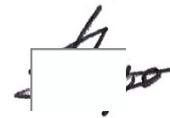


На правах рукописи



ВОРОНЦОВА Наталья Сергеевна

**НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПРОЧНОСТЬ
КОСОИЗГИБАЕМЫХ ФИБРОЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ**

Специальность 05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2019

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет».

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор,
член-корреспондент РААСН
Морозов Валерий Иванович

Официальные оппоненты: **Соколов Борис Сергеевич**
доктор технических наук, профессор,
член-корреспондент РААСН, АО «Казанский
Гипронефтеавиапром», научный консультант;

Корсун Владимир Иванович
доктор технических наук, профессор,
ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», кафедра «Строительство уникальных зданий и сооружений», профессор;

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

Защита диссертации состоится «18» июня 2019 г. в 13³⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.223.03 при ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный архитектурно-строительный университет» по адресу: 190005, г. Санкт-Петербург, 2-я Красноармейская ул., д. 4, зал заседаний диссертационного совета (аудитория 219).

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

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

Автореферат разослан «15» мая 2019 г.

Ученый секретарь
Диссертационного совета



Кондратьева Лидия Никитовна

I. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Сталефибробетон (далее фибробетон) обладает повышенными растяжимостью и сжимаемостью, обусловленными специфической работой фибры в сечении после образования трещины. Фибровое армирование изменяет характер разрушения материала, придавая ему вязкость, что можно считать одним из конструктивных мероприятий по защите от прогрессирующего разрушения.

Повышенные трещиностойкость и растяжимость фибробетона, а также особенности трещинообразования, характеризующиеся возникновением большого количества трещин малой ширины раскрытия при восприятии растягивающих усилий, способствуют формированию «благоприятной среды» для использования высокопрочной арматуры без предварительного напряжения. Известно, что упрочнение бетонной матрицы посредством фибрового армирования позволяет избежать чрезмерных прогибов и раскрытия трещин при эксплуатационном уровне нагрузки, а также реализовать прочностные свойства высокопрочной арматурной стали в стадии разрушения в фиброжелезобетонных элементах. Рост прочности арматуры с увеличением класса значительно снижает ее относительную стоимость, что дает определенный экономический эффект.

Ввиду разнообразия конструктивных форм и условий эксплуатации современных зданий и сооружений на сегодняшний день встречается все больше конструктивных элементов, работающих в условиях сложного напряженно-деформированного состояния, в частности, косоугольного изгиба. Косому изгибу подвержены крайние сборные железобетонные прогоны, бортовые элементы оболочек, подкрановые балки, горизонтальные элементы фахверков наружных стен каркасных зданий, фундаментные и обвязочные балки, стеновые панели и пр. Неучет косых воздействий может привести к переоценке несущей способности и, как следствие, к преждевременному разрушению косоизгибаемого элемента.

В действующих в нашей стране нормативных документах, устанавливающих требования к проектированию сталефибробетонных конструкций СП 360.1325800.2017, отсутствует практический метод расчета косоизгибаемых элементов, что делает тему исследования исключительно актуальной.

Степень разработанности темы исследования. Развитие и применение фиброжелезобетонных элементов стали возможны благодаря работам в области фибробетона таких ученых, как Д.С. Аболиньш, Г.И. Бердичевский, И.В. Волков, В.П. Вылегжанин, Г.В. Гетун, И.А. Горбунов, В.А. Дорф, Ю.И. Ермилов, Д.Е. Капустин, А.В. Корсун, В.И. Корсун, В.М. Косарев, В.К. Кравинскис, Р.О. Красновский, Б.А. Крылов, А.Н. Куликов, Л.Г. Курбатов, Г.Е. Лагутина, И.А. Лобанов, Е.Ф. Лысенко, Л.Р. Маилян, Р.Л. Маилян, В.И. Морозов, В.П. Некрасов, Э.К. Опбул, А.П. Павлов, В.С. Плевков, С.Ф. Подшивалов, Ю.В. Пухаренко, Ф.Н. Рабинович, Н.А. Рак, В.П. Романов, В.П. Рыбасов, А.В. Сакварелидзе, Г.Г. Степанова, К.В. Талантова, В.Н. Тупицына, В.Д. Харлаб, А.О. Хегай, О.Н. Хегай, Г.А. Шикун, S.A. Al-Ta'an, S.A. Ashour, G.B. Watson, Z. Bayasi, J. Edington, D.J. Hannat, D.R. Lankard, J.A. Mandel, P.S. Mangat, A.E. Naaman, B.V. Rangan, J.P. Romualdi, S.P. Shah, M.J. Snyder, R.N. Swamy, L. Vandewalle и др.

Экспериментально-теоретические исследования фиброжелезобетонных элементов, работающих в условиях плоского изгиба, проводили Э.С. Айвазян, Г.В. Гетун, М.П. Леонтьев, Л.Р. Маилян, Р.Л. Маилян, В.И. Морозов, Э.К. Опбул, Г.Г. Степанова, А.В. Шилов, Р.О. Эйзеншмит, S.H. Alsayed, S.A. Al-Ta'an, S.A. Ashour, H.A. Kormeling, H.W. Reinhardt, S.P. Shah, R.N. Swamy, L. Vandewalle, F.F. Wafa и др.

Теоретические исследования косоизгибаемых железобетонных элементов проводились еще в 30-х годах XX века Н.А. Поповичем, Б.Д. Франком, М.Е. Шавельским и др. Однако их предложения основывались на методе расчета по допускаемым напряжениям, рассматривающем упругую работу железобетона с позиции сопротивления материалов.

Теоретические основы расчета по прочности косоизгибаемых железобетонных элементов в своих работах изложили А.С. Ажидинов, В.В. Анищенко, М.З.И. Арафат, В.Н. Байков, В.В. Белов, М.А. Борисова, П.Ф. Вахненко, К.И. Вилков, С.И. Глазер, Е.В. Голубчик, А.В. Горик, К.Х. Доля, И.А. Дорожкова, Жень Бэй-Юй, А.С. Залесов, Ю.Л. Изотов, Г.И. Кичигина, Я.Д. Лившиц, Ю.Н. Марков, В.Б. Назаренко, И.К. Никитин, В.А. Никишкин, А.Н. Павликов, А.И. Папенко, В.В. Полетаев, К.М. Романовская, Ю.М. Руденко, Д.Ю. Саркисов, Д.А. Семенов, Л.И. Сердюк, Н.И. Смолин, В.Н. Строчкий, М.С. Торяник, О.Н. Тоцкий, Б.П. Филиппов, А.А. Цейтлин, Ю.В. Чиненков, Б.С. Чуприна, T. Au, E. Cohen, L.V. Kriz, A.H. Mattock, C.S. Whitney и др.

В настоящее время расчет по прочности косоизгибаемых железобетонных элементов, согласно СП 63.13330.2012, рекомендовано выполнять по нелинейной деформационной модели либо по предельным усилиям по методике, изложенной в пособии к СП 63.13330.2012.

Для расчета по прочности железобетонных элементов при воздействии косоугольного изгиба применимы универсальные методы расчета нормальных сечений, такие как общий случай расчета по прочности железобетонных элементов, предложенный А.А. Гвоздевым, Ю.П. Гущей, Н.М. Мулиным, Е.А. Чистяковым, а также методы, основанные на деформационном подходе, получившие развитие благодаря исследованиям В.И. Бабича, В.Н. Байкова, В.М. Бондаренко, М.И. Додонова, М.Л. Зака, А.С. Залесова, О.Ф. Ильина, Н.И. Карпенко, С.Н. Карпенко, Д.В. Кочкарева, А.Л. Кришана, О.В. Радайкина, Т.А. Мухамедиева, Б.С. Расторгуева, В.И. Римшина, Б.С. Соколова, Е.А. Чистякова и др. Методы, базирующиеся на деформационном подходе, позволяют рассчитывать железобетонные элементы на любой стадии напряженно-деформированного состояния с учетом нелинейного поведения материалов бетона и арматуры.

Большинство зарубежных исследований направлены на изучение общего случая косоугольного изгиба – косоугольного внецентренного сжатия. Несущая способность косоугольного железобетонного элемента в них рассчитывается по общей методике, основанной на нелинейном расчете, методом обратной нагрузки (reciprocal load method) или методом силовых горизонталей (load contour method). Последние два метода представлены в работах В. Bresler, R.W. Furlong, A. Gouwens, C.-T.T. Hsu, J.M. Nieves, A.L. Parme и др.

