концы которых надежно заанкерены в половинках образца, продолжают удерживать его от разрушения. Это наблюдение наглядно демонстрирует один из механизмов работы фибробетона под нагрузкой, который будет более подробно рассмотрен в следующих главах. Пока же можно констатировать, что предлагаемое устройство не ограничивает перемещений фиброармированного бетона под нагрузкой вплоть до разрушения и может стать основой для развития методов определения характеристик его трещиностойкости с учетом отмеченных недостатков.

Выводы по первой главе

1. Фибробетон представляет собой эффективный композиционный материал с высокими физико-механическими характеристиками и эксплуатационными качествами, который находит все более широкое применение в строительстве и может обеспечить положительный эффект, за счет снижения материалоемкости и трудоемкости при изготовлении изделий и конструкций различного назначения.

2. Стандартные методы расчета и проектирования фиброармированных конструкций регламентируют использование численных значений прочностных, деформативных и других характеристик фибры и фибробетона, которые, вследствие многочисленности и неизученности существующих видов фибр, оказываются неизвестными.

3. Существующие в настоящее время методы испытаний обычных бетонов и применяемое оборудование имеют весьма значительные ограничения и не позволяют достоверно определять численные значения характеристик фибробетона. 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.

4. Основными недостатками существующих методик испытаний характеристик трещиностойкости применительно к фибробетонам являются узкий диапазон измеряемых деформаций, недостаточно точный контроль прогибов образцов на стадии упругого деформирования, малая информативность получаемых данных, а также высокая стоимость и сложность испытательного оборудования. В связи с этим, особую актуальность приобретают вопросы совершенствования существующих, а также создания специальных методик и средств испытаний фибробетона как композиционного материала.

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

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- разработать методику определения деформативных свойств и характеристик трещиностойкости фибробетона с учетом отмеченных недостатков;
- исследовать свойства фибробетонов, изготовленных с применением различных, наиболее популярных в настоящее время, видов фибр, с использованием разработанной методики;
- определить эффективность применения отдельных видов фибры и фибробетона в производстве строительных конструкций с учетом полученных новых сведений.

2 РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФОРМАТИВНЫХ СВОЙСТВ И ХАРАКТЕРИСТИК ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ФИБРОБЕТОНА

2.1 Исходные компоненты и составы смесей для изготовления экспериментальных образцов

Отмеченные в предыдущей главе ограничения существующих методов испытаний применительно к фибробетонам, требуют их серьезной корректировки и, соответственно, разработки новой методики экспериментального определения механических характеристик исследуемого материала. При этом следует учитывать разнообразие возможных рецептур и свойств получаемого композита, которое во многом определяется видом применяемых армирующих волокон, их геометрическими размерами, параметрами физико-механических, в том числе упруго-пластических свойств.

Проектирование состава любого строительного материала начинается с определения исходных сырьевых материалов.

Главной структурной составляющей дисперсно-армированного бетона является фибра, с параметрами которой определенным образом должны сочетаться показатели качества других компонентов, входящих в состав сырьевой смеси.

В настоящее время для армирования бетонов применяют металлические и неметаллические высоко- и низкомодульные волокна различной длины и поперечного сечения. При этом стальную фибру получают резанием низкоуглеродистой проволоки, фольги или листовой стали, выплескиванием из расплава, фрезерованием слябов и блюмсов, а также в результате прерывистого вибрационного резания. Минеральные и синтетические фибры представляют собой отрезки моноволокон, комплексных нитей или фибриллированных пленок различного состава, определяющего их основные характеристики и армирующую способность.

Несмотря на существующее разнообразие, в поле зрения специалистов появляются все новые виды фибровой арматуры, которые предлагаются для промышленного использования и могут пополнить материальную базу для получения фибробетонов с разнообразными характеристиками. Одной из таких новых разновидностей является аморфная металлическая фибра, способы получения и особенности свойств которой представлены ниже.

2.1.1 Особенности получения и свойства аморфных металлов

Основное отличие аморфных материалов заключается в отсутствии порядка в их кристаллической структуре. [107, 40, 77]. Такого эффекта удалось добиться быстрым охлаждением расплава, который при этом не успевает кристаллизоваться и сохраняет расположение частиц жидкости.

Разработано множество различных методов аморфизации металлов: метод вакуумного напыления, когда при низком давлении атомы расплавленного металла испаряются и затем осаждаются на охлаждаемой подложке, методы химической и электролитической закалки и другие. Наиболее перспективными, с точки зрения промышленного производства, считаются методы закалки из жидкого состояния, которые подразумевают охлаждение расплавов металлов и сплавов с большими скоростями, позволяющими достигать больших степеней переохлаждения жидкости и, в конечном счете, «замораживание» жидкого состояния [27, 73]. Методы закалки из жидкого состояния нашли широкое применение, так как позволяют получить аморфные металлические порошки, тонкую проволоку и ленту.

Основными разновидностями методов закалки из жидкого состояния, позволяющими получить аморфный металл в виде тонкой ленты, является метод центробежной закалки, закалки на диске и прокатки. На рис. 2.1 приведены схематические изображения этих методов.

Во всех этих методах прослеживается несколько общих принципов. Вначале требуется расплавить металл. При этом важно сохранить чистоту расплава,

поэтому при плавлении, как правило, применяется электродуговой или индукционный нагрев. Далее требуется выдавить расплав через сопло. При этом, с целью сохранения чистоты расплава, выдавливание производится под действием газа. Завершающим является этап затвердевания расплава, происходящий в результате контакта с поверхностью вращающегося холодильника.

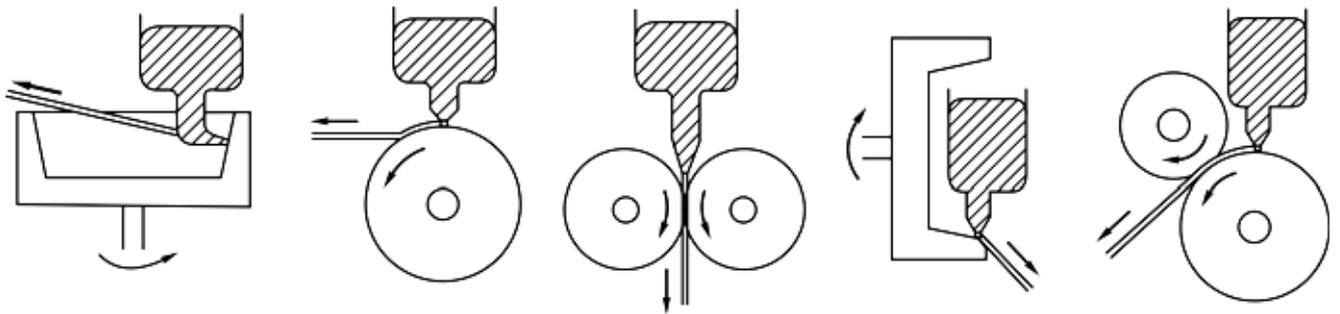


Рисунок 2.1 – Методы заковки из жидкого состояния

Основные различия этих методов заключаются в конструкции холодильника, например, в методе прокатки охлаждение производится с двух сторон.

Важным вопросом остается получение внешней поверхности достаточной степени чистоты, которая не соприкасается с холодильником. Метод прокатки позволяет получить хорошее качество обеих поверхностей ленты, так как они одновременно охлаждаются. Каждый метод имеет свои ограничения по размерам лент, обусловленные различиями в процессе отверждения, и в аппаратном исполнении методов.

Наиболее простая аппаратура, применяемая в методе заковки на диске, позволяет в широких пределах изменять ширину ленты в зависимости от размеров плавильных тиглей. Данный метод позволяет изготавливать ленты различной ширины, от 0,1-0,2 до 10мм, при этом несложно поддерживать постоянство ширины с высокой точностью. Выход готовой ленты при методах заковки из расплава ограничивается лишь размерами тигля, и в настоящее время разрабатываются установки с вместимостью тигля до 50 кг.

В процессе закалки из жидкого состояния металл быстро затвердевает, растекаясь тонким слоем по поверхности вращающегося холодильника. Толщина слоя расплава на холодильнике определяется скоростью его вращения, его характеристиками и скоростью истечения расплава. Для различных сплавов скорость охлаждения зависит также и от теплопроводности, теплоемкости, вязкости, плотности расплава. Кроме того, важным фактором является коэффициент теплопередачи между расплавом и холодильником.

В настоящее время установлены некоторые условия аморфизации при различных методах закалки из жидкого состояния. Компонентами аморфизирующихся сплавов могут быть практически все металлы. При этом аморфизации могут быть подвергнуты всевозможные комбинации металлов.

Одним из важнейших условий аморфизации является скорость охлаждения. При достаточно медленном охлаждении жидкость кристаллизуется, однако при быстром охлаждении зарождение и рост кристаллов подавляется, и кристаллизации не происходит: образуется метастабильная переохлажденная жидкость. Кроме того, при понижении температуры степень переохлаждения увеличивается, скорость движения атомов в жидкости значительно падает, и движение атомов прекращается. В этом случае протекание кристаллизации и образование кристаллической решетки невозможно, потому что возникает твердое тело с таким же расположением атомов, как в переохлажденной жидкости. Такое состояние называют состоянием стекла или аморфным состоянием, а температуру при которой произошло затвердевание называют температурой стеклования

Таким образом, аморфные металлы получаются в результате охлаждения расплава со скоростью, превышающей скорость кристаллизации. В результате, в аморфных телах отсутствует дальний порядок расположения атомов, в то же время это расположение не является хаотичным. Как и в жидкости, в аморфных телах расположение атомов подчиняется закону ближнего порядка, при котором упаковка атомов стремится к плотности, характерной для кристаллического тела. Отсутствие дальнего порядка в аморфных телах обуславливает отсутствие

выраженной точки плавления. Возможность образования аморфной структуры при затвердевании расплава определяется такими параметрами как частота зарождения кристаллов, скорость их роста и скорость охлаждения, которые определяются физико-химическими свойствами расплава. Таким образом, главным условием образования аморфной структуры является невозможность образования зародышей кристаллов.

Достигнутые в настоящее время скорости охлаждения позволяют получать в виде аморфных лишь некоторые виды сплавов. Образование кристаллической структуры связано с диффузией атомов, поэтому при одинаковой скорости охлаждения аморфизация будет происходить при меньшей подвижности атомов. Поэтому важной задачей является создание в аморфных сплавах некристаллизуемых атомных групп, которые, находясь в твердом аморфном сплаве, повышают его термическую стабильность.

Существует такое понятие как устойчивость аморфного сплава, то есть склонность к переходу в кристаллическое состояние. Температура стеклования меньше температуры кристаллизации сплава. Устойчивость аморфного сплава можно охарактеризовать как разность этих температур. Следует отметить, что поскольку аморфная структура является метастабильной то при нагреве может произойти упорядоченная кристаллизация. Это объясняет важность устойчивости аморфного сплава.

Аморфная структура металлов, неупорядоченное расположение атомов, приводит к изменениям магнитных, электрических и механических свойств. Эти свойства значительно отличаются от свойств кристаллических металлов того же состава. Модуль упругости аморфных металлов, как правило, оказываются несколько меньшим, по сравнению с исходным металлом. Аморфный металл так же отличается высоким пределом текучести при практически отсутствующем деформационном упрочнении.

В аморфном сплаве, имеющем структуру переохлажденной жидкости, отсутствует такой источник фазовой неоднородности, как сильно отличающиеся по атомному строению и химическому составу объемы. Эта особенность во

многим определяет отличия свойств аморфных сплавов от кристаллических и обуславливает отсутствие в них анизотропии. При этом плотность аморфных сплавов всего на 1-2% меньше плотности кристаллических металлов того же состава. Важной особенностью аморфных сплавов является их коррозионная стойкость, которая объясняется быстрым образованием пассивирующей пленки. Пассивирующая пленка обладает высокой степенью химической однородности. Поскольку аморфные сплавы не содержат кристаллов, то в них отсутствуют дефекты, характерные для кристаллических тел, которые могли бы стать центрами коррозии.

Механические свойства аморфных металлов так же отличаются от кристаллических металлов. Аморфные сплавы характеризуются высокой прочностью и твердостью. При растяжении аморфные металлы разрушаются хрупко, их относительное удлинение не превышает 2 %, тогда как при сжатии пластическая деформация может достигать 50 %. В настоящее время разработаны такие составы аморфных сплавов, которые на 30% более прочные, чем наиболее прочные из известных сталей кристаллической структуры. При этом модуль упругости аморфного металла оказывается на 40 - 60% меньшим по сравнению с кристаллическим металлом того же состава. Коэффициент Пуассона аморфных металлов близок к 0,4 и представляет собой среднее значение между кристаллическими металлами и жидкостями. Особенности структуры аморфного металла, однородность химического состава обуславливают механизмы деформирования и разрушения.

Аморфные металлы, являясь высокопрочными материалами с характерной таким материалам низкой вязкостью разрушения, имеют в 10 раз больший критический коэффициент интенсивности напряжений, по сравнению с металлами кристаллической структуры. Это объясняется тем, что в случае разрушения кристаллических сплавов происходит скол по кристаллографическим плоскостям, а в структуре аморфных металлов отсутствуют такие плоскости и не происходит разрушения сколом. В результате в вершине трещины происходит значительная концентрация напряжений вызывающая большие пластические

деформации, происходящие только по фронту распространения трещины. В связи с этим энергия необходимая для разрушения становится чрезвычайно большой. Кроме того при развитии пластических деформаций происходит релаксация напряжений вблизи трещины, которая так же повышает энергию разрушения. Таким образом, высокая прочность и трещиностойкость являются одними из самых важных свойств аморфных металлов, отличающих их от металлов с кристаллической структурой.

Тонкие ленты из аморфного металла производятся для исследования свойств аморфных металлов и, кроме того нашли широкое практическое применение, в том числе в качестве армирующего волокна при создании таких композиционных материалов как фибробетон.

Аморфная металлическая фибра производится методом закалки из расплава, путем охлаждения на вращающемся диске. При этом, на охлаждающей поверхности диска сформирован микрорельеф, передающий свою форму поверхности изготавливаемой ленты. Микрорельеф получается при механической обработке шлифованием или химическим травлением. Металлическая лента получаемая на используемом оборудовании может иметь толщину от 5 до 200 мкм, и ширину от 300 до 3000 мкм, микрорельеф составляет 5 - 30% толщины ленты.

2.1.2 Характеристика исходных компонентов и методики изготовления лабораторных образцов

В качестве дисперсной арматуры использовались наиболее популярные у строителей виды фибр, отличающиеся по составу и свойствам и имеющие практическое значение:

- фибра стальная проволочная круглого сечения волнового профиля диаметром 0,3мм и длиной 22мм производства Белорусского металлургического завода (рис. 2.2);



Рисунок 2.2 – стальная проволочная фибра

- фибра металлическая аморфная длиной 40 мм, толщиной 20 - 30мкм и шириной 2-3мм производства ООО «Химмет» (рис. 2.3).

Эквивалентный диаметр аморфного металлического волокна составляет 0,27мм что приблизительно соответствует диаметру стальных проволочных фибр и, таким образом, при анализе получаемых данных позволит сравнивать влияние аморфного и кристаллического металла дисперсной арматуры на свойства фибробетона;



Рисунок 2.3 - Аморфная металлическая фибра

- фибра синтетическая полипропиленовая «Kalcifil S» длиной 12мм и диаметром 25мкм (рис. 2.4).

Синтетическая фибра применялась из соображений, что она является одной из самых распространенных и по некоторым свойствам прямо противоположной использованным металлическим волокнам.



Рисунок 2.4 - Фибра синтетическая полипропиленовая «Kalcifil S»

При изготовлении лабораторных образцов в качестве матрицы использовался мелкозернистый бетон, что позволило добиться высокой степени дисперсности армирования. Состав бетонной смеси при изготовлении всех образцов был одинаков: Ц:П = 1:2 при В:Ц = 0,37 и расходе добавки суперпластификатора Schomburg Remicrete SP-10 (FM) 0,7 % от массы цемента.

Все исследования проводились на образцах - балках размером 70x70x280 мм, что соответствует крупности применяемого заполнителя в соответствии с требованиями ГОСТ 29167. Одновременно с фибробетонными образцами во всех случаях изготавливались неармированные образцы из бетона того же состава. Такой подход, принятый во многих работах [13, 14, 66, 70, 78, 79], дает возможность оценить влияние на свойства композита только фибрового армирования.

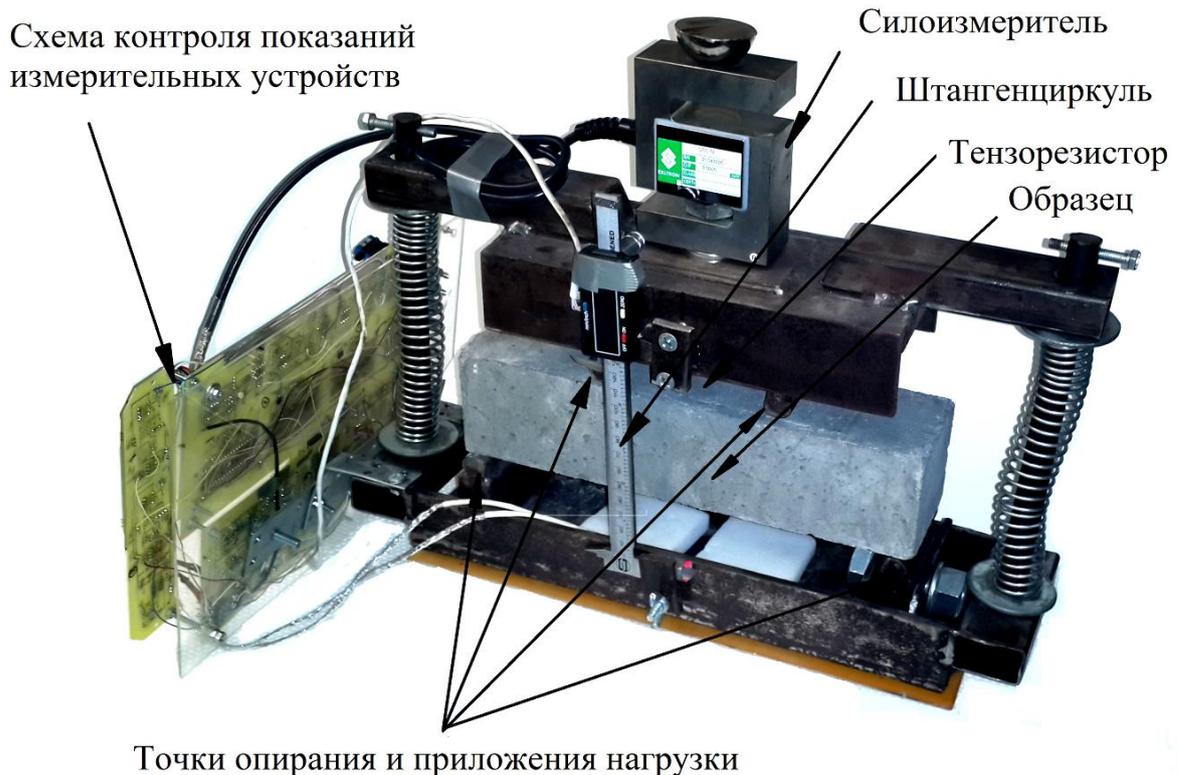
Для изготовления образцов использовались кварцевый песок с наибольшей крупностью зерен 5 мм и модулем крупности $M_{кр} = 2,34$ по ГОСТ 8736-93 «Песок для строительных работ» и бездобавочный портландцемент марки ПЦ 500 Д0 производства ОАО «Осколцемент». Уплотнение смеси осуществлялось на лабораторной виброплощадке. Твердение образцов происходило в условиях тепловлажностной обработки в пропарочной камере при температуре изотермической выдержки 80° С по режиму 2 + 4 + 3 часа, после чего они хранились в воздушно-сухих условиях лаборатории в течение 14 суток.

2.2 Разработка методики испытания трещиностойкости фибробетонных образцов

2.2.1 Разработка устройства для испытания лабораторных образцов

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.

Общий вид конструкции устройства, разработанного для проведения испытания и построения диаграмм деформирования фибробетонных образцов представлен на рисунке 2.5.



Точки опирания и приложения нагрузки

Рисунок 2.5 – Устройство для построения диаграмм деформирования фибробетонных образцов

В процессе разработки учитывались особенности поведения фибробетона под нагрузкой, а также сведения о возможных методах определения исследуемых

свойств и характеристик других строительных композитов, обнаруженных в ходе анализа технической литературы:

1. Метод определения модуля упругости при изгибе по ГОСТ 9550 «Пластмассы. Методы определения модуля упругости при растяжении, сжатии и изгибе»;

2. Методика ВНИИКРнефти определения модуля упругости тампонажного камня с учетом прогиба образца [23], в которой, в частности, указывается, что в отличие от трехточечного при четырехточечном изгибе вследствие постоянства изгибающего момента между точками приложения нагрузки создаются условия, при которых получаемые результаты испытаний не зависят от возможных неоднородностей образца в области максимального изгибающего момента, и таким образом уменьшается разброс показаний;

3. Метод определения модуля упругости ячеистого бетона при изгибе с использованием тензорезистора по ГОСТ 25485.

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

При конструировании устройства 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 элемент выполнен в виде мембраны и не является столь чувствительным.

В целях минимизации влияния неровности граней образца в процессе испытания было 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 образцов. 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^{-5} мм, что в 20 раз точнее стандартного метода.

Об эффективности данного решения свидетельствуют примеры промежуточных диаграмм, получаемых в ходе проведения предварительных испытаний и отражающих изменение показаний силоизмерителя и тензорезисторов во времени (рис. 2.6 и 2.7).

По вертикальной оси диаграмм откладывались изменения косвенных характеристик деформаций и нагрузок, а по горизонтальной оси - порядок их следования.

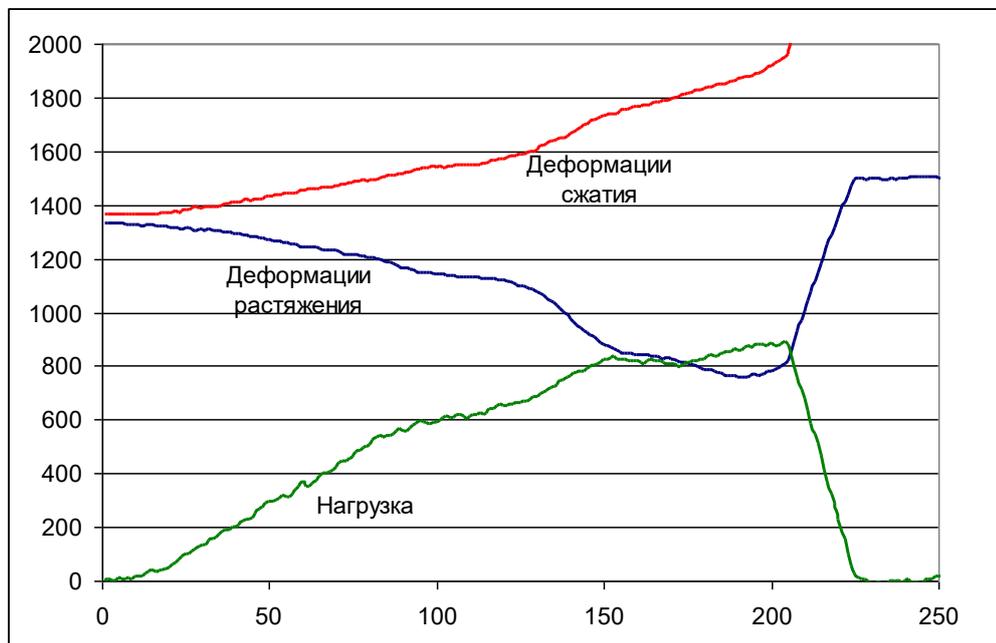


Рисунок 2.6 – Диаграммы изменения показаний датчиков во времени при испытании фибробетона с аморфнометаллической фиброй (1% об), отн. ед

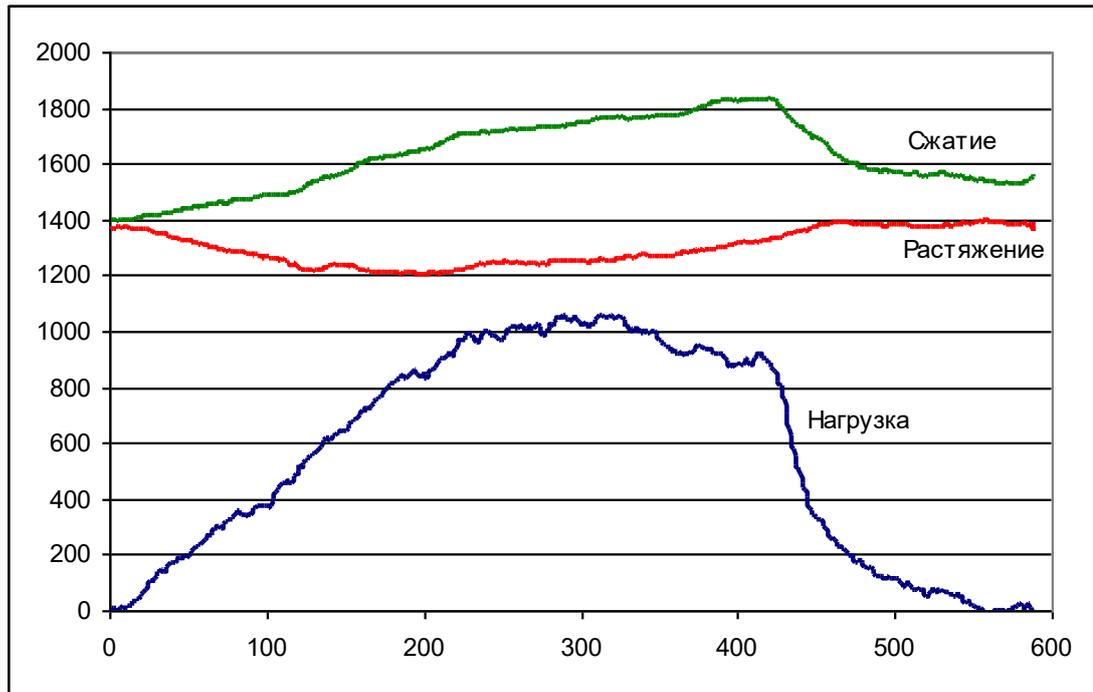


Рисунок 2.7 – Диаграмма изменения показаний датчиков во времени при испытании фибробетона с проволоочной фиброй (1,5% об), отн. ед

Так как испытания проводились с целью отработки методики, и получение достоверных характеристик материала не являлось основной задачей, в образцах не производилось начального надреза. По этой же причине к образцу приклеивалось по два тензорезистора – на верхней и нижней гранях. В процессе приложения нагрузки образец изгибался, верхняя его грань испытывала сжатие, нижняя – растяжение.

По диаграмме на рисунке 2.6 видно, что на начальном этапе приложения нагрузки деформации развиваются линейно, однако в интервале показаний 125 - 150 наблюдается отклонение от линейного характера распределения, что свидетельствует о переходе материала в состояние пластического деформирования и начале развития трещин. В определенный момент, нагрузка прилагаемая к образцу, начинает резко падать, что объясняется разрушением образца, показания же тензорезисторов не возвращаются к уровню начала эксперимента, так как трещина, разделившая образец, повредила их.

На рисунке 2.7 представлена аналогичная диаграмма, построенная в ходе испытания образца, армированного проволоочной фиброй в количестве 1,5% по объему. Однако в данном случае линия, характеризующая деформации

растяжения, плавно возвращается к показаниям, соответствующим началу испытания. Это означает, что трещина прошла, не повредив тензорезистор, и он продолжает адекватно контролировать изменение деформаций. Таким образом, показания тензорезисторов представляют интерес для точного контроля поведения образца лишь в зоне упругих деформаций. Однако, точки, в которых диаграммы перестают быть линейными, являются ключевыми при дальнейшей обработке данных и получении достоверной информации о свойствах исследуемого материала.

Учитывая это, для контроля перемещений образца на стадии пластического деформирования в разработанном приборе использован цифровой штангенциркуль, в конструкции которого предусмотрено подключение к шине данных. Штангенциркуль имеет точность, составляющую 0,01 мм.

В ходе дальнейших испытаний свойств материала образцов, в них производились начальные надрезы, в нижней грани, как того требует ГОСТ 29167, и поэтому для контроля упругих деформаций применялся только один тензорезистор, который приклеивался к верхней, сжимаемой, грани образца. Показания тензорезистора расчетным путем преобразовывались в прогибы при упругих деформациях, а пластические деформации контролировались штангенциркулем.

Тензорезистор, силоизмеритель и штангенциркуль с помощью несложного схемотехнического решения опрашиваются попеременно несколько раз в секунду, полученные данные о деформациях и нагрузках отправляются компьютер [59, 15, 16, 17] 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.

Технические характеристики разработанного устройства приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 - Технические характеристики разработанного устройства

Измеряемая величина	Стадия испытания	Измерительное устройство	Диапазон измерений	Погрешность
Прогиб образца	На стадии упругого деформирования	Тензорезистор	0-0,1 мм	$\pm 5 \cdot 10^{-4}$ мм
	На стадии пластического деформирования	Штангенциркуль	0-40 мм	$\pm 0,02$ мм
Прилагаемая нагрузка	В процессе всего испытания	Силоизмеритель	0-50 кН	0,1 кН

Детальное описание устройства и его работы, а также процесса обработки полученных данных, приведено в Приложениях А и Б.

2.2.2 Особенности определения модуля упругости фибробетона по экспериментальным данным

На рисунке 2.8 представлена диаграмма деформирования и разрушения фибробетона, построенная с применением разработанного устройства. Диаграмма построена в ходе испытания образца, армированного стальной проволочной фиброй при ее расходе, составляющем 2 % по объему.

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 расчетным путем преобразовывались в прогибы при упругих деформациях, а пластические деформации контролировались штангенциркулем.

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.

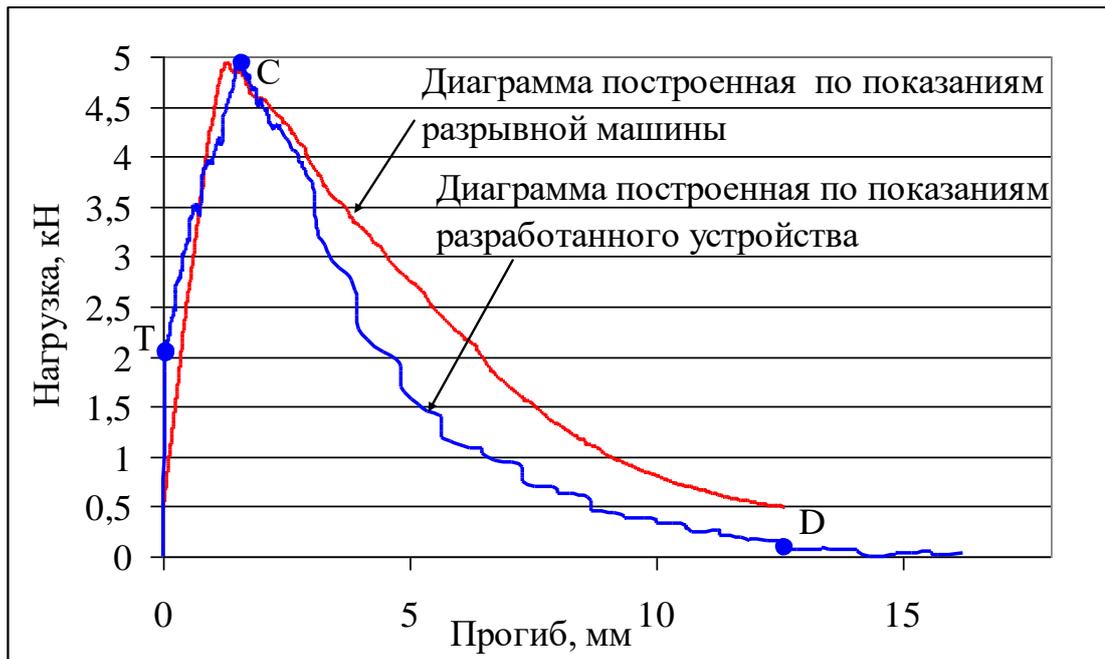


Рисунок 2.8 – Полные диаграммы зависимости прогибов фибробетонных образцов от прилагаемых нагрузок

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 участок диаграммы сливается с вертикальной осью. На рисунке 2.9 представлены диаграммы разрушения тех же фибробетонных образцов с использованием

полулогарифмической шкалы, что позволило более детально рассмотреть процесс их деформирования в упругой стадии и сделать соответствующие выводы:

1. На диаграмме, построенной с помощью разработанного устройства, совершенно 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.

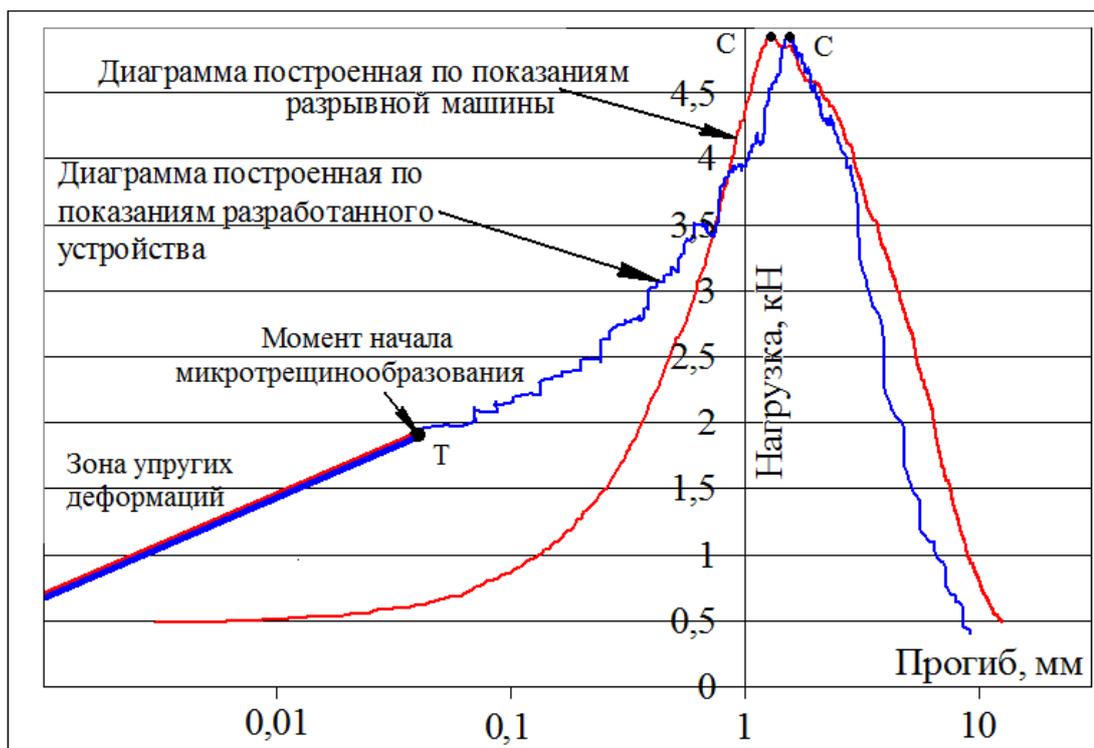


Рисунок 2.9 – Диаграммы деформирования фибробетонных образцов, построенные с применением различных устройств (шкала оси прогибов логарифмическая)

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 соответствующих расчетов (рисунок 2.10).

На диаграммах видно, что линии ОТ, 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.

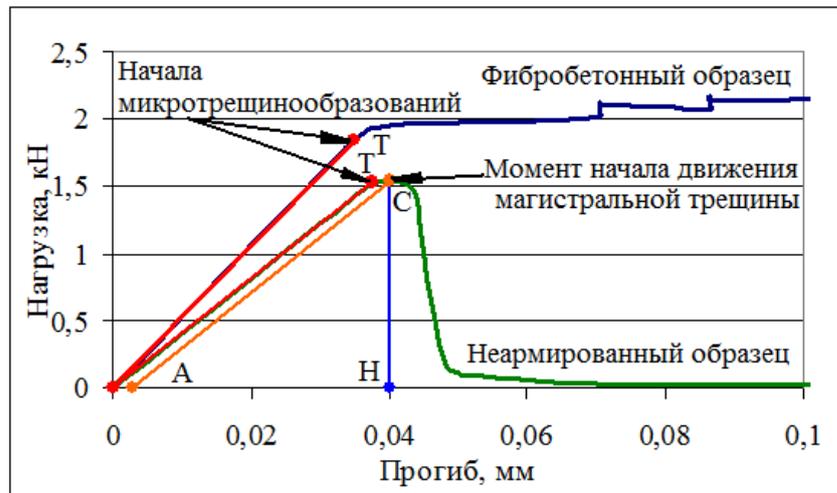


Рисунок 2.10 – Участки упругих деформаций диаграмм «нагрузка – прогиб» бетона и фибробетона

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 - 37970 МПа. Дальнейшие исследования показали, что модуль упругости фибробетонных образцов, в зависимости от вида и расхода фибры, составляет 32000-40000 МПа.

2.2.3 Методика определения коэффициента интенсивности напряжений и энергетических характеристик трещиностойкости по экспериментальным данным

С учетом использования в предлагаемой методике четырехточечной схемы нагружения, в расчет критического коэффициента интенсивности напряжений по

ГОСТ 29167 были внесены изменения: использована специально полученная для этого в [41] формула 2.1

$$K_c = \frac{3Pl}{tW^2} \sqrt{\pi a} (1,122 - 1,121\alpha + 3,74\alpha^2 + 3,873\alpha^3 - 19,05\alpha^4 + 22,55\alpha^5) \quad (2.1)$$

где W и t – полная высота и ширина образца, м; P – прилагаемая нагрузка, Н; l – расстояние от точки приложения нагрузки до ближайшей опоры, м; a – глубина начального надреза, составляющая, м; α – величина, рассчитываемая по формуле 2.2

$$\alpha = \frac{a}{W} \quad (2.2)$$

Кроме коэффициента интенсивности напряжений разработанная методика позволяет определять и другие характеристики трещиностойкости испытываемого материала. Для этого, полученная в ходе испытаний фибробетонного образца диаграмма зависимости прогибов от прилагаемых нагрузок условно разделяется на участки, описывающие разные этапы его деформирования и разрушения. Оперируя площадями под соответствующими участками диаграммы можно рассчитать удельные энергозатраты на деформирование до начала движения магистральной трещины (G_i), и удельные эффективные энергозатраты на статическое разрушение (G_f).

На рисунке 2.11 представлены участки диаграммы, построенной в ходе испытания образца, армированного проволочной фиброй в количестве 1,5% по объему, описывающие упругие и часть пластических деформаций.

На рисунке видны дополнительные построения, произведенные в соответствии с методикой, регламентированной ГОСТ 29167.

На диаграмме особое значение имеет положение точки Т, определяющая нагрузку, при которой начинается процесс образования и слияния микротрещин. Через эту точку проводится отрезок ОТ, характеризующий упругие деформации.

Не менее важной характеристикой при испытании фибробетона является момент начала движения магистральной трещины, который на диаграмме обозначен точкой С. Через эту точку проводится вертикальная линия СН. Рассчитав площади под отделенными участками графика, можно определить

условные удельные энергозатраты на деформирование до начала движения магистральной трещины (G_i^*) и условные удельные эффективные энергозатраты на статическое разрушение образца (G_f^*).

