

На правах рукописи

ГОЛИШЕВСКАЯ ДАРЬЯ АЛЕКСАНДРОВНА

**НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОЕ СОСТОЯНИЕ НЕОДНОРОДНО
АРМИРОВАННЫХ СТАЛЕФИБРОБЕТОННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И МЕТОДИКА ИХ
РАСЧЕТА**

2.1.1. Строительные конструкции, здания и сооружения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Москва – 2024

Работа выполнена в департаменте строительства инженерной академии Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы» (РУДН)

- Научный руководитель: **Маркович Алексей Семенович**
кандидат технических наук, доцент, доцент департамента строительства инженерной академии ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы»
- Официальные оппоненты: **Ибрагимов Александр Майорович**
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры металлических и деревянных конструкций ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»
- Ксенофонтова Татьяна Кирилловна**
кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры инженерных конструкций института мелиорации, водного хозяйства и строительства им. А.Н. Костякова ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева»
- Ведущая организация: **ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого»**

Защита состоится 28 марта 2024 г. в 11:00 часов на заседании диссертационного совета ПДС 2022.009, созданного на базе ФГАОУ ВО «Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы», по адресу: 115419, г. Москва, ул. Орджоникидзе, д. 3, ауд. 368.

С диссертацией можно ознакомиться в Учебно-научном информационном библиотечном центре (Научной библиотеке) РУДН по адресу: 117198, г. Москва, ул. Миклухо-Маклая, д.6.

Электронная версия диссертации, автореферат и объявление о защите диссертации размещены на официальном сайте Высшей аттестационной комиссии при Министерстве науки и высшего образования РФ (<https://vak.minobrnauki.gov.ru>) и на сайте <https://www.rudn.ru/science/dissovet>

Автореферат разослан «__» _____ 2024 г.

Ученый секретарь диссертационного совета ПДС 2022.009
кандидат технических наук, доцент

Маркович А.С.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Одна из основных задач развития строительной индустрии состоит в повышении прочности и надежности строительных конструкций. Бетон является основным строительным материалом, используемым в массовом строительстве. Одним из направлений повышения прочности бетонов является применение дисперсного армирования. Наибольший интерес представляют композиты на основе доступных для производства минеральных матриц, дисперсно-упрочненных особыми волокнами (металлическими, стеклянными, базальтовыми, полиамидными, углеродными и т.д.). Применение дисперсно-армированных бетонов перспективно как в сборных, так и в монолитных конструкциях.

Несмотря на то, что в настоящее время имеются определенные противоречия в оценках результатов исследований, проводимых отечественными и зарубежными учеными, можно выделить общие закономерности, позволяющие достоверно оценивать физико-механические характеристики дисперсно-армированных бетонов. При этом имеет место недостаточная изученность неоднородно армированных сталефибробетонных элементов. В связи с этим крайне важным является исследование напряженно-деформированного состояния бетонных и железобетонных элементов, имеющих неоднородное дисперсное армирование. Решению этой проблемы и посвящена настоящая работа.

Степень разработанности темы исследования. Имеются многочисленные публикации, посвященные вопросам, проблемам и технологии дисперсного армирования бетонов. В России и странах зарубежья (преимущественно США, Канада, Франция, Германия, Китай, Япония) ежегодно проходят конференции, симпозиумы, научно-технические семинары, конгрессы, на которых обсуждаются результаты исследований и вопросы, связанные с применением дисперсно-армированных бетонов в строительстве.

Анализ теоретических и экспериментальных исследований деформирования и прочности дисперсно-армированного бетона (работы Д.С. Аболиньш, И.У. Аубакирова, Э.С. Айвазян, С.С. Каприелов, Б.А. Крылов, С.В. Клюев, А.В. Клюев, Л.Г. Курбатов, К.В. Михайлов, Т.А. Низина, К.Л. Бирюкович, В.П. Некрасов, В.А. Перфилов, Ю.В. Пухаренко, Д.А. Пантелеев, Ф.Н. Рабинович, К.В. Талантова, Р.В. Лесовик, И.В. Журавская, Г.К. Хайдуков, V. Rarnalaishnan, M. Beddar, C.D. Johnston, Abdulhadi M., Brik V., Charan S.S., Gore K.R., Jin S., Raj S., Shen X., Zhang J. и др.) показал, что применение дисперсно-армированного бетона позволяет добиться более высокой прочности на сжатие и растяжение, существенного снижения усадки, устойчивости к трещинообразованию и высокой ударной прочности.

В то же время, многие теоретические и экспериментальные исследования по определению физико-механических характеристик дисперсно-армированного бетона касаются определения этих характеристик для однородно армированных элементов. Особенности нелинейной работы сжатых и изгибаемых неоднородно армированных сталефибробетонных элементов с учетом их разгрузки и догрузки изучены недостаточно.

Целью диссертационной работы является исследование физико-механических характеристик дисперсно-армированного бетона на основе стального волокна и разработка физически нелинейного конечного элемента для расчета сталефибробетонных элементов с учетом неоднородного армирования.

Задачи исследования. Для достижения поставленной цели в настоящей диссертации были сформулированы следующие задачи:

1. На основе обзора современного состояния теории расчета дисперсно-армированных элементов, систематизации результатов теоретических и экспериментальных исследований сформулировать основные предпосылки физически нелинейного метода расчета неоднородно армированных сталефибробетонных элементов;

2. Провести серию экспериментов, нацеленных на определение прочностных и деформационных характеристик сталефибробетонных элементов при сжатии и изгибе;

3. На основе результатов проведенных экспериментальных исследований предложить аналитические зависимости (функции) для построения фактической диаграммы деформирования сталефибробетона $\sigma(\varepsilon)$ в зависимости от процентного содержания фибрового волокна в составе бетонной матрицы;

4. Для установления действительного напряженно-деформированного состояния неоднородно дисперсно-армированных сталефибробетонных изгибаемых элементов провести экспериментальные исследования на образцах сталефибробетонных балок с неравномерным фибровым армированием;

5. Разработать физически нелинейный конечный элемент дисперсно-армированной балки, позволяющий учитывать неоднородное армирование;

6. Проанализировать, критически оценить и сравнить результаты расчета с использованием предлагаемого конечного элемента с полученными экспериментальными данными и результатами физически-нелинейных расчетов с применением программного комплекса Ansys Mechanical, произвести оценку их достоверности;

7. Предложить рекомендации для выполнения практических расчетов неоднородно армированных сталефибробетонных элементов.

Объектом исследования являются сжатые и изгибаемые сталефибробетонные элементы с неоднородным дисперсным армированием.

Предметом исследования являются прочностные и деформационные характеристики сжатых и изгибаемых сталефибробетонных элементов при различном проценте фибрового армирования.