К настоящему времени внесен большой вклад в исследование работы железобетонных конструкций в условиях сложного напряженно-деформированного состояния, а также их защиты от прогрессирующего разрушения благодаря работам В.И. Колчунова, Вл.И. Колчунова, А.В. Корсуна, В.И. Корсуна, А.С. Сальникова, А.Г. Тамразяна, В.С. Федорова, Н.С. Федоровой, В.И. Яковенко и др. На сегодняшний день в работах И.В. Бахотского, Т.С. Евдокимовой, В.И. Морозова, Э.К. Опбул, А.О. Хегай, М.О. Хегай решены задачи по расчету фиброжелезобетонных элементов в условиях чистого и поперечного изгиба, внецентренного сжатия, косоугольного внецентренного сжатия и кручения с изгибом. Особое место занимают исследования при кратковременном динамическом нагружении, проведенные В.С. Плевковым, К.Л. Кудяковым, Д.Ю. Саркисовым, Д.Г. Уткиным и др. Полученные результаты создали предпосылки для исследования вопросов прочности фиброжелезобетонных элементов в условиях сложного напряженно-деформированного состояния, в частности, косоугольного изгиба.

В новом нормативном документе, устанавливающем требования к проектированию сталефибробетонных конструкций СП 360.1325800.2017, впервые введен расчет по прочности нормальных сечений на основе нелинейной деформационной модели. Однако в силу известной трудоемкости его численной реализации широкое применение данного метода в проектной практике вызывает определенные трудности.

Цель исследования заключается в определении характера напряженно-деформированного состояния фиброжелезобетонных элементов при воздействии косоугольного изгиба и разработке практического метода расчета по прочности таких элементов.

Задачи исследования:

1. Провести экспериментальные исследования косоизгибаемых фиброжелезобетонных балок с регулярным армированием мягкой сталью при различных углах наклона силовой плоскости к поперечному сечению элемента при кратковременном нагружении.

2. Провести экспериментальные исследования косоизгибаемых фиброжелезобетонных балок с высокопрочной арматурой без предварительного напряжения при различных углах наклона силовой плоскости к поперечному сечению элемента при кратковременном нагружении.

3. Исследовать и обосновать эффективность применения высокопрочной арматуры без предварительного напряжения в фиброжелезобетонных элементах, работающих в условиях косоугольного изгиба.

4. Выполнить численное моделирование фиброжелезобетонных элементов с регулярным армированием мягкой или твердой сталью при воздействии косоугольного изгиба в конечно-элементном программном комплексе; исследовать напряженно-деформированное состояние элемента, определить поля напряжений и распределения деформаций.

5. Разработать практический метод расчета по прочности нормальных сечений фиброжелезобетонных элементов, подверженных косоугольному изгибу, обеспечивающий адекватный результат.

Объект исследования – косоизгибаемый фиброжелезобетонный элемент с дисперсно-распределенными в объеме мелкозернистого бетона стальными фибрами и регулярным армированием мягкой сталью или высокопрочной арматурой без предварительного напряжения при кратковременном нагружении.

Предмет исследования – напряженно-деформированное состояние и прочность нормального сечения косоизгибаемого фиброжелезобетонного элемента.

Область исследования соответствует паспорту специальности ВАК 05.23.01 – Строительные конструкции, здания и сооружения, и относится к пункту 3. Создание и развитие эффективных методов расчета и экспериментальных исследований вновь возводимых, восстанавливаемых и усиливаемых строительных конструкций, наиболее полно учитывающих специфику воздействий на них, свойства материалов, специфику конструктивных решений и другие особенности.

Научная новизна

1. Получены новые данные об изменении механических характеристик материала при добавлении отдельных видов, применяемых на практике, стальных фибр в объем мелкозернистого бетона. Предложена простая в реализации методика испытания фибробетона на осевое растяжение, позволяющая изучать специфику нелинейного поведения материала в процессе роста нагрузки.

2. Впервые получены экспериментальные данные о влиянии фибрового армирования на прочность нормального сечения, процесс трещинообразования, прогибы и характер разрушения фиброжелезобетонного элемента в условиях косоугольного изгиба на специально разработанной испытательной установке.

3. Экспериментально подтверждена возможность эффективного применения высокопрочной арматуры без предварительного напряжения в косоизгибаемых фиброжелезобетонных элементах.

4. Получены новые данные о характере напряженно-деформированного состояния косоизгибаемых фиброжелезобетонных элементов посредством численного исследования методом конечных элементов в программном комплексе ANSYS с учетом нелинейного деформирования материалов.

5. Разработан метод расчета по прочности нормальных сечений косоизгибаемых фиброжелезобетонных элементов с учетом специфики нелинейного поведения материалов под нагрузкой, в том числе установленной в рамках проведенных экспериментальных и численных исследований, удобный в инженерной практике.

Теоретическая значимость диссертационной работы заключается в построении математической модели косоизгибаемого фиброжелезобетонного элемента, в том числе армированного высокопрочной арматурой без предварительного напряжения, обеспечивающей получение напряженно-деформированного состояния и прочности с учетом специфики нелинейного поведения материалов под нагрузкой.

Практическая значимость диссертационной работы заключается в разработке оригинального метода расчета по прочности нормальных сечений косоизгибаемых фиброжелезобетонных элементов, уже на данном этапе исследования находящего применение в практике проектирования, что подтверждается актами о внедрении ООО «Архстройпроект» и АО «Экспериментальный завод».

Методология и методы исследования

Методологической основой диссертационной работы послужили общенаучные методы познания, в частности анализ и сравнение полученных теоретических результатов с опытными данными; метод идеализации при переходе от напряженно-деформированного состояния косоизгибаемого элемента к расчетной модели; эксперимент и измерение; метод численного моделирования.

Положения, выносимые на защиту

1. Результаты определения прочностных и деформативных характеристик фибробетона с одним из наиболее распространенных на рынке типов стальной фибры.

2. Результаты экспериментального исследования косоизгибаемых фиброжелезобетонных и железобетонных элементов, выполненные на специально созданной для этих целей испытательной установке, для различных углов наклона силовой плоскости к поперечному сечению элемента. Установленные особенности, сходства и отличия работы в процессе кратковременного нагружения и разрушения косоизгибаемых элементов из фиброжелезобетона и традиционного железобетона.

3. Результаты численного моделирования косоизгибаемых фиброжелезобетонных и железобетонных элементов в программном комплексе ANSYS с учетом нелинейного деформирования бетона, фибробетона и регулярной арматуры, с использованием механических характеристик, полученных в ходе экспериментального исследования.

4. Практический метод расчета по прочности нормальных сечений косоизгибаемых фиброжелезобетонных элементов прямоугольного поперечного сечения.

Степень достоверности результатов обоснована применением базовых понятий сопротивления материалов, теории упругости, строительной механики, математического анализа, а также общепринятых гипотез и допущений современной теории железобетона; подтверждена проведенными экспериментальными исследованиями косоизгибаемых фиброжелезобетонных элементов при кратковременном нагружении; обеспечена применением стандартных методов испытаний, использованием метрологически аттестованного испытательного оборудования и измерительных приборов.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на всероссийских и международных конференциях: II международном конгрессе «Актуальные проблемы современного строительства» (2013 год, СПбГАСУ); III международном конгрессе «Актуальные проблемы современного строительства» (2014 год, СПбГАСУ); 70-й научной конференции профессорско-преподавательского состава университета (2014 год, СПбГАСУ); 69-й межвузовской научно-практической конференции «Актуальные проблемы современного строительства» (2016 год, СПбГАСУ); международной научной конференции «Долговечность, прочность и механика разрушения бетона, железобетона и других строительных материалов» (2016 год, СПбГАСУ); 70-й всероссийской научно-практической конференции «Актуальные проблемы современного строительства» (2017 год, СПбГАСУ); 74-й научной конференции про-

фессорско-преподавательского состава и аспирантов университета (2018 год, СПбГАСУ); первой международной конференции «Композитные материалы и конструкции в современном строительстве» (2018 год, СПбГАСУ).

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 6 печатных работах, общим объемом 2,56 п. л., лично автором – 2,31 п. л., в том числе 4 работы опубликованы в изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов, утвержденный ВАК РФ.

Структура и объем диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, приложения, списка литературы из 261 наименования, в том числе 49 зарубежных источников. Работа представлена на 222 страницах печатного текста, содержит 75 рисунков, 15 таблиц, 137 формул и 2 страницы приложения.

II. ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во *введении* сформулирована проблема и обоснована актуальность проводимого исследования, представлены степень разработанности, цель и задачи исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, методология и методы исследования, положения, выносимые на защиту, степень достоверности результатов и апробация работы.

В *первой главе* выполнен анализ существующих публикаций, относящихся к теме исследования. Рассмотрены основные параметры, оказывающие влияние на прочностные и деформативные свойства фибробетона, а также характерные случаи разрушения фибробетонных элементов. Проанализированы результаты экспериментально-теоретических исследований фиброжелезобетонных элементов в условиях плоского изгиба, в том числе с регулярным армированием высокопрочной арматурой без предварительного напряжения. Раскрыты вопросы понятия косоугольного изгиба и особенности армирования косоугольных элементов. Представлен обзор известных подходов к оценке прочности нормальных сечений косоугольных железобетонных элементов, а также экспериментальных исследований и их результатов. Намечены направления дальнейшей разработки темы.