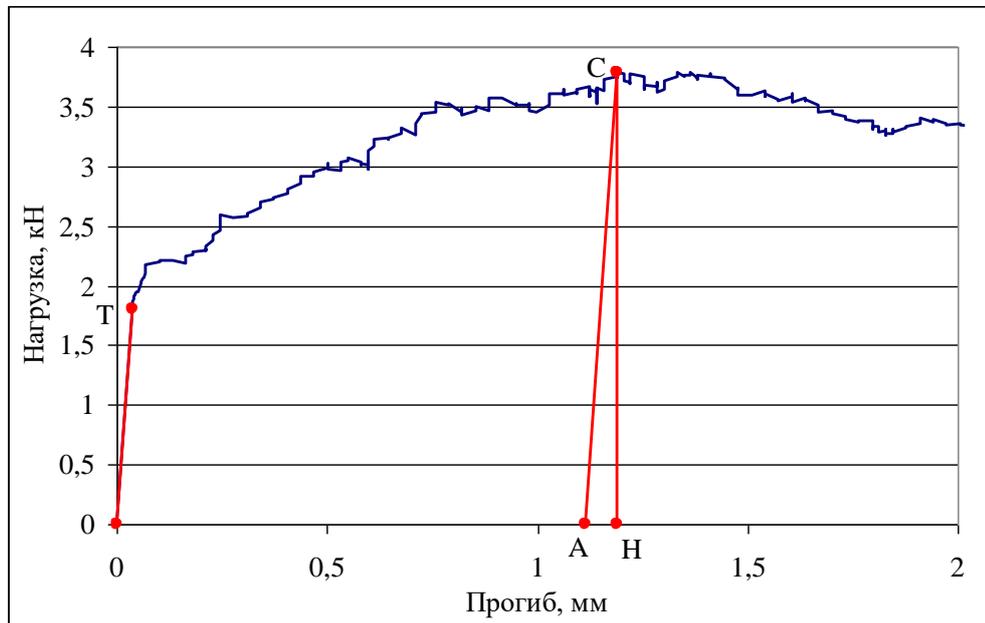


Рисунок 2.11 – Диаграмма деформирования фибробетонного образца с дополнительными построениями

На рисунке 2.12 представлена полная диаграмма деформирования того же образца, доведенного до разрушения.

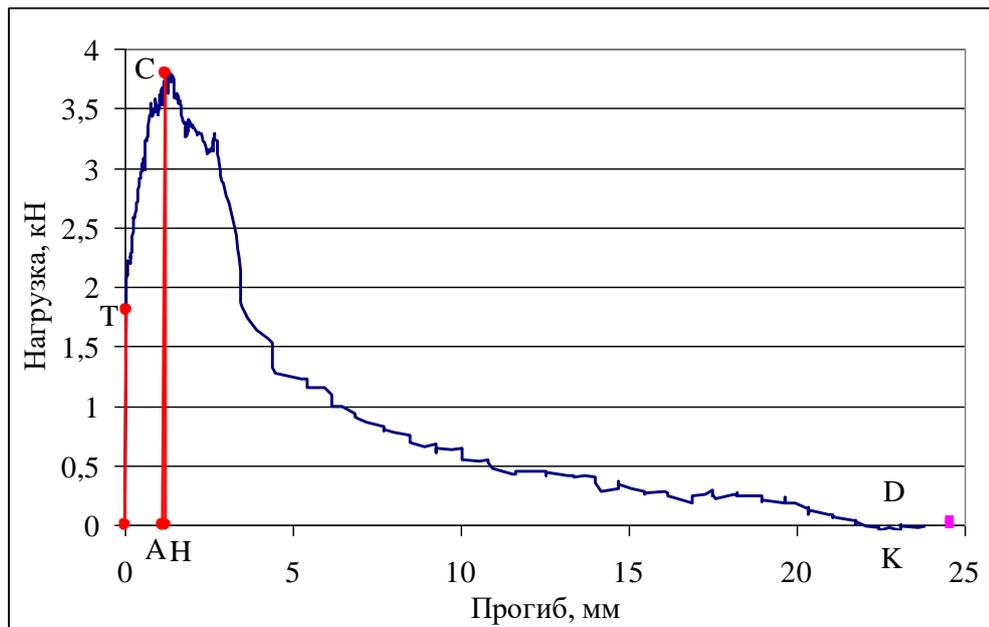


Рисунок 2.12 – Полная диаграмма разрушения фибробетонного образца

По диаграмме видно, что после образования магистральной трещины в точке С, нагрузка снижается по плавно нисходящей кривой линии, а не падает резко как при испытании контрольного образца, что отражает особый (вязкий) характер разрушения фибробетона и тесную связь бетонной матрицы с армирующими волокнами вплоть до полного разрушения. Площадь под этим участком диаграммы вносит большой вклад в значение энергозатрат на деформирование и разрушение после образования магистральной трещины, и позволяет оценить влияние того или иного вида фибры на вязкость разрушения фибробетона.

Таким образом, разработанная 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.

Выводы по второй главе:

1. В соответствии с целью и задачами исследования разработаны составы фибробетонных смесей и определена методика изготовления опытных образцов с использованием разных по составу и свойствам армирующих волокон, которые в настоящее время выпускаются в промышленных объемах или предлагаются к массовому производству и поэтому имеют практическое значение.

2. Разработано устройство для испытания трещиностойкости фибробетонных образцов, обеспечившее 20-кратное, по сравнению со стандартным методом, повышение точности измерений за счет минимизации влияния неровности их граней, а также исключения вдавливания упоров испытательного механизма в поверхность контактирующего с ними материала. Высокая точность результатов испытаний позволяет получать более детальную картину поведения фибробетона при нагружении и точно определять причины и характер его разрушения.

3. Разработана методика, позволяющая по результатам испытания одного фибробетонного образца, путем обработки диаграмм зависимостей прогибов от

прилагаемых нагрузок, определить его модуль упругости и характеристики трещиностойкости: коэффициент интенсивности напряжений, энергозатраты на деформирование и разрушение после образования магистральной трещины, что позволяет оценить влияние того или иного вида фибры на вязкость разрушения фибробетона.

3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПОСТРОЕНИЯ РАСЧЕТНЫХ ДИАГРАММ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ФИБРОБЕТОННЫХ ОБРАЗЦОВ ПОД НАГРУЗКОЙ

Проведенные исследования позволяют представить общий вид диаграммы деформирования фибробетонного образца под нагрузкой, обеспечивающей его изгиб вплоть до разрушения (рис. 3.1).

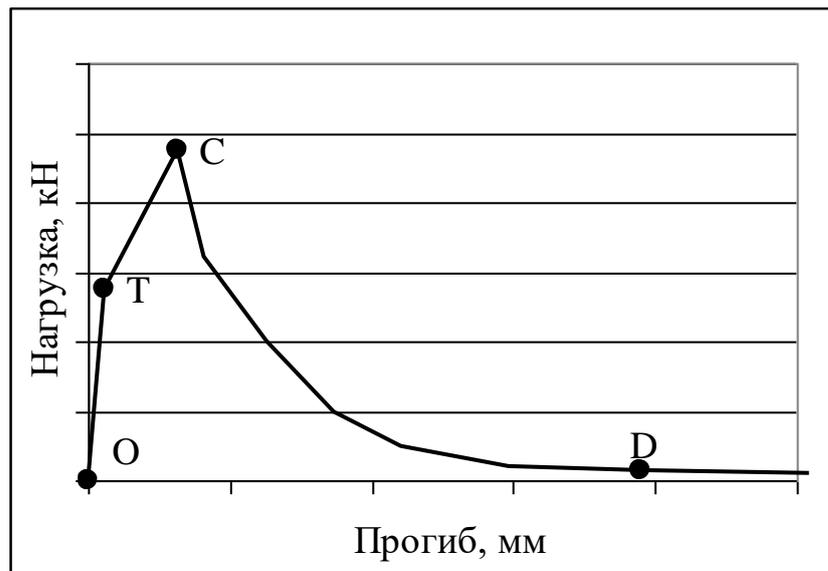


Рисунок 3.1 – Общий вид диаграммы деформирования фибробетонного образца

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 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

высокомодульные (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 в зависимости 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.

3.1 Вывод теоретических зависимостей для построения диаграмм деформирования фибробетонных образцов

Для получения расчетной диаграммы деформирования фибробетонного образца под нагрузкой вплоть до разрушения необходимо определить координаты точек T, C и D, которые и будут соответствовать нагрузкам (по вертикальной оси) и деформациям прогиба (по горизонтальной оси) в этих точках.

Определение величины нагрузки и прогиба в точке T

Процесс построения расчетной диаграммы деформирования следует начинать с линии OT, ограничивающей зону упругих деформаций. Известно, что такие деформации характеризуются прямой линией, угол наклона которой зависит от модуля упругости материала.

Очевидно, 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 T, можно определить по формуле (3.1):

$$P_T = \frac{f_T 48E_{fb}I}{l_o^3}. \quad (3.1)$$

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

Модуль упругости фибробетона можно определить расчетным путем с использованием выражений, представляющих собой развитие одного из известных законов теории композиционных материалов - "правила смесей" и связывающих модули упругостей всех компонентов, входящих в состав фибробетона с их содержанием в объеме образца. Так, например, в [82] описывается возможность использования для расчета модуля упругости фибробетона модели Фойхта (формула 3.2).

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

где: E_b и E_f - модули упругости бетона (матрицы) и фибры; μ_b и μ_f - объемные доли бетона и фибры в составе композита.

Приведенная формула, как и другие подобные, не учитывает взаимного влияния компонентов, в связи с чем наблюдается некоторое расхождение с экспериментальными данными. Автор упомянутой выше работы предлагает усовершенствовать формулу введением в нее экспериментального комплексного коэффициента, учитывающего взаимное влияние бетона и фибры, наличие между ними контактной зоны цементного камня с улучшенными свойствами, а также еще несколько возможных факторов. При этом предлагается разным видам фибры присваивать свой коэффициент, например, для стальной проволочной фибры волнового профиля он составляет 1,23. Сравнение полученных расчетных данных с экспериментальными указывает на незначительные расхождения между ними, что подтверждает правомерность примененного подхода. Таким образом, для определения модуля упругости фибробетона может быть использована формула (3.3)

$$E_{fb} = \mu_b E_b + \varphi \mu_f E_f, \quad (3.3)$$

где: φ - экспериментальный комплексный коэффициент.

Определение величины нагрузки и прогиба в точке С

Нагрузку в точке С можно найти, выражая из известной формулы прочности бетонного образца на растяжение при изгибе (формула 3.4)

$$P_c = \frac{2bh^2 R_{fb}}{3l_o}, \quad (3.4)$$

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

При этом, для расчета прочности фибробетона, армированного высокомодульной фиброй, в зависимости от характера разрушения композита могут применяться формулы (3.5) или (3.6), основанные на принципах «правила смесей» [87]:

- если разрушение происходит в результате нарушения сцепления и последующего вытягивания волокон из матрицы (формула 3.5)

$$R_{fb} = \frac{2\tau_f \mu_f}{d} + 3,5R_{кз} \mu_f + R_b(1 - 4,5\mu_f) \quad (3.5);$$

- при разрушении образца в результате разрыва волокон (формула 3.6)

$$R_{fb} = R_f \mu_f + 3,5R_{к.з.} \mu_f + R_b(1 - 4,5\mu_f), \quad (3.6)$$

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 контактной зоны (формула 3.7):

$$R_{fb} = 3,5R_{кз} \mu_f + R_b(1 - 4,5\mu_f), \quad (3.7)$$

Для определения координаты, соответствующей точке С по оси прогибов, предлагается формула (3.8), полученная путем выражения этой величины из уравнения (3.1) после внесения некоторых изменений, связанных с тем, что в данный момент рассматривается зона пластического деформирования (формула 3.9):

$$f_C = \frac{P_C l_o^3}{48 E_{fb}^1 I}, \quad (3.9)$$

где: E_{fb}^1 - модуль деформации фибробетона, определяемый по формуле 3.10

$$E_{fb}^1 = \nu_f E_{fb}, \quad (3.10)$$

где: ν_f - коэффициент упругопластичности в момент, предшествующий разрушению фибробетона.

Известно, что при определении модуля деформации (модуля упругопластичности) бетона значение (ν) изменяется от 1,0 (при упругой работе материала) до 0,15 (в момент, предшествующий разрушению). Способность фибробетона к пластическому деформированию гораздо выше, чем у неармированного бетона и даже чем у железобетона, поэтому значение коэффициента упругопластичности при расчете модуля деформации композита должно быть гораздо ниже. В диссертационном исследовании предлагается определять его величину в зависимости от объемной доли армирующих волокон по графику, полученному путем статистической обработки экспериментальных данных, поступивших в процессе испытания фибробетонных образцов (рис.3.2).

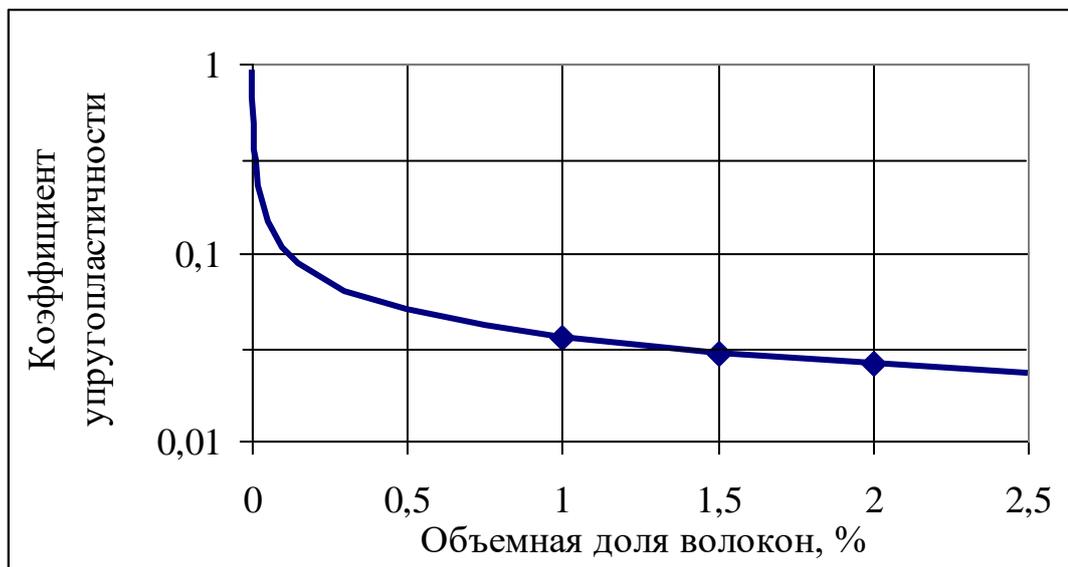


Рисунок 3.2 – Коэффициент упругопластичности фибробетона

Введение в обычный бетон низко модульных волокон практически не оказывает влияния на его поведение под нагрузкой в упругой и упругопластической стадии деформирования, поэтому для таких фибробетонов

коэффициент упругопластичности предлагается принимать в пределах 0,15 – 0,25, в зависимости от процента армирования.

Определение величины нагрузки и прогиба в точке D

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 или собственной прочностью волокон, когда их связь с матрицей сохраняется вплоть до разрушения. При этом очевидно, что нагрузка будет снижаться от наивысшей точки С до нуля. Таким образом оказывается неизвестной только величина прогиба образца, соответствующего точке D.

При выводе уравнений для определения данной характеристики исходили из следующих соображений. Площадь под кривой CD представляет собой энергетические затраты на статическое разрушение материала в результате движения магистральной трещины – вязкость разрушения фибробетона (W_{fb}), которая определенным образом зависит от вида и свойств исходных компонентов, объемного соотношения между ними, главным образом, от степени насыщения матрицы армирующими волокнами, и в конечном счете определяется прочностью границ раздела фаз. При этом, если длина волокон больше некоторой критической длины ($l_f > l_c$), то большая их часть в момент разрушения композита разрывается, и вязкость разрушения будет невысокой, а если ($l_f < l_c$), то основной вклад в сопротивление композита разрушению будет вносить энергия, затрачиваемая на вытягивание волокон из матрицы. Исходя из этого, расчетные значения вязкости разрушения фибробетона, в зависимости от характеристик волокон и матрицы, а также степени их взаимодействия, могут быть определены следующим образом [75]:

1. При прочной связи фибры с бетонной матрицей, когда большая часть волокон при максимальных напряжениях разрывается, а другие волокна, концы

которых расположены относительно растущей трещины на расстояниях $x \leq l_c/2$, вытягиваются из матрицы по формуле 3.11

$$W_{fb} = N \int_0^{l_c/2} W_f \frac{dx}{l_c/2}, \quad (3.11)$$

где: N – число фибр, вовлеченных в процесс вытягивания из матрицы можно определить по формуле 3.12:

$$N = \frac{\frac{l_c}{l_f} \mu_f b h}{\frac{\pi d^2}{4}}, \quad (3.12)$$

где: W_f - энергозатраты на вытягивание одного волокна (фибры), которые согласно [75] составляют (формула 3.13)

$$W_f = \frac{l_c}{l_f} \frac{\pi d l_c^2 \tau}{12}, \quad (3.13)$$

После подстановки значений N и W_f в (3.13) и проведения соответствующих преобразований получим формулу 3.14:

$$W_f = \frac{l_c^4 \pi d \tau \mu_f b h}{12 l_f^2}, \quad (3.14)$$

2. При отсутствии прочной связи фибры с бетонной матрицей, когда длина фибры меньше критической длины ($l_f < l_c$), доля вытянутых волокон будет равна 1, а энергия, затрачиваемая на их вытягивание при разрушении композита составит (формула 3.15):

$$W_f = N \int_0^{l_f/2} W_f \frac{dx}{l_f/2}, \quad (3.15)$$

В этом случае число фибр, вытягиваемых из матрицы можно определить по формуле 3.16:

$$N = \frac{b h \mu_f}{\frac{\pi d^2}{4}}, \quad (3.16)$$

энергозатраты на вытягивание одного волокна [75] определяются по формуле 3.17:

$$W_f = \frac{\pi d l_f^2 \tau}{24}, \quad (3.17)$$

и вклад фибры в вязкость разрушения фибробетона составит (формула 3.18):

$$W_{fb} = \frac{l_f^2 \tau b h \mu_f}{6d}, \quad (3.18)$$

Выше указывалось, что рассматриваемый процесс вытягивания волокон описывается линией CD, притом нагрузка, соответствующая точке D, равна нулю. Соединив точки C и D, получим под этой линией прямоугольный треугольник, площадь которого равна W_{fb} . При известной величине нагрузки в точке C (высота треугольника), прогиб, соответствующий точке D, можно найти по формуле 3.19

$$f_D = 2 \frac{W_{fb}}{P_C} + f_C \quad (3.19)$$

Таким образом, для построения нисходящего участка диаграммы, в зависимости от длины фибры, следует применить формулы (3.20) или (3.21), которые позволяют определить прогиб в точке D:

- при длине фибры меньше критической, когда вытягиваются все волокна

$$f_D = 2 \frac{l_f^2 \tau b h \mu_f}{6d P_C} + f_C \quad (3.20)$$

- при длине фибры больше критической, когда волокна при разрушении композита в основном разрываются, и вытягивается из матрицы лишь некоторая их часть

$$f_D = 2 \frac{l_c^4 d \tau b h \mu_f}{12 l_f^2 P_C} + f_C \quad (3.21)$$

где: l_c – критическая длина фибры.

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 проволочная фибра имеет волновой профиль, который на отрезке TC, частично распрямляется, что было учтено в процессе построения соответствующей диаграммы.

Ниже представлены примеры диаграмм, полученных расчетным путем с применением предлагаемых теоретических зависимостей.

3.2 Примеры построения диаграмм деформирования и разрушения образцов, изготовленных с применением различной фибры

3.2.1 Построение расчетных диаграмм деформирования образцов, армированных стальной проволочной фиброй

В данном случае в качестве примера рассматривается процесс построения диаграммы деформирования фибробетонного образца размером 70x70x280 мм, армированного стальной проволочной фиброй, характеристики которой представлены в главе 2 диссертации, при ее расходе 2% по объему. Расстояние между точками приложения нагрузки при испытании на изгиб (база) составляет 266 мм, в нижней (растянутой) грани образца имеется начальный надрез глубиной 25 мм.

Вначале следует рассмотреть зону упругих деформаций. Известно, что такие деформации характеризуются прямой линией, и угол ее наклона зависит от модуля упругости фибробетона, который определяется по формуле (3.3) и в данном случае составляет 35566МПа.

Учитывая, что процесс микротрещинообразования в фибробетоне вне зависимости от вида и расхода волокон начинается при одинаковом с неармированным образцом прогибе ($f_T = 0.037$ мм), можно, используя формулу (3.1), найти нагрузку, соответствующую точке Т, которая составит 1,78кН. При этом момент инерции для прямоугольного рабочего сечения образца вычислялся по формуле 3.22

$$I = \frac{bh^3}{12}. \quad (3.22)$$

Полученные таким образом нагрузка и прогиб представляют собой координаты точки окончания действия упругих деформаций и начала образования магистральной трещины (точка Т).

При определении координат точки С, соответствующей значению максимальной нагрузки, воспринимаемой образцом, и образованию магистральной трещины, важно заметить, что используемые при его изготовлении волокна имеют волновой профиль, при этом длина волны составляет 5мм, а ее высота 1,5мм. Ранее, при проведении испытаний таких образцов было отмечено выкрашивание бетона из образовавшейся трещины с одновременным распрямлением попадающей в эту трещину волны стальной фибры. Только после этого происходило нарушение сцепления на границе фибра-матрица и начинался процесс их вытягивания из бетона. В случае применения других видов фибр такой особенности не наблюдалось. Удлинение фибры при распрямлении волны, исходя из ее геометрических размеров, составляет 0,8 мм. Таким образом, с учетом уже имеющегося начального прогиба (0,037 мм) его значение в точке С составит 1,26мм. Именно при этом прогибе будет наблюдаться наибольшее значение прилагаемой нагрузки, которое можно вычислить по формуле (3.5), имея в виду, что прочность контактной зоны, учитывающую степень улучшения свойств цементного камня вблизи поверхности волокон, можно принять как в [87] $R_{кз} = 1,4R_6$, а прочность сцепления фибр с матрицей определить по одной из предлагаемых методик.

Прочность сцепления волокон с бетоном зависит от множества факторов: от длины, диаметра и формы применяемой фибры, качества их поверхности, от материала из которого они изготовлены, а также от состава матрицы, ее структуры и прочности.

Существует несколько различных методик определения численного значения прочности сцепления волокон с матрицей. Некоторые методы созданы для определения этой характеристики для традиционной стержневой арматуры, существуют методы для испытаний композитной арматуры, но есть и такие, которые созданы специально для испытаний фибробетона. Как правило методы включают некоторую зависимость, в которую нужно подставлять данные, полученные экспериментальным путем. В большинстве случаев авторы таких работ отмечают частный характер предлагаемых зависимостей и настаивают на необходимости определения прочности сцепления армирующих элементов экспериментальным путем, поскольку она связана с очень большим числом факторов учесть которые аналитически с большой точностью оказывается затруднительно.

В диссертационной работе для характеристики прочности сцепления использовать данные, полученные с применением метода, разработанного Пухаренко Ю.В. [87] и предполагающего испытания прочности фиброцементных образцов, изготовленных из цементного теста нормальной густоты с применением исследуемой фибры. Испытанию подвергаются несколько серий образцов, отличающихся количеством фибры. При этом определяется такой ее расход, при увеличении которого наблюдается устойчивый рост прочности фиброцемента. В литературе известны результаты испытаний стальной проволочной фибры по данному методу [82]. В данном случае прочность сцепления составила 3,08 МПа при использовании цемента марки М500Д0.

С учетом приведенных данных, максимальная нагрузка, действующая на образец в процессе его испытания (координата точки С по вертикальной оси) составила 4,756 кН.

После достижения разрушающей нагрузки в наивысшей точке С диаграммы, она начинает снижаться. В этот момент магистральная трещина пронизывает все рабочее сечение образца, и таким образом исключает матричную составляющую композита из работы. Безусловно матрица продолжает воспринимать нагрузку, но только посредством передачи ее волокнами, то есть работа матрицы состоит в обеспечении прочности сцепления (τ). Данный процесс разрушения фибробетонного образца описывается на диаграммах линией CD. Очевидно, что в случае развития описанного процесса нагрузка будет снижаться с наивысшей точки С до нуля. Таким образом оказывается неизвестной только прогиб образца f_D , который может быть определен из выражения (3.20), так как в длина используемых волокон не превышает критическую ($l_f < l_c$). В результате логарифмической аппроксимации полученного отрезка CD получаем плавную кривую линию нисходящей ветви расчетной диаграммы.

Полученная таким образом диаграмма представлена на рисунке 3.3.

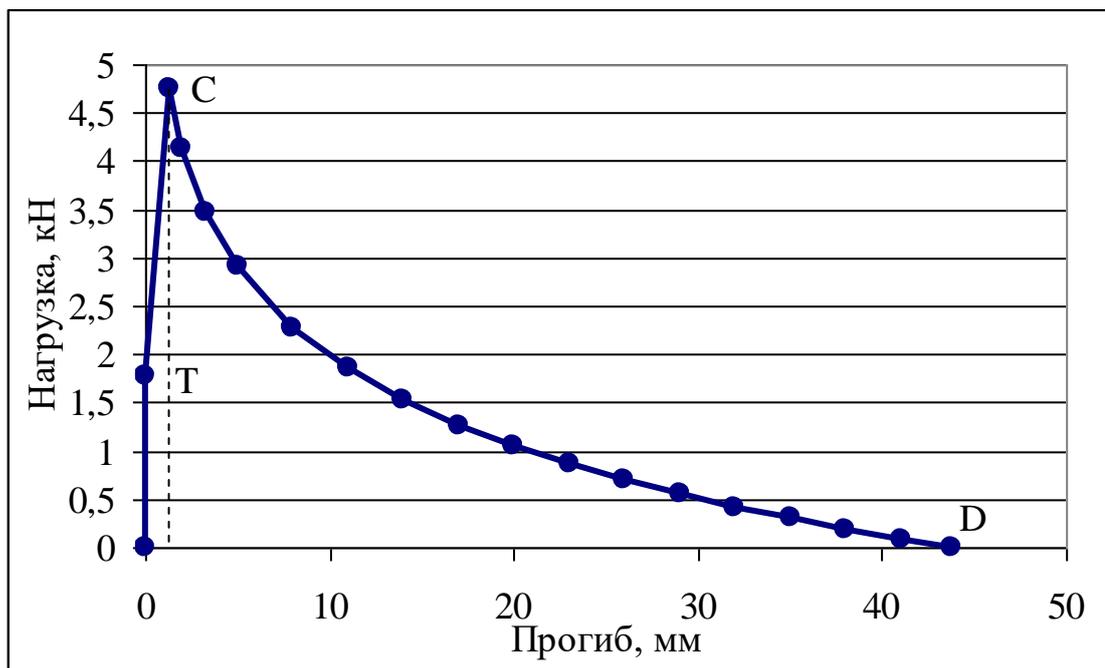


Рисунок 3.3 - Расчетная диаграмма деформирования и разрушения фибробетона, армированного стальной проволочной фиброй в объеме 2%

На рисунке 3.4 представлены аналогичные расчетные диаграммы разрушения фибробетонных образцов, изготовленных с применением стальной проволочной фибры в количестве 1 и 2 % по объему.

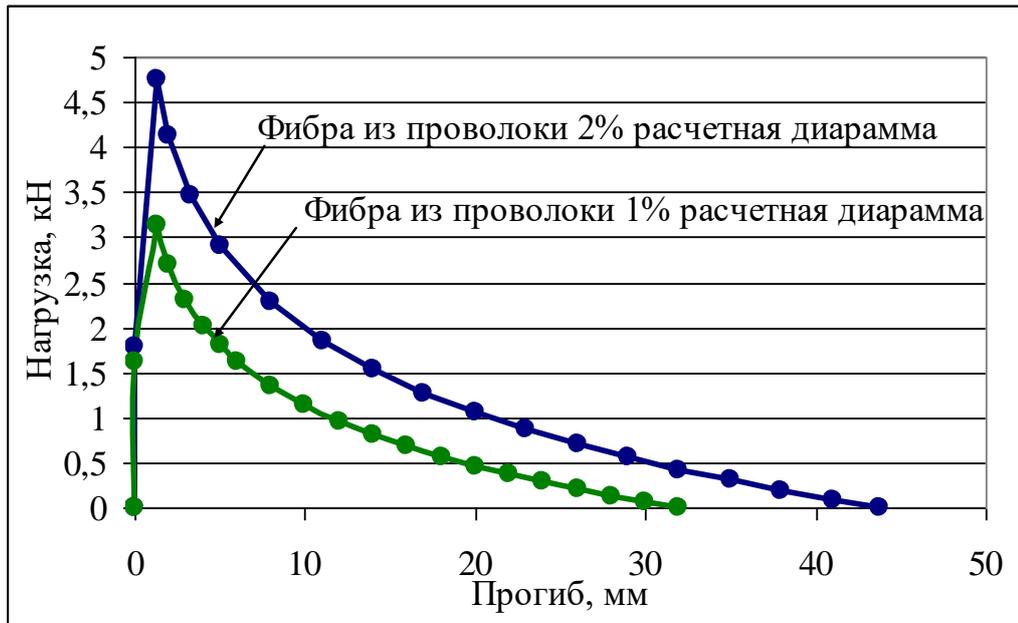


Рисунок 3.4 - Расчетные диаграммы деформирования и разрушения фибробетонных образцов с применением стальной проволоки фибры

Представленные диаграммы достаточно точно отражают характер поведения фибробетона под нагрузкой вплоть до разрушения и в этом смысле совпадают с диаграммами, полученными в ходе предварительных экспериментов и найденными в технической литературе, что подтверждает правильность выбранных подходов и справедливость предложенных допущений.

3.2.2 Построение расчетных диаграмм деформирования образцов, армированных синтетической фиброй

Особенностью синтетической фибры является низкий по сравнению с бетоном модуль упругости, в связи с чем ее введение в состав композита не приводит к заметному увеличению прочности и трещиностойкости при статической нагрузке. В то же время, ее вклад является весьма заметным в обеспечении вязкости разрушения фибробетона, то есть в пределах нисходящей ветви диаграммы (линия CD). Кроме того, использование такой фибры приводит к улучшению структуры и, в связи с этим, некоторому повышению прочностных характеристик бетона за счет образования вблизи весьма развитой поверхности волокон контактных зон цементного камня повышенной плотности и прочности.

С учетом этих положений в данном разделе приведены примеры построения расчетных диаграмм фибробетона, армированного низко модульными синтетическими волокнами «Kalcifil S» длиной 12мм и диаметром 25мкм при расходах, равных 1,0% и 0,5% по объему. Модуль упругости волокон в соответствии со справочными данными принят равным 8000МПа, прочность сцепления фибры с матрицей (τ), определенная по выше приведенной методике, составила 0,11 МПа.

Расчет координат точек Т, С и D для построения диаграмм деформирования осуществлялся по уравнениям (3.4), (3.9), (3.20) с учетом выражения (3.3), (3.7) и (3.18), представленным в разделе 3.1.

Полученные расчетные диаграммы деформирования и разрушения фибробетонных образцов представлены на рисунке 3.4.

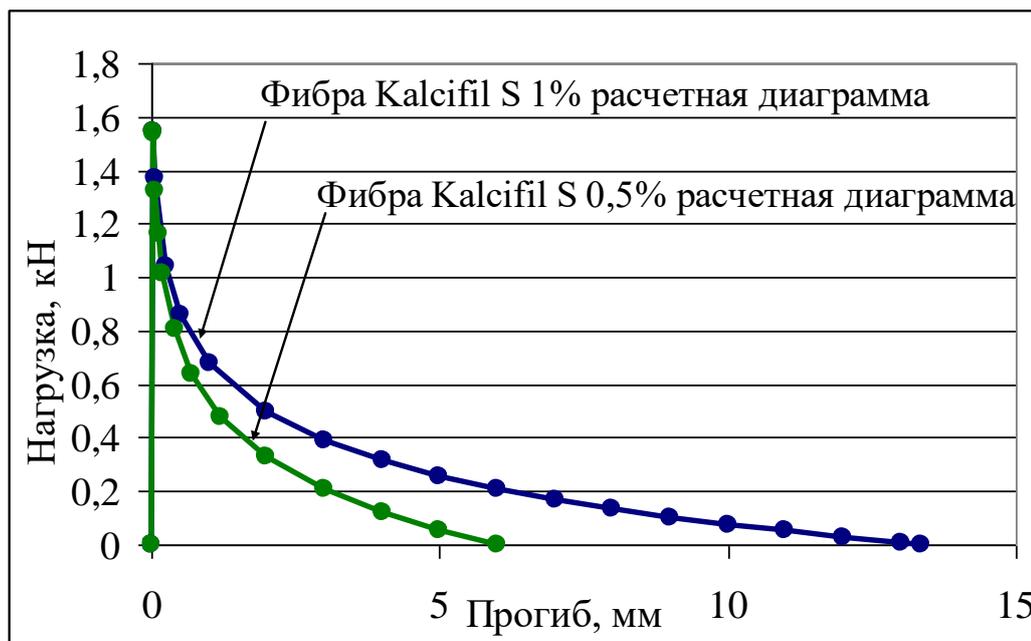


Рисунок 3.5 - Расчетные диаграммы деформирования и разрушения фибробетонных образцов с применением низко модульной синтетической фибры

3.2.3 Построение расчетных диаграмм деформирования образцов, армированных аморфной металлической фиброй

Аморфнометаллическая фибра является сравнительно новой разновидностью дисперсной арматуры и отличается от других видов стальных

волокон весьма развитой боковой поверхностью, благодаря чему имеет повышенное сцепление с бетонной матрицей. Этим и еще некоторыми особенностями объясняется столь пристальное внимание к ней со стороны специалистов. В ходе предварительных экспериментов установлено, что разрушение фибробетона, изготовленного с применением аморфной металлической фибры, имеющей прочную связь с окружающим бетоном, происходит в результате разрыва большей части волокон, напряжения в которых достигают предела их прочности, и вытягивания остальных, концы которых находятся на расстоянии от края растущей трещины, не превышающем половины критической длины фибры.

Как и в предыдущих примерах, построение расчетной диаграммы зависимости прогибов от прилагаемых нагрузок фибробетонных образцов, изготовленных с применением аморфной металлической фибры, следует начать с зоны упругих деформаций, то есть с определения координаты точки Т по формуле (3.1). При этом следует учесть, что модуль упругости аморфной металлической фибры составляет 180000 МПа, а экспериментальный комплексный коэффициент $\varphi = 4,61$ [82]. Такая значительная величина поправочного коэффициента объясняется особенностями структуры и свойств аморфных сплавов, из которых получается фибра, демонстрирующая, согласно имеющимся экспериментальным данным, высокую прочность (996 МПа) при осевом растяжении. Однако в случае внецентренного растяжения таких волокон максимальная нагрузка, которую они способны воспринять, несколько снижается. Дело в том, что в процессе изготовления фибры охлаждающий диск, на котором производится аморфизация расплава, придает поверхности фибры микрорельеф, способствующий повышению ее анкеровки в матрице. Это безусловно способствует достижению высоких прочностных характеристик фибробетона, но одновременно приводит к образованию многочисленных концентраторов напряжений по длине волокон, которые и обуславливают снижение максимальной нагрузки, воспринимаемой ими в случае внецентренного растяжения. При формовании образцов фибры распределяются по объему хаотично, в произвольном порядке, и совершенно

очевидно, что их некоторая часть будет подвергаться внецентренному растяжению.

В рассматриваемом примере зона упругих деформаций образца, армированного аморфнометаллической фиброй в количестве 1% по объему, заканчивается при нагрузке равной 1,906 кН и прогибе 0,037мм.

Процесс микротрещинообразования фибробетонного образца под нагрузкой характеризуется линией ТС, для построения которой необходимо определить координаты точки С, являющейся вершиной диаграммы и определяющей прочность фибробетона на растяжение при изгибе. Для расчета нагрузки в этой точке следует применить формулу (3.4) с учетом выражения (3.6). При этом, для приближения полученного результата к реальному с учетом указанных выше особенностей аморфной фибры, предлагается ввести поправочный коэффициент q , который можно рассчитать в зависимости от объемной доли волокон по формуле 3.23

$$q = -35\mu_f + 1,3. \quad (3.23)$$

В результате произведенных вычислений при расходе волокон, равном 1% по объему, нагрузка в точке С составила 3,481 кН.

На следующем этапе определялся прогиб образца, соответствующий точке С, который в результате расчета по формуле (3.9) оказался равным 0,409 мм.

В виду того, что аморфнометаллическая фибра является сравнительно новым видом армирующих волокон, и ее влияние на поведение фибробетона под нагрузкой изучено мало, проведена проверка полученного результата с учетом формул и геометрических построений, регламентированных ГОСТ 29167.

На рисунке 3.6 схематично изображена часть диаграммы, отражающей поведение фибробетонного образца при изгибе, а именно зоны упругих и упругопластических деформаций, которые приводят к образованию магистральной трещины.

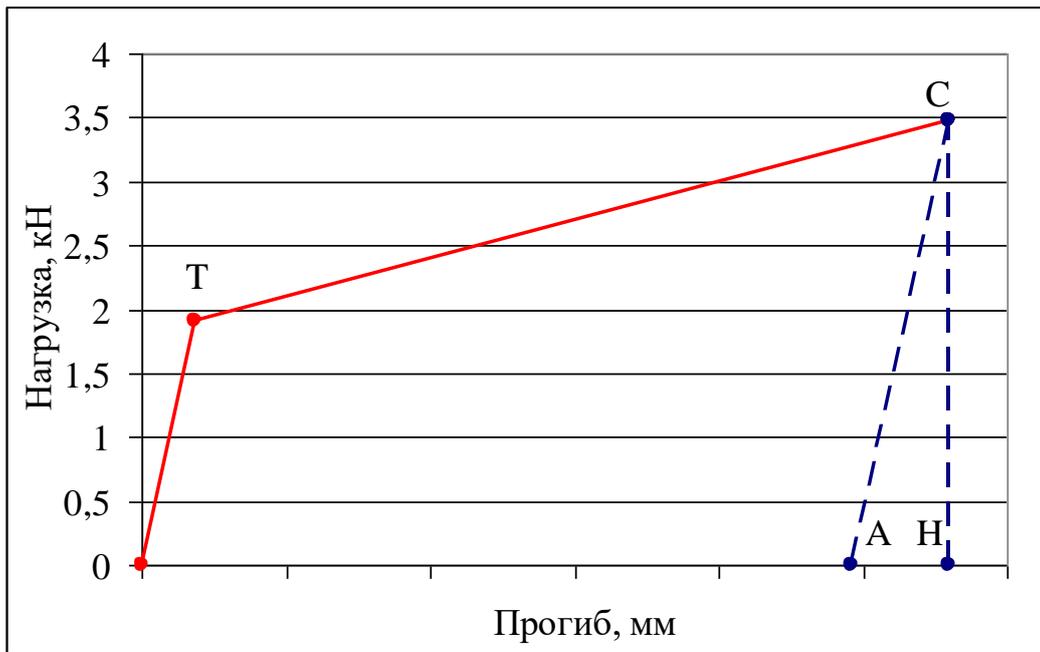


Рисунок 3.6 – Схематичное изображение части диаграммы деформирования фибробетонного образца, изготовленного с применением аморфной металлической фибры

На рисунке линия СН представляет собой перпендикуляр к горизонтальной оси, проведенный через точку С, а линия СА проходит через точку С параллельно линии ОТ. Площадь фигуры ОТСА определяет энергозатраты на процессы развития и слияния микротрещин до формирования магистральной трещины, а площадь треугольника АСН - энергозатраты на упругое деформирование до начала движения магистральной трещины. Сумма этих площадей означает удельные энергозатраты на статическое разрушение фибробетонного образца, которые по ГОСТ 29167 вычисляются по формуле 3.24

$$G_i = \frac{W_m + W_e}{t(b - a_0 - a_{0t})}, \quad (3.24)$$

где: W_m - энергозатраты на процессы развития и слияния микротрещин до формирования магистральной трещины статического разрушения; W_e - энергозатраты на упругое деформирование до начала движения магистральной трещины статического разрушения; t - высота образца; b - ширина образца; a_0 - начальный надрез в растянутой грани образца; a_{0t} - начальный надрез в сжатой грани образца (допускается не образовывать).