Научная новизна работы заключается в получении новых данных о напряженно-деформированном состоянии сжатых и изгибаемых сталефибробетонных элементов с различным процентом фибрового армирования, а также учетом нелинейной работы и влияния пластических деформаций, а именно:

1. Разработана методика экспериментального определения физико-механических характеристик сталефибробетона, в том числе: модуль упругости, коэффициент поперечных деформаций, значения предельных деформаций при сжатии и растяжении, величина прочности элементов с различным процентом дисперсного армирования;

2. Предложен закон деформирования сталефибробетона, описываемый полиномиальной функцией четвертой степени с постоянными коэффициентами, которые определяют вид кривой $\sigma(\varepsilon)$ в зависимости от процентного содержания стальной фибры в составе бетонной матрицы;

3. Сформулированы предпосылки для разработки физически нелинейного метода расчета неоднородно армированных сталефибробетонных элементов, на основании которых разработана методика численного расчета и построен конечный элемент неоднородно армированной балки, адаптированный к вычислительному комплексу ПРИНС.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в получении научно-обоснованных результатов и выводов, а также аналитических зависимостей для построения действительных диаграмм деформирования сталефибробетона $\sigma(\varepsilon)$, применяемых при расчетах на прочность и деформативность, которые были использованы при разработке методики физически нелинейного расчета неоднородно армированных сталефибробетонных элементов.

Методология и методы исследования. Методологической основой исследования являются научные работы отечественных и зарубежных ученых в области теории расчета фибробетонных и железобетонных конструкций, общие положения и принципы строительной механики, экспериментальные методы исследования напряженно-деформированного состояния строительных конструкций. Кроме того, использованы известные общенаучные методы

исследования такие, как научный анализ, систематизация, математическое моделирование и эксперимент.

Положения, выносимые на защиту:

1. Методика и результаты экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния дисперсно-армированных элементов, в том числе неоднородно армированных по высоте сечения сталефибробетонных балок;

2. Аналитические зависимости $\sigma(\varepsilon)$ для построения действительных диаграмм деформирования сталефибробетона при сжатии, которые позволяют учитывать влияние процента дисперсного армирования в диапазоне от 0,5% до 2%;

3. Физико-механические характеристики сталефибробетона в диапазоне армирования от 0,5% до 2%, а именно: прочность на сжатие, прочность на растяжение при изгибе, предельные деформации сжатия и растяжения при изгибе, начальный модуль упругости, коэффициент поперечных деформаций (коэффициент Пуассона);

4. Методика численного расчета МКЭ и разработанный на её основе нелинейный конечный элемент балки неоднородного армирования.

Степень достоверности результатов работы обеспечивается корректным использованием общепринятых положений теории железобетона, методов строительной механики, механики деформируемого твердого тела и предпосылок расчета, установленных на основе обширного анализа теоретических и экспериментальных исследований дисперсно-армированных элементов. Верификация результатов расчета с использованием разработанного конечного элемента проводилась на основе экспериментальных данных, полученных с участием автора в лаборатории департамента строительства инженерной академии РУДН с применением современного аттестованного испытательного оборудования и поверенных средств измерений, и путем сравнения с результатами физически нелинейного расчета в иностранном программном комплексе Ansys Mechanical на основе трёхмерной модели бетона с использованием критерия прочности Виллама и Варнке. Точность разработанного конечного элемента подтверждается приемлемой сходимостью результатов расчета с экспериментальными данными и результатами, полученными в программе Ansys Mechanical.

Апробация результатов. Результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: «Инженерные системы – 2019» (Москва, 2019); IV Международная научно-практическая конференция «Современные строительные материалы и технологии» (Калининград, 2021); International Conference on Engineering Research 2021 (Москва, 2021); International Conference on Engineering Systems 2022 (Москва, 2022).

Публикации. Материалы диссертации изложены в 6 научных публикациях, из них 5 за последние пять лет: 2 статьи опубликованы в журналах, включенных в Перечень ВАК, 4 статьи в изданиях, индексируемых в БД Scopus и Web of Science.

Структура и объем работы. Научная квалификационная работа состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы и приложений. Общий объем работы 175 страниц, включающий 67 рисунков и 26 таблиц. Количество источников использованной литературы – 171. Количество приложений – 3.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы диссертации, определяются цели и задачи исследования, указывается научная новизна и практическая значимость работы.

В первой главе рассмотрены различные виды дисперсных волокон, применяемых для армирования строительных конструкций. Приведены сравнительные характеристики по плотности, прочности на растяжение, модулю упругости, относительному удлинению при

разрыве материалов, которые используются для изготовления волокна. Выполнен анализ и систематизация исследований конструкций из дисперсно-армированных бетонов, рассмотрены основные области их применения.

За последние 10 лет существенно возрос интерес к использованию дисперсно-армированных бетонов как в России, а также в странах Европы, Азии и США. Это связано с необходимостью получения для современного строительства бетонов с повышенными по сравнению с обычными тяжелыми бетонами физико-механическими характеристиками. Имеются многочисленные работы отечественных ученых (Ф.Н. Рабинович, Ю.В. Пухаренко, Д.А. Пантелеев, И.У. Аубакирова, С.В. Клюев, А.В. Клюев, Р.В. Лесовик, Т.А. Низина и др.), посвященные вопросам, проблемам и технологии дисперсного армирования бетонов.

Исследованиям свойств дисперсно-армированных бетонов посвящены работы отечественных и зарубежных ученых: Д.С. Аболиньш, И.У. Аубакирова, Э.С. Айвазян, Б.А. Крылов, С.В. Клюев, А.В. Клюев, Л.Г. Курбатов, К.В. Михайлов, Т.А. Низина, К.Л. Бирюкович, В.П. Некрасов, В.А. Перфилов, Ю.В. Пухаренко, Д.А. Пантелеев, Ф.Н. Рабинович, К.В. Талантова, Р.В. Лесовик, И.В. Журавская, Г.К. Хайдуков, V. Rarnalaishnan, M. Beddar, C.D. Johnston, Abdulhadi M., Brik V., Charan S.S., Gore K.R., Jin S., Raj S., Shen X., Zhang J. и др.

Применение дисперсно-армированного бетона эффективно в конструкциях, к которым предъявляются требования высокой трещиностойкости, сопротивляемости знакопеременным и ударным нагрузкам, а также в конструкциях сложной геометрической формы.

Наиболее эффективным в конструкционном отношении является армирование бетонных конструкций стальной фибровой, модуль упругости которой примерно в 6 раз превышает модуль упругости бетона (200 ГПа). Рабочий диапазон объемного содержания стального волокна в дисперсно-армированном бетоне находится, как правило, в пределах от 1 до 1,5%. Более высокий процент армирования не всегда является обоснованным, так как при этом повышается трудоемкость изготовления конструкции.

На основе проведенного анализа литературных источников сформулированы основные направления теоретических и экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния неоднородно армированных сталефибробетонных элементов.

Вторая глава посвящена рассмотрению существующих подходов к расчету прочности элементов конструкций из дисперсно-армированных бетонов в отечественной и зарубежной практике.

Анализ существующих теорий показал, что наиболее предпочтительным для разработки новых и модификации существующих методов расчета дисперсно-армированных бетонных и железобетонных конструкций являются теории, в которых эпюра напряжений, распределенная по высоте сечения, принимается в виде квадратичной функции. Данный вид эпюры хорошо аппроксимирует экспериментальные кривые.

Отмечено, что расчеты железобетонных элементов с дисперсным армированием и без существенно упрощаются, если использовать аналитическую форму зависимости между напряжениями и деформациями в виде $\sigma = f(\varepsilon)$. Такую зависимость можно описывать двумя уравнениями, соответственно, на участках I и II (рисунок 1).