Во *второй главе* описаны этапы подготовки к экспериментальным исследованиям: выбор типа фибры, конструирование и изготовление образцов, экспериментальная установка для исследования напряженно-деформированного состояния (далее НДС) балок в условиях косоугольного изгиба. Представлены результаты определения прочностных и деформативных характеристик бетона, фибробетона и арматуры. Предложена методика испытания бетонных и фибробетонных образцов-призм на осевое растяжение. Изложены результаты экспериментального исследования косоугольных фиброжелезобетонных элементов, а также контрольных образцов из традиционного железобетона при различных углах наклона силовой плоскости при кратковременном нагружении.

Для дисперсного армирования бетона применялась фибра ФСВ-А-0,30/30, что означает «фибра из стальной высокоуглеродистой проволоки (ФСВ), анкерного профиля (А), номинальным диаметром 0,30 мм и длиной 30 мм», производства ОАО «Белорусский металлургический завод» по ТУ 14-1-5564-2008. Выбор

типа армирующих волокон обусловлен характером усилий, прилагаемых к экспериментальному образцу, рекомендуемым во многих исследованиях соотношением длины и диаметра фибры l_f/d_f , равным 100, а также относительно не высокой стоимостью. Изогнутые концы фибры – анкеры способствуют лучшему сцеплению с бетоном-матрицей. Для всех фибробетонных и фиброжелезобетонных образцов был принят процент фибрового армирования по объему, равный 2%.

С целью исследования НДС и прочности косоизгибаемых фиброжелезобетонных элементов в зоне чистого косоугольного изгиба при кратковременном нагружении были изготовлены фиброжелезобетонные образцы-балки, а также контрольные образцы из железобетона на ОАО «Кузнечевский комбинат строительных конструкций и материалов» в г. Архангельске. Всего было изготовлено 14 балок – 7 серий, в каждой из которых по две балки-близнеца, размером 2460×220×120 ($l \times h \times b$) мм. Общая характеристика серий образцов-балок представлена в таблице 1.

Таблица 1 – Общая характеристика изготовленных образцов-балок

Серия	Шифр балки	Продольная рабочая арматура	Процент фибрового армирования по объему, %	Угол наклона силовой плоскости, °	Количество, шт.
1	ЖБ1	4Ø10 класса А500С	0	10	2
2	ЖБ2		0	20	2
3	ФЖБ1.1		2	10	2
4	ФЖБ1.2		2	20	2
5	ФЖБ1.3		2	20	2
6	ФЖБ2.1	Ø14 класса Ат800	2	10	2
7	ФЖБ2.2		2	20	2

В качестве бетона-матрицы применялся мелкозернистый бетон. Продольная рабочая арматура располагается таким образом, чтобы плоскость действия внешних сил проходила через центр тяжести арматуры, т. е. в соответствии с углом наклона силовой плоскости, принятым равным 10 или 20° для разных серий балок, а также через геометрический центр поперечного сечения элемента. Для формирования пространственного каркаса конструктивно установлены продольные арматурные стержни диаметром 6 мм класса А240. Поперечное армирование выполнено замкнутыми хомутами диаметром 5 мм класса В500 с шагом 150–200 мм в зоне действия постоянного момента (кроме серии ФЖБ1.3) и с шагом 50 мм в приопорных зонах во избежание разрушения по наклонному сечению. Схема армирования поперечных сечений косоизгибаемых железобетонных и фиброжелезобетонных элементов в зоне действия постоянного момента представлена на рисунке 1.

Прочностные и деформативные характеристики бетона и фибробетона установлены посредством испытаний образцов-кубов и призм, изготовленных одновременно с экспериментальными балками, и представлены в таблице 2. За предельные деформации сжатия приняты деформации, соответствующие максимальным сжимающим напряжениям в материале. Начальный модуль упругости определялся при уровне нагрузки, соответствующем 30 % от разрушающей. Для вычисления прочности на осевое растяжение вводился поправочный коэффициент

ент $\beta = 0,815$, полученный линейным экстраполированием значений, указанных в таблице 4 ГОСТ 10180–2012.

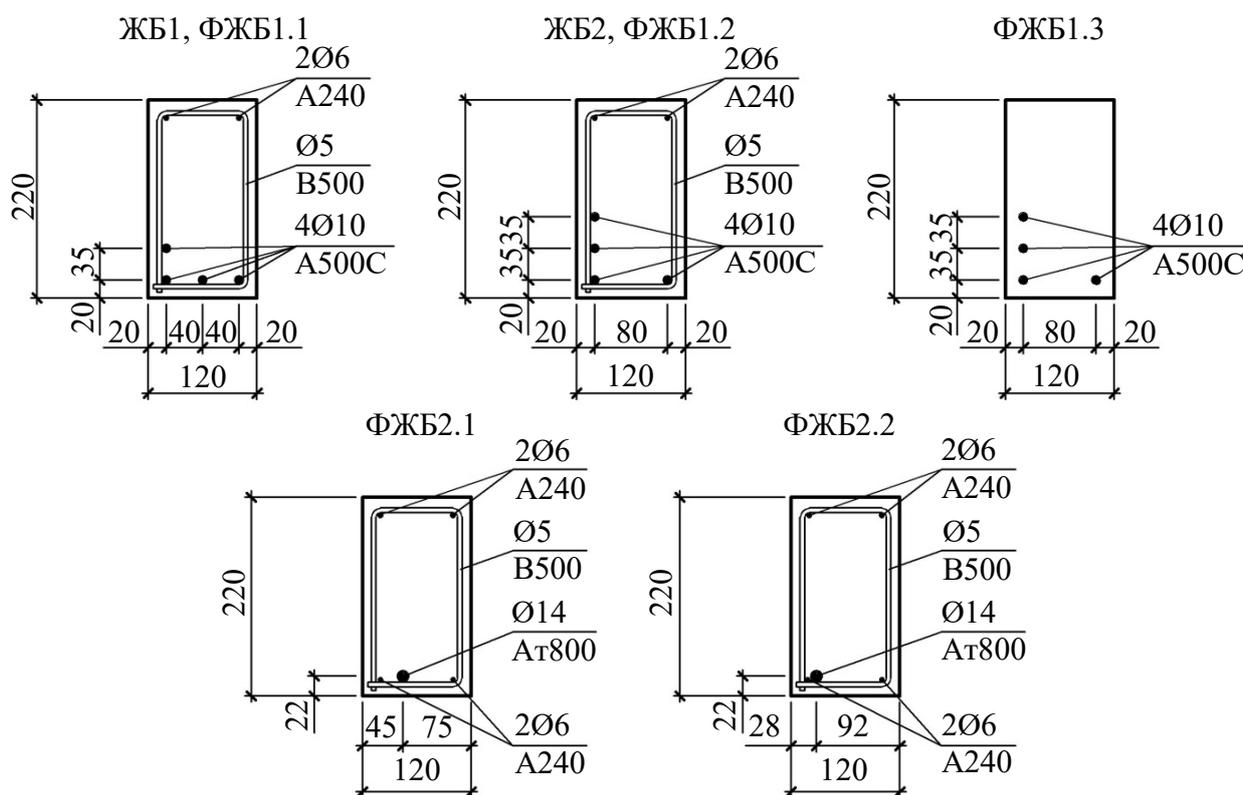


Рисунок 1 – Схема армирования поперечных сечений косоизгибаемых железобетонных и фибробетонных элементов в зоне действия постоянного момента

Таблица 2 – Прочностные и деформативные характеристики бетона и фибробетона

Серия	Материал	Кубиковая прочность, МПа	Призменная прочность, МПа	Предельные деформации при сжатии, ‰	Начальный модуль упругости, МПа · 10 ⁻³	Прочность на осевое растяжение, МПа
1	Бетон	19,4	16,0	1,85	18,0	0,75
2	Фибробетон	47,1	29,1	3,50	20,5	2,57

Для определения прочности бетона и фибробетона на осевое растяжение разработана методика испытания образцов-призм, позволяющая также получить диаграмму деформирования материала с ниспадающей ветвью после достижения растягивающими напряжениями максимального значения. Призмы были испытаны в универсальной испытательной системе INSTRON 5989. Размер призм был определен возможностью установки образца в зажимных губках испытательной системы и принят 55×55×400 мм. Всего было испытано по 3 бетонных и фибробетонных образца в каждой серии. Для предотвращения преждевременного разрушения призмы в местах ее закрепления выполнялось усиление фиброармированным пластиком (ФАП) – однонаправленной тканью из углеродного волокна для структурного усиления SikaWrap-530C с использованием двухкомпонентного клеевого состава на эпоксидной основе Sikadur-330. Схема установки призмы в зажимных губках испытательной системы и общий вид в процессе испытания на осевое растяжение представлены на рисунке 2. Общий вид образцов после испытания представлен на рисунке 3.