Таким образом, горизонтальная координата точки С, то есть величина прогиба образца, складывается из отрезков ОА и АН. Для нахождения длины АН детально рассмотрим участок диаграммы, характеризующей упругие деформации образца (рис.3.6).

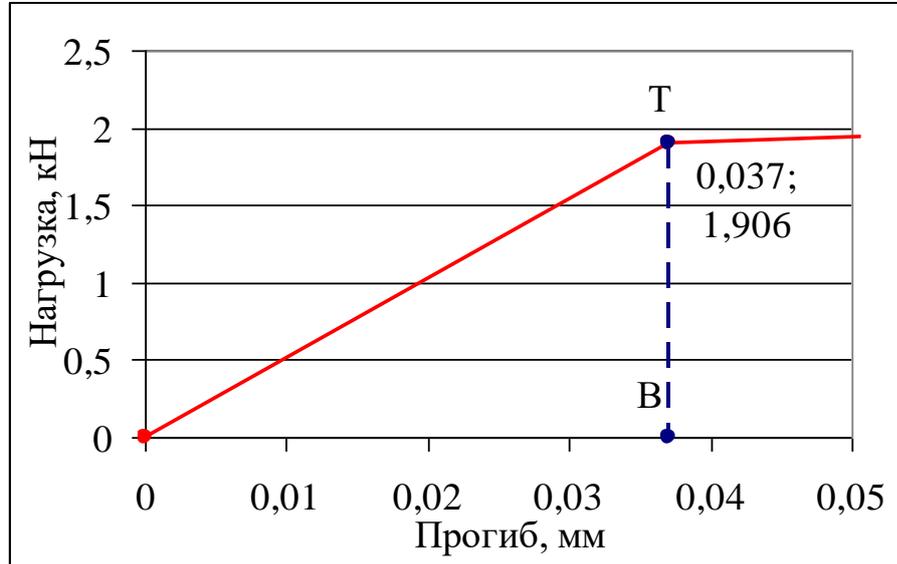


Рисунок 3.6 - Схематичное изображение зоны упругих деформаций фибробетонного образца

Угол TOB с учетом полученных ранее значений нагрузки и прогиба, соответствующих точке Т, составляет $88,89^\circ$. Исходя из подобия треугольников OTB и ACH и величины нагрузки в точке С, равной 3,481 кН, длина отрезка АН составляет 0,068 мм. Аналогично можно определить длину ОА. Для этого следует рассмотреть фигуру OTCA , осуществив дополнительные построения: провести линию ON , совпадающую с линией OT , горизонтальную линию NC и горизонтальную линию TF , как это показано на рисунке 3.7.

Получившаяся фигура ONCA представляет собой параллелограмм, площадь которого равна энергозатратам на процессы развития и слияния микротрещин и может быть найдена по формуле (3.25)

$$W_m = OA \cdot AC \cdot \sin TOA \cdot 0,76228, \quad (3.25)$$

Коэффициент, входящий в формулу, получен из следующих соображений. Если принять площадь ONCA за единицу, то с учетом соотношения длин отрезков OT и AC площадь OTFA составит 52,456%, а TNCF - 47,544%. При этом очевидно, что линия TC делит TNCF пополам. Таким образом, площадь фигуры

ОТСА составляет 76,228% площади ONCA, и длина отрезка ОА с учетом (3.24) и (3.25) может быть найдена по формуле 3.26

$$OA = \frac{G_i t (b - a_0) - W_e}{AC \cdot \sin TOA \cdot 0,76228}, \quad (3.26)$$

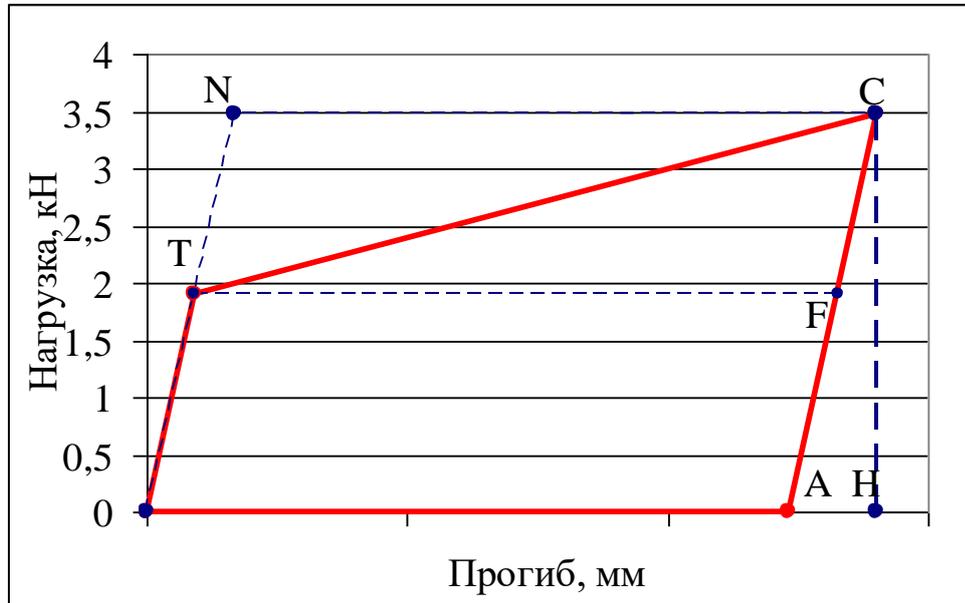


Рисунок 3.7 - Фигура ОТСА на схематичной диаграмме деформирования фибробетона

В соответствии с методикой обработки получаемых диаграмм по ГОСТ 29167 удельные энергозатраты G_i можно определить, выражая из формулы 3.27

$$K_i = \sqrt{G_i E_b}, \quad (3.27)$$

где: K_i - критический коэффициент интенсивности напряжений, который в свою очередь можно выразить из уравнения (3.28)

$$R_{bt} = \frac{0,77 K_i}{\sqrt{2,6 \pi d_{am}}} \quad (3.28)$$

где: R_{bt} - прочность материала на осевое растяжение; d_{am} - максимальная крупность применяемого в бетоне заполнителя.

Таким образом, учитывая, что в данном случае модуль упругости и прочность бетона следует заменить на аналогичные показатели фибробетона, получим следующее выражение для вычисления прогиба образца, соответствующего точке С (формула 3.29)

$$OH = \frac{\left(\frac{(R_f \mu_f + 3,5R_{кз} \mu_f + R_b(1 - 4,5\mu_f)) \sqrt{2,6\pi d_{am}}}{0,77} \right)^2 \cdot t(b - a_0) - W_e}{E_{fb}} + AH \cdot \frac{1}{AC \cdot \sin TOA \cdot 0,76228} \quad (3.29)$$

В результате вычислений по данной формуле длина отрезка ОН составляет 0,407мм, то есть практически совпадает с величиной прогиба, определенного по формуле (3.9).

Для определения максимального прогиба, соответствующего точке D на расчетной диаграмме деформирования фибробетона, армированного аморфнометаллическими волокнами, длина которых в данном случае превышает критическую, следует воспользоваться уравнением (3.21)

$$f_D = 2 \frac{l_c^4 d t b h \mu_f}{12 l_f^2 P_C} + f_C \quad (3.21)$$

При этом, критическая длина аморфнометаллической фибры, согласно [82], составляет 7,6 мм, а значение прочности сцепления фибры с матрицей можно определить из условия равновесия внутренних и внешних сил (формула 3.30)

$$\tau = \frac{d\sigma}{2l_c}, \quad (3.30)$$

где: σ - нормальное напряжение в аморфной металлической фибре при максимальной нагрузке, которое по литературным данным [82] составляет 870 МПа.

После этого нисходящая ветвь диаграммы строится так же как и в предыдущих случаях.

Полученные в результате теоретических расчетов диаграммы представлены на рисунке 3.8.

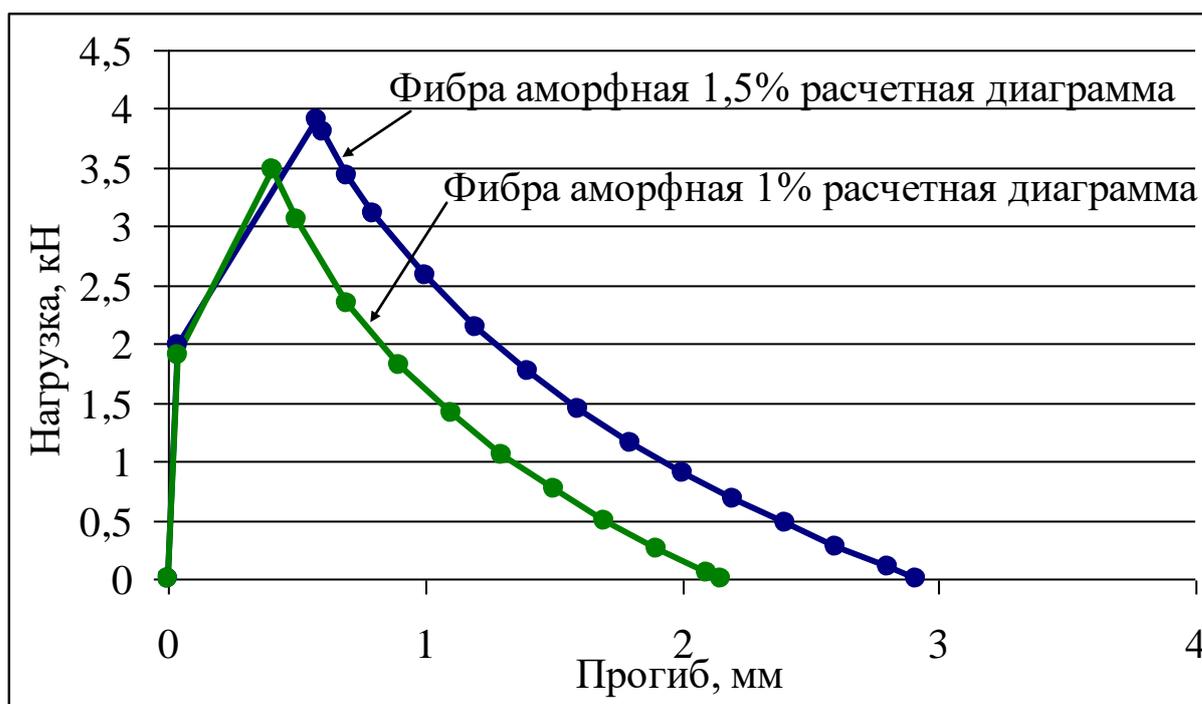


Рисунок 3.8 - Расчетные диаграммы деформирования и разрушения фибробетонных образцов с применением аморфной металлической фибры

В таблице 3.1 представлены результаты определения характеристик трещиностойкости фибробетонов, армированных различными волокнами, произведенные по представленным выше по расчетным диаграммам. При этом, кроме показателей, указанных в 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^*). Расчет данной характеристики следует производить по формуле 3.31, аналогичной приведенным в ГОСТ 29167 для вычисления подобных показателей

$$G_c^* = \frac{W_c}{t(b - a_0 - a_{0t})} \quad (3.31)$$

где t и b – ширина и высота образца, м; a_0 – глубина начального надреза на нижней (растянутой) грани образца, м; a_{0t} – глубина начального надреза на верхней (сжатой) грани образца, м (в соответствии с предлагаемой методикой допускается не производить).

Судя по полученным численным значениям, такая характеристика позволяет детализировать оценку эффективности применения того или иного вида фибры по результатам испытаний или расчета.

Таблица 1 – Расчетные характеристики трещиностойкости и модули упругости фибробетонных образцов

Характеристика трещиностойкости, полученная расчетным путем	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 образца до формирования магистральной трещины, Дж/м ²	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	8,55	8,87	321	521	935	1278
G_f^* – условные удельные эффективные энергозатраты на статическое разрушение, кДж/м ²	666	1186	852	1200	8391	17412
K_c^* – условный критический коэффициент интенсивности напряжений, МПа·м ^{0,5}	0,3	0,39	0,77	0,86	0,69	1,05
Прочность на растяжение при изгибе, МПа	5,03	3,85	9,79	10,98	8,85	13,38
Модуль упругости, МПа*10 ³	32	34	37	40	32	34

Безусловно в приведенных расчетах остается ряд неучтенных факторов, однако предлагаемый подход может послужить достаточно точным инструментом при моделировании поведения фибробетона под нагрузкой и определении возможной эффективности различных видов армирующих волокон, представляющих практический интерес.

Выводы по третьей главе

1. В результате проведенных исследований предложены теоретические зависимости для построения диаграмм деформирования фибробетона, позволяющих прогнозировать поведение композита под нагрузкой вплоть до разрушения.

2. Приведены примеры построения диаграмм деформирования фибробетонов, армированных стальной проволочной, синтетической и аморфнометаллической фиброй, демонстрирующие возможность достаточно точного определения характеристик трещиностойкости таких композитов расчетным путем.

3. Установлено, что поведение фибробетона под нагрузкой на стадии пластического деформирования определяется параметрами дисперсного армирования и прочностью сцепления фибр с матрицей. При этом реализуется один из возможных механизмов разрушения:

- вытягивание всех волокна при их длине, не превышающей некоторое критическое значение;
- разрыв основной части армирующих волокон при их длине больше критической, и вытягивание оставшейся (меньшей) доли, заанкеренной в матрице относительно растущей трещины на небольшую глубину.

4. Наиболее показательными характеристиками трещиностойкости фибробетона следует считать критический коэффициент интенсивности напряжений, а также энергозатраты на пластическое деформирование до начала движения магистральной трещины и статическое разрушение.

4 РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ ХАРАКТЕРИСТИК ФИБРОБЕТОНОВ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗРАБОТАННОЙ МЕТОДИКИ

4.1 Характеристики фибробетона, изготовленного с применением проволочной фибры

Для испытания фибробетонов с использованием разработанной методики были изготовлены образцы мелкозернистого бетона размером 70x70x28 мм, армированные стальной проволочной, аморфнометаллической и низко модульной синтетической фиброй. Состав смесей и метод изготовления лабораторных образцов приведены в разделе 2.1.2.

Несколько образцов из каждой серии испытывали на растяжение при изгибе с помощью стандартного лабораторного пресса с целью определения разрушающей нагрузки. Оставшиеся образцы испытывали с использованием разработанного устройства по методике, приведенной в разделе 2.2. По полученным данным в соответствии с Приложением Б строили диаграммы деформирования и производили расчеты деформативных, силовых и энергетических характеристик трещиностойкости испытываемых материалов. При этом, для корректного применения формул, предлагаемых ГОСТ 29167, численные значения прогибов и нагрузок, получаемых при четырехточечном изгибе, приводились к трехточечной схеме испытаний путем умножения всех их значений на соответствующие коэффициенты, определяемые экспериментальным путем.

Результаты теоретических исследований и опытов, представленные в предыдущих разделах диссертации, показывают, что наиболее показательными характеристиками трещиностойкости фибробетонов являются условные удельные энергозатраты на упругопластическое деформирование до формирования магистральной трещины (G_c^*), на статическое разрушение до момента начала движения магистральной трещины (G_i^*), на статическое разрушение после начала

движения магистральной трещины (G_f^*) и условный критический коэффициент интенсивности напряжений (K_c^*).

Для определения численных значений этих величин необходимо на полученных в ходе испытаний диаграммах произвести построение дополнительных линий (рис 4.1):

- ОТ, параллельной зоне упругих деформаций диаграммы;
- ТВ, перпендикулярной оси прогибов;
- СН, то есть перпендикуляра к горизонтальной оси, проходящего через точку С диаграммы, соответствующую началу движения магистральной трещины;
- АС параллельно линии ОТ, пролегающей вдоль зоны диаграммы, описывающей упругие деформации;
- ДК, перпендикулярной горизонтальной оси диаграммы.

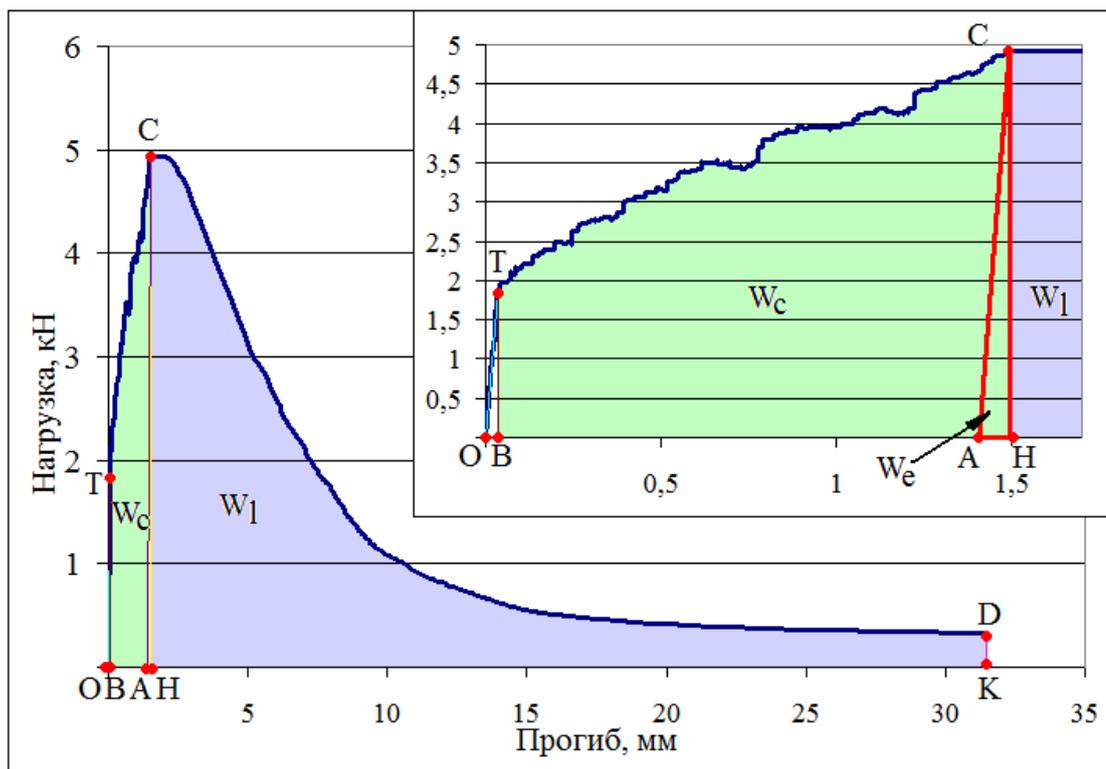


Рисунок 4.1 – Диаграмма деформирования и разрушения фибробетонного образца на проволочной фибре с дополнительными построениями

Дополнительные построения делят диаграмму на отдельные участки, оперируя площадями которых, можно определить соответствующие им энергозатраты:

- на упругое деформирование образца (W_e) как площадь фигуры АСН;
- на процессы развития и слияния микротрещин до формирования магистральной трещины (W_m) как площадь фигуры ОТСА;
- на локальное статическое деформирование в зоне магистральной трещины (W_l) как площадь фигуры НСДК;
- на упругопластическое деформирование до формирования магистральной трещины (W_c) как площадь фигуры ВТСН.

Таким образом, условные удельные энергозатраты на упругопластическое деформирование образца до формирования магистральной трещины вычислялись по формуле 4.1

$$G_c^* = \frac{W_c}{t(b - a_0 - a_{0t})}, \quad (4.1)$$

где t и b – ширина и высота образца, м; a_0 – глубина начального надреза на нижней (растянутой) грани образца, м; a_{0t} – глубина начального надреза на верхней (сжатой) грани образца, м (в данном испытании не производилось).

Условные удельные энергозатраты на деформирование образца до начала движения магистральной трещины определялись по формуле 4.2

$$G_i^* = \frac{W_m + W_e}{t(b - a_0 - a_{0t})}, \quad (4.2)$$

Условные удельные эффективные энергозатраты на статическое разрушение по формуле 4.3

$$G_f^* = \frac{W_e + W_l}{t(b - a_0 - a_{0t})}, \quad (4.3)$$

а условный критический коэффициент интенсивности напряжений определялся из формулы 4.4

$$K_c^* = \frac{3Pl}{tb^2} \sqrt{\pi a_0} * \left(1,122 - 1,121\alpha + 3,74\alpha^2 + 3,873\alpha^3 - 19,05\alpha^4 + 22,55\alpha^5 \right) \quad (4.4)$$

В таблице 4.1 представлены численные значения характеристик трещиностойкости и модулей упругости испытанных образцов.

Таблица 4.1 – Характеристики трещиностойкости и модули упругости фибробетонных образцов, изготовленных с применением проволочной фибры

Характеристика трещиностойкости	Объемное содержание проволочной фибры, %		
	0	1	2
G_c^* – условные удельные энергозатраты на упругопластическое деформирование до образования магистральной трещины, Дж/м ²	1,58	588	1571
G_i^* – условные удельные энергозатраты на статическое разрушение до момента начала движения магистральной трещины, Дж/м ²	10	597	1581
G_f^* – условные удельные эффективные энергозатраты на статическое разрушение, Дж/м ²	14	6425,8	13236
K_c^* – условный критический коэффициент интенсивности напряжений, МПа·м ^{0,5}	0,34	0,84	1,09
Прочность на растяжение при изгибе, МПа	4,34	8,21	13,87
Модуль упругости, МПа·10 ³	30	37	39

На рисунках 4.3 и 4.4 представлены диаграммы зависимостей прогибов от прилагаемых нагрузок, построенные в ходе испытаний образцов, армированных проволочной фиброй в количестве 1 и 2% по объему, и участки диаграмм, описывающие упругие деформации.

По диаграммам видно, что прогибы образцов на стадии упругого деформирования при одинаковых нагрузках различны. Это свидетельствует о влиянии фибрового армирования на модуль упругости материала. Нагрузки, соответствующие началу движения магистральных трещин в образцах также неравны и повышаются с увеличением расхода волокон. Такое влияние фибрового армирования прослеживается и по энергозатратам на деформирование

до начала движения магистральной трещины, и по величинам критического коэффициента интенсивности напряжений.

Изменение модуля упругости, энергозатрат (G_i^*) и K_c^* можно объяснить образованием внутри исходного бетона жесткого каркаса из хаотично распределенных волокон, препятствующего развитию деформаций образца.

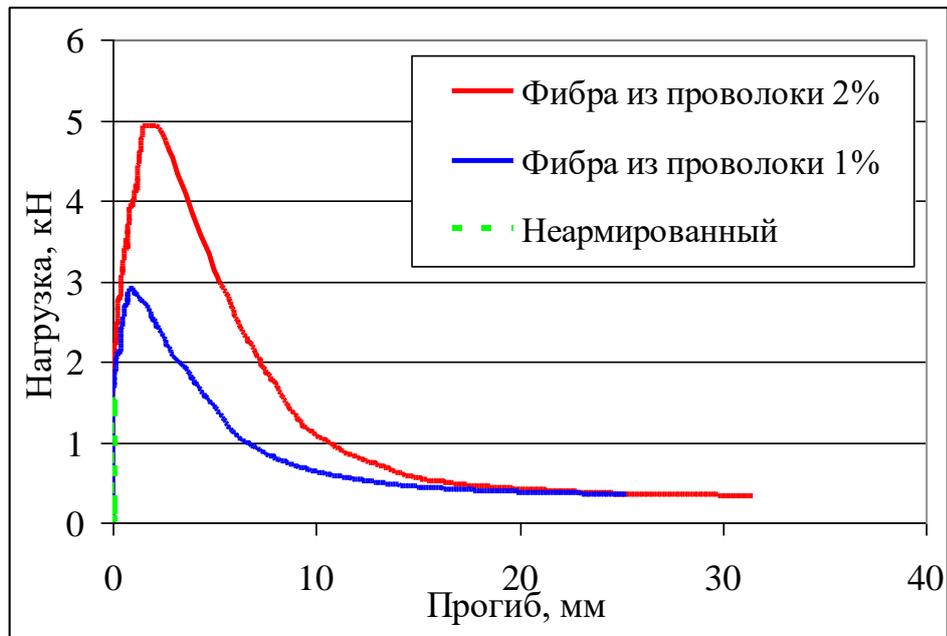


Рисунок 4.3 – Полные диаграммы деформирования и разрушения фибробетонных образцов, изготовленных с применением проволоочной фибры

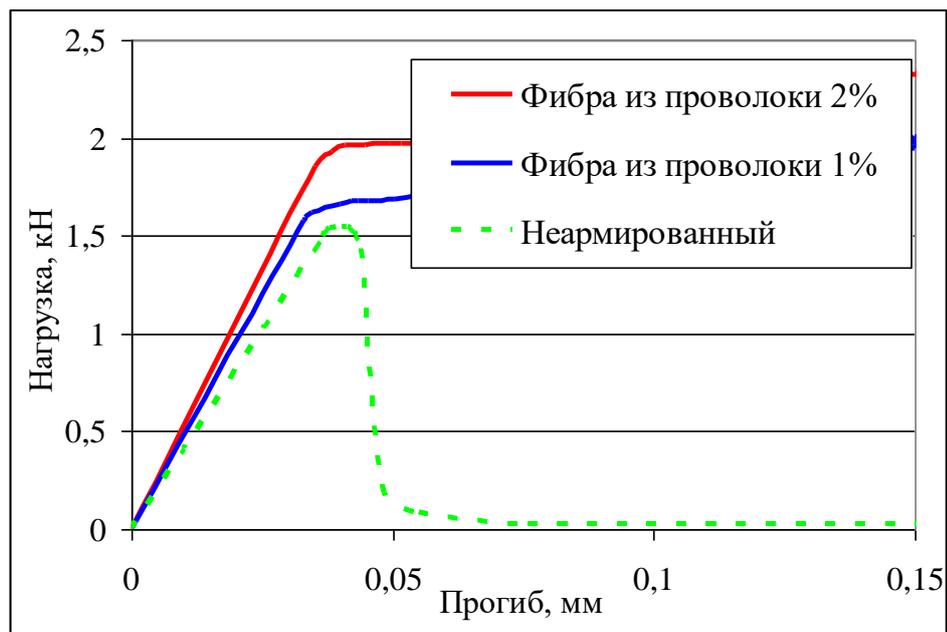


Рисунок 4.4 – Зоны упругих деформаций диаграмм деформирования и разрушения фибробетонных образцов, изготовленных с применением проволоочной фибры

Модуль упругости стальных проволочных волокон значительно выше модуля упругости мелкозернистого бетона-матрицы, и прилагаемая к нему нагрузка в значительной степени воспринимается волокнами, что и объясняет стеснение матрицы и наблюдаемый эффект. Кроме этого, значительное влияние оказывает модификация структуры цементного камня вблизи поверхности волокон, в результате чего образуется контактная зона, обладающая более высокой, чем в остальном объеме, прочностью и плотностью и так же как армирующие волокна ограничивающая деформации образца.

При достижении определенной величины нагрузки в образце происходит образование и начинается развитие магистральной трещины. При этом прилагаемое усилие все в большей и большей степени перераспределяется на высокомодульные волокна, концы которых заанкерены в бетоне по обе стороны от растущей трещины и продолжают обеспечивать совместную с ним работу. Особенностью применяемых в данном эксперименте стальных фибр является наличие волнового профиля. Очевидно, что образующиеся и сливающиеся микротрещины непременно пересекут волокна, и развитие этого процесса приведет к распрямлению волн, что и было замечено в ходе проведения испытаний.

Максимальное значение нагрузки наблюдается в момент образования магистральной трещины, при этом большая часть волокон оказывается выпрямленной, после чего нагрузка начинает снижаться, что объясняется нарушением сцепления волокон с матрицей и их последующим вытягиванием. Процесс вытягивания волокон из матрицы характеризуется нисходящими ветвями полученных диаграмм. Численно этот процесс можно характеризовать условными удельными эффективными энергозатратами на статическое разрушение (G_f^*).

По диаграммам видно, что количество проволочной фибры не оказывает значительного влияния на механизм разрушения фибробетона и влияет только на численные характеристики трещиностойкости и модуля упругости.

4.2 Характеристики фибробетона, изготовленного с применением синтетической фибры

В таблице 4.2 приведены численные значения характеристик трещиностойкости и модулей упругости образцов мелкозернистого бетона, армированного низко модульной синтетической фиброй в количестве 0,5% и 1% по объему, полученные в результате испытания и обработки данных по аналогии с п.4.1.

Таблица 4.2 – Характеристики трещиностойкости и модули упругости фибробетонных образцов, изготовленных с применением синтетической фибры

Характеристика трещиностойкости	Объемное содержание синтетической фибры, %		
	0	0,5	1
G_c^* – условные удельные энергозатраты на упругопластическое деформирование до образования магистральной трещины, Дж/м ²	1,58	2,7	6,2
G_i^* – условные удельные энергозатраты на статическое разрушение до момента начала движения магистральной трещины, Дж/м ²	10	11,12	12,91
G_f^* – условные удельные эффективные энергозатраты на статическое разрушение, Дж/м ²	14	604	1077
K_c^* - условный критический коэффициент интенсивности напряжений, МПа·м ^{0,5}	0,34	0,37	0,38
Прочность на растяжение при изгибе, МПа	4,34	4,70	4,81
Модуль упругости, МПа*10 ³	30	32	34

На рисунках 4.5 и 4.6 представлены полные диаграммы зависимостей прогибов от прилагаемых нагрузок, построенные в ходе испытаний образцов, и их участки, описывающие зону упругих деформаций.

Как и в случае с проволочной фиброй, прогибы образцов на стадии упругого деформирования при одинаковых нагрузках различны. Причем,

несмотря на то, что синтетическая фибра является низко модульной, модуль упругость композита при ее введении несколько повышается.

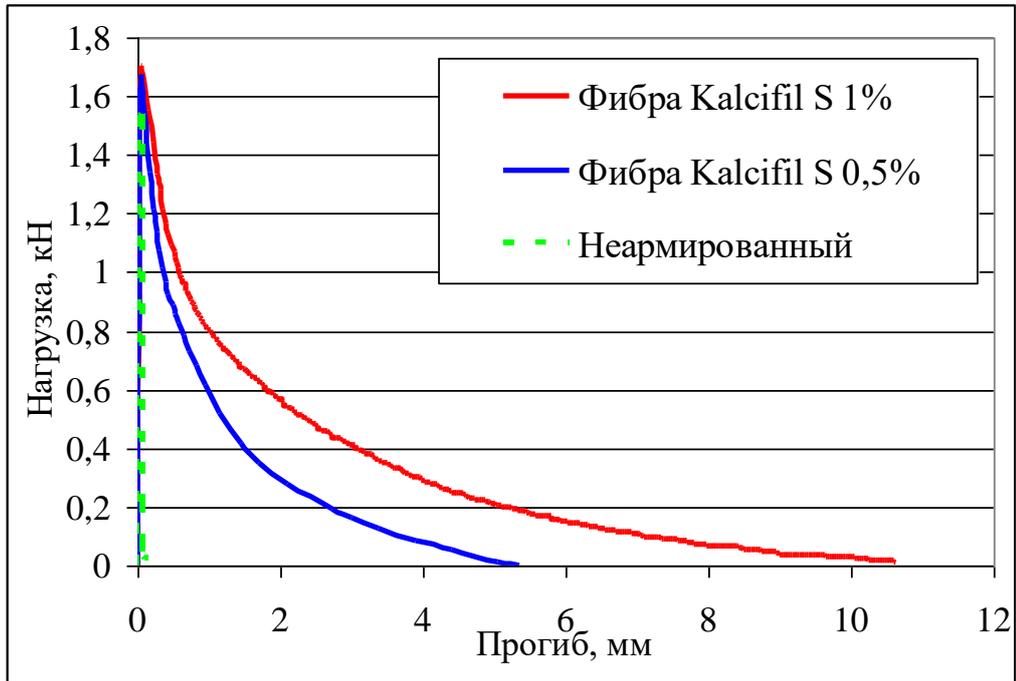


Рисунок 4.5 – Полные диаграммы деформирования и разрушения фибробетонных образцов, изготовленных с применением синтетической фибры

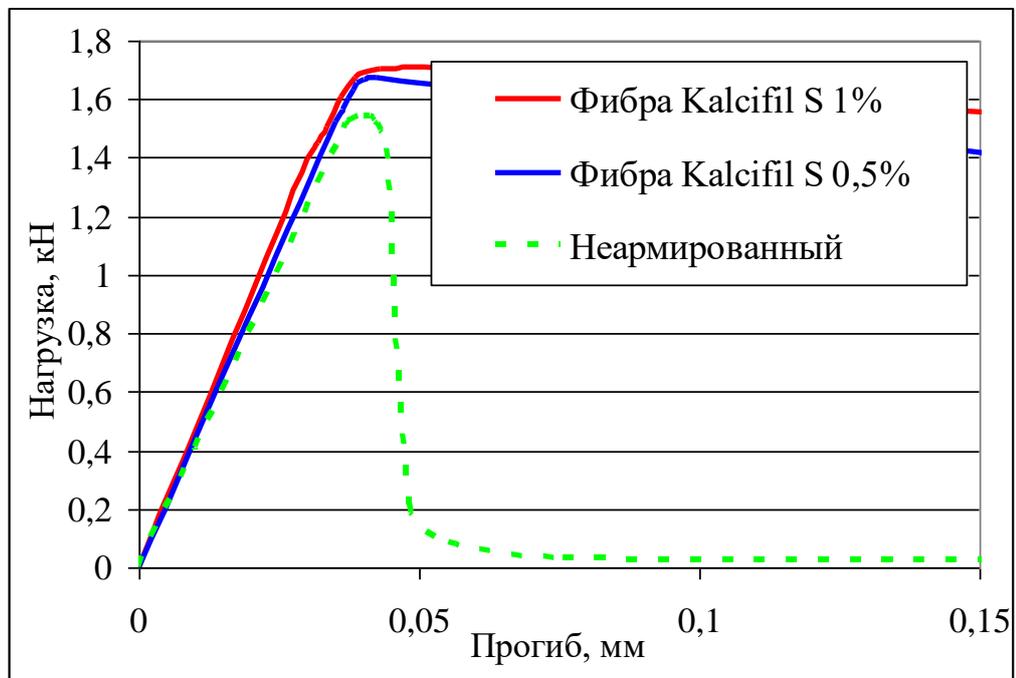


Рисунок 4.6 – Зоны упругих деформаций диаграмм деформирования и разрушения фибробетонных образцов, изготовленных с применением синтетической фибры

Нагрузки, соответствующие началу движения магистральных трещин в образцах, различаются незначительно, что также объясняется использованием для армирования волокон с низким модулем упругости, которые не оказывают существенного влияния на прочность композита. Это следует и из величин энергозатрат на деформирование до начала движения магистральной трещины и из значений критического коэффициента интенсивности напряжений.

Наблюдаемое в данном случае некоторое повышение модуля упругости фибробетона можно объяснить модификацией структуры цементного камня вблизи поверхности волокон, которые имеют малый диаметр, сравнительно небольшую длину, что обеспечивает высокую степень дисперсности армирования, то есть весьма протяженную поверхность раздела с матрицей. Кроме того, плотность полипропилена в несколько раз меньше плотности стали и, следовательно, количество синтетических волокон в единице объема образца значительно больше, чем при применении стальной проволочной фибры. Все это обуславливает создание более развитого микрокаркаса, созданного контактными зонами, обладающими повышенной плотностью и твердостью. Такой каркас, как и в случае применения фибры других видов, препятствует развитию упругих деформаций.

Следует отметить, что при дальнейшем увеличении расхода синтетических волокон прочность композита понижается. Это можно объяснить тем, что сама низко модульная фибра не воспринимает все возрастающую при испытании нагрузку, а по некоторым оценкам даже уподобляется нитевидным порам, сокращающим рабочее сечение образца. Тем не менее, характер влияния синтетических волокон на процесс разрушения композита можно до определенной степени сравнивать с работой стальной проволочной фибры. При достижении максимальных напряжений синтетические волокна, так же как и стальные, теряют связь с матрицей и вытягиваются из нее, что сопровождается понижением нагрузки и описывается нисходящей ветвью диаграммы. Численно этот процесс охарактеризуется условными удельными эффективными энергозатратами на статическое разрушение (G_f^*).

По диаграммам видно, что количество синтетической фибры, как и стальной проволочной, не оказывает значительного влияния на механизм разрушения фибробетона, и влияет только на численные характеристики трещиностойкости и модуля упругости.

4.3 Характеристики фибробетона, изготовленного с применением аморфной металлической фибры

В таблице 4.3 приведены численные значения характеристик трещиностойкости и модулей упругости испытанных образцов.

Таблица 4.3 – Характеристики трещиностойкости и модули упругости фибробетонных образцов, изготовленных с применением аморфной металлической фибры

Характеристика трещиностойкости	Объемное содержание аморфной металлической фибры, %		
	0	1	1,5
G_c^* – условные удельные энергозатраты на упругопластическое деформирование до образования магистральной трещины, Дж/м ²	1,58	526	593
G_i^* – условные удельные энергозатраты на статическое разрушение до момента начала движения магистральной трещины, Дж/м ²	10	537	605
G_f^* – условные удельные эффективные энергозатраты на статическое разрушение, Дж/м ²	14	706	913
K_c^* – условный критический коэффициент интенсивности напряжений, МПа·м ^{0,5}	0,34	0,74	0,93
Прочность на растяжение при изгибе, МПа	4,34	9,38	10,5
Модуль упругости, МПа·10 ³	30	38	40

Ранее отмечалось, что аморфнометаллическая фибра, имеющая больший по сравнению с бетоном модуль упругости, представляет собой отрезки тонких лент

с эквивалентным диаметром, сопоставимым с диаметром используемой в данной работе стальной проволочной фибры. Однако, развитая боковая поверхность и особенности структуры таких волокон, обуславливают отличный от ранее описанных механизм их влияния на бетон. Развитая боковая поверхность обеспечивает повышенную анкеровку фибр в матрице и в значительной степени способствует модификации структуры цементного камня, что приводит к повышению модуля упругости. Это следует из рисунков 4.7 и 4.8, на которых представлены диаграммы зависимостей прогибов от прилагаемых нагрузок, построенные в ходе испытаний неармированных образцов и армированных аморфной металлической фиброй в количестве 1% и 1,5% по объему, а также фрагменты диаграмм, описывающие зоны упругих деформаций.

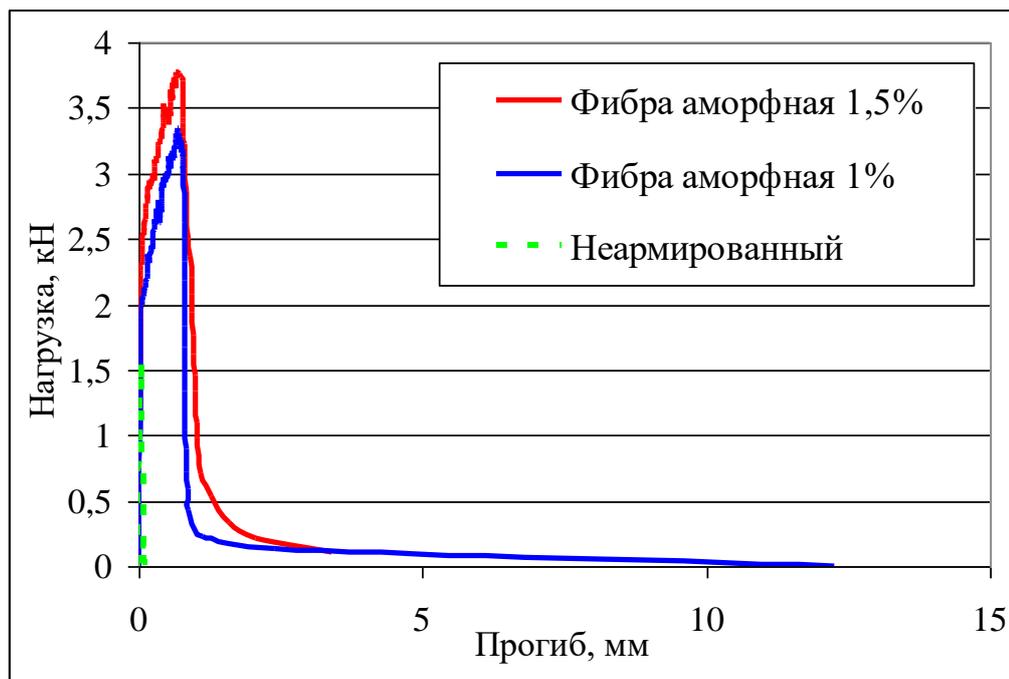


Рисунок 4.7 – Полные диаграммы деформирования и разрушения фибробетонных образцов, изготовленных с применением аморфной металлической фибры

По диаграммам видно, что прогибы образцов с разным количеством фибры на стадии упругого деформирования при одинаковых нагрузках различны. Так же не равны и повышаются с увеличением расхода волокон нагрузки, соответствующие началам движения магистральных трещин. Отмеченное влияние фибрового армирования можно проследить и по приведенным выше значениям

энергозатрат на деформирование до начала движения магистральной трещины и критического коэффициента интенсивности напряжений. Причем в случае с аморфной фиброй, ее влияние на данные и другие характеристики особенно заметно.