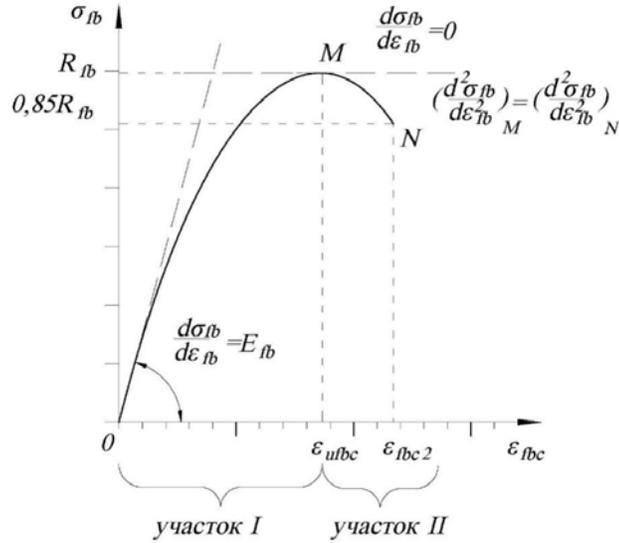


Рисунок 1 – Вид зависимости напряжение-деформация

$$\sigma(\varepsilon)_I = R_{fb} \left[2 \left(\frac{\varepsilon_{fbc}}{\varepsilon_{ufbc}} \right) - \left(\frac{\varepsilon_{fbc}}{\varepsilon_{ufbc}} \right)^2 \right], \quad (1)$$

$$\sigma(\varepsilon)_{II} = R_{fb} \left(1 - 0,15 \frac{\varepsilon_{fbc} - \varepsilon_{ufbc}}{\varepsilon_{fbc2} - \varepsilon_{ufbc}} \right), \quad (2)$$

где R_{fb} – прочность дисперсно-армированного бетона на сжатие; ε_{fbc} и ε_{ufbc} – текущая и предельная деформации дисперсно-армированного бетона при сжатии.

Однако описание функции $\sigma(\varepsilon) = f(\varepsilon_{fbc})$ двумя функциями (1), (2) на практике не всегда представляется удобным. В общем случае зависимость между напряжениями и деформациями дисперсно-армированного бетона при сжатии можно представить в виде полиномиальной функции пятой степени, предложенной В.Н. Байковым, С.В. Горбатовым и З.А. Дмитриевым, которая будет отвечать условиями, указанным на рисунке 1.

$$\sigma_{fb} = A_0 \varepsilon_{fbc} + B_0 \varepsilon_{fbc}^2 + C_0 \varepsilon_{fbc}^3 + D_0 \varepsilon_{fbc}^4 + F_0 \varepsilon_{fbc}^5, \quad (3)$$

где A_0, B_0, C_0, D_0, F_0 – постоянные коэффициенты, число которых соответствует числу уравнений, характеризующих материал.

Для практического использования уравнение (3) преобразовано в следующую форму:

$$\sigma_{fb} = A \left(\frac{\varepsilon_{fbc}}{\varepsilon_{ufbc}} \right) + B \left(\frac{\varepsilon_{fbc}}{\varepsilon_{ufbc}} \right)^2 + C \left(\frac{\varepsilon_{fbc}}{\varepsilon_{ufbc}} \right)^3 + D \left(\frac{\varepsilon_{fbc}}{\varepsilon_{ufbc}} \right)^4 + F \left(\frac{\varepsilon_{fbc}}{\varepsilon_{ufbc}} \right)^5, \quad (4)$$

где $A = \varepsilon_{ufbc} A_0$; $B = \varepsilon_{ufbc}^2 B_0$; $C = \varepsilon_{ufbc}^3 C_0$; $D = \varepsilon_{ufbc}^4 D_0$; $F = \varepsilon_{ufbc}^5 F_0$.

Раскрытие нормируемых условий приводит к системе из пяти уравнений, линейных относительно параметров A, B, C, D, F . Из её решения получаем формулы для определения значений этих параметров:

$$A = \varepsilon_{ufbc} E_{fb}; \quad B = -\frac{1}{2}(\varepsilon_{ufbc} E_{\sigma} + 3C + 4D + 5F); \quad C = -L_1 - 2D - 3F; \quad (5)$$

$$D = \frac{1}{1+b} \left[-L_2 - \frac{7}{3}(b^2 + b + 1)F \right]; \quad F = \frac{3[(1+b)L_1 + 2bL_2]}{1 - 3b + 6b^2 - 4b^3}.$$

В этих формулах используются следующие обозначения:

$$L_1 = 2R_{fb} - \varepsilon_{ufbc} E_{fb}; \quad L_2 = [R_{fb} (1 - \frac{a}{b}) + \varepsilon_{ufbc} E_{fb} (\frac{b-1}{b})] \frac{1}{b-1}; \quad (6)$$

$$a = 0,85; \quad b = \frac{\varepsilon_{fbc2}}{\varepsilon_{ufbc}}.$$

Аналитическая зависимость между напряжениями и деформациями для сжатого бетона, построенная с учетом всех нормируемых показателей, позволяет во многих случаях получать наиболее достоверные данные о несущей способности фибробетонных элементов. При этом можно отказаться от дополнительных эмпирических зависимостей и коэффициентов.

На основе проведенного анализа, в дальнейшем, зависимость между напряжениями и деформациями сталефибробетона при обработке экспериментальных данных будет приниматься в виде полиномиальной функции.

В третьей главе представлена методика и результаты экспериментов, нацеленных на исследование физико-механических характеристик образцов-кубов и балок при статическом нагружении с учетом разгрузки из области неупругих деформаций.

Была проведена программа экспериментальных исследований, которая включала в себя изготовление образцов-кубов и балок, а также испытание последних при статическом нагружении с вариацией параметров дисперсного армирования.

В качестве дисперсного армирования было выбрано два вида стальной фибры: фибра проволочная анкерная 0,3/30 (рисунок 2а); фибра проволочная волновая 0,3/22 (рисунок 2б).



Рисунок 2. Фибра проволочная: анкерная 0,3/30 (а), волновая 0,3/22 (б)

В качестве матрицы для изготовления образцов использовался мелкозернистый бетон, который позволяет обеспечить высокую степень насыщения волокнами и высокую дисперсность армирования. Все образцы, изготовленные в ходе исследований, имели одинаковый состав бетонной матрицы: Ц:П:Щ = 1:1,2:1,6 при В:Ц = 0,45 и расходе суперпластифицирующей добавки 1,5% от массы цемента. Был определен расход материалов на каждый замес объемом, необходимым для изготовления образцов-кубов размером 100×100×100 мм и образцов-балок размером 65×250×1400 мм ($b \times h \times L$). Объемное содержание стального волокна (μ_f) в составе бетона принималось равным: 0,5%, 1%, 1,5%, 2%.

Количество образцов-кубов в одной партии составляло 6 шт., количество образцов-балок – 4 шт. В общей сложности было изготовлено 48 дисперсно-армированных образцов-кубов и 16 образцов-балок с однородным армированием. Отдельно была изготовлена сталефибробетонная балка, имеющая неоднородное армированное по высоте сечения волокном анкерного типа (маркировка балки «НСФБ1»). Балка была условно разделена на 10 слоев (рисунок 3). В нижней части балки было выполнено максимальное дисперсное армирование равное 2,0%, а в верхней части минимальное – 0,5%.