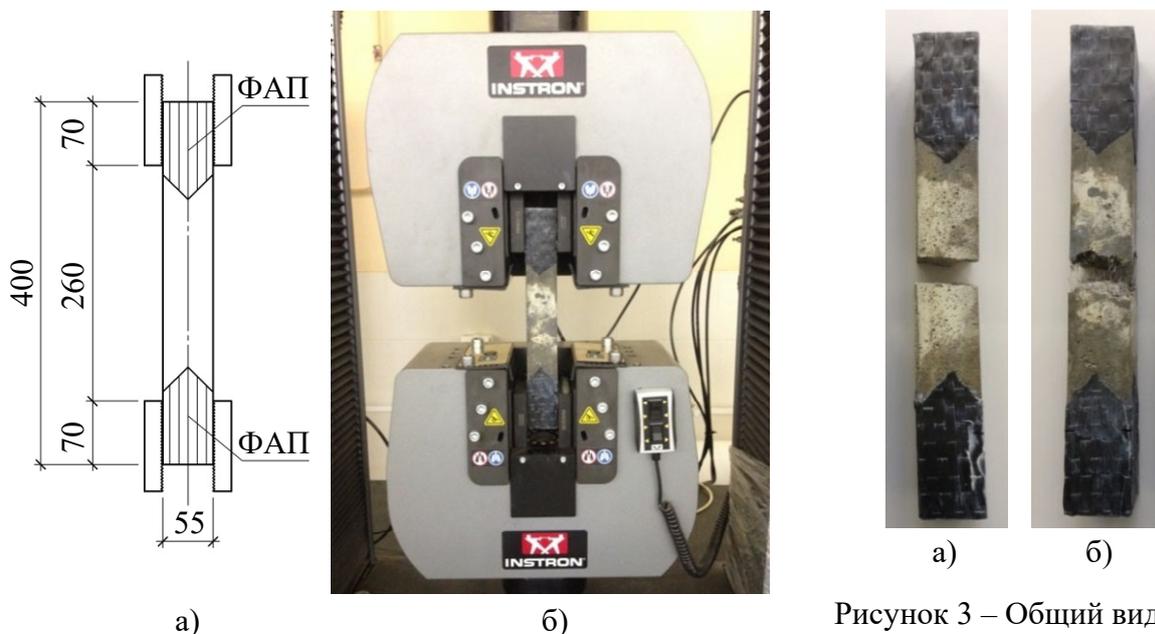


Рисунок 2 – Схема установки призмы в зажимных губках универсальной испытательной системы INSTRON 5989 (а) и общий вид в процессе испытания на осевое растяжение (б)



Рисунок 3 – Общий вид характерного разрушения бетонных (а) и фибробетонных (б) образцов-призм, испытанных на осевое растяжение

Добавление фибры из стальной проволоки ФСВ-А-0,30/30 процентным содержанием, равным 2% по объему, в бетонную матрицу прочности на сжатие 16,0 МПа способствует значительному улучшению механических свойств полученного материала. Результаты проведенных испытаний показали:

- увеличение кубиковой прочности в 2,4 раза;
- увеличение призмочной прочности в 1,8 раза;
- увеличение предельных деформаций при сжатии в 1,9 раза;
- увеличение начального модуля упругости на 14%;
- увеличение прочности на осевое растяжение в 3,4 раза по сравнению с контрольными образцами из мелкозернистого бетона.

Полученные результаты свидетельствуют об эффективности применения выбранной фибры в матрице на основе мелкозернистого бетона.

По результатам испытания образцов арматуры на осевое растяжение установлено, что величины физического и условного пределов текучести для арматурного проката классов А500С и Ат800 составили 583,9 и 1091,6 МПа соответственно.

Для изучения работы косоизгибаемых элементов прямоугольного поперечного сечения была запроектирована и изготовлена специальная экспериментальная установка, позволяющая прикладывать к балке сосредоточенные силы от внешней нагрузки под углом β в диапазоне от 0 до 90° относительно осей симметрии поперечного сечения. Для удобства наблюдения процессов образования и развития трещин, а также снятия показаний приборов экспериментальная установка предполагает обратную схему испытания элемента – с поворотом на 180° относительно его положения в процессе эксплуатации. Угол β (угол наклона силовой плоскости) создается с помощью поворота и закрепления опорных дисков,

на которые образец-балка опирается шарнирно в третях пролета. Общий вид установки представлен на рисунке 4.



Рисунок 4 – Общий вид экспериментальной установки

Экспериментальные исследования косоизгибаемых элементов проводились в лаборатории СПбГАСУ. Схема испытания и расстановки измерительных приборов представлена на рисунке 5. Нагружение образца выполнялось посредством двух сосредоточенных сил, создаваемых двумя гидравлическими домкратами модели ДГ20П150Г грузоподъемностью 20 т.

За предельный изгибающий момент балок с продольной рабочей арматурой из мягких сталей принят момент достижения в последнем, менее нагруженном стержне напряжений, равных физическому пределу текучести, либо момент исчерпания прочности сжатой зоны бетона или фибробетона. Для балок с высокопрочной арматурой – момент достижения в арматурном стержне напряжений, равных условному пределу текучести, либо момент исчерпания прочности сжатой зоны фибробетона. Значения предельных изгибающих моментов, воспринимаемых поперечными сечениями косоизгибаемых железобетонных и фиброжелезобетонных элементов, представлены в таблице 4.

Анализ результатов экспериментального исследования косоизгибаемых железобетонных и фиброжелезобетонных элементов позволил сделать следующие выводы:

1. Фиброжелезобетонные образцы-балки показали повышенную прочность, трещиностойкость, жесткость и вязкость при разрушении по сравнению с образцами из традиционного железобетона.

Увеличение несущей способности косоизгибаемых фиброжелезобетонных элементов составило для серий балок

- с регулярным армированием мягкой сталью, в среднем на 18–32 %;
- с использованием высокопрочной арматуры, в среднем на 13–24 % по сравнению с контрольными образцами из железобетона.

Появление первых трещин, нормальных к продольной оси элемента, отмечено при уровне нагрузки 0,19–0,21 и 0,22–0,24 от предельной для железобетонных и фиброжелезобетонных балок соответственно.

Выявлено снижение прогибов в фиброжелезобетонных балках

- с арматурой класса А500С в 1,15–1,2 раза;
- с арматурой класса Ат800 в 1,25 раза по сравнению с железобетонными образцами, что свидетельствует об увеличении жесткости элементов при использовании фибрового армирования.