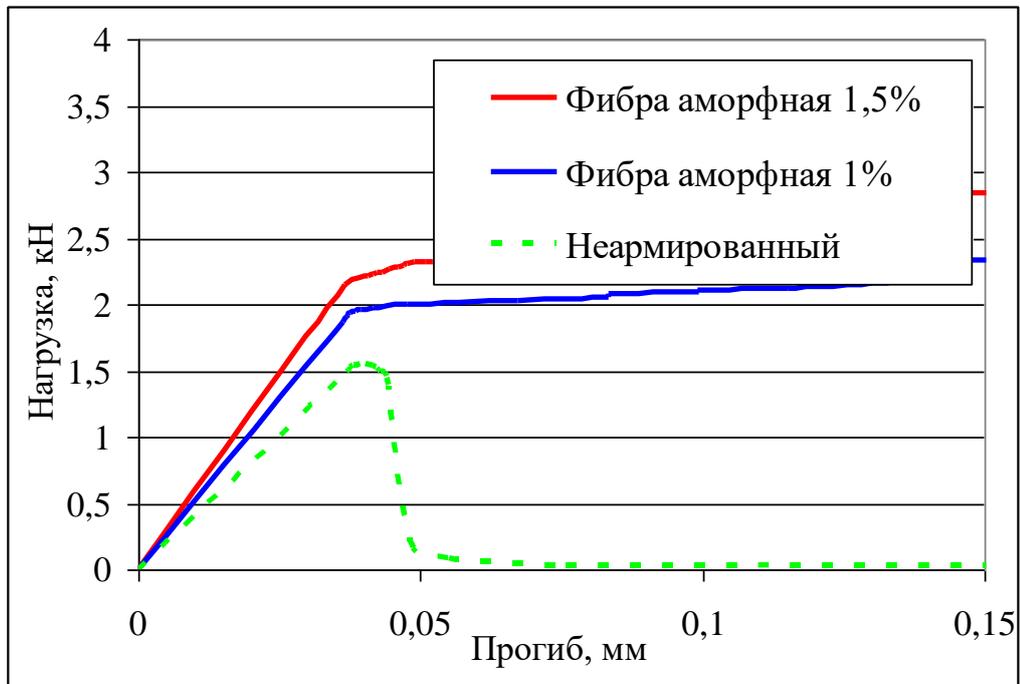


Рисунок 4.8 – Зоны упругих деформаций диаграмм деформирования и разрушения фибробетонных образцов, изготовленных с применением аморфной металлической фибры

Вместе с тем, особенностью аморфных металлов является их довольно хрупкий характер собственного разрушения, что во многом определяет характер деформирования и разрушения образцов, изготовленных с применением фибры такого вида. В процессе испытаний, при нагрузке, близкой к предельной для данного образца, был отчетливо слышен характерный треск, сопровождающий разрыв отдельных аморфнометаллических волокон. Как правило, после этого образец быстро разрушается. Таким образом, в процессе развития магистральной трещины практически не наблюдается вытягивания волокон из матрицы, так как большинство из них разрывается на более ранних стадиях. Этим и объясняется тот факт, что аморфная металлическая фибра не способствует значительному увеличению вязкости разрушения, то есть условных удельных эффективных энергозатрат на статическое разрушение (G_f^*) материала.

По диаграммам, представленным на рисунке 4.7, видно, что, как и в предыдущих случаях, количество аморфной металлической фибры, не оказывает заметного влияния на механизм разрушения фибробетона. При варьировании процента армирования изменяются лишь численные характеристики трещиностойкости и модуля упругости. При этом позитивное влияние такой фибры ограничивается содержанием в бетоне, не превышающем 1,5% по объему. На рисунке 4.9 видно существенное изменение в худшую сторону поведения образца под нагрузкой при армировании его аморфнометаллической фиброй в количестве 1,75% об.

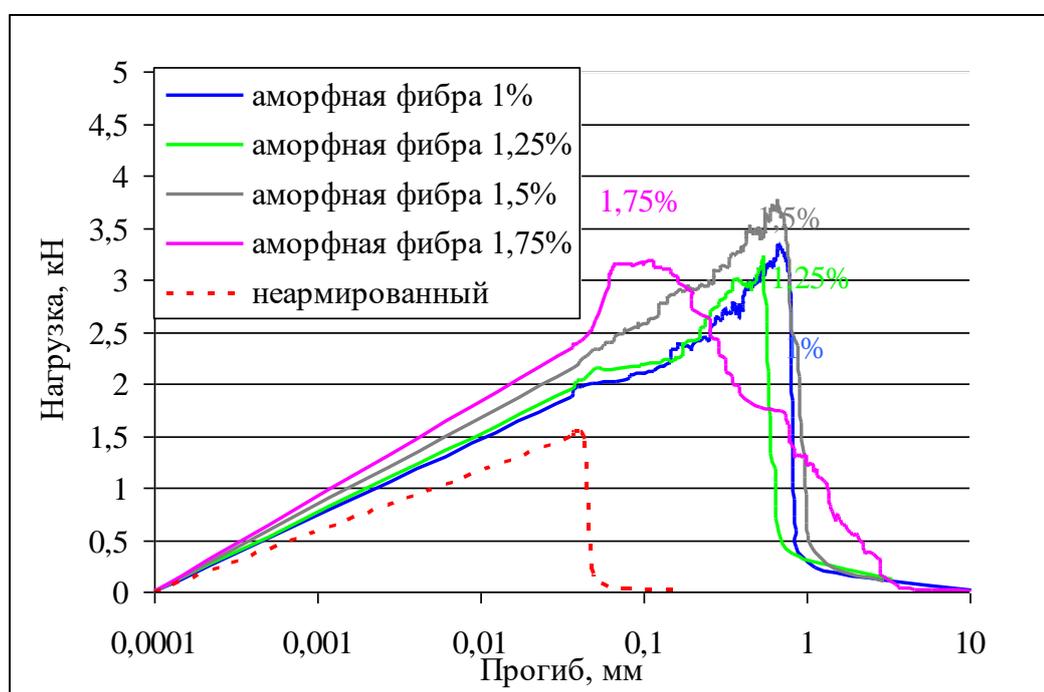


Рисунок 4.9 – Диаграммы деформирования и разрушения фибробетонных образцов, изготовленных с применением аморфной металлической фибры

Осмотр разрушенных образцов мпоказал, что в данном случае волокна в основном вытягивались из бетона в процессе испытания, что, очевидно, объясняется их недостаточным сцеплением, вызванным ее дефицитом матрицы. В данном случае, недостаток матричной составляющей связан с затруднениями технологического плана, которые имели место в процессе приготовления фибробетонной смеси и формования образцов, на поверхности которых после твердения и распалубки наблюдались всевозможные раковины и каверны. Учитывая это, было решено ограничить насыщение принятой в исследовании

матрицы волокнами 1,5% по объему, после которого наблюдается ухудшение физико-механических характеристик получаемого композита.

4.4 Сравнение полученных расчетных и экспериментальных данных

В таблице 4.4 приведены численные значения показателей трещиностойкости и модулей упругости испытанных образцов в сравнении с полученными ранее аналогичными расчетными характеристиками.

Таблица 4.4 – Расчетные и экспериментальные характеристики трещиностойкости и модули упругости фибробетонных образцов, изготовленных с применением различных видов фибры

Характеристика трещиностойкости		Неармированный образец, эксп.	Вид фибры / объемное содержание					
			Kalcifil S / 0,5%	Kalcifil S / 1%	Аморфная / 1%	Аморфная / 1,5%	Проволочная / 1%	Проволочная / 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

На рисунках 4.10 и 4.11 представлены диаграммы зависимостей прогибов от прилагаемых нагрузок, построенные в ходе испытаний образцов изготовленных с

применением различных видов фибр и участки диаграмм, описывающие упругие деформации соответственно. Объемное насыщение матрицы волокнами составляло 1%. Представленные диаграммы наглядно демонстрируют влияние вида волокон на механизмы деформирования и разрушения фибробетонных образцов.

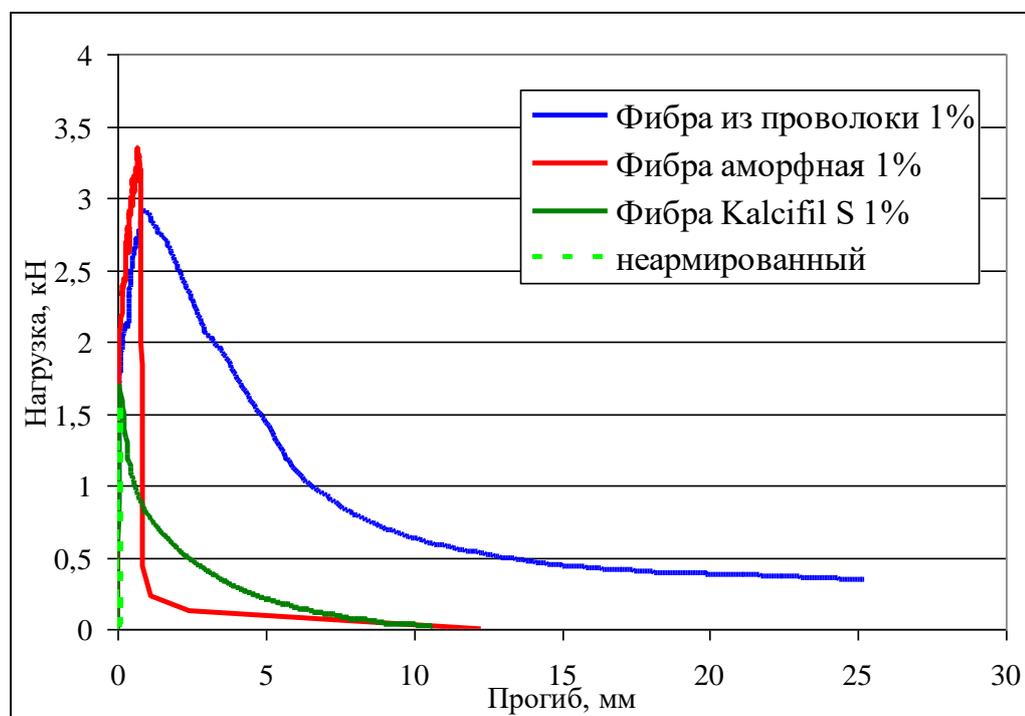


Рисунок 4.10 – Полные диаграммы деформирования и разрушения фибробетонных образцов, изготовленных с применением различных видов фибр

На рисунке 4.11 видно, что прогибы фибробетонных образцов, при одинаковых с неармированным образцом нагрузках, оказываются несколько меньшими. Это свидетельствует о некотором повышении модуля упругости, что можно объяснить введением в состав бетона фибры, модифицирующей его структуру:

- на макроуровне присутствие волокон, беспорядочно ориентированных по всему объему образца, ограничивает его деформации;
- на микроуровне вдоль всей поверхности волокон образуется контактная зона, обладающая более высокой плотностью, твердостью и прочностью.

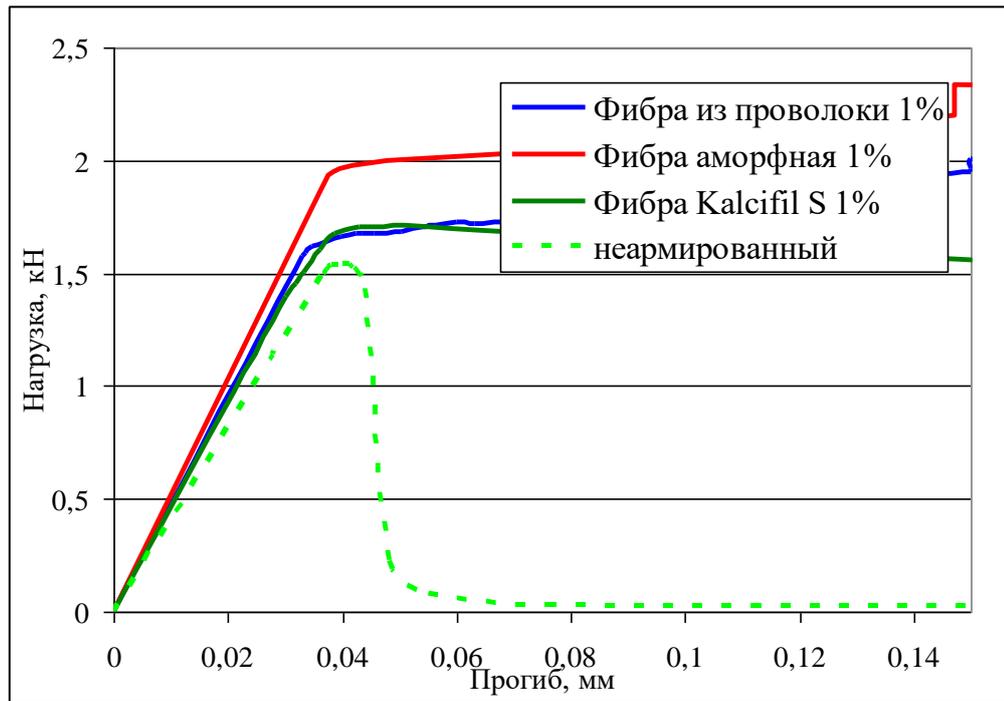


Рисунок 4.11 – Зоны упругих деформаций диаграмм деформирования и разрушения фибробетонных образцов, изготовленных с применением различных видов фибры

В результате совокупности этих факторов образуется фиброцементный каркас, который существенным образом изменяет деформации всего материала, которые уменьшаются с увеличением содержания стальной проволочной и аморфной металлической фибры, и увеличиваются с увеличением содержания синтетической фибры. Следует отметить и тот факт, что образование трещин в фибробетонных образцах, изготовленных с применением стальной проволочной и аморфной металлической фибры, начинается при более высоких нагрузках, чем в неармированном образце или в армированном синтетической фиброй. Данная особенность прослеживается и по величине энергозатрат на разрушение до момента начала движения магистральной трещины.

После образования трещин напряжения в фибробетоне, армированном стальной проволочной фиброй, перераспределяются на волокна, и они, утрачивая сцепление с матрицей, начинают вытягиваться из образца, причем данный процесс вначале протекает при повышающейся нагрузке. В определенный момент фибра вытягивается из образца настолько, что прекращает воспринимать прилагаемую нагрузку, после чего прогиб увеличивается уже при понижающейся

нагрузке. Этот процесс в значительной степени влияет на энергозатраты на статическое разрушение.

Аморфная металлическая фибра за счет своей геометрии и развитой боковой поверхности имеет значительную анкеровку в бетоне, а также более высокий по сравнению с ним модуль упругости. Эти особенности способствуют повышению модуля упругости фибробетона, изготовленного с применением такого вида фибры. По диаграммам видно, что образование трещин происходит при нагрузке, значительно превышающей разрушающую нагрузку неармированного образца, что подтверждается энергозатратами на разрушение до образования магистральной трещины.

После образования трещин происходит разрыв большей части волокон. При этом значительного увеличения вязкости разрушения, по сравнению с неармированным образцом, не наблюдается.

По полученным данным можно сделать вывод о том, что стальная проволочная фибра не дает значительного увеличения энергозатрат на упругое деформирование, однако значительно повышают энергозатраты на пластическое деформирование образца, изготовленного на ее основе. Модуль упругости такого композита повышается с увеличением содержания волокон. При этом, даже небольшого количества фибры достаточно для значительного увеличения модуля упругости, при дальнейшем увеличении ее содержания в бетоне модуль упругости повышается, но в меньшей степени.

Подобные эффекты, но в гораздо меньшей степени, проявляются и в бетоне, армированном синтетической фиброй.

Аморфная металлическая фибра значительно отличается от перечисленных тем, что не оказывает заметного влияния на энергозатраты на пластическое деформирование, однако значительно увеличивает модуль упругости, и повышает энергозатраты на деформирование и разрушение до начала движения магистральной трещины.

Сравнение расчетных и экспериментальных характеристик трещиностойкости рассмотренных фибробетонов показывает хорошую

сходимость. Как в случае расчетных, так и экспериментальных данных наблюдается одинаковая связь между изменением расхода волокон и изменением характеристик трещиностойкости, что подтверждает справедливость предложенных подходов и принятых допущений, использованных при получении характеристик трещиностойкости расчетным путем. Безусловно в отдельных случаях наблюдаются некоторые расхождения между расчетными и экспериментальными данными, но их можно объяснить тем, что представленные диаграммы получены в процессе испытаний единичных образцов, содержащих некоторые дефекты и отклонения, тогда как при расчете аналогичных диаграмм имеет место идеальный случай.

Полученные данные и проведенный анализ результатов позволил разработать проект стандарта организации на проведение испытаний по определению характеристик трещиностойкости и модуля упругости фибробетона с использованием разработанных методики и устройства.

Выводы по четвертой главе

1. Экспериментальные исследования свойств фибробетона, армированного различными видами волокон, проведенные с использованием разработанных методики и устройства, показали хорошую сходимость теоретических и опытных данных, что подтверждает справедливость принятых ранее подходов и допущений, используемых при получении характеристик трещиностойкости расчетным путем.

2. Анализ полученных данных показывает, что модуль упругости и прочность композита повышается не только в результате введения высокомодульной фибры, но и низко модульной, за счет образования в структуре бетона микроаркаса из контактных зон цементного камня между фиброй и матрицей, обладающего повышенной плотностью и прочностью.

3. Степень влияния разных по виду и характеристикам волокон на механизм разрушения и свойства получаемого фибробетона различна:

- стальная проволочная фибра в большей степени повышает энергозатраты на статическое разрушение бетона (вязкость разрушения), его прочность и модуль упругости;

- синтетическая фибра практически не оказывает влияния на величину энергозатрат на процессы образования магистральной трещины и формирование прочности фибробетона, но вызывает некоторое увеличение энергозатрат на статическое разрушение и модуля упругости;

- аморфная металлическая фибра в наибольшей степени, по сравнению с другими видами использованных волокон, повышает энергозатраты на деформирование и разрушение до начала движения магистральной трещины, модуль упругости и критический коэффициент интенсивности напряжений, а также значительно увеличивает прочность на растяжение при изгибе. При этом, ее влияние на величину энергозатрат на статическое разрушение бетона весьма ограничено.

4. В результате проведенных исследований разработан проект стандарта организации на проведение испытаний по определению характеристик трещиностойкости и модуля упругости фибробетона с использованием разработанных методики и устройства.

5 ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ДИСПЕРСНОГО АРМИРОВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ И КОНСТРУКЦИЙ С УЧЕТОМ ПОЛУЧЕННЫХ ТЕОРЕТИЧЕСКИХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

5.1 Эффективность применения фибры в конструкции аэродромных покрытий

В предыдущих главах рассмотрены особенности различных видов волокон и фибробетонов, изготовленных с их применением, показана эффективность и описаны некоторые области применения этих материалов в строительстве. Фибровое армирование позволяет в значительной степени повысить прочность, трещиностойкость и некоторые другие свойства и характеристики бетона, в связи с чем применение фибробетона обеспечивает улучшение эксплуатационной надежности строительных изделий и конструкций с одновременным понижением их стоимости. При этом, экономический эффект достигается как за счет сокращения расхода бетонной смеси или арматурной стали, так и за счет упрощения некоторых технологических операций, а в ряде случаев отказа от них, и, следовательно, от приобретения, обслуживания и эксплуатации оборудования, что в некоторой степени сокращает капитальные вложения в организацию производства [63, 65, 64]. Различные волокна по-разному влияют на свойства получаемых композитов, их эксплуатационные характеристики, и, соответственно, на эффективность применения по тому или иному назначению.

В настоящее время все большее развитие получает воздушный транспорт. Увеличивается интенсивность движения и количество воздушных судов, их грузоподъемность и взлетная масса, что приводит к усиленному износу покрытий аэродромов, качество которых является одним из основных и решающих условий обеспечения регулярности и безопасности воздушных перевозок. В связи с этим, к материалу и конструкции взлетно-посадочных полос и рулежных дорожек предъявляются особые требования [26, 29, 31, 34].

По характеру возникающих усилий и деформаций аэродромные покрытия относятся к категории жестких одежд, обладающих значительным сопротивлением изгибающим нагрузкам. При этом получившие широкое распространение железобетонные покрытия обычно рассматриваются как работающие в стадии практически полностью обратимых (упругих) деформаций. Вследствие этого в качестве критерия предельного состояния бетонного конструктивного слоя аэродромного покрытия принимают величину максимальных напряжений, вызванных действием расчетной нагрузки. Учитывая это, одной из перспективных областей применения фибробетона, обладающего повышенной жесткостью и прочностью, является производство аэродромных плит покрытия.

Строительство аэродромных покрытий из сборных железобетонных плит исключают необходимость создания непосредственно на объекте и постоянного поддержания в рабочем состоянии предприятий для хранения и переработки исходных строительных материалов, приготовления бетона, его транспортирования, укладки и др. Обеспечивается равномерность загрузки рабочей силы и ликвидируется сезонность при новом строительстве или ремонте. Применение сборных покрытий способствует сокращению сроков строительства и повышению качества работ за счет высокой степени заводской готовности применяемых изделий.

5.1.1 Предпосылки применения дисперсного армирования в конструкции аэродромных плит

Наиболее распространена конструкция предварительно напряженной аэродромной плиты ПАГ. Размеры плиты составляют 2,0х6,0 м при толщине 0,14 - 0,2 м, в зависимости от требований по несущей способности. Общий вид плиты ПАГ-20 представлен на рисунке 5.1.

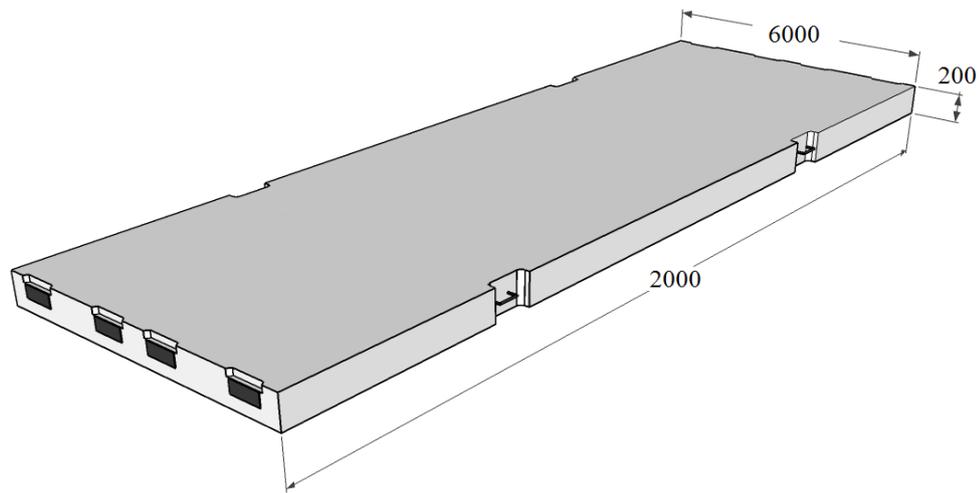


Рисунок 5.1 - Плита аэродромная ПАГ-20.

Для изготовления плиты используют бетон класса В25 и армирование, схема которого представлена на рисунках 5.2 и 5.3.

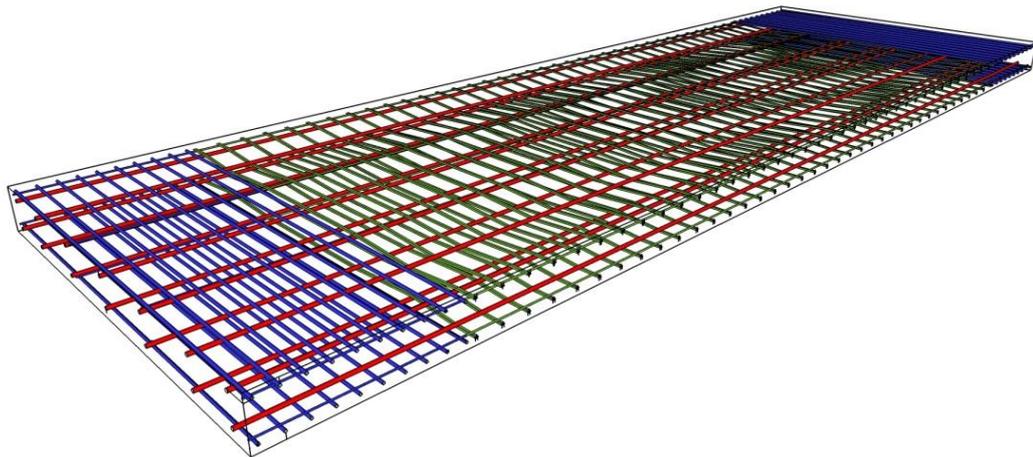


Рисунок 5.2 – Общая схема армирования плиты ПАГ-20

Плита армирована в продольном направлении двойной напрягаемой стержневой арматурой периодического профиля диаметром 14 мм. В поперечном направлении плита армирована двумя сетками С3, переплетенными с напрягаемой арматурой и состоящими из 76 холодотянутых проволок диаметром 5мм, составленных парами. Края плиты армированы четырьмя сетками, состоящими из 10 стержней диаметром 10мм. Арматурные сетки С3 и С5 требуются для усиления конструкции при восприятии нагрузок от предварительного напряжения арматуры, возникающих в процессе производства и эксплуатации плиты.

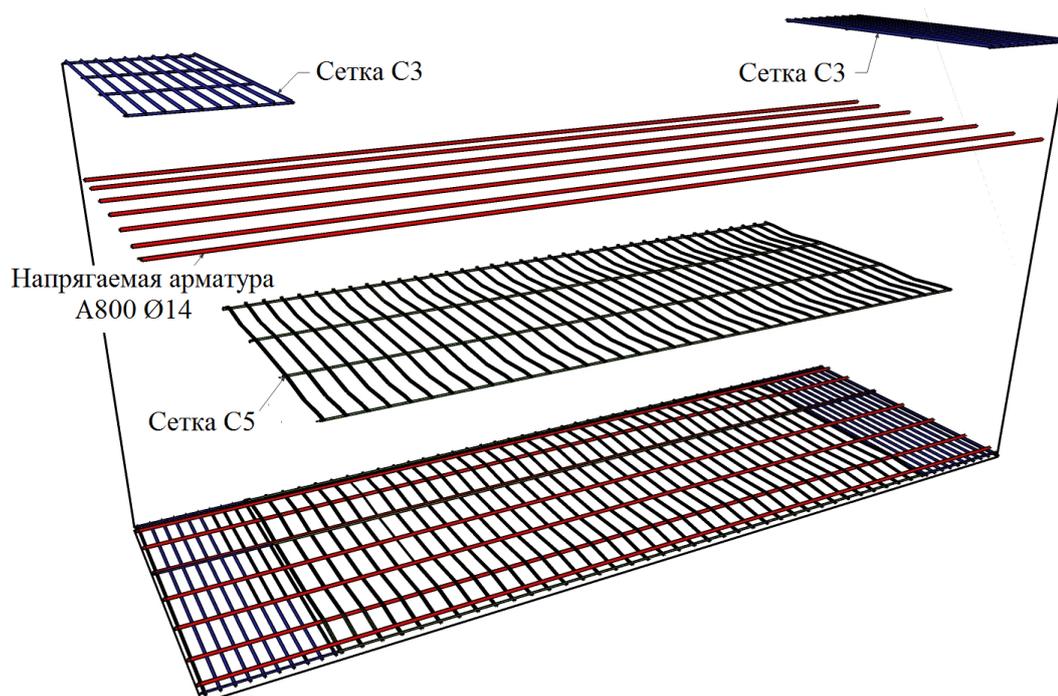


Рисунок 5.3 – Детальная схема армирования плиты ПАГ-20

Для обеспечения устойчивого положения плит в конструкции покрытия, они имеют стыковые соединения в виде горизонтальных скоб, которые закладывают в плиты при изготовлении и свариваются между собой в процессе монтажа покрытия.

Предварительно напряженные железобетонные плиты укладывают в покрытие длинной стороной вдоль направления движения воздушного судна, что необходимо для обеспечения благоприятных условий при взлете и посадке. Соединения между плитами во всех швах, кроме температурных, выполняют сварными и заполняют мастикой. Сборные покрытия, как правило, устраивают на прочном искусственном основании из цементно-песчаной смеси, песка, щебня, шлака или песчано-гравийной смеси.

Одним из важнейших требований, предъявляемых к конструкциям аэродромных покрытий, является повышенная трещиностойкость, напрямую связанная с долговечностью и безопасностью их эксплуатации. В связи этим, аэродромные плиты из традиционного железобетона выпускают предварительно напряженными, что, наряду с повышением трещиностойкости и жесткости конструкций, дает возможность одновременно решить и другие проблемы

строительства: снизить материалоемкость за счет использования арматуры и бетона высокой прочности, значительно уменьшить массу конструкций, особенно большепролетных. Однако, применение предварительного напряжения в железобетонных конструкциях сопряжено и с некоторыми проблемами. Так, внецентренное сжатие способно вызвать трещины в бетоне растянутой зоны, а также в торцах плит при сосредоточенном и неравномерном приложении сжимающих усилий. Возникающие трещины способны привести к местному разрушению бетона вблизи напрягаемой арматуры и потере сцепления с ней вследствие проскальзывания, что может привести к выходу из строя конструкции в целом. Для предупреждения возможного образования таких трещин создаются местные усиления конструкций за счет дополнительного расхода металла и бетона.

Повышению несущей способности и экономичности аэродромных плит способствует применение высокопрочной арматуры. Известно, что модули упругости обычных и высокопрочных арматурных сталей приблизительно равны, однако высокопрочные достигают предельного состояния при очень больших деформациях, в то время как предельная растяжимость тяжелого бетона, как правило, не превышает 0,015%. Очевидно, что в таких условиях эффективность применения высокопрочной арматуры зависит от показателей трещиностойкости бетона и возможности их улучшения в зоне армирования, то есть от создания условий, способствующих появлению как можно большего количества трещин ограниченного раскрытия [80, 89, 108].

Приведенные в предыдущих разделах диссертационной работы экспериментальные исследования фибробетонов, изготовленных с применением как аморфной металлической, так и некоторых других видов фибры, показывают значительное увеличение критического коэффициента интенсивности напряжений и прогибов образцов не только с сохранением прочностных характеристик исходного бетона, но и с их повышением [36, 38]. Таким образом, фибровое армирование позволяет создать условия, обеспечивающие совместную работу высокопрочной арматуры и бетона в более широком диапазоне нагрузок и

деформаций. При этом, полученные экспериментальные данные доказывают возможность полного использования прочностных характеристик высокопрочной арматуры без предварительного напряжения [80].

5.1.2 Перспективы применения аморфнометаллической фибры для повышения прочности и долговечности аэродромных покрытий

Аэродромные покрытия в процессе эксплуатации подвергаются различным воздействиям, которые могут быть разделены на механические, физические, а также физико-химические, возникающие при действии окружающей среды и химических материалов, применяемых при зимнем содержании аэродромов.

Механические воздействия автомобильного транспорта и воздушных судов вызывают в покрытии вертикальные и горизонтальные усилия. Под воздействием вертикальных нагрузок происходит изгиб плит, лежащих на упругом основании, вызывающий появление в бетоне напряжений растяжения при изгибе. Горизонтальные усилия в покрытии возникают при взлете и посадке самолетов, движении других транспортных средств с переменной скоростью и особенно при торможении. Эти усилия вызывают напряженное состояние, как правило, в поверхностных слоях покрытия и обуславливают абразивный износ дорожного бетона. Таким образом, применение дисперсного армирования высокомодульными волокнами, обеспечивающего значительное увеличение прочности на изгиб, ударостойкости и снижение истираемости бетона, является весьма эффективным. При этом, степень улучшения указанных характеристик получаемого композита во многом определяется надежностью связи дисперсной арматуры с бетоном на границе раздела фаз, что, в свою очередь, зависит от характера и величины боковой поверхности армирующих волокон. Именно по этой причине, аморфнометаллическая фибра, боковая поверхность которой более чем в 6 раз превышает боковую поверхность проволочной фибры равновеликого поперечного сечения, представляет определенный практический интерес.

К **физическим воздействиям** окружающей среды на бетонные покрытия следует отнести, прежде всего, изменения температуры и относительной влажности воздуха. Особое значение имеют погодно-климатические изменения, сопровождающиеся переходом температуры воздуха через 0°C , что приводит к циклическому попеременному замораживанию-оттаиванию бетона и возникновению внутренних растягивающих напряжений в его структуре. Таким образом, одним из наиболее важных требований, предъявляемыми к бетону плит покрытий аэродромов, является морозостойкость.

Существует ряд гипотез, объясняющих природу внутрискруктурного давления и снижения морозостойкости бетона [110, 85]. По Н. А. Житкевичу снижение прочности объясняется разрушением межпоровых перегородок цементного камня вследствие возникновения давления замерзающей воды.

В. М. Москвин, М. М. Капкин, Б. М. Мазур и А. М. Подвальный разрабатывали гипотезу морозного разрушения, связывая его с различиями в коэффициентах термического расширения компонентов бетона.

Общепринятой считается теория гидравлического давления Пауэрса, который утверждает, что в бетоне есть резервные поры, в которые и вытесняется вода, поглощенная ранее крупными порами, при переходе ее в лед. Тем самым компенсируется давление и предотвращается нарушение структуры бетона. Однако при оттаивании не вся вода испаряется, часть ее остается в резервных порах и с каждым циклом замораживания и оттаивания все более заполняет их. Разрушение произойдет, если мельчайшие условно замкнутые поры таким образом заполнятся водой и не смогут далее выполнять функции резервных.

Исследованиями, проведенными в 70-80-е годы в ЛИСИ, ЛенЗНИИЭПе, ЛИИЖТе, установлено, что дисперсное армирование бетона фиброй приводит к увеличению однородности материала с образованием мелкой преимущественно замкнутой пористости, повышающей его морозостойкость. Так по результатам, представленным в работе [87], морозостойкость неармированного бетона в условиях стандартных испытаний составила 7 циклов, а при введении в его состав стальной проволочной фибры увеличилась в 2-7 раз в зависимости от параметров

армирования. В ходе проведения экспериментов было зафиксировано увеличение объема замкнутой пористости, что также является следствием фибрового армирования и причиной повышенной морозостойкости получаемого материала. Помимо этого, высокая морозостойкость фибробетона обеспечивается непосредственным участием прочной и высокомодульной фибры в восприятии знакопеременных нагрузок, расшатывающих структуру материала. Это участие тем больше, чем выше прочность сцепления с бетонной составляющей композита. Учитывая это, становится очевидной целесообразность применения аморфнометаллической фибры при производстве изделий, эксплуатация которых предусматривает, в том числе, условия переменного замораживания и оттаивания.

Кроме тяжелых условий работы покрытия в условиях переменных температур имеет место значительная проблема, связанная с его обледенением в холодное время года, препятствующим нормальной эксплуатации аэродрома [113]. В связи с этим, возникают и дополнительные агрессивные воздействия на бетон в виде **химических реагентов**, используемых для борьбы со снежно-ледяными образованиями покрытий [113].

Возникновение гололеда тесно связано с погодными-климатическими условиями региона, главным образом, с выпадением снега и тому подобных осадков в зимний период. Механизм образования гололеда обусловлен тем, что при температурах воздуха, близких к 0°C , снег быстро уплотняется, а при повышении температуры воздуха до положительной и последующем резком похолодании снег превращается в снежно-ледяной накат или лед.

Существует ряд методов, применяемых для удаления льда или повышения сцепления колес транспортных средств с покрытиями в условиях гололеда:

- абразивный, при котором по льду рассыпается песок или другой подобный материал, и таким образом создается шероховатая поверхность, что повышает коэффициент сцепления колес с покрытием;

- механический, требующий применения самоходных или прицепных машин и механизмов ударного, срезающего, скребкового или вибрационного действия;

- химический, заключающийся в использовании россыпи химических веществ - реагентов, способных вызвать плавление (размягчение) льда и поддержание образовавшейся слякоти в незамерзшем состоянии;

- тепловой, предполагающий использование температуры струи горячих газов или применение специальных устройств и установок для подогрева верхних слоев покрытия и расплавления пленок льда;

- комбинированный, являющийся сочетанием двух или более указанных выше методов.

Наиболее простым методом предупреждения образования гололеда или его ослабления является абразивный. В качестве инертных материалов для посыпки по льду применяется песок, каменноугольные шлаки, зола и мелкие фракции щебня. Однако, такой метод не может быть рекомендован к применению, поскольку имеется риск попадания мелких твердых частиц в двигатели воздушных судов.

В определенное время перспективным считался механический способ борьбы с гололедом. В течение последних лет было предложено несколько десятков типов машин и механизмов для разрыхления и отделения (скола) льда и снега от покрытия, однако полное удаление льда механическим методом оказалось невозможным из-за его значительного сцепления с аэродромным покрытием.

Тепловой метод в большинстве случаев неприменим вследствие значительных затрат тепловой энергии, что оказывается экономически нецелесообразным.

Учитывая это, в настоящее время очистка аэродромных покрытий от льда в аэропортах осуществляется в основном с помощью разнообразных химических реагентов, которые должны эффективно растворять лед и препятствовать его образованию, в том числе в результате уплотнения снега транспортными

средствами. На сегодняшний день достаточно широкое распространение получили антигололедные реагенты на основе ацетата калия и хлористого магния. Такой метод, так же как и другие, не лишен недостатков, наиболее значимым из которых является способность применяемых реагентов вызывать коррозию составляющих покрытия. При этом, отказ от использования противогололедных химических реагентов невозможен в силу несовершенства альтернативных методов, в связи с чем особое значение приобретают вопросы, связанные с защитой арматуры от коррозии в составе плит покрытия аэродромов.

Известно, что защитное действие бетона по отношению к арматуре определяется способностью цементного камня пассивировать сталь [14, 11]. В подавляющем большинстве случаев коррозия металлов происходит по электрохимическому механизму, для осуществления которого необходимы разность потенциалов на поверхности металла, электролитическая связь между поверхностями металла с разными потенциалами, активное состояние анодных участков и деполяризатор. Разность потенциалов всегда присутствует вследствие неоднородности структуры технических металлов и разности в условиях контакта бетона и поверхности металла. Поскольку бетон представляет собой капиллярно-пористое тело, его внутренняя поверхность гидрофильна и обладает активностью, очевидно, что условия электролитической связанности и активности анодных участков выполняются. В качестве деполяризатора, как правило, выступает кислород. Его недостаток может замедлить процесс коррозии, но такое происходит лишь при практически полном насыщении бетона водой.