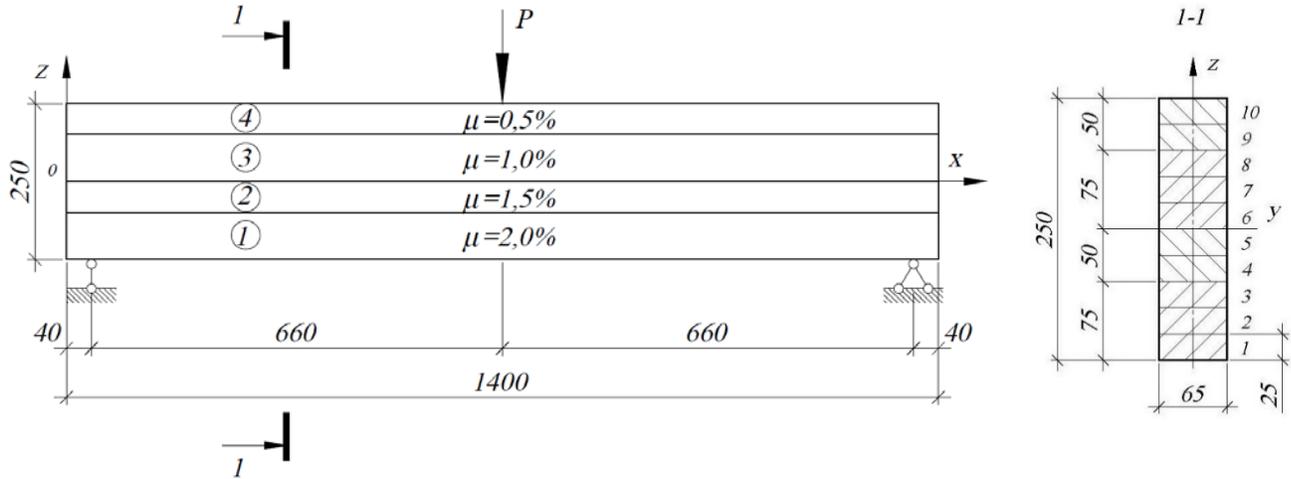


Рисунок 3 – Распределение содержания стального анкерного волокна по высоте сечения сталефибробетонной балки «НСФБ1»

Для получения действительных диаграмм деформирования использовалась методика, согласно которой в процессе испытаний на сжатие и изгиб в реальном времени синхронно с нагрузкой регистрировались продольные и поперечные деформации образцов.

Испытания образцов на прочность выполнялись на гидравлическом пресс Matest по ГОСТ 10180-2012 «Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам». Для исследования напряженно-деформированного состояния на смежные грани контрольных образцов-кубов были наклеены тензорезисторы. На каждой грани образца-куба было установлено по 7 тензорезисторов ВХ 120-5АА так, чтобы направление их базы совпадало с направлением измеряемой деформации (рисунок 4). Тензорезисторы под номерами 1 ÷ 5 и 8 ÷ 12 измеряют продольную деформацию, а 6, 7, 13 и 14 – поперечную.

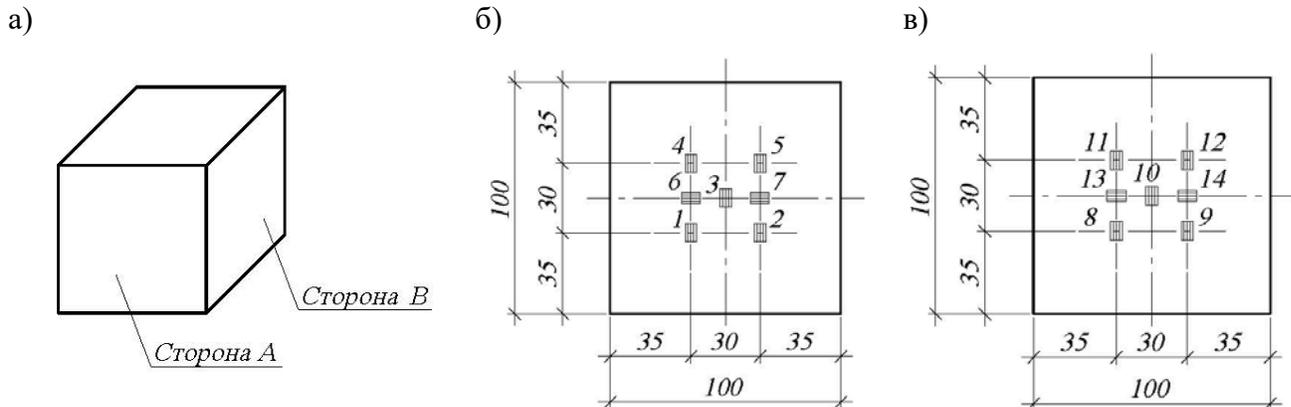


Рисунок 4 – Схема расположения тензорезисторов на гранях образцов-кубов: а – маркировка граней образца; б – сторона «А»; в – сторона «В»

Для исследования напряженно-деформированного состояния образцов-балок на контрольные образцы, размером $65 \times 250 \times 1400$ мм ($b \times h \times L$), был наклеен 21 тензорезистор ВХ 120-20АА в направлении главных деформаций, таким образом, чтобы направление его базы совпадало с направлением измеряемой деформации (рисунок 5).

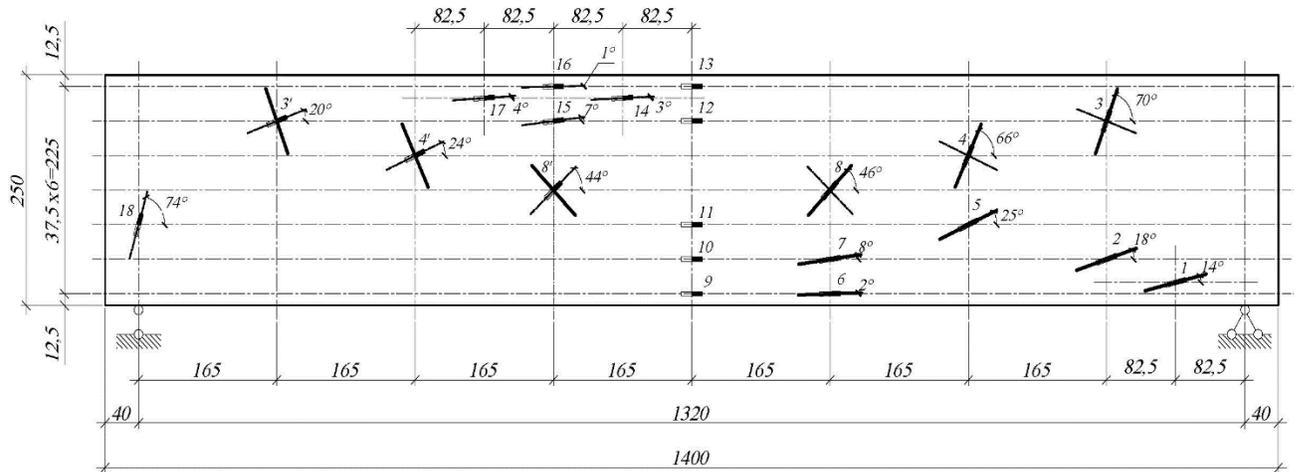


Рисунок 5 – Схема расположения тензорезисторов на образце-балка

Тензорезисторы были подключены к 32-х канальной тензометрической станции ZETLAB (рисунок 6, 7) по полной мостовой схеме (рисунок 8).