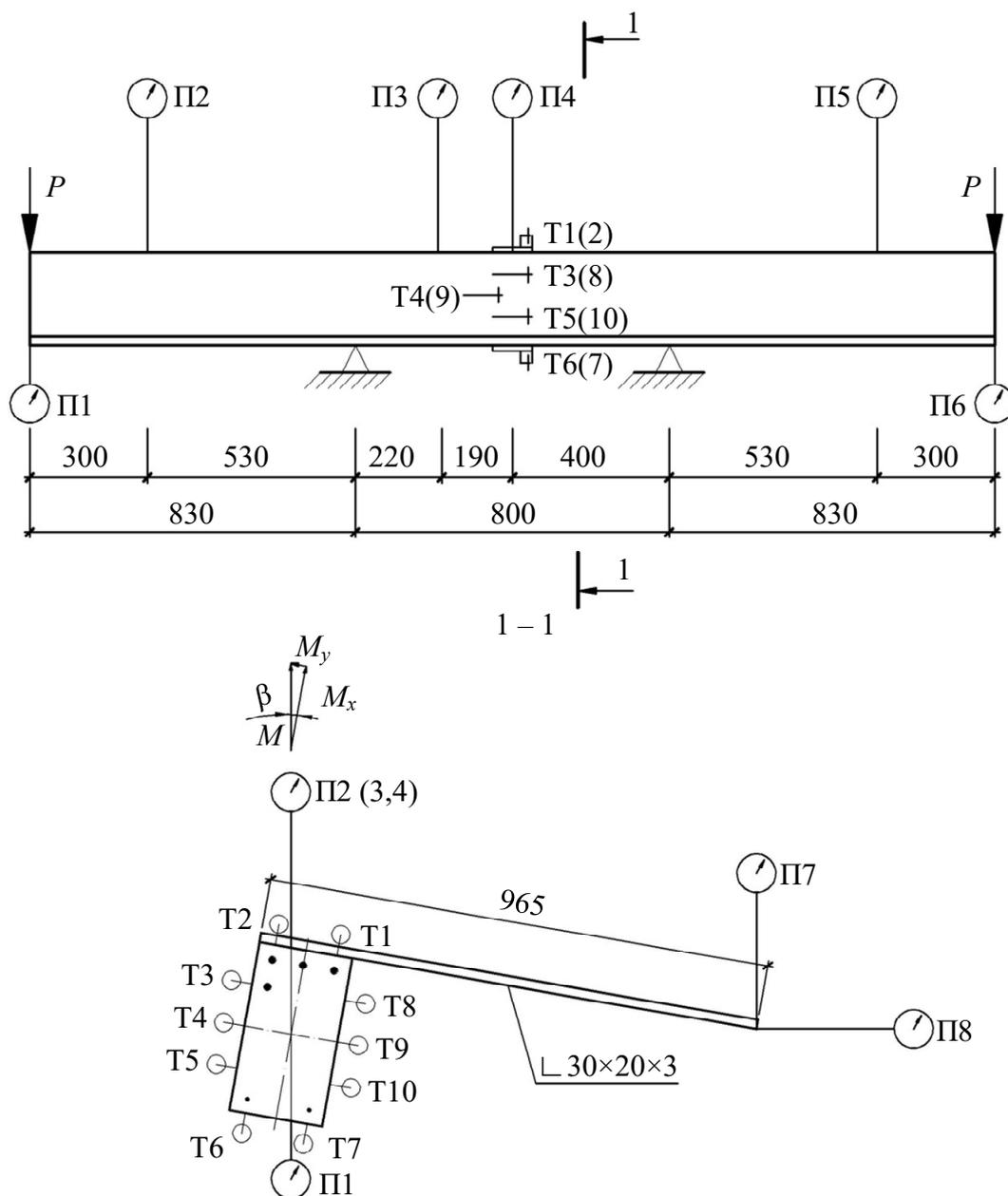


Рисунок 5 – Схема испытания образцов-балок и расстановки измерительных приборов: T1-T10 – электромеханические тензометры Н.Н. Аистова ТА-2; П1-П8 – прогибомеры системы Н.Н. Аистова и В.Т. Овчинникова 6ПАО; P – сосредоточенная сила, прикладываемая в процессе испытания; M – изгибающий момент, возникающий в зоне чистого косоуго изгиба; β – угол между силовой плоскостью и плоскостью, проходящей через вертикальную ось симметрии поперечного сечения и продольную ось балки

Фибровое армирование способствует более эффективному использованию регулярной арматуры, поскольку в железобетонных балках некоторые стержни остались недоиспользованными, и предельное состояние наступило в результате исчерпания прочности бетона сжатой зоны, в то время как в фиброжелезобетонных элементах все стержни достигли напряжений, соответствующих физическому или условному пределу текучести арматурной стали.

2. При эксплуатационном уровне нагрузки, соответствующем 70 % от предельного, в фиброжелезобетонных элементах, армированных мягкой сталью, наблюдалось снижение ширины раскрытия нормальных трещин до 2 раз в балках,

испытанных при углах наклона силовой плоскости, равных 10° , и до 1,7 раза – при 20° . В фиброжелезобетонных балках, армированных одним высокопрочным арматурным стержнем, зафиксирована величина ширины раскрытия нормальных трещин, превышающая (до 30%) или равная ее величине в железобетонных образцах. Следует заметить, что снижение ширины раскрытия нормальных трещин может быть достигнуто за счет установки нескольких арматурных стержней меньшего диаметра. Установлено уменьшение среднего расстояния между трещинами в фиброжелезобетонных балках

- с арматурой класса А500С в 1,7 раза;
- с арматурой класса Ат800 в 1,4–1,7 раза по сравнению с контрольными железобетонными образцами.

3. Увеличение угла наклона силовой плоскости способствует снижению несущей способности до 16 % и повышению прогибов косоизгибаемых фиброжелезобетонных элементов. В балках с регулярной арматурой из высокопрочных сталей предельные изгибающие моменты оказались близки по значению, поскольку с увеличением угла наклона силовой плоскости центр тяжести рабочей арматуры существенно переместился, таким образом, плечо внутренней пары сил практически не изменилось по величине, а повернулось.

4. Величина угла закручивания была минимальна для всех образцов-балок и находилась в пределах от $0,01$ до $0,14^\circ$, следовательно, величиной неизбежно возникающего крутящего момента можно пренебречь.

5. Полученные результаты и анализ характера трещинообразования, значений ширины раскрытия нормальных трещин и прогибов позволяют сделать вывод о наличии необходимых предпосылок для эффективного применения в косоизгибаемых фиброжелезобетонных элементах высокопрочной арматуры без предварительного напряжения.

В *третьей главе* представлены исходные данные и результаты численного исследования косоизгибаемых фиброжелезобетонных и железобетонных элементов.

С целью определения характера НДС косоизгибаемых элементов в зоне действия постоянного момента с учетом нелинейного деформирования бетона или фибробетона и регулярной арматуры было проведено численное исследование железобетонных и фиброжелезобетонных элементов в программном комплексе ANSYS (Mechanical APDL).

В ходе численного эксперимента были смоделированы 2 типа железобетонных и 5 типов фиброжелезобетонных балок, идентичных опытным образцам, указанным в таблице 2. Моделирование бетона и фибробетона выполнялось трехмерным объемным элементом solid65, реализующим модель разрушения K.J. Willam и E.D. Warnke. Регулярное армирование задавалось при помощи трехмерного стержневого элемента link8. Опорные и грузораспределительные пластины реализованы трехмерными объемными элементами solid45.

Прочностные и деформативные характеристики материалов задавались при помощи идеализированных диаграмм состояния. Диаграммы состояния бетона и фибробетона при сжатии (рисунок 6, а и б) основаны на результатах испытания

бетонных и фибробетонных образцов-призм и диаграммах, применяемых в других исследованиях. Участок диаграммы между точками 0–4 представляет кусочно-линейную функцию, опорные точки которой найдены из уравнений кривых, аппроксимирующих результаты испытания лабораторных образцов-призм на сжатие, и соответствуют напряжениям, равным 0, 30, 60, 85 и 99 % от предела прочности бетона и фибробетона при сжатии. Для обеспечения сходимости решения горизонтальный участок диаграммы задан с незначительным упрочнением; относительные деформации ε_{b2} и ε_{fb2} численно равны 0,0035 и 0,0076 соответственно. Диаграммы дополнены ниспадающей ветвью, физический смысл которой заключается в «размазывании» трещин на некоторую область конечных элементов, тем самым обеспечивая ее непрерывность и позволяя получить численное решение задачи. Для точки 6 относительные деформации приняты равными $1,2\varepsilon_{b2}$ и $1,2\varepsilon_{fb2}$ для бетона и фибробетона соответственно, а величина напряжений – 20% от прочности материала на сжатие.

Моделирование работы элемента solid65 при растяжении по умолчанию задается диаграммой, представленной на рисунке 6, в. Коэффициент релаксации растягивающих напряжений T_c принят численно равным 0 для бетона и 0,6 для фибробетона.

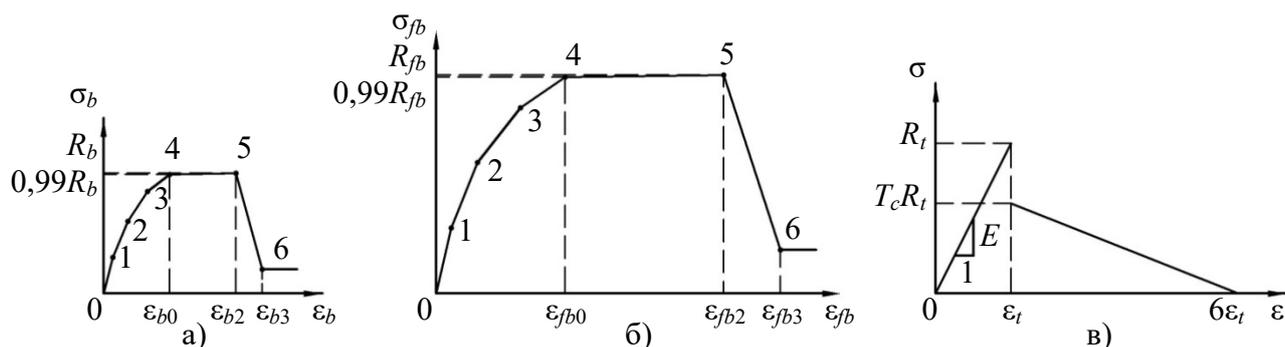


Рисунок 6 – Диаграммы состояния а) бетона и б) фибробетона при сжатии; в) элемента solid65 при растяжении: R_t – прочность материала на растяжение; T_c – коэффициент релаксации растягивающих напряжений, E – модуль упругости материала

Механические характеристики регулярной арматуры задавались при помощи идеализированных диаграмм состояния, установленных СП 63.13330.2012, с учетом прочностных и деформативных характеристик, определенных в ходе предварительных испытаний арматурных стержней. Горизонтальные участки диаграмм приняты с незначительным упрочнением. Опорные и грузораспределительные пластины приняты упругими.