Важной характеристикой процесса коррозии стали является ее скорость, которая зависит от степени агрессивности водной среды, определяемой значением pH. Отсутствие коррозии стали в бетоне объясняется тем, что она не способна растворяться в щелочной среде, но чтобы такая пассивность сохранялась, требуется ее постоянный контакт с поровой жидкостью, имеющей водородный показатель $\text{pH} > 11,8$. В случае использования портландцемента это условие выполняется, однако ионы хлора могут нарушить пассивное состояние

поверхности арматурной стали даже при высоких значениях водородного показателя.

Суммируя вышеизложенное, можно сказать, что коррозия стальной арматуры вызывается, как правило, внешними воздействиями, в результате которых понижается водородный показатель поровой жидкости в бетоне или в нем появляются ионы хлора. При этом снижение водородного показателя может быть вызвано снижением содержания гидроксида кальция в результате выщелачивания омывающей водой или нейтрализацией кислыми жидкостями или газами. Для обеспечения сохранности арматуры можно увеличить толщину защитного слоя бетона, повысить его плотность, уменьшить проницаемость или ввести в его состав ингибирующие добавки. Однако в случае применения фибрового армирования вопрос коррозионной стойкости приобретает особое значение. Очевидно, что в отличие от арматурных стержней, вокруг отдельных стальных фибр невозможно создать защитный слой бетона достаточной толщины и это может привести к тому, что волокна, расположенные вблизи поверхности изделия, будут подвергаться агрессивному воздействию хлорсодержащих противогололедных реагентов. Данную проблему можно решить применением аморфнометаллической фибры.

Аморфнометаллические сплавы являются с точки зрения химии совершенно новыми материалами. Особенностью их структуры является отсутствие дефектов в виде границ раздела зерен и дислокаций, присущих кристаллическим металлам. Вследствие высоких скоростей охлаждения в процессе закалки из расплава в аморфных сплавах не возникает ликваций, включений, сегрегаций, то есть дефектов, вызываемых диффузией, возникающей в процессе образования кристаллических структур при охлаждении с обычными скоростями. Таким образом, аморфная структура при всем своем беспорядке является одной из самых однородных [107, 40, 77], а сами аморфные металлы, в которых нет характерных структурных дефектов и химических неоднородностей, должны быть более стойкими к коррозии.

Как уже отмечалось, коррозионная стойкость металла в различных средах может быть достигнута благодаря переходу в пассивное состояние под действием добавок. Хорошо известно, что хромистая сталь становится нержавеющей при содержании хрома более 13%. При этом, в пассивирующей пленке, возникающей на поверхности нержавеющей стали, скапливается значительное количество хрома. Тот же эффект имеет место и в аморфных сплавах, содержащих хром, увеличение количества которого в пассивирующей пленке обеспечивает повышение коррозионной стойкости металла. Дело в том, что хром в пассивирующей пленке представляется в виде оксидов и гидроксидов, которые имеют лучшие защитные свойства по сравнению с оксидами и гидроксидами железа. Важнейшим отличием аморфных металлов от кристаллических является то, что даже небольшого количества хрома в их составе достаточно для того, чтобы в пассивирующей пленке его содержание оказалось более 50%.

Таким образом, проведенные экспериментальные исследования, а также данные, обнаруженные в ходе литературного обзора, показывают, что применение аморфной металлической фибры при производстве плит покрытий взлетно-посадочных полос и рулежных дорожек аэродромов может оказаться весьма выгодным как с технической, так и экономической точек зрения.

5.2 Технико-экономическая оценка использования фибры при производстве аэродромных плит

По ГОСТ 25912 плиты ПАГ-14...20 должны изготавливаться из тяжелого бетона, имеющего классы по прочности при сжатии В25, на растяжение при изгибе - $B_{btb}3,6$ и марку по морозостойкости, в зависимости от среднемесячной температуры наиболее холодного месяца, F100...200.

В соответствии с требованиями ГОСТ плиты следует подвергать натурному испытанию на трещиностойкость, которое производится не ранее 4 часов и не позднее 2 суток после термообработки нагружением балластом в соответствии со схемой, приведенной на рисунке 5.4.

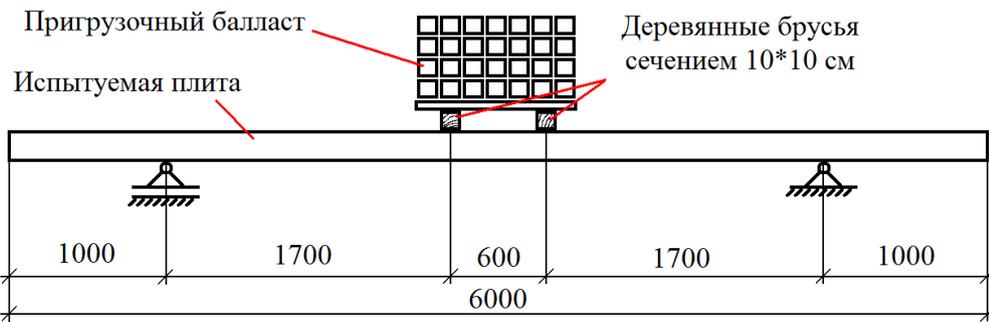


Рисунок 5.4 - Схема испытаний трещиностойкости плит ПАГ-20 нагружением

Перед началом испытания плиту устанавливают на опоры, расстояние между которыми составляет 4 м. Пригрузочный балласт следует располагать на вспомогательной плите, которая, как и опоры, располагается на двух брусках, расположенных поперек длинной стороны плиты. Расстояние между брусками и от брусков до края плиты определяется в зависимости от ее толщины. Масса пригрузочного балласта назначается в зависимости от толщины плиты, класса использованной напрягаемой арматуры, а также прочности бетона конструкции - отпускной или соответствующей классу.

Нагружение плит с отпускной прочностью следует производить ступенями по 10%, а на последних двух ступенях по 5 %, от контрольной нагрузки. После каждой ступени нагружения следует выдержка не менее 10 минут, а после приложения контрольной нагрузки - не менее 30 минут. После этого производится осмотр конструкции. Плита считается прошедшей испытание, если при тщательном осмотре с лупой с четырехкратным увеличением не было обнаружено трещин ни на одной из ее граней.

Расчетная схема плиты ПАГ-20 представлена на рисунке 5.5.

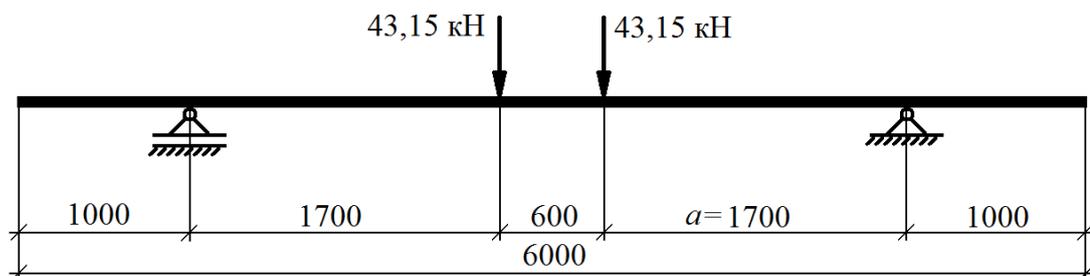


Рисунок 5.5 - Расчетная схема плиты ПАГ-20.

Используя СП 52-102-2004 "Предварительно напряженные железобетонные конструкции", можно определить прогиб плиты, возникающий при такой схеме нагружения.

Так как по результатам испытаний плиты не допускается наличие трещин, то расчет плиты производился по деформациям для конструкций без трещин в растянутой зоне.

В данном случае, исходя из прочности бетона, соответствующей классу В25, нагрузка на плиту в процессе ее испытания выбрана равной 86,3 кН (8800 кгс).

В определенных случаях, в том числе в рассматриваемом, прогиб можно определять упрощенным способом по формуле 5.1.

$$f = Sl^2 \left(\frac{1}{r} \right)_{\max} \quad (5.1)$$

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

Коэффициент S определялся в соответствии с положениями пособия к СП 52-102-2004 и СНиП 2.03.03-85 по формуле 5.2 и составил 0,095.

$$S = \frac{1}{8} - \frac{a^2}{6l^2} \quad (5.2)$$

где: a - расстояние от точки опирания конструкции до точки приложения нагрузки (Рис. 5.5).

Полную кривизну изгибаемого предварительно напряженного элемента для участка без трещин в растянутой зоне можно определить по формуле 5.3

$$\frac{1}{r} = \left(\frac{1}{r} \right)_1 + \left(\frac{1}{r} \right)_2 \quad (5.3)$$

где: $\left(\frac{1}{r} \right)_1$ - кривизна от непродолжительного действия кратковременных нагрузок

$$\left(\frac{1}{r}\right)_1 = \frac{M - N_p e_{op}}{D}, \quad 5.4$$

где: M - изгибающий момент от действия внешней нагрузки; N_p - усилие предварительного обжатия; e_{op} - эксцентриситет усилия предварительного обжатия относительно центра тяжести приведенного сечения элемента; D - изгибная жесткость приведенного поперечного сечения элемента;

$\left(\frac{1}{r}\right)_2$ - кривизна от продолжительного действия постоянных и временных длительных нагрузок.

Схема армирования сечения в середине пролета рассматриваемой плиты приведена на рисунке 5.6.

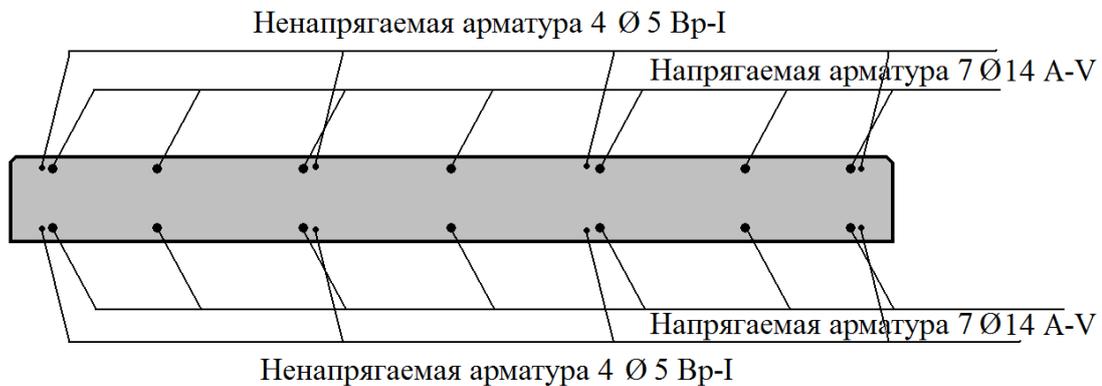


Рисунок 5.6 - Схема армирования плиты ПАГ-20

Произведение усилия предварительного обжатия на эксцентриситет этого усилия относительно центра тяжести приведенного сечения позволяет при определении кривизны элемента учесть явление выгиба элемента при передаче усилий обжатия на бетон. На рисунке 5.6 видно, что напрягаемая арматура, как сжатая так и растянутая, располагается симметрично относительно горизонтальной оси изделия, проходящей через центр тяжести сечения. Кроме того, в соответствии с требованиями ГОСТ 25912 напряжение и в растянутой и в сжатой арматуре одинаковое. Таким образом, выгиб изделия, вызываемый усилием обжатия растянутой арматуры будет компенсироваться усилием обжатия сжатой арматуры, в результате чего выгиба наблюдаться не будет и этим произведением можно пренебречь.

Изгибную жесткость приведенного поперечного сечения элемента (D) можно определить по формуле 5.5

$$D = E_{b1} I_{red} \quad (5.5)$$

где: E_{b1} - модуль деформации сжатого бетона, определяемый в зависимости от продолжительности действия нагрузки; I_{red} - момент инерции приведенного сечения относительно его центра тяжести.

Модуль деформации сжатого бетона при непродолжительном действии нагрузки определяют по формуле 5.6

$$E_b^1 = 0,85 E_b \quad (5.6)$$

где: E_b - модуль упругости бетона.

В соответствии с положениями СП 52-102-2004 модуль упругости бетона, класса по прочности при сжатии В25 равен 30000 МПа. Таким образом, модуль деформации сжатого бетона при непродолжительном действии нагрузки составляет 25500 МПа.

Момент инерции приведенного поперечного сечения элемента (I_{red}) относительно его центра тяжести определяют как для сплошного тела по общим правилам сопротивления упругих элементов с учетом всей площади сечения бетона и площадей сечения арматуры с коэффициентом приведения арматуры к бетону. В рассматриваемом случае момент инерции приведенного поперечного сечения элемента (I_{red}) относительно его центра тяжести составляет 0,003298 м⁴. Таким образом, изгибная жесткость приведенного поперечного сечения элемента составила $D = 84,099$ МПа*м⁴.

Нагрузку от действия пригрузочного балласта следует считать непродолжительной, поэтому кривизна по формуле (5.4) составляет 0,0011.

Кривизну от продолжительного действия постоянных и временных длительных нагрузок $\left(\frac{1}{r}\right)_2$ можно определить аналогично, однако при определении изгибной жесткости элемента D следует использовать модуль деформации сжатого бетона при продолжительном действии нагрузки, который определяют по формуле 5.7.

$$Eb1 = \frac{Eb}{1 + \varphi_{b,cr}}, \quad (5.7)$$

где: $\varphi_{b,cr}$ - коэффициент ползучести бетона.

Коэффициент ползучести бетона определяют в соответствии с положениями СП 52-102-2004, в зависимости от относительной влажности воздуха окружающей среды и класса бетона по прочности при сжатии. В данном случае коэффициент ползучести принят равным 2,5.

Таким образом момент инерции приведенного поперечного сечения элемента (I_{red}) относительно его центра тяжести, с учетом коэффициента приведения для длительных нагрузок, составляет $0,00518\text{м}^4$, а изгибная жесткость приведенного поперечного сечения элемента (D) составляет $44,398\text{МПа}\cdot\text{м}^4$.

Нагрузку от действия собственного веса конструкции следует считать постоянной, с учетом этого кривизна $\left(\frac{1}{r}\right)_2$ составляет $0,00045$.

В результате проведенных вычислений установлено, что прогиб плиты ПАГ-20, приобретаемый ею в процессе испытаний трещиностойкости, составляет $2,35\text{ мм}$.

С учетом полученных данных произведен расчет плиты ПАГ-20, комбинированно армированной стержневой и фибровой арматурой, с использованием положений СП 52-104-2006 "Сталефибробетонные конструкции". При этом исходили из следующих данных и соображений.

Известен опыт применения фибрового армирования при производстве предварительно напряженных ребристых плит покрытий и перекрытий, имеющих длину 6 м, ширину 3 или 1,5 м и предназначенных для замены аналогичных железобетонных [96]. При этом было применено комбинированное армирование: сохранена напрягаемая арматура в продольных ребрах и ненапрягаемая в поперечных, аналогично исходному изделию, а вся сетчатая исключена и заменена фиброй в виде отрезков стальной проволоки диаметром $0,5-0,8\text{мм}$ и длиной 75мм . Замена сетчатой арматуры на фибровую позволила сократить

толщину полки плиты на 10мм, и она составила 20 мм вместо 30мм, что привело к сокращению расхода бетона и уменьшению собственного веса конструкции на 17%.

Испытания показали, что в данном варианте надежная монолитная связь между ребрами и полкой плиты сохраняется и при отсутствии арматурной сетки: поперечные ребра работали совместно с продольными вплоть до полного разрушения конструкции, которое произошло при нагрузке в 1,4-1,5 раза превышающей расчетную. Результаты испытаний показали, что прочность, трещиностойкость и жесткость фиброжелезобетонных плит удовлетворяет требованиям норм.

Важно отметить, что в результате проведенных комплексных испытаний установлена эффективность фибрового армирования на торцах плит, куда обычно вводится дополнительное усиливающее армирование для увеличения анкеровки напрягаемой арматуры.

Авторы работы отмечают, что применение дисперсного армирования позволяет добиться уменьшения массы изделия на 13-19% за счет экономии бетона и снижения стоимости на 6 %. При этом наибольший экономический эффект наблюдается не за счет снижения количества используемых материалов, а за счет исключения операций по производству и монтажу сетчатой арматуры.

Выше указывались некоторые проблемы использования высокопрочной стержневой арматуры без предварительного напряжения. Отмечалось, что основной задачей для повышения ее эффективности является создание условий, при которых бетонная матрица и арматурные стержни работали бы совместно в широких диапазонах прилагаемых нагрузок и возникающих деформаций. На практике это означает необходимость увеличения трещиностойкости, прочности и жесткости бетона, чего и удалось добиться введением в состав композита высокомодульной металлической фибры. Таким образом, появилась возможность исключить предварительное напряжение и, следовательно, отказаться от сеток С5 и С3, которые выполняют в изделии роль распределительной арматуры,

обеспечивающей восприятие усилий обжатия бетона от действия предварительно напряженной арматуры.

Так как введение в состав бетона фибры способствует увеличению его морозо - и коррозионной стойкости, условие повышенной долговечности и эксплуатационной надежности конструкции можно считать выполненным.

Суммируя все вышесказанное можно сделать вывод о безусловной целесообразности применения как аморфной металлической так и стальной проволочной фибры в производстве фиброжелезобетонных аэродромных плит и о возможном положительном эффекте от ее использования.

В качестве основы для предлагаемой фиброжелезобетонной плиты ПАГ был использован мелкозернистый бетон, который по физико-механическим характеристикам не уступает обычному тяжелому, но при этом обеспечивает более равномерное распределение фибры в объеме изделия. На основании существующих в технической литературе примеров применения фибрового армирования при производстве железобетонных конструкций, в том числе предварительно напряженных, было принято решение ввести в состав бетонной смеси металлическую фибру в количестве 1% по объему изделия.

В качестве расчетной принята та же схема, что и при расчете обыкновенной плиты ПАГ-20, изображенная на рисунке 5.5.

В целом методика определения прогибов сталефибробетонных элементов по СП 52-104-2006 мало отличается от методики СП 52-102-2004, разница состоит лишь в определении приведенного момента инерции сечения относительно его центра тяжести, так как в данном случае следует ввести в расчет еще и площадь сечения фибры с учетом коэффициента приведения к бетону.

В соответствии с положениями СП 52-104-2006, прогиб сталефибробетонного элемента определялся по формуле 5.8

$$f = ml^2 \left(\frac{1}{r} \right)_{tot} \quad (5.8)$$

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

Коэффициент, зависящий от расчетной схемы элемента и вида нагрузки, для фибробетонного элемента определяется так же как и для железобетонного и в данном случае так же равен 0,095.

Полную кривизну изгибаемого элемента для участка без трещин в растянутой зоне можно определить по формуле 5.9

$$\left(\frac{1}{r}\right)_{tot} = \left(\frac{1}{r}\right)_1 + \left(\frac{1}{r}\right)_2 \quad (5.9)$$

где: $\left(\frac{1}{r}\right)_1$ - кривизна от непродолжительного действия кратковременных нагрузок; $\left(\frac{1}{r}\right)_2$ - кривизна от продолжительного действия постоянных и временных длительных нагрузок.

Кривизну от непродолжительного действия кратковременных нагрузок можно определить по формуле 5.10

$$\left(\frac{1}{r}\right)_1 = \frac{M}{B_{f1}} \quad (5.10)$$

где: M - изгибающий момент от действия внешней нагрузки; B_{f1} - жесткость сталефибробетонного элемента при кратковременном действии нагрузки.

Жесткость элемента можно определить по формуле 5.11:

$$B_{f1} = 0,85E_b I_1 \quad (5.11)$$

где: E_b - модуль упругости бетона; I_1 - момент инерции приведенного сечения относительно его центра тяжести.

Момент инерции приведенного поперечного сечения элемента I_1 относительно его центра тяжести определяют как для сплошного тела по общим правилам сопротивления упругих элементов с учетом всей площади сечения бетона и площадей сечения арматуры с коэффициентом приведения арматуры к

бетону и площадей сечения фибровой арматуры с коэффициентом приведения фибры к бетону.

Кривизну от продолжительного действия постоянных и временных длительных нагрузок $\left(\frac{1}{r}\right)_2$ можно определить по формуле 5.12

$$\left(\frac{1}{r}\right)_2 = \frac{M \cdot \varphi_{b,crc}}{B_{f1}} \quad (5.12)$$

где: $\varphi_{b,crc}$ - коэффициент ползучести бетона.

При расчете полной кривизны сталефибробетонного элемента следует так же учитывать кривизну, возникающую при действии усилий обжатия преднапряженной арматуры. Однако в случае, когда предварительное напряжение в арматуре отсутствует эти слагаемые можно не учитывать. Кроме того, даже в случае преднапряжения, если армирующие элементы расположены симметрично относительно центра тяжести сечения, выгиба не наблюдается, и эти слагаемыми так же можно пренебречь.

При определении момента инерции приведенного сечения был учтен не модуль упругости мелкозернистого бетона, выбираемый по справочной таблице СП 52-104-2006, а полученные в диссертационном исследовании экспериментальные данные, соответствующие принятым расходам фибры.

Расчет по представленной методике показал, что при сохранении геометрических размеров исходной плиты ПАГ-20 с учетом замены вида бетона и отказа от сетчатой, распределительной, арматуры в пользу фибровой, прогиб составил 1,4 мм при использовании стальной проволочной фибры и 1,38мм - при использовании аморфной металлической.

Методом последовательных приближений определена высота фиброжелезобетонной плиты, при которой значение прогиба при испытании трещиностойкости оказалось максимально приближенным к прогибу традиционно армированной плиты ПАГ. В случае применения стальной проволочной фибры высота изделия, обеспечивающая прогиб при испытании трещиностойкости наравне с обычной ПАГ-20 (прогиб 2,34мм), составила 156мм,

а в случае применения аморфной металлической фибры - 153мм (прогиб 2,33мм). Учитывая это, на следующем этапе расход армирующих волокон был сокращен до 0,8% по объему, в результате чего получилось, что высота плиты с проволочной фиброй составляет 160мм (прогиб 2,34мм).

Таким образом, в результате применения фибрового армирования оказалось возможным сократить высоту плиты ПАГ-20 при сохранении и даже улучшении ее физико-механических характеристик.

Ниже представлены некоторые расчеты экономической эффективности предлагаемых технических решений, связанных с применением дисперсного армирования при производстве железобетонных аэродромных плит ПАГ-20(табл. 5.1-5.2).

Таблица 5.1 - Расход материалов на железобетонную плиту ПАГ-20

Поз.	Наименование	Кол-во	Масса ед., кг	Общая масса, кг
	Детали			
1	Напрягаемая арматура А800 Ø14 l=6000мм	14	7,2	101,6
2	Сетка С5 Вр-1 Ø5 l=1960мм	132	0,28	36,96
	Вр-1 Ø5 l=4650мм	8	0,67	5,36
3	Сетка С3 Вр-1 Ø5 l=750мм	16	0,11	1,72
	А300 Ø10 l=1980мм	40	1,22	48,9
			Итого	200,38
	Материал			
1	Портландцемент СЕМ I 41,5			840
2	Песок строительный, Мкр 2,5			1452
3	Щебень гранитный, Фр 5-20			3000

Таблица 5.2 – Расход материалов на фиброжелезобетонную плиту ПАГ-20

Поз.	Наименование	Кол-во	Масса ед., кг	Общая масса, кг
	Детали			
1	Ненапрягаемая арматура А800 Ø14 l=6000мм	14	7,2	101,6
			Итого	101,6
	Материал			
1	Портландцемент СЕМ I 41,5			1116
2	Песок строительный Мкр 2,5			2232
3	Фибра стальная проволочная			146

Из таблицы 5.3 видно, что экономический эффект от применения стальной проволочной фибры составляет 60 рубля на одно изделие. При этом не

учитывались затраты на проведение технологических операций по созданию предварительного напряжения, поскольку их удалось исключить и, соответственно, уменьшить затраты на приобретение, эксплуатацию и ремонт соответствующего оборудования. Кроме того в расчетах не учитывались затраты на трудоемкие операции по изготовлению сеток С3 и С5, от которых в фиброжелезобетонном изделии также удалось отказаться. Важно отметить и существенное сокращение массы предлагаемых изделий, от которой в определенной степени зависит стоимость их транспортирования к месту строительства и монтажа на объекте.

Таблица 5.3 - Стоимость материалов на одну плиту ПАГ-20

Поз.	Материал	Стоимость за 1 кг, руб.	Стоимость на плиту, руб.
Железобетонная плита			
1	A800 Ø14	29,5	2997
2	Вр-1 Ø5	28,6	1441
3	A300 Ø10	28,7	1398
4	Портландцемент СЕМ I 41,5	3,45	2896
5	Песок строительный Мкр 2,5	0,16	249
6	Щебень гранитный Фр 5-20	0,67	2035
	Итого		11016
Фиброжелезобетонная плита			
1	A800 Ø14	29,5	2997
2	Портландцемент СЕМ I 41,5	3,45	3974
3	Песок строительный Мкр 2,5	0,16	368
4	Фибра стальная проволочная	30,0	3617
	Итого		10956

С этих позиций использование аморфной металлической фибры представляется еще более эффективным, однако, поскольку в настоящее время ее производство находится на стадии выполнения пусконаладочных работ и научных изысканий по определению оптимального химического состава сплава, остается неизвестной даже ориентировочная стоимость таких волокон. В связи с этим пока еще затруднительно дать экономическую оценку эффективности их применения.

Выводы по пятой главе

1. Одной из наиболее перспективных конструкций для применения высокомодульной металлической фибры является плита покрытия взлетно-посадочных полос и рулежных дорожек ПАГ.

2. Основными проблемами, возникающими в процессе эксплуатации сборных аэродромных покрытий, являются работа в условиях попеременного замораживания и оттаивания и возможность коррозии, вызываемой воздействием на стальную стержневую арматуру хлорсодержащих антигололедных реагентов.

3. Использование при производстве ПАГ металлической фибры, особенно аморфнометаллической, целесообразно не только по причине возможности увеличения прочности, жесткости и трещиностойкости бетона в конструкции, но и в связи с повышением ее морозо- и коррозионной стойкости.

4. Помимо технической и технологической целесообразности, применение металлической фибры при производстве ПАГ обеспечивает определенный экономический эффект.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных диссертационных исследований получили дальнейшее развитие вопросы совершенствования системы контроля и оценки качества фибробетона как композиционного материала. При этом достигнуты и могут быть отмечены следующие теоретические и практические 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 практического использования, которые позволяют производить испытания образцов с высокой точностью и в полной мере отвечают необходимым условиям и требованиям современного этапа развития науки о композиционных материалах. 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. При этом показано, что численные значения измеряемых величин отличаются от полученных с применением стандартного метода.

3. Конструктивными средствами обеспечена возможность точного контроля упругих деформаций образца, что позволяет достоверно определять 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.

4. Установлена возможность детализации получаемых по новой методике диаграмм, позволившая зафиксировать и подробно рассмотреть процесс

микротрещинообразования в фибробетоне вплоть до образования магистральной трещины и включить в расчет характеристик трещиностойкости величины, которые ранее не учитывались при использовании стандартных методик.

5. Предложены теоретические зависимости для построения диаграмм деформирования фибробетонных образцов, позволяющих 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.

6. 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.

7. Обосновано использование K_c^* , G_c^* 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.

8. На основе анализа и сравнения диаграмм и численных значений характеристик трещиностойкости, полученных в ходе испытаний фибробетонных образцов, оценена эффективность примененных волокон, а также обоснована технико-экономическая эффективность применения металлической фибры при производстве строительных изделий и конструкций на примере аэродромной плиты ПАГ-20.

9. Разработан проект стандарта организации на проведение испытаний по определению характеристик трещиностойкости и модуля упругости фибробетона с применением разработанной методики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Bernard, E.S.* Influence of Test Machine Control Method on Flexural Performance of Fiber Reinforced Concrete Beams// Journal of ASTM International. 2009. – Vol. 6. No. 9.
2. *Hannant, D.J.; Zonsveld, J.J. and Hughes, D.C./* Composites. №1 – 1978.
3. *Irwin, G.R.* Analysis of stresses and strain near the end of a crack traversing a plate // J. Appl. Mech. – 1957. – V. 24, No 3. – p. 361-364.
4. *Mangat, P.S.; Swamy, R.N.* Compactibility of steel fibre reinforced concrete// Concrete. 1974. № 5. – p. 34-35.
5. *Porter, H.F.* Preparation of Concrete from selection of materials to final disposition. Proceedings of the National Association of Cement Users, ACJ, Vol 6. 1910.
6. *Rasheed, M.H.F.; Agha, A.Z.S.* Analysis of Fibrous Reinforced Concrete Beams// Engineering and Technical Journal. 2012, №30 (6). – p. 974-987.
7. *Shah, P.S.; Rangan, V.K.* Effect of fiber addition on concrete strength/ Indian Concrete Journal. 1994, vol. 5, №2-6 (5). – p. 13-21
8. *Shah, S.P.; Rangan, V.K.* Fiber Reinforced Concrete Properties/ ACJ, №2.1971.
9. *Swamy, R.N.* The mechanics of fibre reinforced of cement matrices/ R.N. Swamy, P.S. Mangat// ACI Journal. – 1974. – SP 44. – p. 1-28.
10. *Александров, А. В.* Сопротивление материалов: учебник для вузов / А.В.Александров, В.Д. Потапов, Б.Д. Державин. Под ред. А.В. Александрова. – М.: Высш. Шк., 2003. – 560 с.
11. *Алексеев С.Н.* Коррозия и защита арматуры в бетоне. – М.: Стройиздат, 1968 – 233 с.
12. *Арончик, В.Б.* Определение модуля упругости дисперсно-армированных материалов с учетом произвольной ориентации и конечной длины армирующих волокон: В книге: Вопросы строительства. Вып.4. Рига, 1975. – с. 167-174

13. *Ахназарова С.Л., Кафаров В.В.* Методы оптимизации эксперимента в химической технологии: Учеб. пособие для хим.-технол. специальностей вузов.
14. *Баженов Ю.М.* Технология бетона. – М.: Высш. шк., 1978. -455 с.
15. *Баранов В. Н.* Применение микроконтроллеров AVR: схемы, алгоритмы, программы, 2-е изд. испр. – М.: Издательский дом «Додэка XXI», 2006. – 288 с.
16. *Белов А. В.* Конструирование устройств на микроконтроллерах. – СПб.: Наука и Техника, 2005. – 256 с.
17. *Белов А. В.* Создаем устройства на микроконтроллерах. – СПб.: Наука и Техника, 52007. – 304 с.
18. *Беляев, Н. М.* Сопротивление материалов. - М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1976. – 608 с
19. Бетон армированный волокнами. Реф. информ. / ЦИНИС. Строит. и архитект. Серия 7. Строит. материалы и изделия, 1975, вып. 22, с. 13-14.
20. *Богданова, Е.Р.* Экспериментальные исследования бетона, дисперсно армированного синтетической полипропиленовой фиброй/ Известия Петербургского университета путей сообщения// 2015. – №2 (43). – С. 91-98
21. *Боженов П.И.* Комплексное использование минерального сырья и экология. -М.: Изд-во Ассоциации строит. вузов. 1994.- 365 с.
22. *Боженов П.И., Аллик А.Р., Несмиянова В.В.* Рациональный подбор смеси заполнителей – эффективный способ снижения расхода цемента в бетоне // Применение бетона и железобетона в строительстве / Л.: ЛДНТП, 1981, - с. 10 – 14.
23. *Булатов, А. И.* Формирование и работа цементного камня в скважине.- М.: Недра. – С. 368.
24. Влияние некоторых характеристик отрезков стальной проволоки на свойства бетона, армированного этими отрезками. Реф. информ./ ЦИНИС. Строит. и архитект. Серия 7. Строит. материалы и изделия, 1974, вып. 17, С. 6-8.

25. *Войлоков, И.А.* Фибробетон – история вопроса. Нормативная база, проблемы и решения/ ALITinform: Цемент. Бетон. Сухие смеси. 2009. – №2. С. 44-53
26. *Герберг А. А.* Строительство аэродромов. – М.: Автотрансиздат, 1962 – 331 с.
27. *Герман Г.* Сверхбыстрая закалка жидких сплавов. / Пер. с англ. Е.А. Жураковского, В.В. Федорова под. Ред. В.Т. Борисова.- М.: Metallurgia, 1986 – 375 с.
28. *Гетун, Г. В.* Экспериментально-теоретические исследования изгибаемых железобетонных конструкций, усиленных в растянутой зоне слоем сталефибробетона: автореф. дис. . канд. техн. наук/Г. В. Гетун. Киев, 1983. - 20 с.
29. *Глушков Г. И.* Изыскания и проектирование аэродромов. – М.: Транспорт, 1992 – 463 с.
30. *Голубев, В.Ю.* Высокопрочный бетон повышенной вязкости разрушения: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / В.Ю. Голубев. – СПб., 2009. – 183 с.
31. *Горецкий Л. И.* Строительство аэродромов. – М.: Транспорт, 1980 - 454 с.
32. *Горохов, М.С.* Трещиностойкость фибробетона со стальной анкерной фиброй/ Вестник государственного университета морского и речного флота им. С.О. Макарова. №5 (27). – 2014. С. 47-53
33. *Григорьев, В.И.* Напряженно-деформированное состояние сталефиброжелезобетонных изгибаемых элементов при импульсном воздействии: Автореф. дис... канд. техн. наук/ Ленингр. инж.-строит. ин-т. – Л., 1987. - 24 с.
34. *Демин Б. И.* Строительство аэродромов. – М.: Транспорт, 1980 – 248 с.
35. Дисперсно - армированные бетоны и конструкции из них. // Тезисы докладов и сообщений. / ЛатИНТИ. Рига 1975. 46 с.
36. *Жаворонков, М.И.* Исследование свойств сталефибробетона на основе аморфной металлической фибры/ У.Х. Магдеев, Ю.В. Пухаренко, В.И. Морозов, Д.А. Пантелеев, М.И. Жаворонков// Вестник ВолгГАСУ. Сер.:

- Строительство и архитектура 2013. Выпуск 31 (50). 4.2. Строительные науки. С. 132–135.
37. *Жаворонков, М.И.* Методика определения энергетических и силовых характеристик разрушения фибробетона/ М.И. Жаворонков// Вестник гражданских инженеров. - 2014. - № 6(47). - с. 155-160.
 38. *Жаворонков, М.И.* Определение характеристик разрушения и модуля упругости фибробетона/ М.И. Жаворонков// Известия КГАСУ. - 2015. - № 3(33). - с. 114-120.
 39. *Зерцалов, М.Г.* Экспериментальное определение характеристик трещиностойкости фибробетона/ М.Г. Зерцалов, Е.А. Хотеев// Вестник МГСУ. 2014. № 5. – С. 91-99
 40. *Золотухин, И.В.* Аморфные металлические материалы// Соросовский образовательный журнал. – 1997. №4. – с. 73-78
 41. *Ито Ю., Мураками Ю., Хасебэ Н.* справочник по коэффициентам интенсивности напряжений: В 2-х томах. Т. 1. / пер. с англ. В. И. Даниленко под ред. Р. В. Гольдштейна. – М.: Мир, 1990. – 448 с.
 42. *Каприелов, С.С.* Исследование физико-механических и реологических свойств высокопрочного сталефибробетона// Н.И. Карпенко, В.И. Травуш, А.В. Мишина, А.А. Андрианов, И.М. Безгодов, С.С. Каприелов/ АСADEMIA. АРХИТЕКТУРА И СТРОИТЕЛЬСТВО №1. – 2013. – С. 106-113
 43. *Качанов Л.М.* Основы механики разрушения. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1974. – 312с.
 44. *Ковалева, А.Ю.* Конструирование сталефибробетонов с заданными свойствами (на примере токарной фибры): дис. ... канд. техн. наук: 05.23.05 / А.Ю. Ковалева. – СПб., 2001. – 135 с.
 45. *Копанский Г.В., Курбатов Л.Г.* К вопросу о подборе состава сталефибробетонной смеси. // Производство строительных изделий и конструкций. -Л.: 1982. -С. 151-154.

46. *Коротких, Д.Н.* Закономерности разрушения структуры высокопрочных цементных бетонов на основе анализа полных равновесных диаграмм их деформирования (часть 1)// Вестник ВолгГАСУ. Серия: Строительство и архитектура. – Вып. 26. 2012. – С. 56-67
47. *Коротких, Д.Н.* Закономерности разрушения структуры высокопрочных цементных бетонов на основе анализа полных равновесных диаграмм их деформирования (часть 2)// Вестник ВолгГАСУ. Серия: Строительство и архитектура. – Вып. 27. 2012. – С. 54-62
48. *Коротких, Д.Н.* Характеристика показателей разрушения высокопрочных бетонов на основе анализа полных равновесных диаграмм их деформирования/ А.В. Ушаков, Д.Н. Коротких// Вестник Центрального регионального отделения РААСН. Воронеж, 2011 – С. 76-89
49. *Коротких, Д.Н.* Характеристика показателей разрушения высокопрочных бетонов на основе анализа полных равновесных диаграмм их деформирования/ А.В. Ушаков, Д.Н. Коротких// Вестник Центрального регионального отделения РААСН. Воронеж, 2011 – С.76-89.
50. *Кравинскис, В.К.* Исследование прочности и деформативности иглобетона при статическом нагружении: Автореф. дис. канд. техн. наук / В.К. Кравинскис. Рига., 1974. - 24 с.
51. *Красовский П. С.* Физико-химические основы формирования структуры цементных бетонов: учебное пособие.- Хабаровск: издательство ДВГУПС, 2013. – 204с.
52. *Кристенсен Р.* Введение в механику композитов. / пер. с англ. А.И. Бейля, Н.П. Жмудя под ред. Ю.М. Тарнопольского. – М.: Мир, 1982. – 335с.
53. *Крылов Б.А.* Фибробетон и фиброцемент за рубежом. Реф. информ. /ЦИНИС Строит. и архитект. Серия 7. Строительные материалы и изделия, 1979, вып. 5.
54. *Курбатов Л.Г.* Некоторые вопросы технологии и технико – экономической эффективности сталефибробетона. //Производство строительных изделий и конструкций. - Л.: 1979. - С.38-42.

55. Курбатов Л.Г., Попов В.Н., Трещиностойкость и раскрытие трещин в изгибаемых сталефибробетонных элементах. // Пространственные конструкции в гражданском строительстве. –Л.: 1982. – С. 33-42.
56. Курбатов Л.Г., Рабинович Ф.Н. Об эффективности бетонов, армированных стальными фибрами. Бетон и железобетон. –1980.- № 3.- С. 6-8.
57. Курбатов, Л. Г. Изгибная прочность сталефибробетона при неравномерном распределении фибр по высоте сечения// Л.Г. Курбатов, Г.В. Копанский, О.Н. Хегай/ Пространственные конструкции в гражданском строительстве: труды ЛенЗНИИЭП.- Л., 1976. С. 18-21.
58. Курбатов, Л.Г. Исследования прочности сталефибробетона при продольном ударе// Л.Г. Курбатов, Г.С. Родов/ Исследование и расчет экспериментальных конструкций из фибробетона: труды ЛенЗНИИЭП.- Л., 1978. С. 31-35.
59. Лебедев М. Б. CodeVisionAVR: пособие для начинающих. – М.: Додэка-XXI, 2008.- 592 с.
60. Леонович С.Н. Определение параметров трещиностойкости бетона при нормальном отрыве и поперечном сдвиге. Методические указания для студентов строительных специальностей / С.Н. Леонович, О.В. Попов, К.А. Пирадов. Минск: БИТУ, 2004. - 12 с.
61. Леонович, С.Н. Анализ результатов экспериментальных исследований параметров трещиностойкости бетона/ С.Н. Леонович, Е.А. Гузеев// Проблемы технологии производства строительных материалов, изделий и конструкций, строительства зданий и сооружений: сборник статей II Межвузовской научно-технической конференции/ Под ред. Н.П. Блещика и В.В. Тура. – Брест: БПИ, 1998. – С. 141-153.
62. Леонович, С.Н. Определение энергетических и силовых параметров бетона по полностью равновесным диаграммам деформирования: учебно-методическое пособие для студентов строительных специальностей/ С.Н. Леонович. – Мн.: БНТУ, 2005. – 39 с.