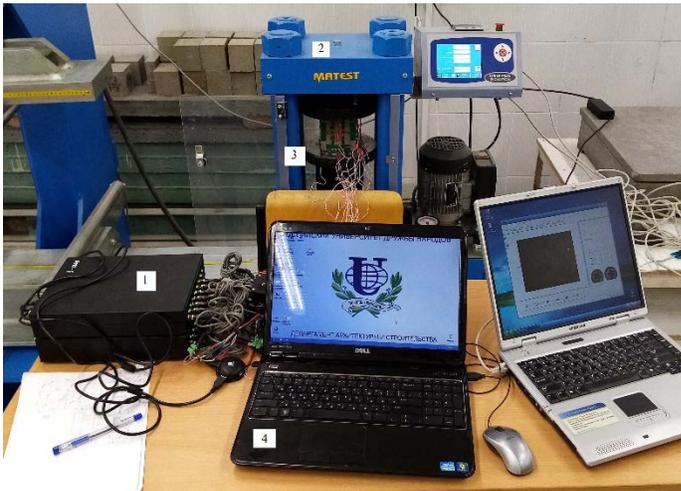


Рисунок 6а – Подключение тензорезисторов к многоканальной тензометрической станции (эксперимент на сжатие образцов-кубов): 1 – тензометрическая станция Zetlab; 2 – гидравлический пресс Matest; 3 – образец-куб с тензорезисторами ВХ 120-5АА; 4 – персональный компьютер для обработки данных

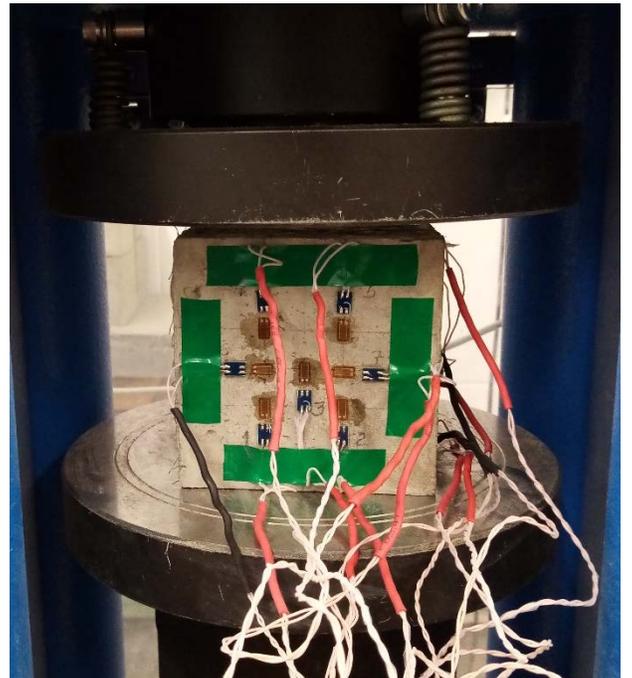


Рисунок 6б – Установка образца-куба в гидравлический пресс

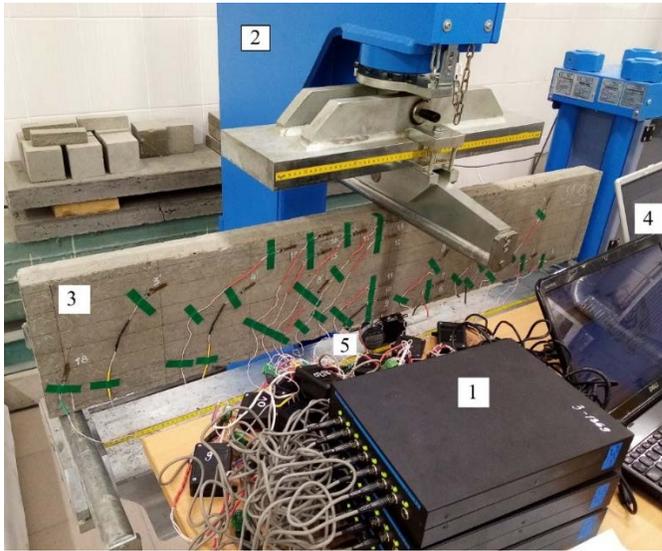


Рисунок 7 – Подключение тензорезисторов к многоканальной тензометрической станции Zetlab: 1 – тензометрическая станция Zetlab; 2 – гидравлический пресс Matest; 3 – образец-балка с тензорезисторами VX 120-20AA; 4 – персональный компьютер для обработки данных; 5 – цифровой прогибомер

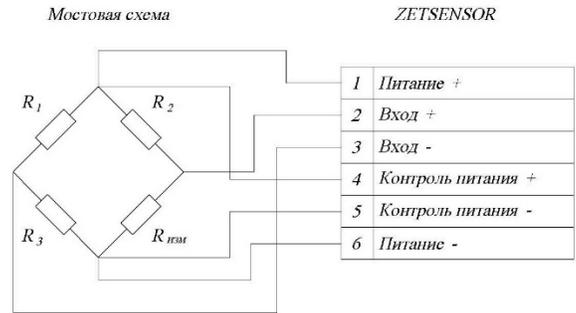


Рисунок 8 – 6-ти проводная схема подключения тензорезисторов

Методика эксперимента предполагала проведение испытаний на сжатие и изгиб в два этапа, что позволило установить величину остаточных (необратимых) деформаций. При проведении испытаний на сжатие, на первом этапе контрольный образец нагружался с постоянной скоростью до заданной величины нагрузки (350 кН), затем разгружался. На втором этапе образец нагружался с постоянной скоростью до полного разрушения (рисунок 9).



Рисунок 9 – Разрушенные образцы-кубы

Испытание балок на изгиб также проходило в два этапа с разгрузкой образца. На первом этапе контрольный образец нагружался с постоянной скоростью до заданной нагрузки 7,5 кН,

затем разгружался. На втором этапе образец нагружался с постоянной скоростью до разрушения. В процессе нагружения фиксировалось образование и развитие трещин в бетоне. Испытуемый образец представлен на рисунке 10.

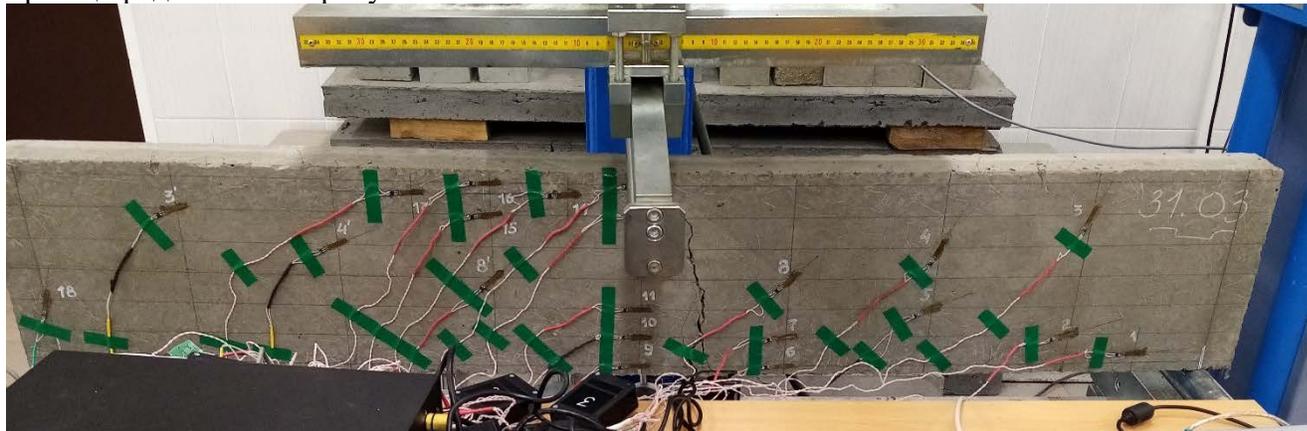


Рисунок 10 – Образование трещины в образце-балка

В ходе испытаний образцов-кубов на сжатие были определены следующие физико-механические характеристики сталефибробетона: прочность на сжатие, начальный модуль упругости, предельные деформации сжатия и растяжения при изгибе, а также коэффициент поперечных деформаций. Результаты испытаний приведены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты испытаний по определению прочности на сжатие сталефибробетонных образцов-кубов