Расчетная схема численной модели косоизгибаемого элемента повторяет схему испытания опытных образцов в лабораторных условиях (рисунок 5). Поскольку конструкции образцов и нагружение симметричны относительно середины пролета, в программном комплексе задавалась половина балки. Сетка конечных элементов имеет шаг 5 или 10 мм с учащением в тех областях, где расположен арматурный стержень. Общее количество конечных элементов порядка 36 тысяч. Решение задачи выполнялось нелинейным статическим анализом. Величина нагрузки разбивалась на заданное количество приращений – шагов

нагрузки. Процесс итераций на каждом шаге выполнялся методом Ньютона-Рафсона.

На рисунке 7 представлены результаты численного моделирования фибро-железобетонных балок серий ФЖБ1.1 и ФЖБ1.2, испытанных под углами наклона силовой плоскости 10 и 20° соответственно, в предельной стадии НДС. На рисунках 7, а и 7, в красным цветом отмечены напряжения, соответствующие наступлению физического предела текучести в арматуре класса А500С. Единицы измерения напряжений – Па. Отрицательные значения искомых величин соответствуют сжатию, положительные – растяжению.

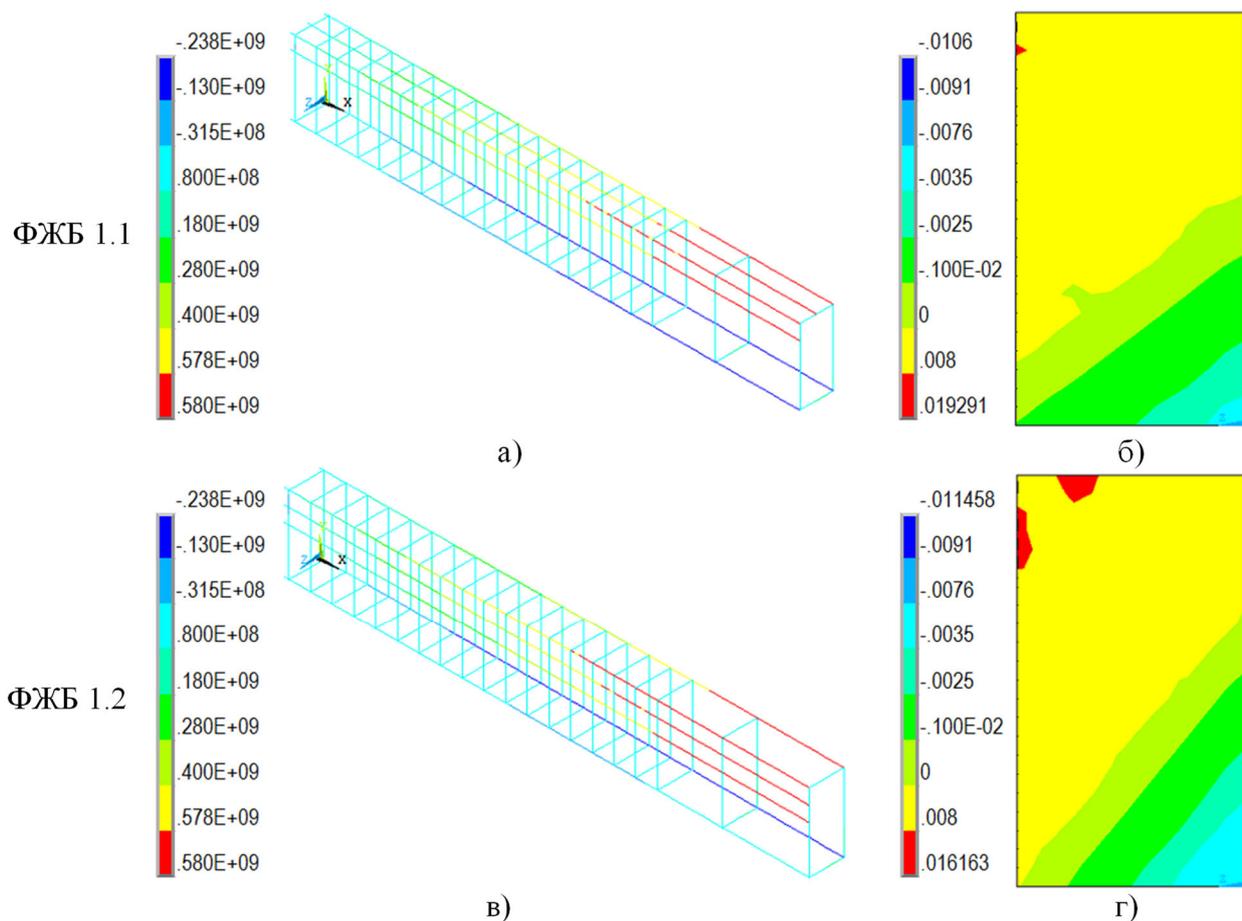


Рисунок 7 – Результаты численного моделирования фиброжелезобетонных балок серий ФЖБ1.1 и ФЖБ1.2, соответствующие предельной стадии НДС: а, в) распределение напряжений в арматурных стержнях; б,г) распределение относительных деформаций в поперечном сечении в зоне действия постоянного момента вдоль продольной оси X

Значения предельных изгибающих моментов, полученных в результате численного исследования, приведены в таблице 4. По результатам выполненного численного исследования сделаны следующие выводы:

1. Улучшенные прочностные и жесткостные характеристики фибробетона по сравнению с традиционным бетоном позволяют повысить несущую способность косоизгибаемого элемента.

2. Увеличение угла наклона силовой плоскости приводит к снижению несущей способности до 11,7 % в железобетонных и до 12,5 % в фиброжелезобетонных элементах.

3. Нейтральная ось поворачивается с ростом угла наклона силовой плоскости, таким образом, в фиброжелезобетонных балках форма сжатой зоны переходит из трапециевидной в треугольную, а в железобетонных остается трапециевидной, ввиду большей площади.

4. В смоделированных железобетонных балках наступление предельной стадии НДС происходит в результате раздробления сжатой зоны, в фиброжелезобетонных – в результате достижения стержнями продольной рабочей арматуры физического или условного предела текучести для мягких и высокопрочных сталей соответственно.

5. Установка конструктивной арматуры небольшого диаметра и наличие замкнутых хомутов не оказали существенного влияния на величину предельного изгибающего момента при угле наклона силовой плоскости, равном 20°.

6. Применение фибрового армирования позволило использовать повышенные прочностные свойства высокопрочной арматурной стали без предварительного напряжения.

7. Благодаря полученным выше результатам в рамках физического и численного экспериментов создались необходимые предпосылки для разработки практического метода расчета по прочности нормальных сечений косоизгибаемых фиброжелезобетонных элементов.

В *четвертой главе* сформулированы предпосылки и разработан практический метод расчета по прочности нормальных сечений косоизгибаемых фиброжелезобетонных элементов. Полученные теоретические выводы сопоставлены с результатами экспериментального и численного исследований.

В основу предлагаемого метода положены методы расчета по прочности косоизгибаемых железобетонных элементов, предложенные С.И. Глазером и М.С. Торяником, а также оригинальные разработки автора, обеспечивающие учет специфики поведения фибробетона в составе конструкции. Расчет по прочности косоизгибаемых фиброжелезобетонных элементов производится по III стадии НДС по предельным усилиям и имеет следующие предпосылки:

1. Эпюра распределения напряжений в фибробетоне сжатой зоны принимается прямоугольной, с ординатой, равной расчетному сопротивлению фибробетона сжатию R_{fb} .

2. Эпюра распределения напряжений в фибробетоне растянутой зоны принимается прямоугольной, с ординатой, равной по величине σ_{fbt} , определяемой как $\sigma_{fbt} = k_{fbt} \cdot R_{fbt}$, где R_{fbt} – расчетное сопротивление фибробетона осевому растяжению, МПа; k_{fbt} – коэффициент перехода от криволинейной эпюры распределения растягивающих напряжений в фибробетоне к эквивалентной прямоугольной

$$k_{fbt} = \rho_1 + \rho_2 \frac{R_{fbt}}{E_{fb} \cdot k_s \cdot \varepsilon_{s0}}, \quad (1)$$

где ρ_1 и ρ_2 – коэффициенты, принимаемые в зависимости от процента фибрового армирования, как $\rho_1=0,15$ и $\rho_2=9,8$ при $\mu_{fv}=1\%$; $\rho_1=0,2$ и $\rho_2=9,0$ при $\mu_{fv}=1,5$; $\rho_1=0,25$ и $\rho_2=9,75$ при $\mu_{fv}=2\%$.