63. *Лесовик, Р.В.* Деформативные свойства мелкозернистого бетона/ Е.С. Глаголев, Р.В. Лесовик, С.В. Ключев, В.А. Богусевич// Строительные материалы. - № 1-2. Москва, 2014 - С. 113-115
64. *Лесовик, Р.В.* К проблеме использования техногенных песков курской магнитной аномалии для производства мелкозернистого фибробетона и изделий на его основе/ Р.В. Лесовик, С.В. Ключев, А.В. Ключев, А.В. Нетребко// Промышленное и гражданское строительство. - № 12. Москва, 2014 - С. 45-48
65. *Лесовик, Р.В.* Мелкозернистый сталефибробетон на основе техногенного песка для получения сборных элементов конструкций/ Р.В. Лесовик, А.В. Ключев, С.В. Ключев// Технологии бетонов. - №2(91). Москва, 2014 - С. 44-45
66. *Лещинский М.Ю.* Испытание бетона: Справ. пособие. – М.: Стройиздат, 1980. - 360 с.
67. *Лобанов И.А., Талантова К.В.* Особенности подбора состава сталефибробетона. // Производство строительных изделий и конструкций. - Л., 1976. - С. 22-32. (Сб.тр. Ленингр. инженер.-строит. ин-та; № 114).
68. *Лысенко, Е. Ф.* Проектирование сталефибробетонных конструкций: учеб. пособие /Е. Ф. Лысенко, Г. В. Гетун. Киев: УМК ВО, 1989. - 184 с.
69. *Максимов, А.Н.* Фибробетон, армированный волокнами минеральной ваты// Фибробетон и его применение в стр.-ве. / М., 1979. с. 46-51
70. Математическая обработка эксперимента и его планирование. //Учеб. пособие. / Карпов В.В., Коробейников А.В., Малышев В.Ф., Фролькис В.А. –М.; СПб., 1998.- 99 с.
71. Материалы, армированные волокнами. / Пер. с англ. Сычевой Л.И., Воловика А.В.- М.: Стройиздат, 1982. - 180 с.
72. *Миненко, Е.Ю.* Оценка энергетических характеристик дисперсно-армированного бетона в дорожном строительстве/ Е.Ю. Миненко, Ю.В. Грачева, О.И. Шлапакова// Вестник ВолгГАСУ. Сер.: Строительство и архитектура. 2013. Вып. 32(51). С. 66-70

73. *Мирошниченко И.С.* Закалка из жидкого состояния. – М.: Металлургия, 1982 - 168 с.
74. *Михайлов, В.В.* Влияние дисперсного армирования минеральными волокнами на свойства напрягающего бетона/ В.В. Михайлов, О.А. Звездин// Исследование и применение напрягающего бетона и самонапряженных железобетонных конструкций: М., Стройиздат. 1984. с. 39-47
75. *Мэттьюз Ф., Ролингс Р.* Композиционные материалы. Механика и технология. / Пер. с англ. С.Л. Баженов. – М.: Техносфера, 2004. – 408 с.
76. *Некрасов, В. П.* Метод косвенного вооружения бетона / В. П. Некрасов. - М., Транспечать, 1925. – 255 с.
77. *Некрасова, Т.В.* Теория и технология получения наноструктурированных компактных материалов: учеб. Пособие / Т. В. Некрасова, В.Н Некрасова-Пермь : Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2013. -123 с.
78. *Новгородский М.А.* Испытание материалов, изделий, конструкций. М.: Высш. шк. 1971. - 326 с.
79. Новое в проектировании бетонных и железобетонных конструкций./ Под ред. Гвоздева А.А. – М., Стройиздат. 1978. 204 с.
80. *Опбул, Э.К.* Прочность и трещиностойкость изгибаемых элементов из дисперсно армированного железобетона с высокопрочной арматурой без предварительного напряжения/ Э.К. Опбул, С.С. Седип // Вестник Тувинского государственного университета, 2014. - №3.- С. 43-54.
81. *Павленко В.И., Арончик В.Б.* Свойства фибробетона и перспективы его применения: Аналит. обзор. / Латв. Респ. ин-т науч.-техн. информ. и пропанды. – Рига, 1978. – 96 с.
82. *Пантелеев, Д. А.* Полиармированные фибробетоны с использованием аморфнометаллической фибры: Дис. ... канд. техн. наук /. СПбГАСУ. - СПб., 2016
83. *Партон В.З.* Механика разрушения: От теории к практике. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1990. – 240с.

84. *Пухаренко Ю.В., Дмитриев А.Л.* Свойства сталефибробетона с высоким содержанием дисперсной арматуры // Труды молодых ученых. / С. -Петербург. Гос. архитектур.- строит. ун-т.- СПб., 1997.-Ч. 1.- С 136-138.
85. *Пухаренко, Ю.В.* Железобетонные изделия и конструкции: Научно-технический справочник/ Под ред. Ю.В. Пухаренко, Ю.М. Баженова, В.Т. Ерофеева. – СПб: НПО «Профессионал», 2013. – с. 1045.
86. *Пухаренко, Ю.В.* Моделирование микротрещинообразования фибробетона методами механики разрушения/ Ю.В. Пухаренко, В.И. Морозов, А.О. Хегай// Современное промышленное и гражданское строительство. – 2011. Т. 7. №3. – с. 125-134
87. *Пухаренко, Ю.В.* Научные и практические основы формирования структуры и свойств фибробетонов: Дис. ... д-ра техн. наук/ Ю.В. Пухаренко: СПбГАСУ. – СПб, 2005. – 315 с.
88. *Пухаренко, Ю.В.* О вязкости разрушения фибробетона/ Ю.В. Пухаренко, В.Ю. Голубев// Вестник гражданских инженеров. – 2008. №3. – с. 80-83
89. *Пухаренко, Ю.В.* Эффективные фиброжелезобетонные конструкции на основе высокопрочного фибробетона для высотного строительства/ Ю.В. Пухаренко, В.И. Морозов// Бетон и железобетон – взгляд в будущее: научные труды III Всероссийской (II Международной) конференции по бетону и железобетону (Москва, 12-16 мая 2014 г.): в 7 т. Т. 3. Арматура и системы армирования. Фибробетоны и армоцементы. Проблемы долговечности. Москва: МГСУ, 2014. – С.186-195.
90. *Рабинович Ф.Н.* Бетоны, дисперсно – армированные волокнами: Обзор / Всесоюз. Науч.-исслед. ин-т науч.-техн. информ. и экономики пром-сти строит. материалов.– М., 1976 - 73 с.
91. *Рабинович Ф.Н.* Дисперсно – армированные бетоны. – М.: Стройиздат, 1989.- 176 с.
92. *Рабинович Ф.Н.* Об оптимальном армировании сталефибробетонных конструкций // Бетон и железобетон. 1986.- № 3.- С. 17-19.

93. *Рабинович Ф.Н.* Об уровнях дисперсности армирования бетонов // Изв. вузов. Стр-во и архитектура. 1981 -№ 11.- С. 30-36.
94. *Рабинович Ф.Н., Романов В.П.* О пределе трещиностойкости мелкозернистого бетона, армированного стальными фибрами. // Механика композиц. материалов. 1985.-№ 2- С. 277-283.
95. *Рабинович Ф.Н., Шикунов Г.А.* Эффективность применения сталефибробетона в промышленном строительстве. // Применение фибробетона в строительстве. -Л., 1985. -С. 9-15.
96. *Рабинович, Ф.Н.* Композиты на основе дисперсно армированных бетонов. Вопросы теории и проектирования, технология, конструкции.– М.: Издательство АСВ, 2004. - 560 с.
97. Растяжимость и начало образования трещин в бетоне, армированном отрезками стальной проволоки. Реф. инф. /ЦИНИС. Стр-во и архитект. Серия 7. Строительные изделия и конструкции. 1975 вып. 9. С. 9-12.
98. *Романов В.П., Захаров И.Д.* Влияние параметров структуры фибрового армирования и гранулометрии песчаной составляющей на технологичность сталефибробетонных изделий. // Интенсификация технологических процессов в производстве сборного железобетона. -Л., 1988.- С. 37-42.
99. *Романов, В.П.* К вопросу о пределе трещиностойкости фибробетона на растяжение// Исследование новых типов пространственных конструкций гражданских зданий и сооружений: Сб. науч. тр./ ЛенЗНИИЭП: Л., 1977 – с. 96 – 105
100. *Рыбасов В.П.* Исследование свойств бетона, армированного стальными волокнами. // Новые материалы и изделия в строительстве. - М., 1982. С. - 36-8.
101. Свойства волокон и бетона, армированного волокнами. Реф. Инф. /ЦИНИС Стр-во и архитект. Серия 7. Строительные изделия и конструкции, 1974. Вып. 14. С. 12-15.
102. *Смирнов, Д.А.* Упругость и ползучесть сталефибробетона: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.17/ Д.А. Смирнов. – СПб., 2011. – 106 с.

103. СНиП 2.03.01-84* Бетонные и железобетонные конструкции. – М.: Госстрой СССР, 1989
104. *Соловьев Б.В., Зива А.Г., Сенина Т.К.* Оценка эффективности применения сталефибробетона в сборных дорожных плитах. // Оценка и обеспечение надежности и долговечности железобетонных конструкций зданий и сооружений промышленных предприятий при их реконструкции и восстановлении. Челябинск, 1984. - С. 78-80.
105. *Ставров Г.Н., Романов В.П., Захаров И.Д.* Состояние и перспективы применения сталефибробетона в конструкциях, подверженных динамическим воздействиям. // Применение сталефибробетона в строительстве./ - Л.: 1985. - С. 55-58.
106. *Ставров, Г.Н.* Состояние и перспективы применения сталефибробетона в конструкциях, подверженных динамическим воздействиям/ Г.Н. Ставров, В.П. Романов, И.Д. Захаров// Применение сталефибробетона в строительстве. – Л.: 1985. – С. 55-58
107. *Судзуки К.* Аморфные металлы. / К. Судзуки, Х. Фудзимори, К. Хасимото. Пер. с японского Е.И. Поляка под ред. И.Б. Кекало. – М.: Metallurgy, 1987 – 328 с.
108. *Талантова К.В.* Эффективность использования арматуры в сталефибробетоне: Дис. ... канд. техн. наук / Ленингр. инженер.-строит. ин-т - Л., 1977.
109. *Трамбовецкий В.П.* Фиброармированные материалы за рубежом. //Строит. материалы за рубежом. 1973.№ 5.-С. 45-47.
110. *Тутицина В.Н.* Исследование дисперсно – армированного бетона и железобетона в условиях многократного замораживания до температуры – 50⁰С: Автореф. дис. ... канд. техн. наук /. Ленингр. инженер.-строит. ин-т. - Л., 1982. - 22 с
111. *Турба, Ю.В.* Экспериментально-статистическое моделирование трещиностойкости бетона, армированный полипропиленовой фиброй// Ю.В. Турба, С.И. Солодкий/ Наукові нотатки. №46. – 2014. С. 512-515

112. Фибробетон в США и Великобритании. // Строит. материалы за рубежом. 1973. -№ 3.- С. 11-16.
113. *Шишков, А.Ф.* Аэропорт: теория и практика зимнего содержания аэродромов/ А.Ф. Шишков, В.В. Запорожец, О.Н. Билякович.- К.: Друкарня Діапринт, 2006. – 196 с.
114. *Шляхтина, Т.Ф.* Экспериментально - теоретические основы проектирования оптимальных составов фибробетонов: Дис. ... канд. техн. наук /. Ленингр. инженер.-строит. ин-т. - Л., 1988

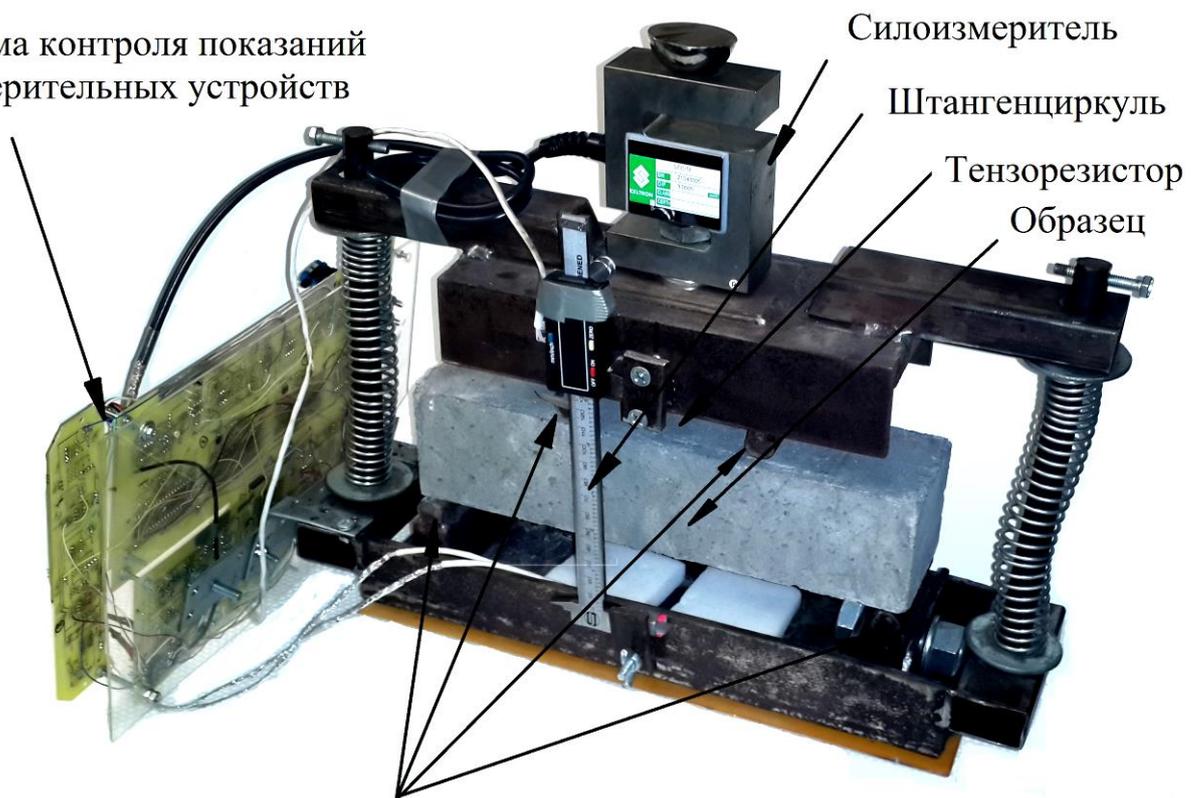
ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ А

ОПИСАНИЕ КОНСТРУКЦИИ ПРИБОРА

Описываемый прибор предназначен для построения диаграмм зависимостей прогибов бетонных и фибробетонных образцов от прилагаемых к ним нагрузок в процессе их испытаний на прочность на растяжение при четырехточечном изгибе. Получаемые диаграммы можно использовать при анализе механизмов разрушения, определении численных значений силовых и энергетических характеристик трещиностойкости и модуля упругости испытываемых образцов. Испытаниям следует подвергать образцы-балки размерами 7*7*28см. Общий вид прибора представлен на рисунке 1.1.

Схема контроля показаний измерительных устройств



Точки опирания и приложения нагрузки

Рисунок 1.1 – Общий вид описываемого прибора.

До начала испытания следует приклеить к верхней и (или) нижней грани образца тензорезистор, затем подключить его к схеме контроля показаний. После этого необходимо поместить испытываемый образец в приборе между упорами

обеспечивающими четырехточечный изгиб. Затем следует установить прибор с образцом в стандартный лабораторный пресс, который в процессе испытания будет обеспечивать приложение нагрузки.

Тензорезисторы используются для контроля прогибов испытываемых образцов на стадии их упругого деформирования. Штангенциркуль используется для контроля прогибов образцов на стадии пластического деформирования. Силоизмеритель обеспечивает контроль прилагаемых к образцу нагрузок. В процессе совместной обработки данных, полученных с описанных измерительных устройств, можно построить диаграмму разрушения испытываемых образцов.

Схема, обеспечивающая контроль показаний измерительных устройств, представлена на рисунке 1.2

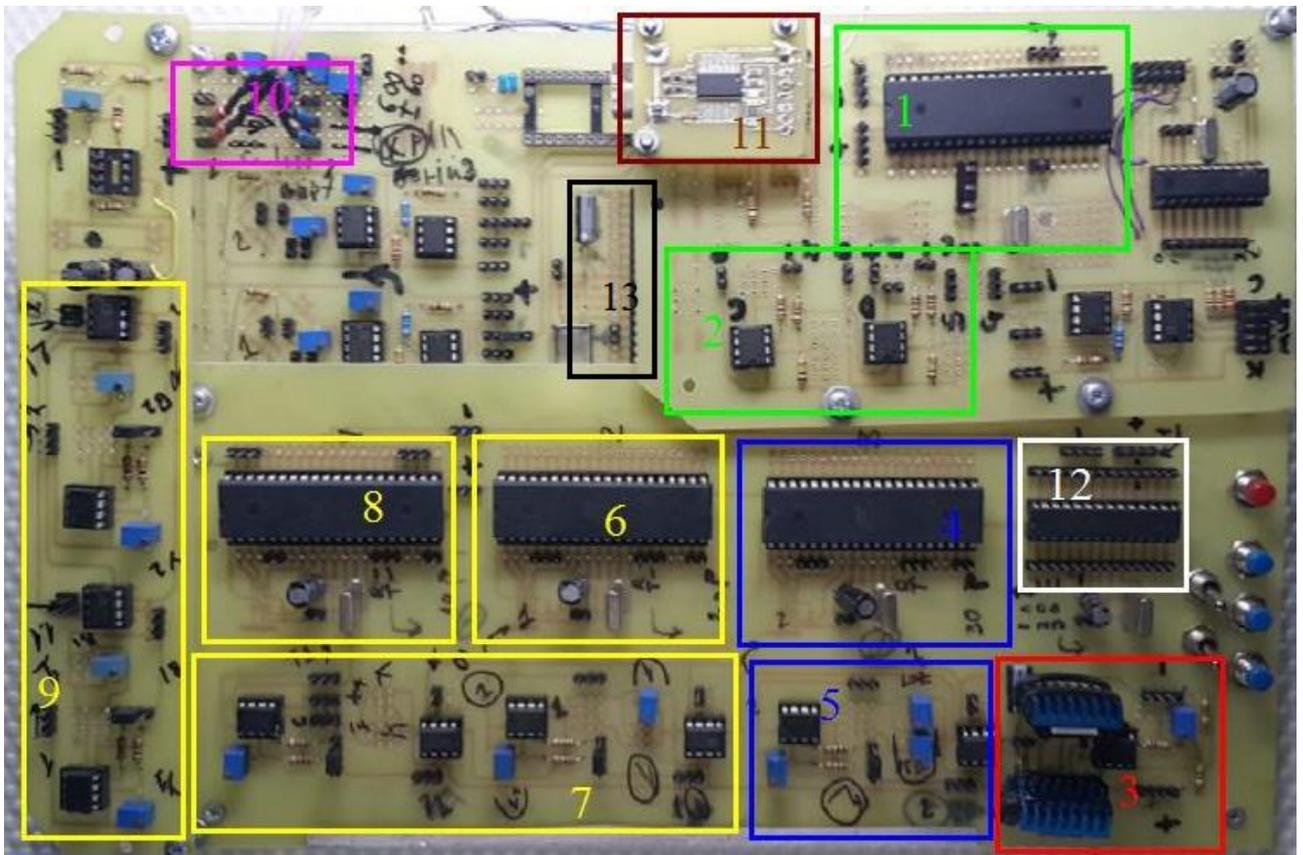


Рисунок 1.2 – Схема контроля показаний измерительных устройств

На схеме виден узел контроля и преобразования показаний штангенциркуля, который представляет собой два усилителя 2 и микроконтроллер 1. Узел контроля показаний тензорезистора состоит из двух усилителей и двух вычитателей 7, а также аналого-цифрового преобразователя и

микроконтроллера 6. Поскольку в приборе задействовано два тензорезистора, то таких узлов в схеме предусмотрено два. В процессе контроля показаний второго тензорезистора задействованы другие два усилителя и два вычитателя 9, а также еще один аналого-цифровой преобразователь и микроконтроллер 8. Тензорезисторы работают по схеме простейших делителей напряжений 10.

Для контроля показаний силоизмерителя использован только один вычитатель и один усилитель 5, и так же аналого-цифровой преобразователь и микроконтроллер 4.

На схеме так же видна цепь двухполярного питания 3 и передатчик 11. Кроме того в схеме присутствуют управляющие микроконтроллеры 12 и 13.

Блок-схема описываемого прибора представлена на рисунке 1.3.



Рисунок 1.3 – Блок-схема описываемого прибора

В начале работы прибора действует штангенциркуль. Он определяет прогибы образца по 8-10 раз в секунду. Выходной сигнал штангенциркуля поступает в преобразователь, а затем в микроконтроллер. После окончания операций преобразования одного показания штангенциркуля его микроконтроллер отправляет полученные данные в мультиплексор и сигнализирует об этом в управляющий микроконтроллер.

При поступлении такого сигнала управляющий микроконтроллер по очереди взаимодействует с микроконтроллерами тензорезисторов и силоизмерителя.

Сигнал с тензорезистора поступает на усилитель и вычитатель и далее, на аналого-цифровой преобразователь, а после этого в микроконтроллер. Контроль показаний второго тензорезистора и силоизмерителя производится по аналогичной схеме.

Управляющий микроконтроллер по окончании работы штангенциркуля отправляет соответствующие сигналы по очереди в микроконтроллеры тензорезисторов и силоизмерителя, а так же в микроконтроллер-мультиплексор.

Мультиплексор собран на основе микроконтроллера. Он имеет 4 входа и один выход. На входы поступают данные измерительных устройств (штангенциркуль, тензорезисторы и силоизмеритель) и в зависимости от поступающего сигнала управляющего микроконтроллера отправляет эти данные по очереди на свой выход. И далее такой поток данных поступает в передатчик для дальнейшей отправки в компьютер.

Обработка показаний штангенциркуля

В конструкции описываемого прибора использован штангенциркуль. Технические характеристики штангенциркуля приведены в таблице 1.

Таблица 1.1 – Технические характеристики штангенциркуля

Диапазон измерения	0-150мм
Дискретность	0,01мм
Погрешность	$\pm 0,02$, при измерении < 100мм
	$\pm 0,03$, при измерении > 100мм
Напряжение питания	1,5в

Общий вид использованного штангенциркуля представлен на рисунке 1.4.



Рисунок 1.4 – Общий вид штангенциркуля.

В конструкции использованного штангенциркуля предусмотрены выводы для подключения к шинам данных и тактового генератора, а также имеется вывод питания и общий схемы (Рис. 1.5).

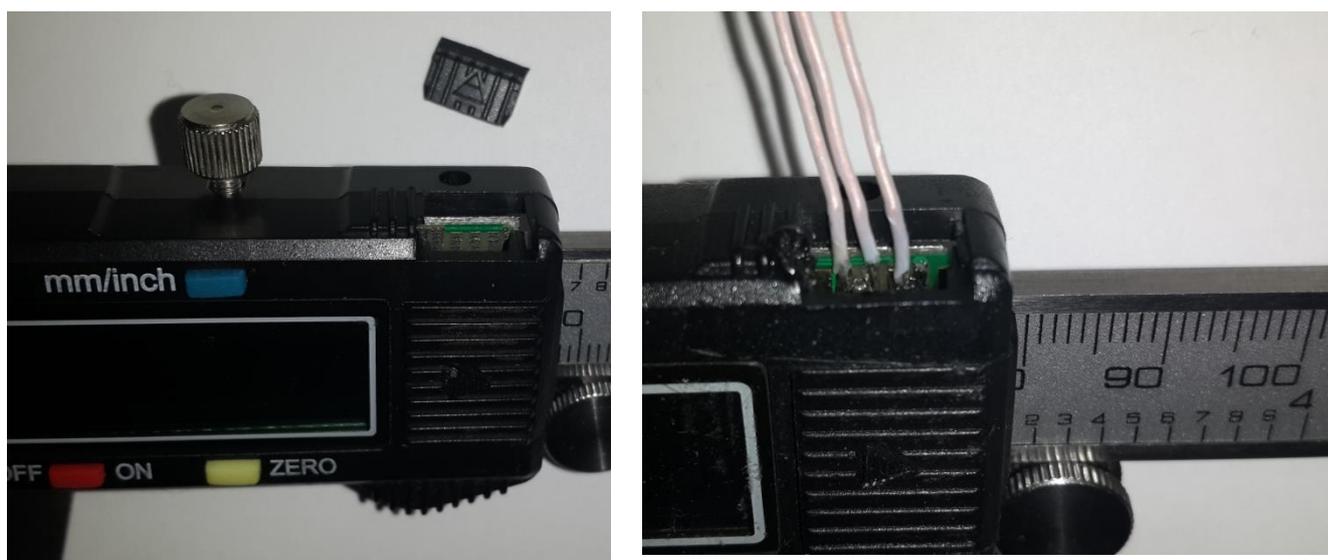


Рисунок 1.5 - Выводы шин данных и тактового генератора штангенциркуля.

С помощью двухканального осциллографа можно рассмотреть формы сигналов на имеющихся выводах. На рисунке 1.6 представлены осциллограммы с шин данных и тактового генератора относительно общего схемы

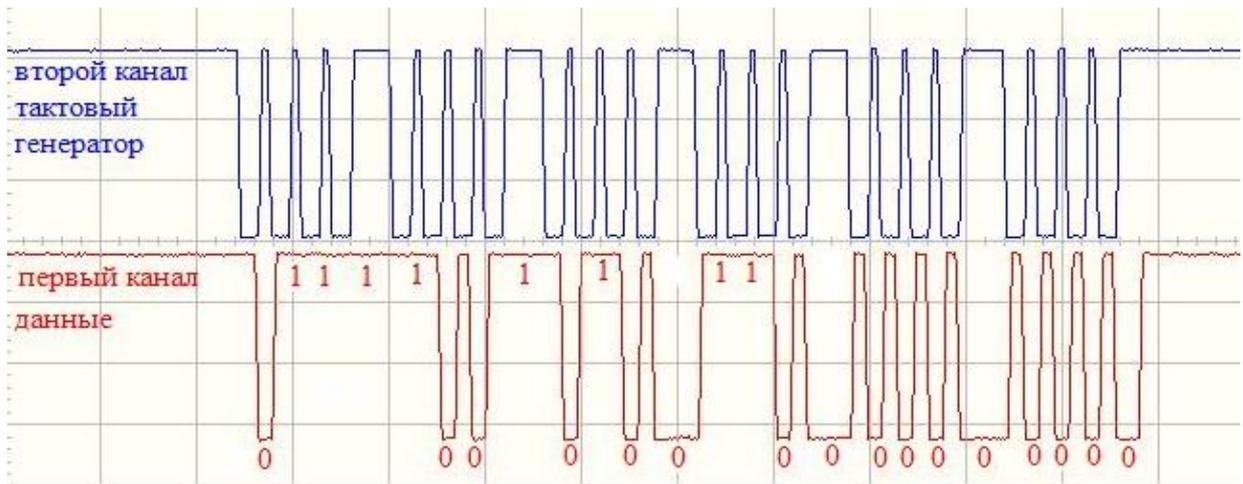


Рисунок 1.6 – Осциллограммы шин данных и тактового генератора штангенциркуля.

На осциллограмме видно, что сигнал тактового генератора представляет собой периодически повторяющийся набор из 24 прямоугольных импульсов. Штангенциркуль работает таким образом, что данные отображающиеся на индикаторе обновляются несколько раз в секунду. Между такими обновлениями в шинах генератора и данных присутствует постоянное напряжение составляющее 1,5В, а в процессе обновления индикатора в шинах появляются такие импульсы. При записи осциллограммы индикатор штангенциркуля показывал 128,58мм.

По тому, что в шине тактового генератора появился первый импульс (слева по осциллограмме) можно понять, что началось обновление показаний индикатора штангенциркуля. Когда первый импульс закончится, и напряжение сигнала тактового генератора вернется к уровню напряжения питания, возникнет первый импульс на шине данных. Притом если имеется импульс, то следует зафиксировать «0», а если импульс отсутствует, то «1». Таким образом, по представленной осциллограмме, можно записать такую последовательность нулей и единиц: 011110010100110000. Полученную последовательность следует записать в обратном порядке: 000011001010011110. Если полученную последовательность преобразовать в десятичную систему исчисления то получится число 12958, что соответствует показанию штангенциркуля.

Таким образом, если на шине данных имеется высокий логический уровень (напряжение питания, то есть между двумя ближайшими импульсами) то следует считать уровень по шине данных.

Весь измеряемый диапазон штангенциркуля укладывается в первые 16 импульсов тактового генератора, то есть в два байта, по 8 бит каждый.

Для отправки этих данных в компьютер можно использовать микроконтроллер. Принципиальная схема этого узла описываемого прибора представлена на рисунке 1.7.

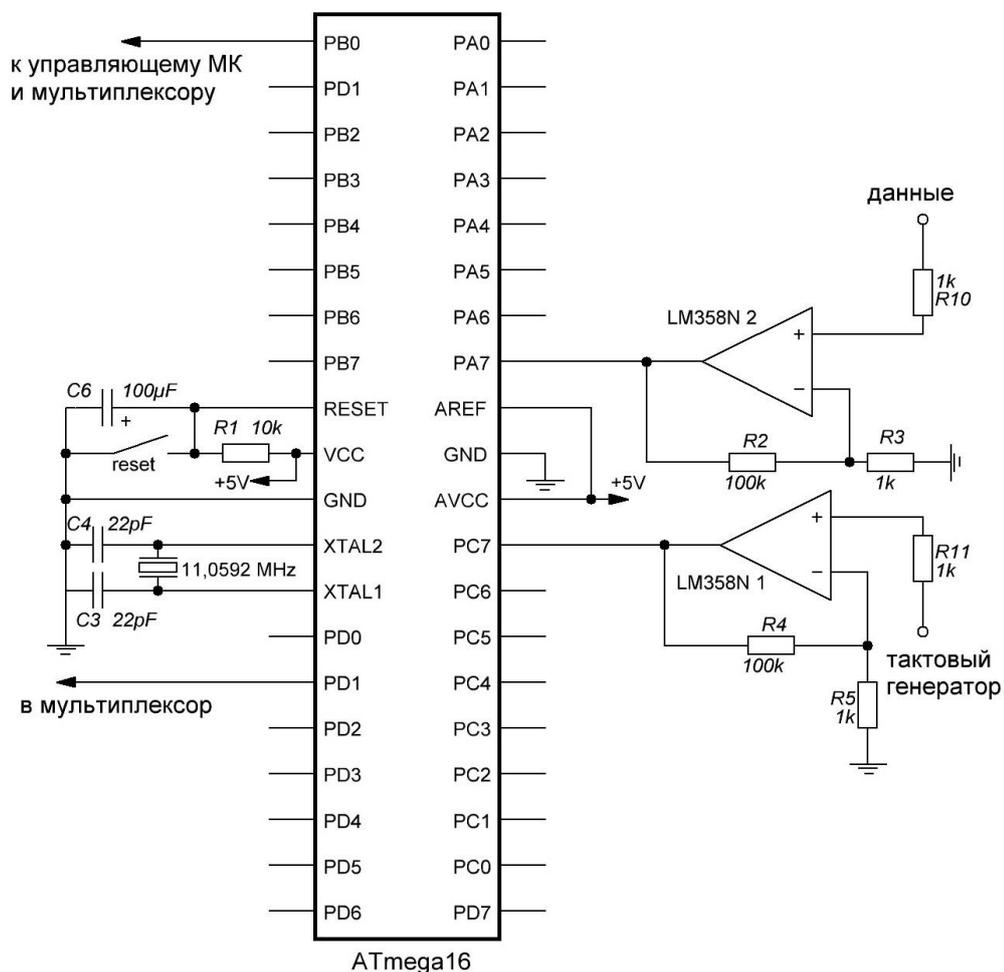


Рисунок 1.7 – Принципиальная схема контроля показаний штангенциркуля.

В схеме задействован микроконтроллер семейства AVR, производимый фирмой Atmel, ATmega16. Выбор микроконтроллера обуславливается тем что в настоящее время он получил широкое распространение в радиолюбительской практике и имеется большое количество примеров реализации устройств на его

основе, кроме того возможности такого микроконтроллера позволяют решать широкий спектр задач в том числе, все те, которые возникли в процессе разработки описываемого устройства. При выборе микроконтроллера важным фактором являлась его доступность.

Ранее было сказано, что штангенциркуль работает при напряжении питания, составляющем 1,5 вольта, и сигнал в шине данных и тактового генератора не превышает напряжения питания. Используемый микроконтроллер работает при напряжении питания, составляющем 5 вольт. Уровень логической единицы на таком микроконтроллере составляет так же составляет 5 вольт. Таким образом, для обеспечения совместной работы микроконтроллера и штангенциркуля требуется усилить сигналы последнего. Для этого были использованы операционные усилители LM358N, подключенные по классической схеме неинвертирующих усилителей. Резисторы R2, R3 и R4, R5 обеспечивают достаточно высокий коэффициент усиления для того, чтобы сигналы штангенциркуля изменялись не от 0 до 1,5 вольт, а от 0 до 5 вольт.

На рисунке так же видна цепь сброса, состоящая из размыкателя, резистора R1 и конденсатора C6, которая выполнена по широко распространенной стандартной схеме. Такая схема обеспечивает сброс микроконтроллера в момент включения питания, и так же позволяет произвести сброс в процессе работы устройства в случае возникновения каких-либо нарушений. Кроме того на рисунке видна цепь из кварцевого резонатора и согласующих конденсаторов C3 и C4, которая обеспечивает работу встроенного тактового генератора на нужной частоте.

На рисунке 1.8 представлен участок программы записанной в память микроконтроллера и обеспечивающей передачу данных штангенциркуля в компьютер.

```

239 while (1)
240 {
241   if (PINA.7 == 1 )
242   {
243     do { c=1; c=c+1; c=c-1;} while (PINA.7 == 1); };
244   // первый бит
245   if (PINA.7 == 0 ) {
246     PORTB = 0b00000001;
247     do { c=1; c=c+1; c=c-1;} while (PINA.7 == 0);
248     while(!(UCSRA & (1<<UDRE)));
249     UDR = 4;
250     if (PINA.7 == 1 )
251     {
252       a= PINC.7;
253       v=0b00000000;
254       v=v+a;
255       do { c=1; c=c+1; c=c-1;} while (PINA.7 == 1); };
256   // второй бит
257   if (PINA.7 == 0 ) {
258     do { c=1; c=c+1; c=c-1; } while (PINA.7 == 0);
259   if (PINA.7 == 1 )
260   {
261     a= PINC.7;
262     a=a<<1;
263     v=v+a;
264     do { c=1; c=c+1; c=c-1;} while (PINA.7 == 1); ;}}
265   // восьмой бит
266   if (PINA.7 == 0 ) {
267     do { c=1; c=c+1; c=c-1; } while (PINA.7 == 0);
268   if (PINA.7 == 1 )
269   {
270     a= PINC.7;
271     a=a<<7;
272     v=v+a;
273     while(!(UCSRA & (1<<UDRE)));
274     UDR = v;
275   // шестнадцатый бит
276   if (PINA.7 == 0 ) {
277     do { c=1; c=c+1; c=c-1; } while (PINA.7 == 0);
278   if (PINA.7 == 1 )
279   {
280     a= PINC.7;
281     a=a<<7;
282     v=v+a;
283     while(!(UCSRA & (1<<UDRE)));
284     UDR = v;
285     while(!(UCSRA & (1<<UDRE)));
286     UDR = 4;
287     PORTB = 0b00000000;
288     delay_ms (50); ;}}
289

```

Рисунок 1.8 – Программа контроля показаний штангенциркуля.

В строках 1 – 238 производится инициализация составляющих микроконтроллера, подключается библиотека задержек, задаются глобальные

переменные s , v и a , производится настройка портов вывода-ввода и настройка USART(универсальный синхронно-асинхронный приемо-передатчик).

В строке 239 начинается бесконечный цикл, который будет повторяться до тех пор, пока на соответствующих выводах микроконтроллера присутствует напряжение питания.

По ранее представленной осциллограмме видно, что показания с шины данных можно снимать только по завершении первого импульса тактового генератора. Таким образом, чтобы начать съем показаний следует дождаться появления такого импульса, то есть такого момента, когда напряжение в шине тактового генератора изменится с 5 вольт до 0 вольт. В строке 241 производится сравнение уровня на выводе 7 порта А с единицей, то есть проверка присутствует ли на данном выводе напряжения питания. Далее, в строке 243 производится присвоение переменной s численного значения, далее к этой переменной прибавляется единица, а затем вычитается. Эти операции представляют собой бесконечный цикл, который будет повторяться до тех пор, пока на данном выводе присутствует высокий логический уровень.

В строке 245 производится сравнение уровня на выводе 7 порта А с нулем, то есть проверка начала импульса в шине тактового генератора штангенциркуля. И если условие сравнения подтверждается, то программа переходит к следующей строке. В строке 246 выводу 0 порта В присваивается высокий логический уровень, то есть на соответствующем выводе появляется напряжение питания, и таким образом этот узел схемы описываемого прибора сигнализирует управляющему микроконтроллеру о начале обработки и передаче данных штангенциркуля.

Показания штангенциркуля можно будет считать только после окончания первого импульса тактового генератора. Для этого в строке 247 вводится бесконечный цикл, который будет повторяться до тех пор пока на выводе 7 порта А не появится 0. Как только это произойдет, микроконтроллер с помощью встроенного передатчика USART передаст в компьютер цифру 4 (строки 248 и 249), по которой при обработке экспериментальных данных и построении

диаграммы можно будет определить их принадлежность к показаниям штангенциркуля.

Далее в строке 250 производится сравнение уровня на выводе 7 порта А с единицей, и если условие сравнения выполняется, то есть если первый импульс тактового генератора закончился, то программа переходит к следующему действию.

В строке 252 производится присвоение переменной а значение соответствующее уровню на выводе 8 порта С, к которому через усилитель подключена шина данных штангенциркуля. В строке 253 производится присвоение переменной v значения 0, а в строке 254 производится сложение переменной v и а. Таким образом если переменная а равна 1, то после операции сложения переменная v окажется равной 00000001.

Далее, в строке 255 в очередной раз запускается бесконечный цикл, который будет повторяться пока уровень на выводе 7 порта А не изменится на противоположный.

Далее, при определении следующего значения по шине данных производятся аналогичные действия. Но при этом Порт В не затрагивается и в компьютер не отправляется цифра 4. Кроме того в строке 261 производится присвоение переменной а значение соответствующее уровню на выводе 8 порта С, а в строке 262 производится побитный сдвиг на один разряд влево. То есть если на шине данных присутствует логическая единица, то переменная а равна 00000001, а после сдвига окажется равной 00000010. И после операции сложения в строке 263 переменная v будет равной 00000011.

Строки 257 – 263 повторяются в программе микроконтроллера еще 4 раза, и с каждым разом побитный сдвиг переменной а увеличивается на один разряд, так что переменная v содержит восемь бит снятых с шины данных штангенциркуля. При этом первый бит шины данных занимает младший разряд переменной v, а восьмой бит занимает старший разряд. То есть, если первый, второй и четвертый биты по шине данных оказались равными единице, то переменная v равна 0001011.

В строке 273-274, то есть после определения первых восьми бит шины данных, производится отправка численного значения переменной v в компьютер.