Тип стального волокна	Кол-во стального волокна, μ_f , %	Кубиковая прочность на сжатие, R_{fb} , МПа	Призмная прочность на сжатие, R_{fb}' , МПа	Предельная деформация, ε_{ufbc}	Начальный модуль упругости, E_b , МПа $\times 10^{-3}$
Бетон без фибры	0	55,00	39,5	0,00200	39,00
Фибра проволочная анкерная 0,3/30	0,5	59,65	42,37	0,00172	44,98
	1,0	62,13	43,98	0,00160	49,41
	1,5	64,33	45,40	0,00156	49,88
	2,0	66,55	46,81	0,00154	51,71
Фибра проволочная волновая 0,3/22	0,5	57,75	41,13	0,00194	41,81
	1,0	59,21	42,09	0,00191	43,43
	1,5	60,47	42,91	0,00186	45,32
	2,0	62,20	44,03	0,00182	48,16

По результатам испытаний образцов-кубов при статическом нагружении до разрушения определены прочностные и деформационные характеристики бетона.

На основе обработки полученных экспериментальных данных построены действительные диаграммы деформирования сталефибробетона с учетом типа армирующих волокон и процентного содержания армирующего волокна (рисунок 11).

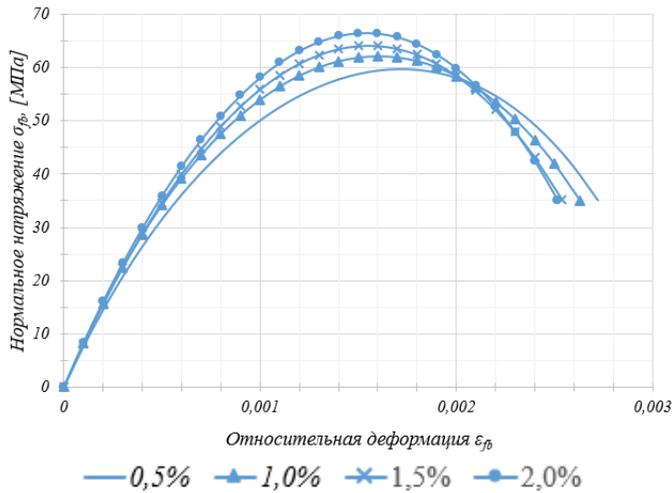


Рисунок 11а – Диаграмма «напряжение-деформация» для сталефибробетона на сжатие с применением волокна анкерного профиля

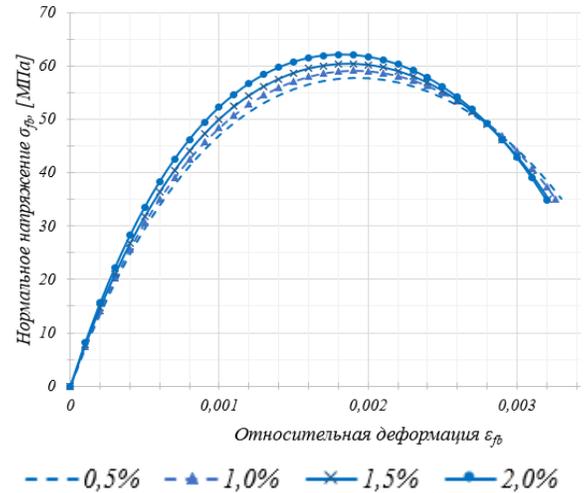


Рисунок 11б – Диаграмма «напряжение-деформация» для сталефибробетона на сжатие с применением волокна волнового профиля

Полученная экспериментальная зависимость между напряжениями и деформациями сталефибробетона при сжатии аппроксимирована полиномиальной функцией четвертой степени, записанной в виде:

$$\sigma_{fb} = \alpha_1 \varepsilon_{fb} + \alpha_2 \varepsilon_{fb}^2 + \alpha_3 \varepsilon_{fb}^3 + \alpha_4 \varepsilon_{fb}^4, \quad (7)$$

где σ_{fb} – нормальные напряжения сжатия; ε_{fb} – продольные деформации; α_1 , α_2 , α_3 , α_4 – постоянные коэффициенты, которые зависят от процентного содержания и типа стального армирующего волокна.

Постоянные коэффициенты α_1 , α_2 , α_3 , α_4 , определяющие вид экспериментальных кривых $\sigma(\varepsilon)$, (рисунок 11) представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Постоянные коэффициенты для функции $\sigma(\varepsilon)$, определяющие вид диаграммы деформирования сталефибробетона в зависимости от типа и количества стального волокна

Тип стального волокна	Постоянные коэффициенты уравнения, $\times 10^6$	Количество стального волокна, μ_f [%]			
		0,5	1,0	1,5	2,0
Фибра проволочная анкерная 0,3/30	α_1	0,0794	0,0855	0,0833	0,0860
	α_2	-37,1	-37,8	-29,1	-29,1
	α_3	9590	7630	2280	1860
	α_4	-1810000	-1400000	-625000	-671000
Фибра проволочная волновая 0,3/22	α_1	0,0742	0,0775	0,0809	0,0862
	α_2	-33,4	-36,1	-38,6	-42,6
	α_3	7030	8110	8840	10000
	α_4	-83100	-1010000	-1130000	-1260000

Значения остаточных деформаций для сталефибробетона, с различным процентом содержания анкерной и волной фибры, представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Остаточные деформации сталефибробетона на сжатие в зависимости от типа и количества стального волокна

Тип стального волокна	Остаточная деформация, $\varepsilon_{plfb} \times 10^3$			
	Количество стального волокна, μ_f [%]			
	0,5	1,0	1,5	2,0
Фибра проволочная анкерная 0,3/30	0,190	0,150	0,143	0,138
Фибра проволочная волновая 0,3/22	0,236	0,193	0,186	0,175

Результаты обработки экспериментальных данных, полученных при испытании образцов-балок с однородным дисперсным армированием, приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Результаты испытаний образцов-балок с однородным дисперсным армированием

Марка образца	Предельный изгибающий момент, M_{ult} , кНм	Наибольшие главные растягивающие напряжения, σ_{ft} , МПа	Предельные деформации сжатия при изгибе, $\varepsilon_{fbc} \times 10^3$	Предельные деформации растяжения при изгибе, $\varepsilon_{ft} \times 10^3$	Максимальный прогиб f , мм
Балка Б1 (0,5%)	2,141	4,597	0,141	0,146	0,1208
Балка Б2 (1%)	2,549	5,292	0,139	0,153	0,1099
Балка Б3 (1,5%)	2,864	5,621	0,138	0,161	0,1089
Балка Б4 (2%)	3,105	6,081	0,136	0,168	0,1051

Результаты обработки экспериментальных данных, полученных при испытании балки, имеющей неоднородное дисперсное армирование по высоте сечения, приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Результаты испытаний образца-балки с неоднородным дисперсным армированием

Марка образца	Предельный изгибающий момент, M_{ult} , кНм	Наибольшие главные растягивающие напряжения, σ_{ft} , МПа	Предельные деформации сжатия при изгибе, $\varepsilon_{fbc} \times 10^3$	Предельные деформации растяжения при изгибе, $\varepsilon_{ft} \times 10^3$	Максимальный прогиб f , мм
НСФБ1	3,047	5,661	0,136	0,164	0,1081

В четвертой главе приведены теоретические положения, послужившие основой для разработки конечного элемента балки неоднородного армирования.