3. Напряжения в стержнях продольной рабочей арматуры принимаются равными расчетному сопротивлению арматуры растяжению R_s .

4. Центры тяжести растянутого и сжатого фибробетона и растянутой арматуры лежат в одной плоскости, соответственно и равнодействующие усилия в них находятся в одной плоскости.

5. Плоскости действия внешних сил и внутренних усилий совпадают или параллельны.

6. Центр тяжести растянутой продольной арматуры максимально приближен к наиболее растянутому углу сечения.

7. Часть растянутой арматуры площадью a_x располагается горизонтально, параллельно ширине сечения b в зависимости от условий нагружения конструкции: при постоянном действии нагрузки центр тяжести арматуры площадью a_x рекомендуется приблизить к более растянутому углу сечения; при нагружении взаимно перпендикулярными векторами сил, один из которых периодически повторяющийся, центр тяжести арматуры площадью a_x располагается на оси Y .

8. Часть растянутой арматуры площадью a_y располагается вертикально, параллельно высоте сечения h , а ее центр тяжести максимально приближен к наиболее растянутому углу сечения.

9. Крайний, наиболее растянутый стержень относится к горизонтальной части арматуры площадью a_x .

Расчетные схемы для треугольной и трапециевидной форм сжатых зон фибробетона представлены на рисунках 8 и 9 соответственно.

Определение формы сжатой зоны фибробетона в косоизгибаемом фиброжелезобетонном элементе выполняется из условия

$$B \leq \frac{2(1,5A - \alpha)}{3B - 1}, \quad (2)$$

где $B = \frac{M_x b}{M_y h}$; $A = (1 - \alpha c_2)(1 - \delta_1) - c_1 c_2 p_2 (V - \delta_1) + c_2 \left(\frac{0,5 - \alpha}{1 - \alpha} - \delta_1 \right) (\alpha - 1)$;

$$B = (1 - \alpha c_2)(1 - \delta_2) - c_1 c_2 p_1 p_2 (u - \delta_2) + c_2 \left(\frac{0,5 - \alpha}{1 - \alpha} - \delta_2 \right) (\alpha - 1); \delta_1 = \frac{a_1}{h}; \delta_2 = \frac{a_2}{b};$$

$$p_1 = \frac{a_x}{a_y}; p_2 = \frac{1}{1 + p_1}; m_1 = \frac{R_s A_s}{bh(R_{fb} + \sigma_{fbt})}; m_2 = \frac{\sigma_{fbt}}{R_{fb} + \sigma_{fbt}}; c_1 = \frac{m_1}{m_2}; c_2 = \frac{1}{1 + c_1};$$

$$\alpha = m_1 + m_2.$$

Если условие (2) выполняется, то сжатая зона имеет треугольную форму, иначе – трапециевидную. Для нахождения величин, входящих в формулу (2), достаточно исходных данных для расчета, тем самым можно заранее определить форму сжатой зоны фибробетона.

Расчет по прочности нормальных сечений косоизгибаемых фиброжелезобетонных элементов прямоугольного сечения выполняется на основе трех уравнений равновесия:

$$\sum Z = 0, \quad \sum M_x = 0, \quad \sum M_y = 0,$$

где $\sum Z$ – сумма проекций всех усилий, возникающих в сечении, на ось Z ; $\sum M_x$ – сумма всех моментов, возникающих в сечении, относительно оси X_1 ; $\sum M_y$ – сумма всех моментов, возникающих в сечении, относительно оси Y_1 .

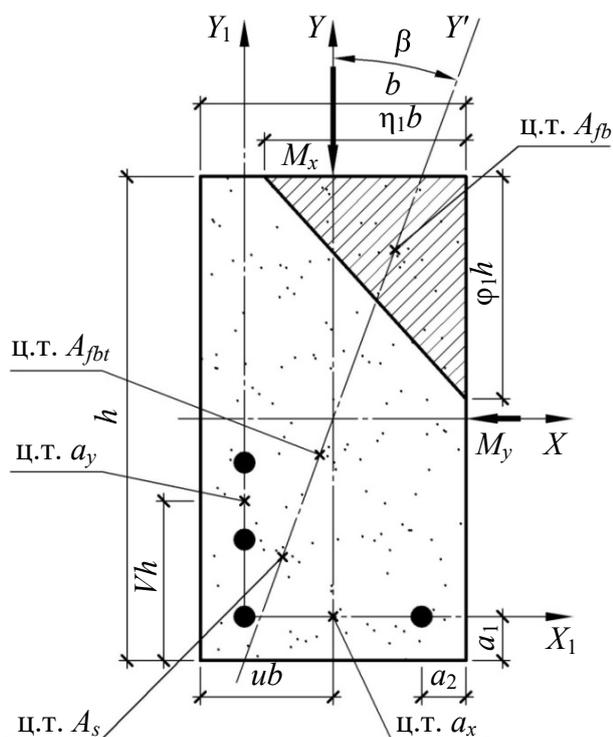


Рисунок 8 – Расчетная схема косоизгибаемого фиброжелобетонного элемента с треугольной формой сжатой зоны фибробетона

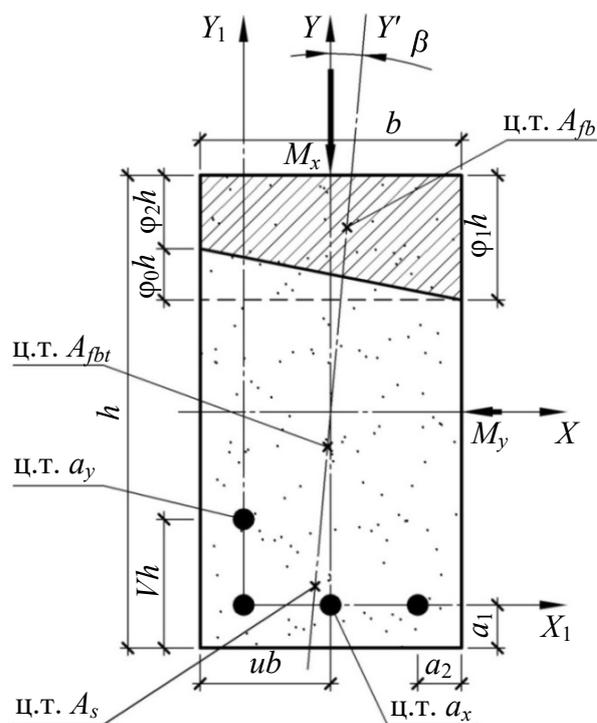


Рисунок 9 – Расчетная схема косоизгибаемого фиброжелобетонного элемента с трапециевидной формой сжатой зоны фибробетона

В полученной системе уравнений неизвестными являются центр тяжести растянутого фибробетона и размеры сжатой зоны. Положение центра тяжести растянутого фибробетона выражаем при помощи зависимостей сопротивления материалов через размеры сжатой зоны фибробетона, таким образом, после преобразований решение сводится к квадратному уравнению с одной переменной φ_1 или φ_0 для треугольной и трапециевидной форм сжатой зоны соответственно. Основные зависимости расчета по прочности нормальных сечений косоизгибаемых фиброжелобетонных элементов представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Основные зависимости расчета по прочности нормальных сечений косоизгибаемых фиброжелобетонных элементов

Треугольная форма сжатой зоны фибробетона	Трапециевидная форма сжатой зоны фибробетона
$\varphi_1 = \frac{3}{2} K_1 + \sqrt{\frac{9}{4} K_1^2 + 2B\alpha};$ $K_1 = A - BB; A_x = \alpha A - \alpha \frac{\varphi_1}{3};$ $\xi = \frac{\varphi_1}{1 - V_s + (1 - u_s) \frac{\varphi_1^2}{2\alpha}}.$	$\varphi_0 = -B + \sqrt{B^2 - K_2};$ $K_2 = 24\alpha(BB - A - 0,5B + 0,5\alpha);$ $\varphi_1 = \alpha + 0,5\varphi_0; A_x = \alpha A - 0,5 \left(\varphi_1^2 - \varphi_1\varphi_0 + \frac{\varphi_0^2}{3} \right);$ $\xi = \frac{\varphi_1}{1 - V_s + (1 - u_s) \varphi_0}.$

Для расчета несущей способности косоизгибаемых фиброжелезобетонных элементов достаточно вычислить предельный изгибающий момент относительно одной из осей симметрии поперечного сечения

$$M_x = A_x b h^2 (R_{fb} + \sigma_{fbt}). \quad (3)$$

Значение граничной относительной высоты сжатой зоны фибробетона определяется как

$$\xi_R = \frac{\varepsilon_{fb2} - 0,5\varepsilon_{fb1} - 0,2\varepsilon_{fb0}}{\varepsilon_{fb2} + \varepsilon_{s0}}, \quad (4)$$

где $\varepsilon_{fb1} = \frac{0,6R_{fb}}{E_{fb}}$, $\varepsilon_{fb0} = 2 \cdot 10^{-3} \cdot \left(\frac{R_{fb}}{R_b}\right)^2$, $\varepsilon_{fb2} = \left(3,5 + 5 \cdot \left(\frac{R_{fb}}{R_b} - 1\right)\right) \cdot 10^{-3}$,

ε_{s0} – относительные деформации растянутой арматуры, определяемые по СП 63.13330.2012.