После этого, аналогичным образом, производится определение следующих восьми бит по шине данных штангенциркуля. При определении седьмого бита переменной v вновь присваивается 0, а побитный сдвиг переменной a так же начинается с единицы. В строках 283-284 производится отправка значения переменной v , содержащей биты с 9 по 16, в компьютер. После этого производится отправка в компьютер цифры 4 (строки 285-286), которая при обработке экспериментальных данных и построении диаграммы, позволит определить окончания поток данных со штангенциркуля.

Затем, в строке 287, всем выводам порта В присваивается низкий логический уровень, то есть вывод 0 порта В примет противоположное состояние – 0 вольт, и таким образом сигнализирует управляющему контроллеру об окончании цикла передачи данных штангенциркуля в компьютер.

Поскольку поток данных штангенциркуля представляет собой 24 бита, а программа контролирует только первые 16, то в строке 288 реализована задержка выполнения программы на 50 миллисекунд. Этого времени достаточно для того чтобы пропустить оставшиеся нерассмотренными 8 бит данных штангенциркуля. После окончания задержки цикл микроконтроллера возвращается к строке 241 и начинает ожидать пока на выводе 7 порта А не произойдет смены логических уровней, то есть не поступит первый импульс тактового генератора следующей последовательности.

В результате работы такой программы в компьютер вначале поступает цифра 4, затем первый байт данных штангенциркуля, затем второй байт, и после этого еще одна цифра 4.

Контроль показаний тензорезисторов и силоизмерителя.

В конструкции описываемого прибора применены тензорезисторы КФ5П1-20-200, которые позволяют производить контроль деформаций образца с высокой точностью.

Обозначение состоит из буквенно - цифровой группы, где КФ5П1 обозначает исполнение и назначение тензорезистора, 20 - база тензорезистора, мм, а 200 – номинальное сопротивление, Ом.

На рисунке 1.9 представлена электронная схема данного узла описываемого прибора, позволяющая производить контроль показаний одного тензорезистора. Поскольку в рассматриваемом приборе предусмотрено использование двух тензорезисторов, то в таких схем в приборе должно быть две.

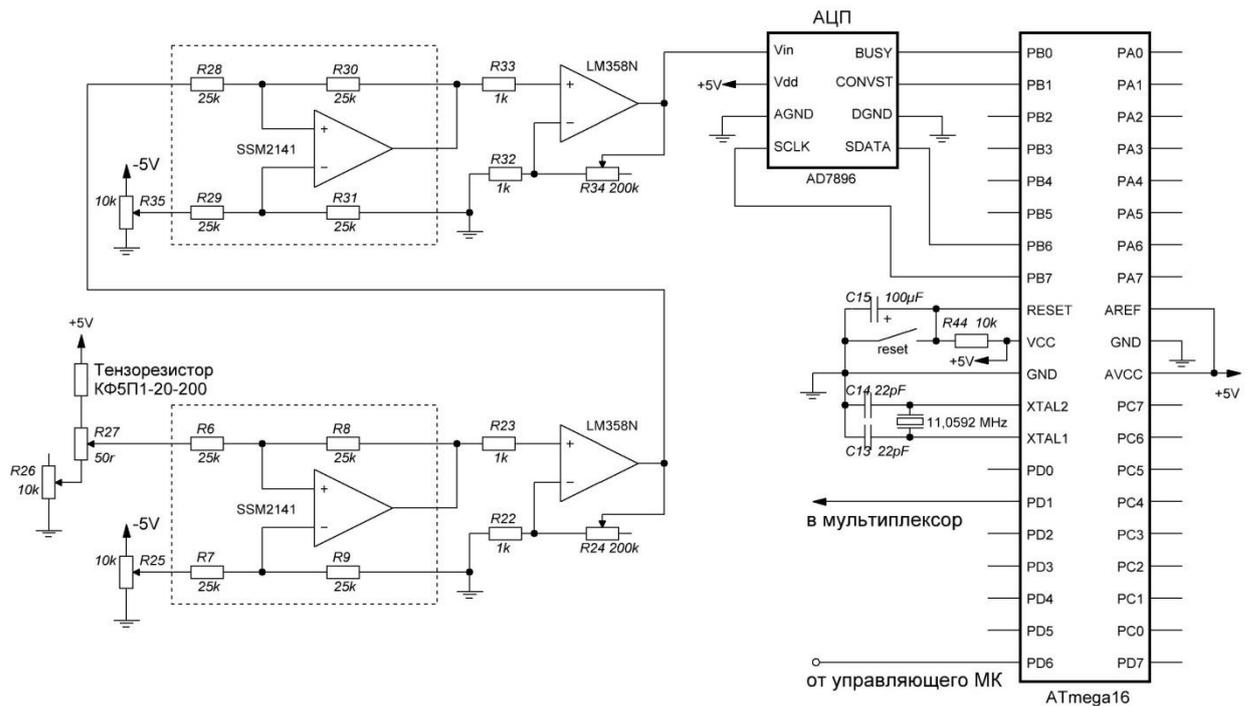


Рисунок 1.9 – Принципиальная схема контроля показаний тензорезистора.

Перед началом испытаний бетонных или фибробетонных образцов необходимо приклеить к их граням тензорезисторы. Целесообразно приклеивать тензорезисторы посередине тех граней образца, которые в процессе испытаний будут претерпевать наибольшие деформации растяжения и сжатия, то есть к условно верхней и нижней граням. В соответствии с требованиями ГОСТ 29167 в образцах следует производить начальные надрезы – концентраторы напряжений. Надрезы следует производить на растянутой и сжатой гранях образца. Очевидно, что начальные надрезы могут помешать адекватной оценке деформации рассматриваемой грани тензорезистором. Однако по ГОСТ 29167 допускается не

производить начальный надрез в верхней грани, таким образом представляется целесообразным приклеивать тензорезистор именно к сжатой (верхней) грани.

В процессе испытания образца, его грани будут претерпевать определенные деформации, поскольку к таким граням приклеены тензорезисторы, то последние так же будут деформироваться. Деформации тензорезистора будет влиять на его длину. Изменение длины тензорезистора можно контролировать по величине его сопротивления. Если тензорезистор претерпевает деформации растяжения, то его сопротивление будет возрастать пропорционально деформациям, а если сжатия, то сопротивление уменьшится.

Существует несколько схемотехнических решений, позволяющих контролировать изменение сопротивления тензорезистора, и многие из них были опробованы в процессе разработки описываемого прибора, и была выбрана полумостовая схема. Выбор обусловлен простотой реализации и удобством использования такой схемы.

Полумостовая схема представляет собой простейший и широко распространенный резистивный делитель напряжения. Схема такого делителя представлена на рисунке 1.10.

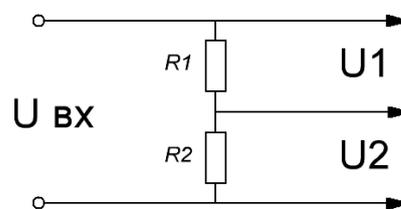


Рисунок 1.10 – Резистивный делитель напряжения.

На вход такой схемы можно подать напряжение практически любой величины, и на ее выходе будут два напряжения, сумма которых составляет величину входного напряжения. Работу такого устройства можно описать формулой 1.1.

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2} \quad (1.1)$$

Таким образом, изменяя величины сопротивлений R_1 и R_2 , можно добиться изменения величин напряжений на выходе делителя.

На схеме (рис. 1.9) полумост представлен подстроечными резисторами R_{26} , R_{27} и тензорезистором. Резистор R_{26} образует одно плечо полумоста, а тензорезистор – другое. Резистор R_{27} имеет небольшое сопротивление и его номинал следует регулировать вначале каждого испытания для нивелирования разброса номиналов тензорезисторов. Регулировку следует производить таким образом, чтобы выходное напряжение делителя до начала испытания составляло 2,5 вольта.

Такая настройка делителя позволяет некоторым образом унифицировать схемы контроля показания обоих тензорезисторов, поскольку они могут, как уменьшать, так и увеличивать свое сопротивление в процессе испытания образца, и при этом будет меняться выходное напряжение полумоста. То есть напряжение в 2,5 вольта выбрано как среднее между нулем и напряжением питания всей схемы, и представляет собой условный нуль, относительно которого оценивается деформации образца.

В зависимости от величин деформаций тензорезисторов выходной напряжение полумоста будет меняться, однако это изменение представляет собой единицы милливольт, что несущественно на фоне условного нуля (2,5 вольта). Для корректной оценки деформаций тензорезистора необходимо произвести усиление переменной составляющей выходного напряжения полумоста. Для этого в схеме был использован вычитатель на операционном усилителе, представленный на схеме резисторами R_6 , R_7 , R_8 , R_8 и операционным усилителем SSM2141. Большое значение имеет точный подбор номиналов резисторов R_6 , R_7 , R_8 , R_8 , поскольку в данном случае они должны иметь равные номиналы. Такой особенностью обуславливается выбор этого операционного усилителя, поскольку конструктивно он выполнен в одном корпусе с этими резисторами. К неинвертирующему входу такого операционного усилителя подключено выходное напряжение полумоста, а к инвертирующему – некоторое отрицательное напряжение, величину которого можно регулировать

подстроечным резистором R25. На выходе вычитателя будет напряжение, представляющее собой разность между напряжением полумоста и отрицательным напряжением, подведенным к вычитателю. Таким образом, на выходе вычитателя, регулированием резистора R25, можно получить только полезную составляющую выходного напряжения полумоста.

Далее, полученный сигнал усиливается с помощью операционного усилителя LM358N и резисторов R22, R24. Усилитель собран по классической и широко распространенной схеме неинвертирующего усилителя. Коэффициент усиления нужно регулировать подстроечным резистором R24 таким образом, чтобы выходное сопротивление усилителя составило 2,5 вольта.

После этого усиленный сигнал поступает на второй вычитатель, и второй усилитель, на них еще раз производится вычитание постоянной составляющей сигнала и усиление переменной. При этом вычитаемое напряжение можно регулировать резистором R35, а усиление - резистором R34. В результате, при правильной настройке, можно добиться достаточно большого усиления полезной составляющей выходного напряжения полумоста, которая зависит от деформаций тензорезистора.

Далее следует отправить полученные данные в компьютер. Для этого использован аналого-цифровой преобразователь AD7896. Выбор такого преобразователя обусловлен доступностью, простотой и удобством его использования. Аналоговый сигнал, то есть усиленная полезная составляющая выходного напряжения полумоста, поступает на вход преобразователя, и далее преобразованный сигнал поступает на микроконтроллер ATmega16, который в свою очередь отправляет полученные данные в передатчик. На схеме видна цепь сброса, состоящая из размыкателя, резистора R45 и конденсатора C18 и цепь, состоящая из кварцевого резонатора и согласующих конденсаторов C3 и C4, которая обеспечивает работу встроенного тактового генератора на нужной частоте.

Микросхема AD7896 передает данные в микроконтроллер по протоколу SPI. В микроконтроллере присутствует встроенный аналого-цифровой

преобразователь, однако он уступает в точности преобразователю AD7896, поэтому было принято решение его не использовать. Далее, на рисунке 1.11 представлен участок программы, записанной в память микроконтроллера, обеспечивающий его взаимодействие с аналого-цифровым преобразователем и отправку данных в передатчик.

```

205 while (1)
206     {
207         if (PIND.6 == 1 )
208         {
209             while(!(UCSRA & (1<<UDRE)));
210             UDR = 2;
211             voltage_ADC = ADC_read();
212             while(!(UCSRA & (1<<UDRE)));
213             UDR = 2; }
214             delay_ms(100);
215         }
216     }
217

```

Рисунок 1.11 – Участок программы контроля показаний тензорезисторов и силоизмерителя.

В строках 1-204 производится инициализация составляющих микроконтроллера, подключается библиотека задержек, библиотека SPI, задаются глобальные переменные *s*, *v* и *a*, производится настройка портов вывода-ввода, настройка USART(универсальный синхронно-асинхронный приемо-передатчик), а также формируется функция, взаимодействующая с аналого-цифровым преобразователем.

В строке 205 начинается бесконечный цикл, который будет повторяться до тех пор, пока на соответствующих выводах микроконтроллера присутствует напряжение питания.

В строке 207 производится сравнение вывода 6 порта D с единицей, и если условие выполняется, то программа переходит к следующему действию. То есть если на выводе 6 порта D появляется логическая единица (5 вольт), то программа продолжает работать, в противном случае ничего не происходит. Логическая единица появляется на данном выводе в результате действия управляющего микроконтроллера.

Далее, в строках 209 и 210, производится отправка в компьютер цифры 2, по которой в процессе построения диаграммы разрушения испытываемого образца можно будет определить принадлежность этих данных к показаниям тензорезистора. После этого, в строке 211, производится активация специальной функции, которая взаимодействует с аналого-цифровым преобразователем. Затем, в строках 212 и 213, производится повторная отправка цифры 2, по которой в дальнейшем потребуется при обработке полученных данных. Далее, в строке 214, выполняется задержка в выполнении программы на 100 миллисекунд, для исключения возможности повторного выполнения всего цикла. После этого цикл заканчивается, поскольку он занимает меньше времени чем на выводе 6 порта D присутствует высокий логический уровень. Цикл повторится только при следующем появлении соответствующего сигнала управляющего микроконтроллера.

Функция, взаимодействующая с аналого-цифровым преобразователем, представлена на рисунке 1.12.

```
44
45 unsigned int ADC_read(void)
46 {
47     unsigned int voltage;
48
49     n_convst =0;
50     n_convst =1;
51     while (_busy);
52
53     voltage=spi(0);
54
55     while(!(UCSRA & (1<<UDRE)));
56     UDR = voltage;
57
58     voltage=spi(0);
59
60     while(!(UCSRA & (1<<UDRE)));
61     UDR = voltage;
62
63     return voltage;
64 }
65
```

Рисунок 1.12 – Функция, взаимодействующая с АЦП.

Строка 211 основного цикла (рис. 1.11) активизирует данную функцию, переводя выполнение программы к строке 45 функции (рис. 1.12). В строке 47 задается переменная, *voltage*, которой в процессе выполнения данной функции будет присваиваться значение напряжения измеренного аналого-цифровым преобразователем. До начала работы функции вывод 0 порта В содержит высокий логический уровень (5 вольт), в строке 49 этому выводу присваивается низкий логический уровень (0 вольт), и далее, в строке 50, этому выводу присваивается высокий логический уровень. Таким образом, на выводе 0 порта В образуется короткий отрицательный импульс, попадающий на вывод CONVST аналого-цифрового преобразователя, и активизирующий его, то есть начинается преобразование аналогового сигнала усилителя в цифровую для дальнейшей отправки в компьютер. Строка 51 означает, что программа не будет работать до тех пор пока не завершится преобразование. Аналого-цифровой преобразователь AD7896 преобразует напряжение в 12-ти битную последовательность и формирует из нее два 8-ми битных байта. Первый из них записывается в переменную *voltage* в строке 53, после чего (строки 55 и 56) ее содержимое отправляется в компьютер. Затем, в строке 58, второй байт записывается так же в переменную *voltage*, заменяя ее прежнее содержимое, после чего, в строках 60 и 61, это содержимое так же отправляется в компьютер. Функция обязательно должна возвращать какую-либо переменную, что и происходит в строке 63. С этой переменной можно работать в основном цикле, но такая возможность, в данном случае, не требуется. В строке 64 работа функции заканчивается и программа возвращается к основному циклу, то есть к строке 212 на рисунке 1.11.

Ранее было упомянуто, что в данном приборе предусмотрены два тензорезистора, то есть в приборе должно быть две рассматриваемые схемы. Разница между этими схемами заключается в программах микроконтроллеров, показания одного из тензорезисторов отделены от остальных данных двумя двойками, а другого тензорезистора двумя тройками.

В конструкции прибора так же применен силоизмеритель STC-5000. Это устройство представляет собой тензометрический датчик силы, способный

измерять нагрузку до 50 кН(5000кг). Конструктивно датчик представляет собой S-образный упругий металлический элемент, внутри деформируемой зоны которого размещен тензорезистор.

Поскольку принцип работы силоизмерителя и тензорезистора один, то схемотехнические решения, контролирующие их показания, отличаются незначительно. Разница заключается в том, что для получения сигнала с этого датчика достаточно подвести к его входам постоянное напряжение, и тогда в зависимости от величины прилагаемой нагрузки будет меняться напряжение на выходе датчика. Изменение напряжения от нагрузки достаточно большое, так что оказалось достаточным произвести только одно вычитание постоянной составляющей и одно усиление переменной. Схема вычитателя, усилителя и преобразователя представлена на рисунке 1.13. Так же на рисунке 1.13 представлена схема преобразователя однополярного напряжения в двухполярное. Которая была использована для обеспечения отрицательного напряжения для вычитателей. При отправке данных силоизмерителя в компьютер его показания отделяются двумя единицами.

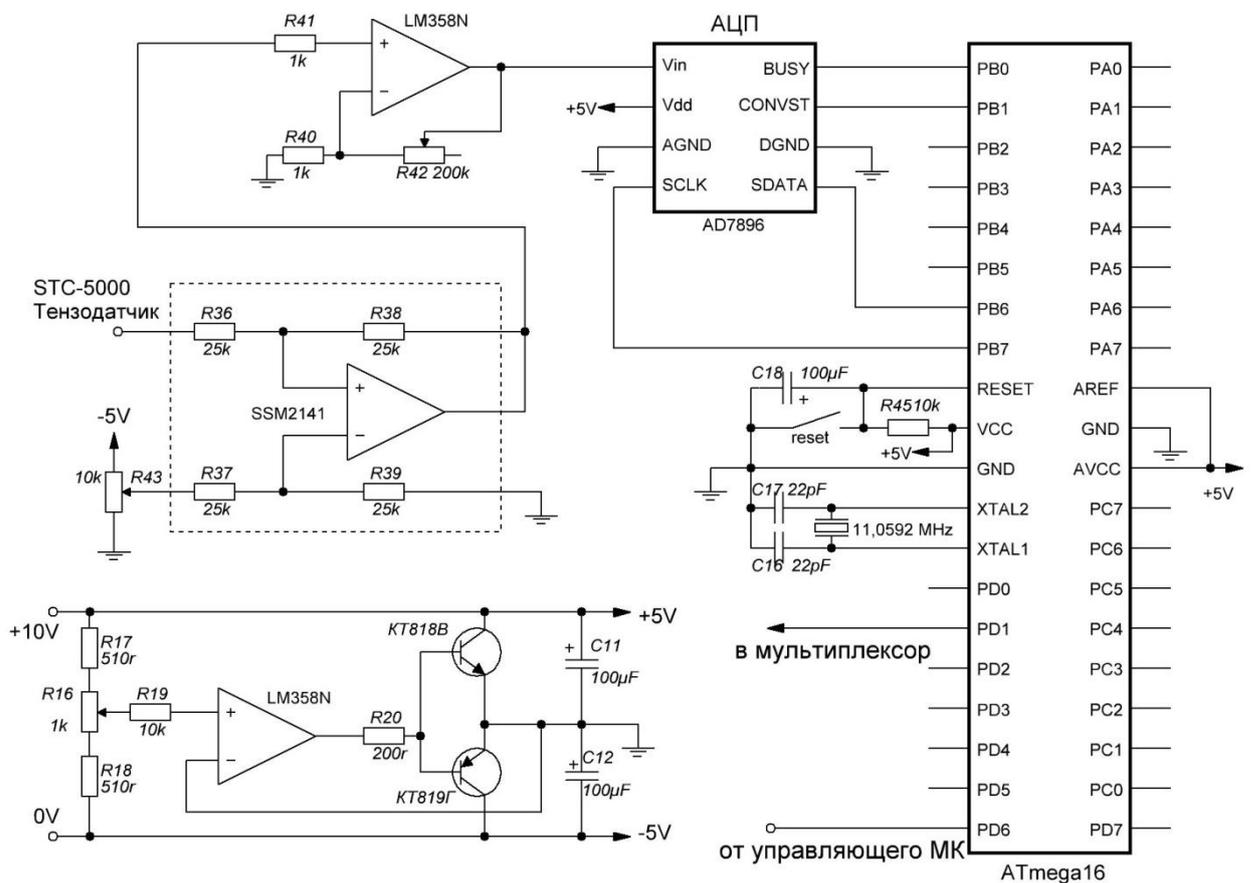


Рисунок 1.13 – Схема контроля показаний силоизмерителя и преобразователь питания.

Сигнал силоизмерителя подключен к неинвертирующему входу вычитателя SSM2141. К неинвертирующему входу вычитателя подключено отрицательное напряжение, величину которого можно регулировать подстроечным резистором R43. В результате работы вычитателя на его выходе появится разность между напряжением сигнала силоизмерителя вычитаемым напряжением. Таким образом, можно добиться практически полного исключения постоянной составляющей сигнала силоизмерителя. Переменная составляющая сигнала с выхода вычитателя поступает на неинвертирующий вход операционного усилителя LM358N. Коэффициент усиления можно регулировать подстроечным резистором R42, таким образом чтобы усиленный сигнал изменялся до уровня не превышающего напряжение питания. После этого усиленный сигнал поступает на аналого-цифровой преобразователь, и далее в микроконтроллер ATmega16. Этот микроконтроллер так же как и в предыдущем случае имеет цепь сброса, состоящую из размыкателя, резистора R45 и конденсатора C18 и цепь из кварцевого резонатора и согласующих конденсаторов C3 и C4, которая обеспечивает работу встроенного тактового генератора на нужной частоте.

Преобразователь напряжения питания состоит из резисторов R17, R18, R19, R20, подстроечного резистора R 16, операционного усилителя LM358N, биполярных транзисторов KT818В и KT819Г и конденсаторов C11 и C12 и преобразует однополярное напряжение в 10 вольт в двухполярное ± 5 вольт. Притом во всей схеме усилители, аналого-цифровые преобразователи, микроконтроллеры и передатчик работают при напряжении питания +5 вольт, а для работы вычитателя требуется напряжение – 5 вольт.

Операционный усилитель LM358N сравнивает напряжение на неинвертирующем входе с резистивного делителя R17, R16, R18 с напряжением, на инвертирующей входе. В соответствии с этим корректируется выходной сигнал, регулирующий напряжения на базах транзисторов KT818В и KT819Г. Регулированием величин сопротивлений делителя подстроечным резистором R16

можно менять изменяя соотношение выходных напряжений такого преобразователя так чтобы они составляли не только ± 5 вольт, но и любые другие, не превышающие 10 вольт. Такая схема преобразователя широко распространена в радиолюбительской практике.

Управление узлами контроля показаний измерительных устройств и передача данных в компьютер.

Очередностью работы микроконтроллеров силоизмерителя, тензорезисторов и штангенциркуля управляет специальный узел. Принципиальная схема такого узла представлена на рисунке 1.14.

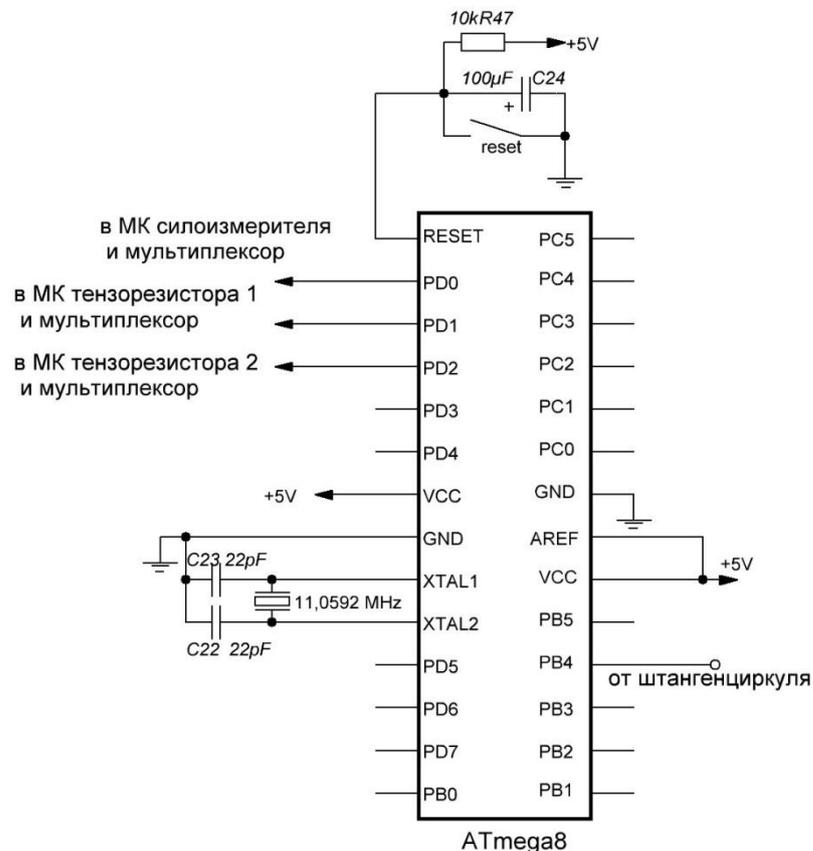


Рисунок 1.14- Схема управляющего узла прибора

В основе этого узла задействован микроконтроллер ATmega8. На схеме видна цепь сброса, состоящая из размыкателя, резистора R47 и конденсатора C24 и цепь из кварцевого резонатора и согласующих конденсаторов C23 и C22, которая обеспечивает работу встроенного тактового генератора на нужной частоте.

К выводу 4 порта В этого микроконтроллера подключен вывод 0 порта В микроконтроллера штангенциркуля. При поступлении соответствующего сигнала на этот вывод включается программа записанная в памяти микроконтроллера и, в результате его работы, на выводах 0, 1 и 2 порта D появляются сигналы управляющие микроконтроллерами других измерительных устройств. Участок программы управляющего микроконтроллера, обеспечивающий его работу, представлен на рисунке 1.15.

```

131 while (1)
132     {
133
134     if (PINB.4 == 0 )
135         {
136
137         PORTD = 0b00000001;
138         delay_ms (8);
139         PORTD = 0b00000010;
140         delay_ms (8);
141         PORTD = 0b00000100;
142         delay_ms (8);
143         do
144             { c=1;
145               c=c+1;
146               c=c-1;}
147         while
148             (PINB.4 == 0);
149         };
150     }
151 }
152

```

Рисунок 1.15 – Участок программы управляющего микроконтроллера.

В строках 1-130 программы производится инициализация составляющих микроконтроллера, подключается библиотека задержек, задается глобальная переменная с и производится настройка портов вывода-ввода.

В строке 131 начинается бесконечный цикл, который будет повторяться до тех пор, пока на соответствующих выводах микроконтроллера присутствует напряжение питания.

В строке 134 производится сравнение вывода 4 порта В с нулем, если условие выполняется, то программа продолжает выполняться. К данному выводу подключен вывод 0 порта В микроконтроллера штангенциркуля. В строке 246

программы управления микроконтроллером штангенциркуля (рис. 8) выводу 0 порта В присваивается высокий логический уровень, а в строке 287 – низкий логический уровень. То есть, в то время пока производится преобразование и передача данных штангенциркуля, на этом выводе присутствует напряжение питания (5 вольт), а для начала работы программы управляющего микроконтроллера на нем должен присутствовать 0. Таким образом, управляющий микроконтроллер в первую очередь ожидает выполнения одного цикла программы микроконтроллера штангенциркуля, и выполняет свою программу только между такими циклами.

В строке 137 программы управляющего микроконтроллера производится установка на выводе 0 порта D высокого логического уровня. Высокий логический уровень (5 вольт) уровень будет присутствовать на данном выводе, в соответствии со строкой 138, в течении 8 миллисекунд.

В строке 139 программы управляющего микроконтроллера производится установка на выводе 1 порта D высокого логического уровня. Высокий логический уровень (5 вольт) уровень будет присутствовать на данном выводе, в соответствии со строкой 140, в течении 8 миллисекунд.

В строке 141 программы управляющего микроконтроллера производится установка на выводе 2 порта D высокого логического уровня. Высокий логический уровень (5 вольт) уровень будет присутствовать на данном выводе, в соответствии со строкой 142, в течении 8 миллисекунд.

К выводам 0, 1 и 2 порта D подключены выводы 6 портов В микроконтроллеров тензорезисторов и силоизмерителя. При появлении на этих выводах высокого логического уровня программы соответствующих микроконтроллеров начинают работать, преобразуя данные измерительных устройств и отправляя их в мультиплексор.

Таким образом управляющий микроконтроллер по очереди посылает сигналы в микроконтроллеры разных измерительных устройств, активируя при этом их программы.

В строках 143-148 программы управляющего микроконтроллера производится выполнение, рассмотренного ранее, бесконечного цикла который работает до тех пор, пока на выводе 4 порта В присутствует низкий логический уровень. Когда на данном уровне появится высокий логический уровень, это будет означать, что началось выполнение программы микроконтроллера штангенциркуля. После появления на выводе 4 порта В напряжения питания программа возвращается в начало, к строке 134.

В результате на одно показание штангенциркуля приходится один цикл программы управляющего микроконтроллера.

Передача данных в компьютер

Для передачи данных, содержащих показания измерительных устройств, используется еще один микроконтроллер ATmega16 и специальный передатчик. Схема передачи данных в компьютер представлена на рисунке 1.16.

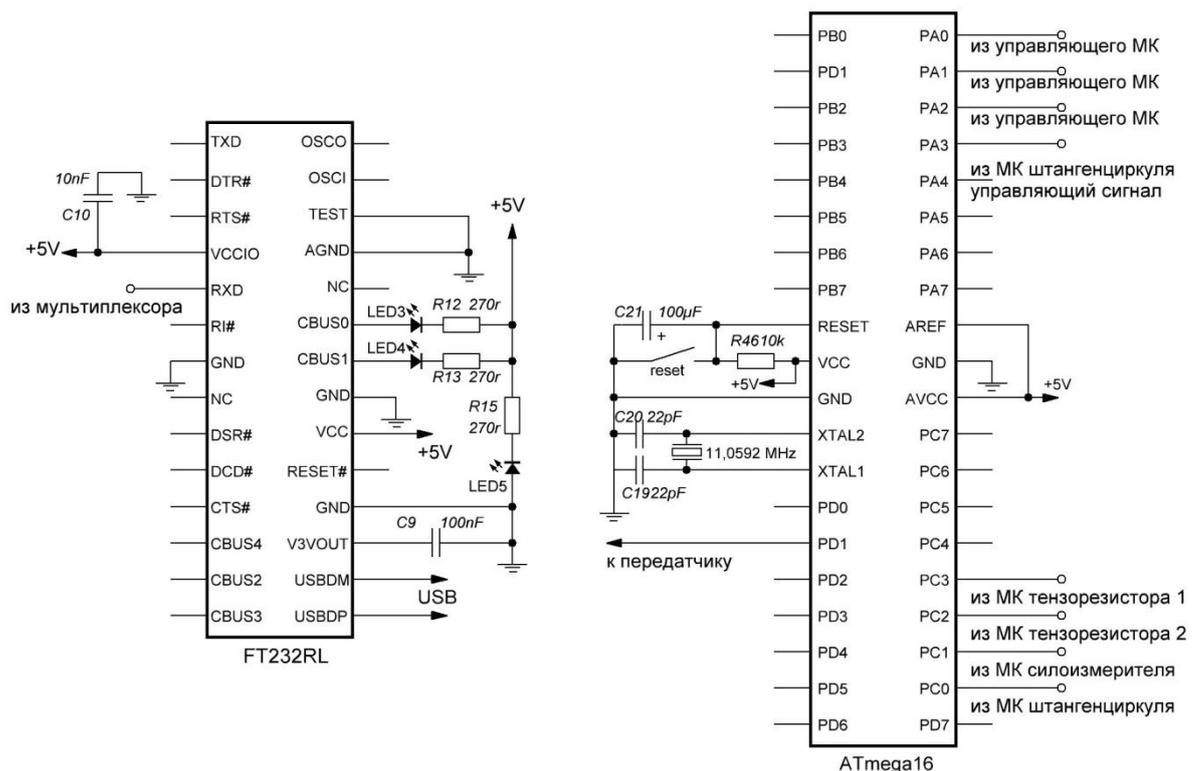


Рисунок 1.16 – Схема передачи данных в компьютер.

Микроконтроллер, так же как и в предыдущем случае, имеет цепь сброса, состоящую из размыкателя, резистора R46 и конденсатора C21 и цепь из кварцевого резонатора и согласующих конденсаторов C20 и C19, которая

обеспечивает работу встроенного тактового генератора на нужной частоте. В данном случае этот микроконтроллер работает по принципу мультиплексора, то есть имеет несколько входов и один выход и в зависимости от сигналов управляющих цепей повторяет на выходе один из входных сигналов.

Программа обеспечивающая работу микроконтроллера в режиме мультиплексора представлена на рисунке 1.17.

```
131 while (1)
132     {
133
134     if (PINA.3 == 1 )
135         {
136             PORTD = PINC.0;
137         };
138     if (PINA.2 == 1 )
139         {
140             PORTD = PINC.1;
141         };
142     if (PINA.1 == 1 )
143         {
144             PORTD = PINC.2;
145         };
146     if (PINA.0 == 1 )
147         {
148             PORTD = PINC.3;
149         };
150     }
151 }
152
```

Рисунок 1.17 - Программа управления мультиплексором.

В строках 1-130 программы производится инициализация составляющих микроконтроллера и производится настройка портов вывода-ввода.

В строке 131 начинается бесконечный цикл, который будет повторяться до тех пор, пока на соответствующих выводах микроконтроллера присутствует напряжение питания.

Микроконтроллер штангенциркуля, в соответствие со своей программой, имеет два, подключенных к мультиплексору, вывода. Из одного вывода исходит управляющий сигнал, а из другого – поток данных содержащих показание штангенциркуля. Притом потоку данных соответствует высокий логический

уровень управляющего сигнала, а когда поток данных прерывается, то управляющий сигнал обращается в 0.

Микроконтроллеры тензорезисторов и силоизмерителя также имеют выводы, несущие результаты замеров. Программы этих контроллеров включались по сигналу управляющего микроконтроллера, притом этот сигнал представлял собой положительный импульс. Выводы управляющего микроконтроллера подключены не только к выводам микроконтроллеров измерительных устройств (рис. 1.14), но и к выводам мультиплексора (рис. 1.16).

Таким образом, к выводам мультиплексора подключены потоки данных и управляющие сигналы с микроконтроллеров всех измерительных устройств (штангенциркуль, тензорезисторы и силоизмеритель).

В строке 134 производится сравнение вывода 3 порта А с единицей. То есть производится проверка наличия на данном выводе управляющего сигнала штангенциркуля. Если условие сравнения выполняется, то программа переходит к строке 136, в которой все выводы порта D повторяют сигнал, присутствующий на выводе 0 порта С. То есть повторяют последовательность нулей и единиц, представляющий собой показание штангенциркуля. Операция повторения будет повторяться пока на выводе 3 порта А присутствует высокий логический уровень, то есть пока на данном выводе присутствует высокий логический уровень управляющего сигнала.

Если же условие в строке 134 не выполняется, то программа переходит к строке 138, где производится сравнение вывода 2 порта А с единицей. При выполнении условия сравнения программа выполняет строку 140, в соответствии с которой все выводы порта D повторяют сигнал, присутствующий на выводе 1 порта С. То есть повторяют поток данных силоизмерителя. Операция повторения будет повторяться пока на выводе 2 порта А присутствует высокий логический уровень, то есть пока на данном выводе присутствует высокий логический уровень управляющего сигнала.

Аналогичные операции производятся в оставшихся строках программы, производится проверка наличия управляющих сигналов и либо перевод потока

данных тензорезисторов на вывод, либо переход к следующей операции сравнения. После выполнения строки 146 или 143, программа возвращается к строке 134, где весь цикл начинается сначала.

Таким образом, по наличию управляющего сигнала соответствующие ему показания измерительных устройств попадают на выход мультиплексора.

С выхода мультиплексора поток данных, содержащих показания измерительных устройств, попадает на вход передатчика.

В качестве передатчика использована микросхема RS232RL. Данная микросхема конвертирует протокол передачи данных микроконтроллеров USART в протокол USB который по соответствующему кабелю подключается к компьютеру. На схеме видны конденсаторы C10 и C9, они подключены к передатчику в соответствии со схемой рекомендованной его производителем. Так же на схеме видны светодиоды LED3, LED4 и LED5, а также резисторы R12, R13 и R15. Резисторы ограничивают силу тока, проходящую через светодиоды. Светодиод LED5 работает постоянно и показывает наличие в цепи напряжения питания, а светодиоды LED3 и LED4 мигают в процессе передачи данных.

Драйверы такой микросхемы, обеспечивающие ее взаимодействие с компьютером, являются свободно распространяемыми и находятся в открытом доступе.

Так же свободно распространяемой, является программа позволяющая просматривать и записывать данные получаемые компьютером в результате взаимодействия с микросхемой RS232RL. Эта программа называется «Terminal v1.9b by Brau», ее рабочее окно представлено на рисунке 1.18.

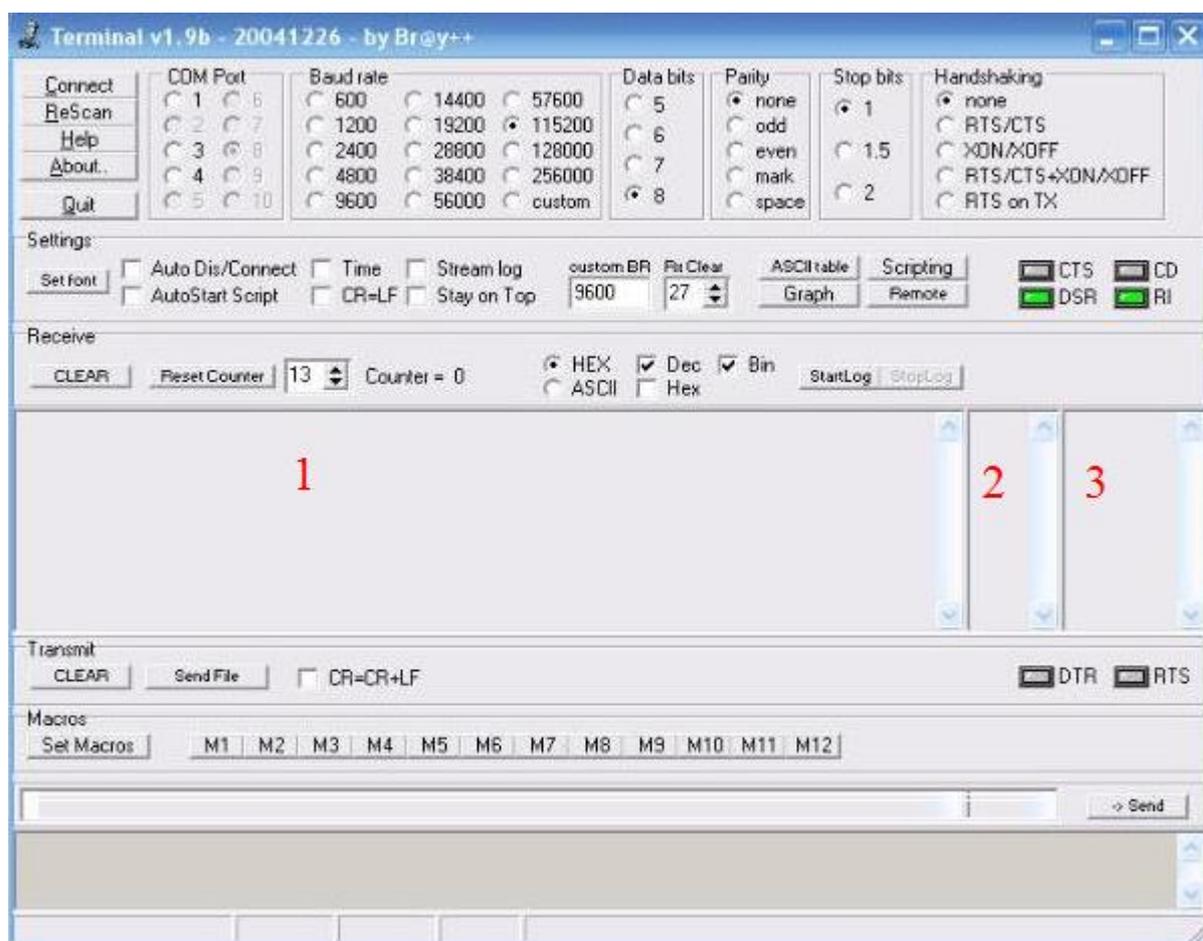


Рисунок 1.18 - Рабочее окно программы Terminal v1.9b by Bray.