Для построения конечного элемента балки неоднородного армирования была использована теория расчета многослойных балок, приведенная в работе П.М. Варвака, которая была модифицирована автором в соответствии с общими принципами метода конечных элементов.

Условия равновесия части элемента длиной dx и схема смещения слоев балки при изгибе представлены на рисунках 12 и 13, соответственно.

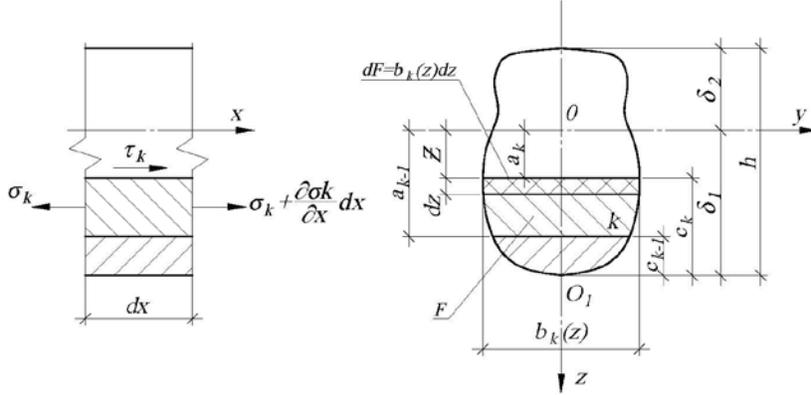


Рисунок 12 – Для получения уравнения равновесия балки

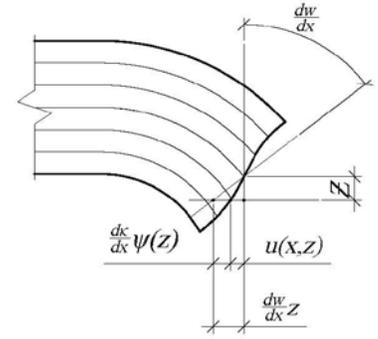


Рисунок 13 – Схема смещения слоев балки при изгибе

Для модели балки, в которой полагается, что поперечные сечения искривляются за счет влияния касательных напряжений, принимается следующая формула:

$$\tau_k = -\frac{d\kappa}{dx} \frac{1}{b_k} \int_{-\delta_2}^z E_k b_k z dz, \quad (7)$$

где $\kappa(x) = \frac{d^2 w}{dx^2}$ – кривизна сдвига; $E_k = E_k(z)$ – модуль упругости в направлении оси x .

Продольные деформации и деформации поперечного сдвига для k -го слоя равны:

$$\varepsilon_k = \frac{\partial u_k}{\partial x} = -\frac{d^2 w}{dx^2} + \frac{d^2 \kappa}{dx^2} \psi_k(z). \quad (8)$$

$$\gamma_k = \frac{\partial u_k}{\partial z} + \frac{\partial w_k}{\partial x} = \frac{\tau_k}{G_k} = \frac{d\kappa}{dx} \frac{d\psi_k(z)}{dz}, \quad (9)$$

$$\frac{\partial u_k}{\partial z} = -\frac{\partial w_k}{\partial x} + \frac{d\kappa}{dx} \frac{d\psi_k(z)}{dz},$$

где $G_k = G_k(z)$ – модуль сдвига; функция $\psi_k(z) = \int_0^z \frac{1}{G_k b_k} \left(\int_{-\delta_1}^z E_k b_k \tilde{z} d\tilde{z} \right) dz$.

Согласно закону Гука, напряжения с учетом выражений (8) и (9) определяются уравнениями:

$$\sigma_k = -E_k \left[\frac{d^2 w}{dx^2} z - \frac{d^2 \kappa}{dx^2} \psi_k(z) \right], \quad (10)$$

$$\tau_k = G_k \frac{d\kappa}{dx} \frac{d\psi_k(z)}{dz}. \quad (11)$$

Выражение для потенциальной энергии деформации балки, показанной на рис. 12, записывается в виде:

$$W = \frac{1}{2} \int_0^l (\sigma_k \varepsilon_k + \tau_k \gamma_k) dF = \frac{1}{2} \int_0^l \left\{ \int_F \sigma_k \left[-\frac{d^2 w}{dx^2} z + \frac{d^2 \kappa}{dx^2} \psi_k(z) \right] dF + \int_F \tau_k \frac{d\kappa}{dx} \frac{d\psi_k(z)}{dz} dF \right\} dx = -\frac{1}{2} \int_0^l \left(M \frac{d^2 w}{dx^2} - \bar{M} \frac{d^2 \kappa}{dx^2} - \bar{Q} \frac{d\kappa}{dx} \right) dx, \quad (12)$$

где l – длина балки; F – площадь поперечного сечения; M – изгибающий момент; Q – поперечная сила; \bar{M} и \bar{Q} – обобщенные изгибающий момент и поперечная сила, возникающие в следствие деформации сдвига поперечных сечений и отвечающие принятым выражениям для деформаций.

Функционал полной потенциальной энергии указанной балки с учетом искривления поперечных сечений за счет действия касательных напряжений принимается в следующем виде:

$$\Pi = W - A = \frac{1}{2} \int_0^l \left(M \kappa - \frac{\bar{M}}{c_1} \kappa + \frac{\bar{Q}}{c_1} \varphi \right) dx - \int_0^l q w dx, \quad (13)$$

где $q = q_z(x)$ – интенсивность распределенной поперечной нагрузки, нормальной к оси x .