Расчет переармированных косоизгибаемых фиброжелезобетонных элементов, а также элементов с регулярной высокопрочной арматурой без предварительного напряжения выполняется последовательными приближениями с учетом напряжений в каждом стержне, вычисленных через относительные деформации i -го арматурного стержня ε_{si} , определяемые из гипотезы плоских сечений и соответствующие достижению относительными деформациями фибробетона крайнего сжатого волокна максимального значения ε_{fb2} .

Работа высокопрочного i -го арматурного стержня при напряжениях, превышающих условный предел текучести, определяется умножением расчетного сопротивления арматуры растяжению R_s на коэффициент γ_{s3i} , значение которого находится в пределах от 1,0 до 1,1.

$$\gamma_{s3i} = \frac{4,5 + 0,0021R_s + \frac{R_{fb}}{R_b} - \left(0,5 + 0,0011R_s + \frac{R_{fb}}{R_b}\right) \frac{\xi_i}{\xi_R}}{4 + 0,001R_s}, \quad (5)$$

где значения напряжений R_{fb} , R_b и R_s принимаются в МПа.

Величины изгибающих моментов, соответствующих предельной стадии НДС, определенные в ходе испытания лабораторных образцов, численного моделирования и по предложенному методу расчета, представлены в таблице 4.

Полученные величины предельных изгибающих моментов, воспринимаемых поперечными сечениями косоизгибаемых фиброжелезобетонных элементов, и выполненный анализ показали, что преимущественно экспериментальные значения превышали теоретические, то есть элементы имели запас прочности. Среднее арифметическое расхождение экспериментальных и теоретических величин предельных изгибающих моментов составило +7,7 % в запас прочности фиброжелезобетонных элементов при среднем квадратичном отклонении 6,7 %. Таким образом, предложенный практический метод расчета по прочности нормальных сечений косоизгибаемых фиброжелезобетонных элементов удовлетворительно согласуется с данными лабораторных испытаний образцов-балок.

Таблица 4 – Величины предельных изгибающих моментов, установленные в результате экспериментально-теоретического исследования

Серия	№	Шифр балки	Экспериментальный предельный изгибающий момент M_z , кН·м	Предельный изгибающий момент, определенный в ПК ANSYS M_a , кН·м	Теоретический предельный изгибающий момент M_T , кН·м
1	1	ЖБ1-1	28,57	23,07	–
	2	ЖБ1-2	26,53		
2	3	ЖБ2-1	25,09	20,38	–
	4	ЖБ2-2	24,58		
3	5	ФЖБ1.1-1	30,84	29,19	31,25
	6	ФЖБ1.1-2	34,30		
4	7	ФЖБ1.2-1	29,64	25,84	27,07
	8	ФЖБ1.2-2	32,23		
5	9	ФЖБ1.3-1	33,38	25,54	27,07
	10	ФЖБ1.3-2	31,94		
6	11	ФЖБ2.1-1	30,98	31,78	30,80
	12	ФЖБ2.1-2	31,23		
7	13	ФЖБ2.2-1	30,57	30,62	29,39
	14	ФЖБ2.2-2	30,86		

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные итоги выполненного экспериментально-теоретического исследования:

1. Экспериментальные исследования образцов-балок позволили получить новые данные о характере напряженно-деформированного состояния и прочности нормальных сечений косоизгибаемых фиброжелезобетонных элементов. Фиброжелезобетонные элементы показали более высокие прочность, трещиностойкость, жесткость и вязкость при разрушении по сравнению с образцами из традиционного железобетона.

Установлено, что фибровое армирование способствует более эффективному использованию регулярной арматуры, а также сказывается на увеличении несущей способности косоизгибаемых фиброжелезобетонных элементов, повышая ее в среднем на 13–32 % по сравнению с контрольными образцами из железобетона.

2. Результаты экспериментального исследования, анализ характера трещинообразования и прогибов создали необходимые предпосылки для эффективного применения в косоизгибаемых фиброжелезобетонных элементах высокопрочной арматуры.

3. Численные исследования, выполненные в программном комплексе ANSYS (Mechanical APDL), позволили получить характер напряженно-деформированного состояния косоизгибаемых фиброжелезобетонных элементов на каждом шаге нагружения и подтвердили наступление предельного состояния в результате достижения стержнями продольной рабочей арматуры физического или условного предела текучести для мягких и высокопрочных сталей соответственно.

4. Разработан практический метод расчета по прочности нормальных сечений косоизгибаемых фиброжелезобетонных элементов, базирующийся на современной теории железобетона и учитывающий специфику поведения фибробе-

тона. Предложенный метод позволяет рассчитывать прочность косоизгибаемых фиброжелезобетонных элементов с традиционным армированием мягкой сталью или с высокопрочной арматурой без предварительного напряжения, при этом используются модифицированные выражения для определения граничной относительной высоты сжатой зоны фибробетона и коэффициента γ_{s3} , обеспечивающего учет поведения высокопрочной арматуры в сочетании с фибровым армированием при напряжениях, превышающих условный предел текучести.

Предпосылки дальнейшей разработки темы. Данная диссертация, однако, не исчерпывает всего круга вопросов, связанных с построением теории и расчета фиброжелезобетонных элементов в условиях косоугольного изгиба, но создает реальные предпосылки для решения многих из них.

Дальнейшие работы целесообразно направить на исследования напряженно-деформированного состояния и прочности фиброжелезобетонных элементов более сложного профиля (тавровых, двутавровых, коробчатого сечения и пр.) с одиночным и двойным армированием, а также второй группы предельных состояний.

IV. ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО ИССЛЕДОВАНИЯ

Публикации в периодических научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. **Воронцова, Н.С.** Расчет прочности косоизгибаемых фиброжелезобетонных элементов [Текст] / Н.С. Воронцова // Вестник гражданских инженеров. – 2014. – №3 (44). – С. 77–85. (0,56 п. л.)

2. **Воронцова, Н.С.** Расчет несущей способности косоизгибаемого фиброжелезобетонного элемента с треугольным очертанием сжатой зоны [Текст] / Н.С. Воронцова // Вестник гражданских инженеров. – 2014. – №5 (46). – С. 24–26. (0,18 п. л.)

3. **Воронцова, Н.С.** Экспериментальные исследования косоизгибаемых фиброжелезобетонных элементов [Текст] / Н.С. Воронцова // Вестник гражданских инженеров. – 2017. – №4 (63). – С. 66–71. (0,38 п. л.)

4. **Воронцова, Н.С.** Конечно-элементное моделирование косоизгибаемых фиброжелезобетонных элементов [Текст] / Н.С. Воронцова, В.И. Морозов // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2017. – №10 (61). – С. 30–41. (0,75 п. л. / 0,5 п. л.)

Публикации в других изданиях:

5. **Воронцова, Н.С.** К расчету прочности фиброжелезобетонных элементов прямоугольного сечения при воздействии косоугольного изгиба [Текст] / Н.С. Воронцова // Доклады 70-й научной конференции профессоров, преподавателей, научных работников, инженеров и аспирантов университета: в 3 ч.; Министерство образования и науки РФ, СПбГАСУ. – СПб., 2014. – Ч.1. – С. 12–17. (0,38 п. л.)

6. **Воронцова, Н.С.** К расчету прочности косоизгибаемых фиброжелезобетонных элементов [Текст] / Н.С. Воронцова // Актуальные проблемы строительства: материалы международной научно-практической конференции студентов, аспирантов, молодых ученых и докторантов 09–11 апреля 2014 года / Министерство образования и науки РФ, СПбГАСУ. – СПб., 2014. – С. 57–61. (0,31 п. л.)

Компьютерная верстка С. Н. Яблокова

Подписано к печати 15.04.2019. Формат 60×84 1/16. Бум. офсетная.

Усл. печ. л. 1,4. Тираж 120 экз. Заказ 45.

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

Отпечатано на МФУ. 198095, Санкт-Петербург, ул. Розенштейна, д. 32, лит. А.