В окне программы можно настроить номер COM порта к которому подключена микросхема RS232RL, скорость передачи данных и параметры самого потока данных. Так же в окне видны три зоны, в которые выводятся принятые данные. В первую зону данные выводятся в шестнадцатеричной системе исчисления, во вторую – в двоичной, а в третью – в десятичной.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

ОБРАБОТКА ПОКАЗАНИЙ

Данные получаемые в ходе испытаний представляют собой поток нулей и единиц. Эти данные преобразуются в десятичную систему исчисления терминальной программой. В этой же терминальной программе данные записываются в столбик. Его нужно копировать в первую колонку рабочего листа программы Excel. В этой колонке показания прибора представлены в виде последовательности данных полученных от штангенциркуля тензорезисторов и силоизмерителя. Притом показания силоизмерителя отделены двумя единицами, тензорезисторов – двойками и тройками, а показания штангенциркуля – четверками. Каждое из показаний прибора записано в две строки. Необходимо преобразовать полученные данные в десятичную систему исчисления, и рассортировать показания измерительных приборов по разным колонкам рабочего листа.

Далее по полученным координатам можно построить диаграммы. При этом важно иметь в виду, что координаты этих диаграмм представляют собой просто преобразованные из двоичной системы исчисления в десятичную данные аналого-цифровых преобразователей (АЦП). Для того чтобы преобразовать показания АЦП в величины нагрузок и деформаций, то есть в килоньютоны и миллиметры, необходимо испытать серию образцов изготовленных из материала с известными или заранее установленными физикомеханическими характеристиками, а по полученным данным проградировать силоизмеритель и тензорезисторы. Например, по прочности образца на растяжение при изгибе можно присвоить максимальному показанию силоизмерителя определенное значение нагрузки.

Для того чтобы установить момент в который необходимо при построении диаграммы перейти от показаний тензорезисторов к показаниям штангенциркуля следует построить график зависимости показаний тензорезисторов от прилагаемых нагрузок искомой точкой будет являться та, после которой проявится нелинейность.

В результате произведенных действий получатся четыре колонки, содержащие данные о прогибах образца, полученные по показаниям тензорезисторов и штангенциркуля, и данные о прилагаемых нагрузках, полученные по показаниям тензорезистора.

На следующем этапе необходимо произвести обработку полученной диаграммы для определения силовых и энергетических характеристик трещиностойкости испытываемых материалов.

Для этого удобно скопировать координаты полученной диаграммы на новый лист. И далее произвести дополнительные построения.

Важно отметить, что в случае необходимости определения численных значений только модуля упругости и коэффициента интенсивности напряжений можно использовать приведенные формулы, поскольку они связывают только показания тензорезистора и силоизмерителя, однако если имеется необходимость определения энергозатрат на разных этапах деформирования следует корректировать показания штангенциркуля. Дело в том, что для корректного применения формул предлагаемых ГОСТ29167 в них должны быть применены численные значения прогибов и нагрузок, получаемых в ходе трехточечного изгиба образцов. Важно повторить, что в разработанной методике предлагается использовать четырехточечную схему изгиба. Поскольку при разрушении образца трещина проходит через начальный надрез, разумно предположить что в месте надреза и будет максимальный прогиб образца, то есть в середине пролета образца. При использовании разработанного метода за прогиб на стадии пластического деформирования образца принимается изменение расстояния между точками опирания и приложения нагрузки, и чтобы привести эти значения к виду прогиба в середине пролета нужно умножить все показания штангенциркуля на некоторый переводной коэффициент, зависящий от расстояний между точками приложения нагрузки и опирания образца, в рассматриваемом случае такой коэффициент составил 1,62.

Кроме показаний штангенциркуля необходимо привести значения нагрузок к нагрузкам эквивалентным трехточечному изгибу. Для этого необходимо так же

произвести умножение всех значений нагрузок на переводной коэффициент. Такой коэффициент можно вывести через определение прочности образца. Можно определить его прочность при четырехточечном изгибе, затем подставить это значение в формулу расчета прочности при трехточечном изгибе и выразить из этой формулы нагрузку. Переводным коэффициентам будет служить отношение нагрузок при разных схемах изгиба. Можно аналогичным образом откорректировать прогибы на стадии упругого деформирования, для этого необходимо использовать имеющуюся нагрузку и значения модуля упругости полученного по результатам четырехточечного изгиба.

В качестве примера рассмотрена диаграмма разрушения образца мелкозернистого бетона армированного стальной проволочной фиброй (2% об.). Мелкозернистый бетон имел цементнопесчаное отношение равное 1:2 и водоцементное отношение равное 0,37. Фибра представляла собой отрезки стальной проволоки круглого сечения и волнового профиля диаметром 0,3мм и длиной 22мм. После приготовления смеси и формования образца он подвергался тепло-влажностной обработке и после этого выдерживался в воздушно нормальных условиях в помещении лаборатории в течение двух недель.

В соответствие с требованиями ГОСТ 29167 следует провести линию DK перпендикулярную горизонтальной оси диаграммы. Линия проводится с начала прямолинейного нисходящего участка диаграммы, то есть из точки D (Рис 2.6).

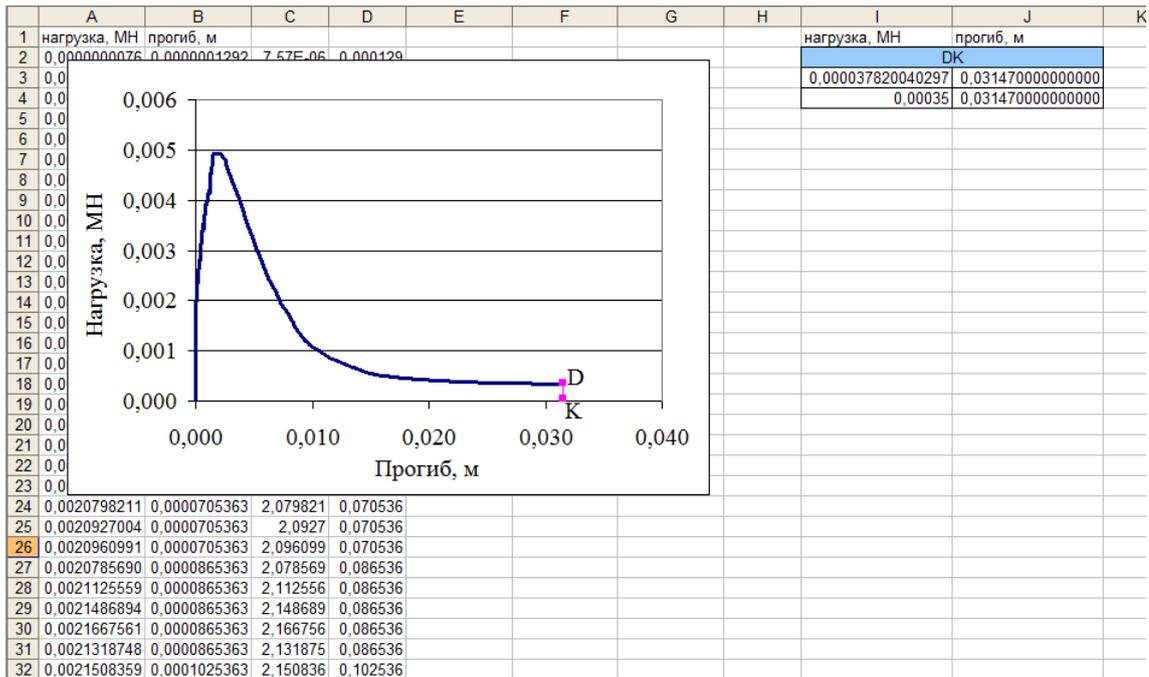


Рисунок 2.6 – Диаграмма разрушения фибробетонного образца и линия DK.

Поскольку испытания с использованием описываемого устройства производятся по схеме с неравновесным характером приложения нагрузки то определять некоторые характеристики трещиностойкости некорректно, кроме того, собственные исследования автора показывают, что наиболее показательными характеристиками трещиностойкости материалов являются условные энергозатраты на деформирование образца до начала движения магистральной трещины (G_i^*), условные удельные эффективные энергозатраты на статическое разрушение (G_f^*) и условный критический коэффициент интенсивности напряжений (K_c^*). Так же предлагается определять условные удельные энергозатраты на упругопластическое деформирование до формирования магистральной трещины (G_c^*).

Для того, чтобы определить численные значения этих величин необходимо произвести построение линии СН, то есть перпендикуляра к горизонтальной оси, проходящего через точку С диаграммы соответствующую началу движения магистральной трещины. После этого необходимо произвести построение линии АС, которая параллельна линии ОТ, лежащей вдоль зоны диаграммы, описывающей упругие деформации. Затем следует построить перпендикуляр ТВ к

горизонтальной оси проходящий через точку Т(Рис 2.6). Важно отметить, что в соответствие с требованиями ГОСТ 29167 прилагаемая к образцу нагрузка должна измеряться в меганьютонах, а прогибы вызываемые действием этой нагрузки в метрах.

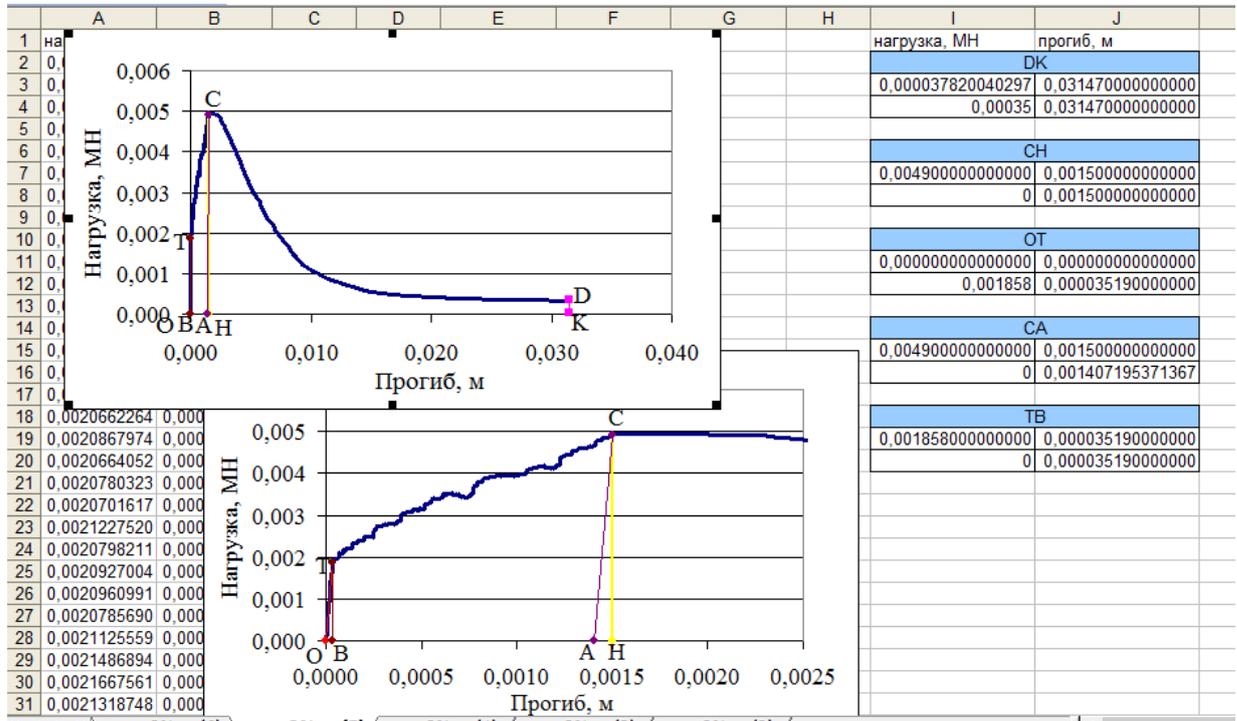


Рисунок 2.6 – Диаграмма разрушения фибробетонного образца с дополнительными построениями.

Произведенные дополнительные построения делят диаграммы на определенные участки, оперируя площадями под отделенными участками диаграммы можно определить соответствующие им энергозатраты.

Энергозатраты на процессы развития и слияния микротрещин до формирования магистральной трещины статического разрушения (W_m) определяются как площадь фигуры OTCA. Энергозатраты на упругое деформирование до начала движения магистральной трещины статического разрушения (W_e) определяются как площадь фигуры ACH. Энергозатраты на локальное статическое деформирование в зоне магистральной трещины (W_l) определяются как площадь фигуры HCDK. Энергозатраты на упругопластическое

деформирование до формирования магистральной трещины (W_c) как площадь фигуры ВТСН.

Условные удельные энергозатраты на деформирование образца до начала движения магистральной трещины можно определить по формуле 2.2.

$$G^*_i = \frac{W_m + W_e}{t(b - a_0)} \quad (2.2)$$

Где t – ширина образца, м; b – высота образца, м; a_0 – глубина начального надреза на нижней (растянутой) грани образца, м.

Удельные эффективные энергозатраты на статическое разрушение рассчитываются по формуле 2.3.

$$G^*_f = \frac{W_e + W_l}{t(b - a_0)} \quad (2.3)$$

Условные удельные энергозатраты на упругопластическое деформирование до формирования магистральной трещины – по формуле 2.4

$$G^*_c = \frac{W_c}{t(b - a_0)} \quad (2.4)$$

Условный критический коэффициент интенсивности напряжений определяется по зависимости 2.5.

$$K^*_c = \frac{3Pl_1}{tb^2} \sqrt{\pi a_0} * \left(1,122 - 1,121\alpha + 3,74\alpha^2 + 3,873\alpha^3 - 19,05\alpha^4 + 22,55\alpha^5 \right) \quad (2.5)$$

Величину α можно рассчитать по зависимости 2.6.

$$\alpha = \frac{a_0}{b} \quad (2.6)$$

Численное значение коэффициента интенсивности напряжения материала нужно определять по нагрузке полученной при четырехточечной схеме. В случае правильной корректировки данных и приведению их к виду трехточечного изгиба можно применить формулу предлагаемую в ГОСТ 29167.

Формулы для расчета площадей под участками диаграммы, а так же формулы для расчета удельных энергозатрат и коэффициента интенсивности

напряжений удобно завести в ячейки рабочего листа, как это представлено на рисунке 2.7.

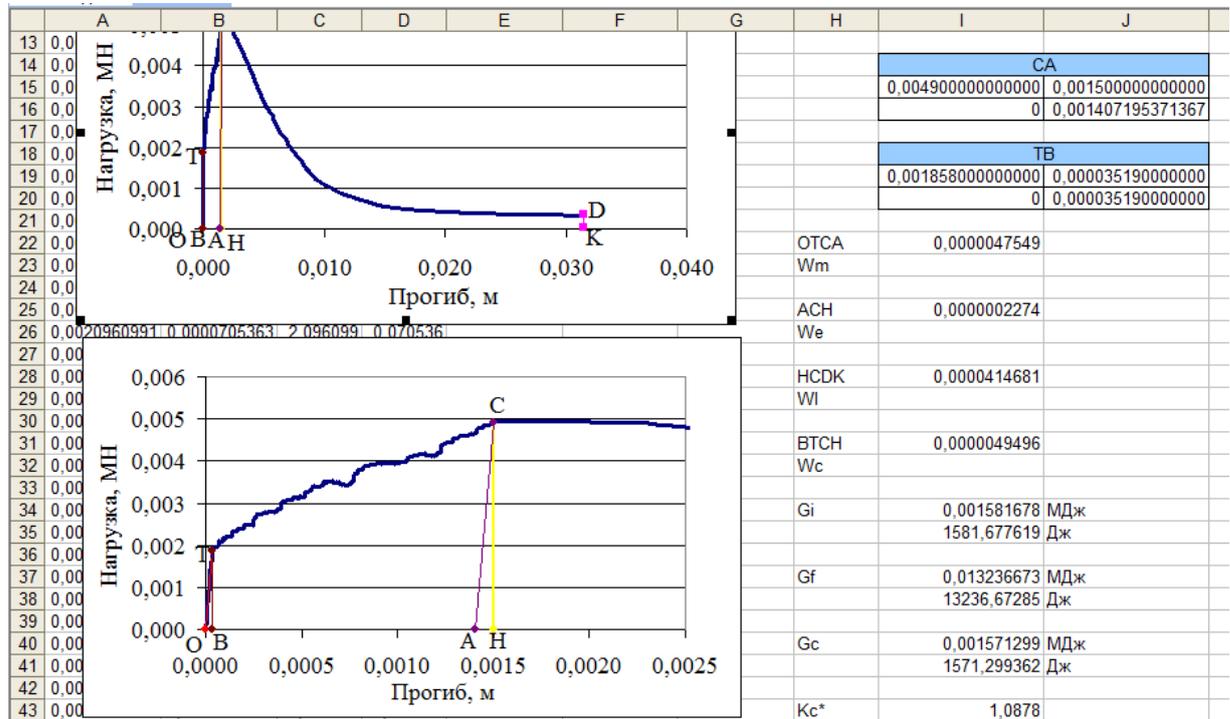


Рисунок 2.7 – диаграмма разрушения фибробетонного образца с дополнительными построениями и расчет характеристик трещиностойкости.

Получившийся лист программы EXCEL следует сохранить для дальнейшего использования при обработке результатов испытаний других фибробетонных образцов. При каждом использовании такого листа будет необходимо только заменить координаты диаграммы разрушения образца, откорректировать координаты дополнительных построений и площади фигур HCDK и BTCA. Такой подход позволит в значительной степени ускорить процесс обработки полученных данных.

По полученной диаграмме так же можно получить численное значение модуля упругости материала испытанного образца. Для этого необходимо использовать формулу 2.1. При этом выразить из нее нужно модуль упругости. Все остальные данные, необходимые для подстановки, можно определить по диаграмме разрушения (прогиб и соответствующая ему нагрузка).

Технические характеристики разработанного устройства приведены в таблице 2.1

Таблица 2.1 - Технические характеристики разработанного устройства

Измеряемая величина	Стадия испытания	Измерительное устройство	Диапазон измерений	Погрешность
Прогиб образца	На стадии упругого деформирования	Тензорезистор	0-0,1 мм	$\pm 5 \cdot 10^{-4}$ мм
	На стадии пластического деформирования	Штангенциркуль	0-40 мм	$\pm 0,02$ мм
Прилагаемая нагрузка	В процессе всего испытания	Силоизмеритель	0-50 кН	0,1 кН

ПРИЛОЖЕНИЕ В
ПРОЕКТ СТАДАРТА ОРГАНИЗАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-
строительный университет»

СТАНДАРТ ОРГАНИЗАЦИИ
«ФИБРОБЕТОНЫ.
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ ПРИ
НЕРАВНОВЕСНЫХ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЯХ»

СТО 02068580-001-2017

Дата введения 2017-07-15

(Проект)

Санкт-Петербург

2017

СТО 02068580-001-2017

Предисловие

1 РАЗРАБОТАН федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» ФГБОУ ВО СПбГАСУ (кафедрой технологии строительных материалов и метрологии: д-р техн. наук, проф. Пухаренко Ю.В., инж. Жаворонков М.И.)

2 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ приказом ректора СПбГАСУ от г. № с2017 г.

4 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ

Содержание

1 Область применения.....	1
2 Нормативные ссылки.....	1
3 Термины и определения.....	2
4 Общие положения.....	3
5 Образцы.....	4
6 Испытательное оборудование.....	5
7 Проведение испытаний.....	5
8 Обработка результатов.....	6
9 Оформление результатов.....	8
Приложение А Условные обозначения величин.....	10
Приложение Б Испытательное оборудование для определения характеристик трещиностойкости.....	11
Приложение В Таблица результатов испытаний.....	12

СТАНДАРТ ОРГАНИЗАЦИИ

ФИБРОБЕТОНЫ**Определение характеристик трещиностойкости при неравновесных механических испытаниях**

Fiber-reinforced concrete. Defining characteristics crack resistance under non-equilibrium mechanical tests

Дата введения 15-07-2017

1. ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ

Настоящий стандарт распространяется на мелкозернистые бетоны и фибробетоны всех видов (кроме ячеистых), применяемых в строительстве, и устанавливает методы их испытаний для определения силовых и энергетических характеристик трещиностойкости при статическом кратковременном нагружении.

Требования настоящего стандарта являются рекомендуемыми.

2. НОРМАТИВНЫЕ ССЫЛКИ

В настоящем стандарте использованы нормативные ссылки на следующие стандарты:

ГОСТ Р 1.5-2012 Стандарты национальные. Правила построения, изложения, оформления и обозначения

ГОСТ 10180-2012 Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам

ГОСТ 18105-2010 Бетоны. Правила контроля и оценки прочности

ГОСТ 28570-90 Бетоны. Методы определения прочности по образцам, отобраным из конструкций

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

СТО 02068580-001-2017

ГОСТ Р 1.4-2004 Стандарты организаций. Общие положения

3. ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ

1. **Трещиностойкость** (вязкость разрушения) **бетона** - способность бетона сопротивляться началу движения и развитию трещин при механических и других воздействиях.

2. **Трещина** - полость, образованная без удаления материала двумя соединенными внутри тела поверхностями, которые при отсутствии в нем напряжений удалены друг от друга на расстояния, во много раз меньше протяженности самой полости.

3. **Магистральная трещина** - трещина, протяженность которой превосходит размеры структурных составляющих материалов и по поверхностям которой произойдет деление образца на части.

4. **Коэффициент интенсивности напряжений K** - величина, определяющая напряженно-деформированное состояние и смещения вблизи вершины трещины, независимо от схемы нагружения, формы и размеров тела и трещины.

5. **Удельные энергозатраты G** - величина, характеризующая удельные (относительно эффективной рабочей площади поперечного сечения образца) энергозатраты на различные этапы деформирования и разрушения.

6. **Условный критический коэффициент интенсивности напряжений K_c^*** - значение K^* , определяемое при неравновесных испытаниях образцов по нагрузке, равной F_c^* , условно характеризующее критическое состояние материала при динамическом начале движения магистральной трещины

7. **Условные удельные энергозатраты на начало статического разрушения G_i^*** - значение G , определяемое при испытаниях образцов по диаграмме $F—V$, характеризующее удельные энергозатраты на начало статического разрушения при неравновесных механических испытаниях.

8. **Условные удельные эффективные энергозатраты на статическое разрушение G_F^*** - значение G , определяемое при испытаниях образцов по

СТО 02068580-001-2017

диаграмме $F—V$, характеризующее удельные энергозатраты на статическое разрушение при неравновесных механических испытаниях.

9. **Условные удельные энергозатраты на упругопластическое деформирование до формирования магистральной трещины G_c^*** - значение G , определяемое при испытаниях образцов по диаграмме $F—V$, характеризующее удельные энергозатраты на упругопластическое деформирование до формирования магистральной трещины при неравновесных механических испытаниях.

4. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

4.1. Характеристики трещиностойкости определяют при неравновесных механических испытаниях.

4.2. Для определения характеристик трещиностойкости испытывают образцы с начальным надрезом. В процессе испытания записывают диаграмму $F—V$.

4.3. По результатам испытаний определяют следующие основные силовые - в терминах коэффициентов интенсивности напряжений (K), и энергетические - в терминах удельных энергозатрат (G) характеристики трещиностойкости материалов.

4.4. Определяемые по настоящему стандарту характеристики трещиностойкости используют для:

- а) сравнения различных вариантов состава, технологических процессов изготовления и контроля качества фибробетонов;
- б) сопоставления фибробетонов при обосновании их выбора для конструкций;
- в) расчетов конструкций с учетом их дефектности и условий эксплуатации;
- г) анализа механизмов и причин разрушений конструкций.

СТО 02068580-001-2017

5. ОБРАЗЦЫ

5.1. Для определения характеристик трещиностойкости при неравновесных испытаниях применяют образцы - балки для испытаний на прочность на растяжение при четырехточечном изгибе.

5.2. Испытаниям следует подвергать образцы-балочки размерами 70*70*280 мм, при использовании заполнителя с максимальным размером зерен 1,25-5мм. Глубина начального надреза должна составлять 25 мм. Соотношение размеров и схемы нагружения образцов приведены на рис. 1.

Минимальные размеры образцов и размеры начальных надрезов принимают в соответствие с п. 2.3 ГОСТ 29167-91 в зависимости от размеров зерен заполнителя d_{am} .

5.3. Начальный надрезы наносят при помощи режущего инструмента или при формовании образцов путем закладывания фольги либо латунной (или стальной) пластины.

Ширина начального надреза не должна превышать $0,5 d_{am}$ и быть не более 2 мм.

5.4. Образцы для испытаний изготавливают по ГОСТ 10180 сериями не менее чем из четырех образцов-близнецов каждая, либо выпиливают из изделий, конструкций, сооружений по ГОСТ 28570.

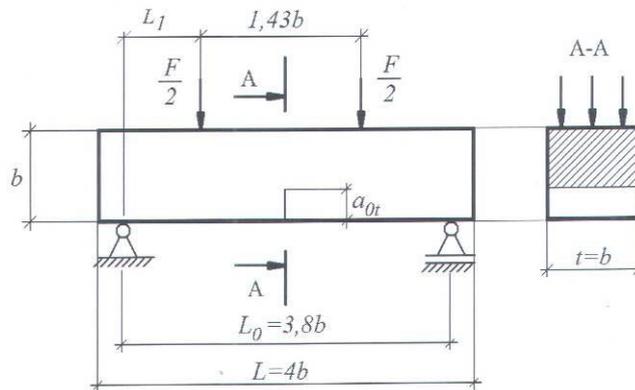


Рисунок 1 – Образец - балочка для испытания на четырехточечный изгиб силой

F .

СТО 02068580-001-2017

5.5. Для изготовления образцов используют оборудование по ГОСТ 10180 и ГОСТ 28570.

5.6. Условия твердения образцов после изготовления принимают по ГОСТ 18105.

6. ИСПЫТАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

6.1. Перечень оборудования и его характеристики для изготовления образцов всех типов и их испытаний для определения характеристик трещиностойкости при неравновесных испытаниях принимают по ГОСТ 10180 и ГОСТ 28570.

6.2. Для определения характеристик трещиностойкости при неравновесных испытаниях образцов используют испытательное оборудование согласно приложению Б; при этом средства измерения должны обеспечивать непрерывную двухкоординатную запись диаграммы $F-V$.

6.3. Правила поверки и аттестации средств измерения и испытательного оборудования принимают по ГОСТ 10180.

7. ПРОВЕДЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ

7.1. При проведении испытаний температура окружающей среды должна составлять (20 ± 5) °С, а относительная влажность - не менее 50 %.

7.2. Линейные размеры образцов измеряют с погрешностью не выше 1 мм.

7.3. Перед началом испытаний следует провести два цикла нагружения - разгружения до нагрузки, составляющей 10 % ожидаемой максимальной нагрузки.

7.4. Скорость нагружения образцов устанавливают по скорости перемещения нагружающей плиты пресса в пределах 0,02—0,2 мм/с; при этом время испытаний должно составлять не менее 1 мин.

СТО 02068580-001-2017

7.5. При неравновесных испытаниях образцы нагружают непрерывно до их разделения на части с фиксацией полной диаграммы состояния материала $F—V$ (Рисунок 2, кривая $OTCDE$).

При равновесных испытаниях образцов типа 1 с $b \geq 200$ мм производят поправку на массу образца и дополнительного оборудования согласно приложению 6 по ГОСТ 29167.

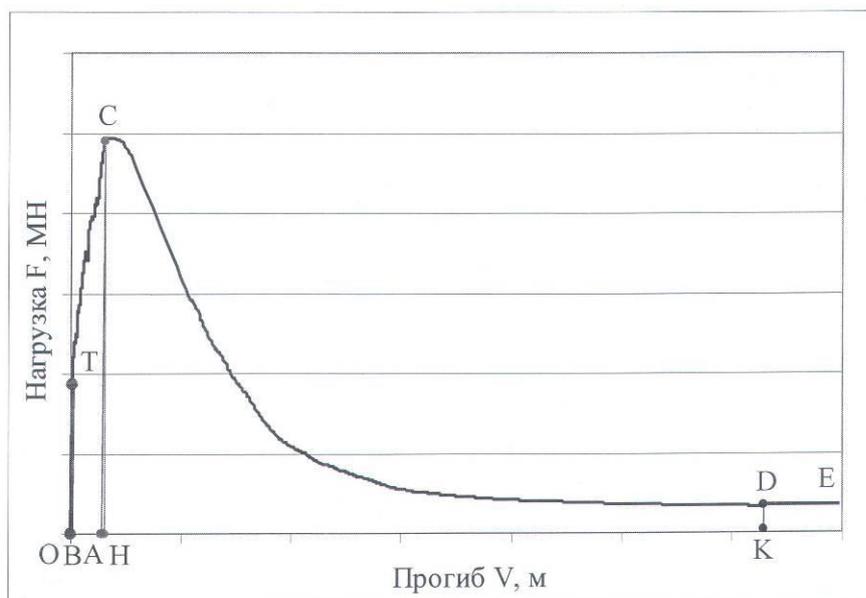


Рисунок 2 – Полная диаграмма состояния материала $F-V$.

8. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ

8.1. Полную диаграмму состояния трансформируют в расчетную и производят дополнительные построения. Дополнительные построения производимые на участке диаграммы, соответствующем упругим деформациям образца, удобно производить по второй диаграмме с большим масштабом горизонтальной оси. (Рисунок 2-3):

СТО 02068580-001-2017

а) с начала прямолинейного нисходящего участка диаграммы, то есть из точки D , где выполняется условие $(dF/dV) \sim \text{const}$, проводят отрезок DK , перпендикулярный оси OV (рисунок 2);

б) определяют положение точки C , соответствующей F_c^* , то есть момент начала движения магистральной трещины (рисунок 3).

б) фиксируют расчетную диаграмму $OTCDK$;

в) из точки C опускают перпендикуляр CH к оси OV и линию CA , параллельную упругой линии OT ;

г) из точки T опускают перпендикуляр TB к оси OV .

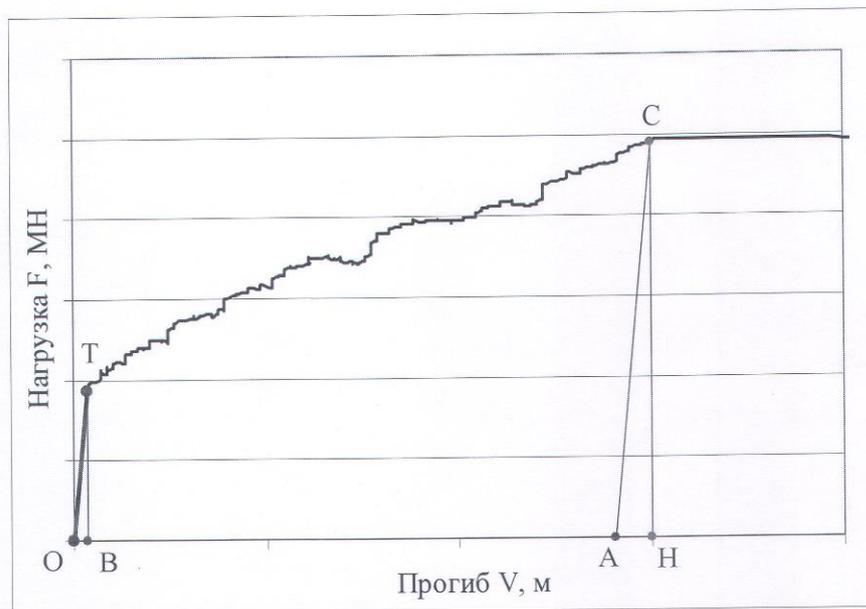


Рисунок 3 – Расчетная диаграмма состояния материала F-V, участок упругих деформаций.

8.2. Расчетным путем или планиметрированием определяют энергозатраты на отдельные этапы деформирования и разрушения образца, а именно: W_m , W_e , W_l , W_c соответственно численно равные площадям фигур $OTCA$, ACH , $HCDK$, $BTCH$.

СТО 02068580-001-2017

8.3. Расчетным путем определяют значения силовых и энергетических характеристик трещиностойкости по зависимостям 1, 2 и 3:

$$G_i^* = \frac{W_m + W_e}{t(b - a_0)} \quad (1)$$

$$G_F^* = \frac{W_e + W_l}{t(b - a_0)} \quad (2)$$

$$G_c^* = \frac{W_c}{t(b - a_0)} \quad (3)$$

8.4. Условный критический коэффициент интенсивности напряжений определяется по зависимости 4 с учетом нагрузки полученной в ходе четырехточечного изгиба.

$$K_c^* = \frac{3Pl_1}{tb^2} \sqrt{\pi a_0} * (1,122 - 1,121\alpha + 3,74\alpha^2 + 3,873\alpha^3 - 19,05\alpha^4 + 22,55\alpha^5) \quad (4)$$

Величину α можно рассчитать по зависимости 5.

$$\alpha = \frac{a_0}{b} \quad (5)$$

9. ОФОРМЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

9.1 Результаты испытаний оформляют в заключении.

9.2 В заключении приводят:

- расчетные диаграммы разрушения испытанных образцов в разных масштабах горизонтальной оси;
- данные о составах испытанных фибробетонов и о расходах и видах примененных волокон;
- расчетные значения условных удельных энергозатрат на статическое разрушение до момента начала движения магистральной трещины (G_i^*),

СТО 02068580-001-2017

условных удельных эффективных энергозатрат на статическое разрушение (G_F^*) и условные удельные энергозатраты на упругопластическое деформирование до формирования магистральной трещины (G_c^*);

- расчетные значения условного критического коэффициента интенсивности напряжений (K_c^*);

9.3 Результаты испытаний представляют в табличной форме, приведенной в приложении В.

СТО 02068580-001-2017

ПРИЛОЖЕНИЕ А

УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ ВЕЛИЧИН

K_c^* - условный критический коэффициент интенсивности напряжений, МПа·м^{0,5}.

G - удельные энергозатраты, МДж/м².

G_i^* - условные удельные энергозатраты на статическое разрушение до момента начала движения магистральной трещины, МДж/м².

G_F^* - условные удельные эффективные энергозатраты на статическое разрушение, МДж/м².

G_c^* - условные удельные энергозатраты на упругопластическое деформирование до формирования магистральной трещины, МДж/м².

W - энергозатраты, МДж.

W_m - энергозатраты на процессы развития и слияния микротрещин до формирования магистральной трещины статического разрушения, МДж.

W_e - энергозатраты на упругое деформирование до начала движения магистральной трещины статического разрушения, МДж.

W_l - энергозатраты на локальное статическое деформирование в зоне магистральной трещины, МДж.

W_c - энергозатраты на упругопластическое деформирование до формирования магистральной трещины, МДж.

F - нагрузка, действующая на образец в процессе испытания, МН.

F_c^* - нагрузка, соответствующая началу движения магистральной трещины при неравновесных испытаниях, МН.

V - перемещения образца, м.

V_e - перемещения, соответствующие упругим деформациям образца, м.

V_m - перемещения, соответствующие необратимым деформациям образца, м.

a_0 - длина начального надреза, м.

b, t, L_0, L, L_l - размеры образцов, м.

d_{am} - максимальный размер заполнителя, м.

СТО 02068580-001-2017

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

**ИСПЫТАТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ХАРАКТЕРИСТИК ТРЕЩИНОСТОЙКОСТИ**

Для определения характеристик трещиностойкости при неравновесных испытаниях образцов используют специальные испытательные машины, позволяющие производить постоянную запись диаграммы зависимости прогибов испытываемых образцов от прилагаемых к ним нагрузок. Рекомендуемые технические характеристики испытательных машин представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Рекомендуемые технические характеристики испытательных машин.

Измеряемая величина	Стадия испытания	Диапазон измерений	Допускаемая погрешность
Прогиб образца	На стадии упругого деформирования	0-0,1 мм	$\pm 5 \cdot 10^{-4}$ мм
	На стадии пластического деформирования	0-40 мм	$\pm 0,02$ мм
Прилагаемая нагрузка	В процессе всего испытания	0 -50 кН	0,1кН

СТО 02068580-001-2017

ПРИЛОЖЕНИЕ В

ТАБЛИЦА РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ

Характеристика трещиностойкости	Объемное содержание и вид примененной фибры, % об.		
G_i^* - условные удельные энергозатраты на статическое разрушение до момента начала движения магистральной трещины, МДж/м ²			
G_F^* - условные удельные эффективные энергозатраты на статическое разрушение, МДж/м ²			
G_c^* - условные удельные энергозатраты на упругопластическое деформирование до формирования магистральной трещины, МДж/м ²			
K_c^* - условный критический коэффициент интенсивности напряжений, МПа·м ^{0,5}			

СТО 02068580-001-2017

УДК 006.86

ОКС 19.020

Ключевые слова: бетон, фибробетон, трещиностойкость, энергозатраты,
коэффициент интенсивности напряжений, неравновесная схема

Руководитель разработки

Зав. кафедрой ТСМиМ,

д.т.н., профессор



Ю.В.Пухаренко

Инженер



М.И.Жаворонков

ПРИЛОЖЕНИЕ Г
ГРАМОТА В НОМИНАЦИИ «НАУЧНАЯ ПЕРСПЕКТИВА»

**Санкт-Петербургский государственный
архитектурно-строительный университет**

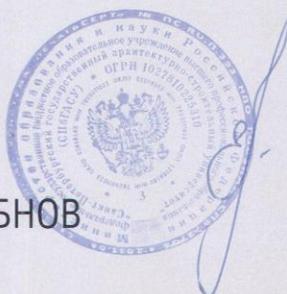
ГРАМОТА

Награждается
выпускник 2012 года
Строительного факультета

ЖАВОРОНКОВ
Михаил Ильич

в номинации
«Научная перспектива»
за достигнутые успехи
в научно-исследовательской деятельности

Ректор СПбГАСУ
Евгений Иванович РЫБНОВ



ПРИЛОЖЕНИЕ Д

ДИПЛОМЫ ПОБЕДИТЕЛЯ КОНКУРСА ГРАНТОВ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА





ПРАВИТЕЛЬСТВО САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

ДИПЛОМ

СЕРИЯ ПСП № 13149

ПОБЕДИТЕЛЬ КОНКУРСА ГРАНТОВ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА
ДЛЯ СТУДЕНТОВ, АСПИРАНТОВ, МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ,
МОЛОДЫХ КАНДИДАТОВ НАУК 2013 г.

Маврошин Михаил Львович

ГУБЕРНАТОР САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

Г.С. ПОЛТАВЧЕНКО





ПРАВИТЕЛЬСТВО САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

ДИПЛОМ

СЕРИЯ ПСП № 14162

ПОБЕДИТЕЛЬ КОНКУРСА ГРАНТОВ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА
ДЛЯ СТУДЕНТОВ, АСПИРАНТОВ, МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ,
МОЛОДЫХ КАНДИДАТОВ НАУК 2014 г.

Мавериков Михаил Львов

ГУБЕРНАТОР САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

Г.С. ПОЛТАВЧЕНКО





ПРАВИТЕЛЬСТВО САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

ДИПЛОМ

серия ПСП № 16477

ПОБЕДИТЕЛЬ КОНКУРСА ГРАНТОВ САНКТ-ПЕТЕРБУРГА
ДЛЯ СТУДЕНТОВ, АСПИРАНТОВ, МОЛОДЫХ УЧЕНЫХ,
МОЛОДЫХ КАНДИДАТОВ НАУК 2016 Г.

Маврошин Михаил Львович

Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет

ГУБЕРНАТОР САНКТ-ПЕТЕРБУРГА

Г.С. ПОЛТАВЧЕНКО