В данной главе представлены общие принципы построения конечного элемента балки неоднородного армирования (рисунок 12) и определены коэффициенты матрицы жесткости $[R]$ на основании вариационного принципа Лагранжа:

$$[R] = \begin{bmatrix} [r_1] & [r_2] \\ [r_2] & [r_3] \end{bmatrix}, \quad (14)$$

где подматрицы $[r_1]$ и $[r_3]$ отвечают состоянию изгиба и сдвига, соответственно, а подматрица $[r_2]$ определяет взаимовлияние этих состояний.

$$[r_1] = \begin{bmatrix} \frac{12}{l^3} & \frac{6}{l^2} & -\frac{12}{l^3} & \frac{6}{l^2} \\ \frac{6}{l^2} & \frac{4}{l} & -\frac{6}{l^2} & \frac{2}{l} \\ -\frac{12}{l^3} & -\frac{6}{l^2} & \frac{12}{l^3} & -\frac{6}{l^2} \\ \frac{12}{l^3} & \frac{6}{l^2} & -\frac{12}{l^3} & \frac{6}{l^2} \end{bmatrix} \quad [r_2] = \begin{bmatrix} \frac{12}{l^3} & \frac{6}{l^2} & -\frac{12}{l^3} & \frac{6}{l^2} \\ \frac{6}{l^2} & \frac{4}{l} & -\frac{6}{l^2} & \frac{2}{l} \\ -\frac{12}{l^3} & -\frac{6}{l^2} & \frac{12}{l^3} & -\frac{6}{l^2} \\ \frac{12}{l^3} & \frac{6}{l^2} & -\frac{12}{l^3} & \frac{6}{l^2} \end{bmatrix}$$

$$[r_3] = \begin{bmatrix} \frac{1}{c_1} \left(\frac{12c_2}{l^3} + \frac{6}{5l} \right) & \frac{1}{c_1} \left(\frac{6c_2}{l^2} + \frac{1}{10} \right) & -\frac{1}{c_1} \left(\frac{12c_2}{l^3} + \frac{6}{5l} \right) & \frac{1}{c_1} \left(\frac{6c_2}{l^2} + \frac{1}{10} \right) \\ \frac{1}{c_1} \left(\frac{6c_2}{l^2} + \frac{1}{10} \right) & \frac{1}{c_1} \left(\frac{4c_2}{l} + \frac{2l}{15} \right) & -\frac{1}{c_1} \left(\frac{6c_2}{l^2} + \frac{1}{10} \right) & \frac{1}{c_1} \left(\frac{2c_2}{l} + \frac{l}{30} \right) \\ -\frac{1}{c_1} \left(\frac{12c_2}{l^3} + \frac{6}{5l} \right) & -\frac{1}{c_1} \left(\frac{6c_2}{l^2} + \frac{1}{10} \right) & \frac{1}{c_1} \left(\frac{12c_2}{l^3} + \frac{6}{5l} \right) & -\frac{1}{c_1} \left(\frac{6c_2}{l^2} + \frac{1}{10} \right) \\ \frac{1}{c_1} \left(\frac{6c_2}{l^2} + \frac{1}{10} \right) & \frac{1}{c_1} \left(\frac{2c_2}{l} + \frac{l}{30} \right) & -\frac{1}{c_1} \left(\frac{6c_2}{l^2} + \frac{1}{10} \right) & \frac{1}{c_1} \left(\frac{4c_2}{l} + \frac{2l}{15} \right) \end{bmatrix} \quad (14a)$$

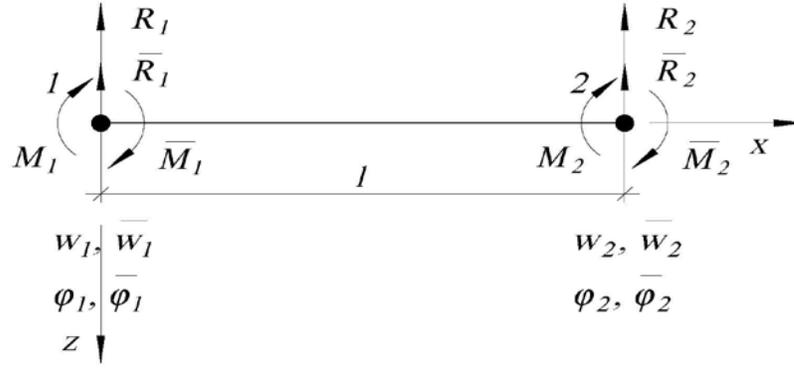


Рисунок 14. Конечный элемент многослойной балки

В каждом i -ом узле КЭ ($i=1, 2$) назначаются по две независимые группы степеней свободы (изгибная и сдвиговая):

$$\{z_{i,l}\} = \begin{Bmatrix} w_i \\ \varphi_i \end{Bmatrix}, \quad \{\bar{z}_i\} = \begin{Bmatrix} \bar{w}_i \\ \bar{\varphi}_i \end{Bmatrix}, \quad (15)$$

где $w(x)$ – перемещение; $\bar{w}(x) = c_1 \kappa(x)$ – обобщенное перемещение, связанное с учетом поперечного сдвига; $\varphi = \frac{dw}{dx}$ – угол поворота сечения; $\bar{\varphi} = \frac{d\bar{w}}{dx}$ – аналог угла поворота сечения, связанный с учетом поперечного сдвига.

Принимаются следующие обозначения:

$$D_{11} = \int_F E_k z^2 dF = \sum_{k=1}^n \int_{a_{k-1}}^{a_k} E_k b_k z^2 dz; \quad D_{12} = -\int_F E_k \psi_k(z) z dF = -\sum_{k=1}^n \int_{a_{k-1}}^{a_k} E_k b_k \psi_k(z) z dz; \quad (16)$$

$$D_{22} = \int_F E_k \psi_k^2(z) dF = \sum_{k=1}^n \int_{a_{k-1}}^{a_k} E_k b_k \psi_k^2(z) dz; \quad c_1 = \frac{D_{12}}{D_{11}}; \quad c_2 = \frac{D_{22}}{D_{12}}.$$

С учетом принятых обозначений:

$$M = D_{11}(\kappa + \bar{\kappa}); \quad \bar{M} = -D_{11}(c_1 \kappa + c_2 \bar{\kappa}); \quad Q = -\frac{D_{11}}{c_1} \bar{\varphi}; \quad \bar{Q} = D_{11} \bar{\varphi}. \quad (17)$$

Система уравнений равновесия МКЭ в матричной форме имеет следующий вид:

$$[R]\{z\} = \{P\} \quad (18)$$

где $\{P\}$ – вектор внешней узловой нагрузки, $\{z\}$ – вектор узловых перемещений.

$$\{z\} = \left\{ w_1 \quad \varphi_1 \quad w_2 \quad \varphi_2 \quad \bar{w}_1 \quad \bar{\varphi}_1 \quad \bar{w}_2 \quad \bar{\varphi}_2 \right\}^T \quad (19)$$

Матрица жесткости конечного элемента вычисляется по формуле:

$$[R] = \int_V [B^T] D [B] dV \quad (20)$$

и имеет размерность 8×8 .

Полный вектор усилий в узлах n -го КЭ:

$$\{S\} = \left\{ Q_1 \quad M_1 \quad Q_2 \quad M_2 \quad \bar{Q}_1 \quad \bar{M}_1 \quad \bar{Q}_2 \quad \bar{M}_2 \right\}^T \quad (21)$$

Геометрическая матрица, связывающая вектор деформаций и вектор узловых перемещений, равна

$$[B] = Z \begin{bmatrix} -\frac{6}{l^2} + \frac{12x}{l^3} & -\frac{4}{l} + \frac{6x}{l^2} & \frac{6}{l^2} - \frac{12x}{l^3} & -\frac{2}{l} + \frac{6x}{l^2} \end{bmatrix}. \quad (22)$$

На основании закона Гука нормальные напряжения в сечении стержня определяются по формуле:

$$\sigma_k = D_k [B_k] \{z_k\} = E_k z_{0k} \begin{bmatrix} -\frac{6}{l^2} + \frac{12x}{l^3} & -\frac{4}{l} + \frac{6x}{l^2} & \frac{6}{l^2} - \frac{12x}{l^3} & -\frac{2}{l} + \frac{6x}{l^2} \end{bmatrix} \times \begin{Bmatrix} w_i \\ \varphi_i \\ w_j \\ \varphi_j \end{Bmatrix}, \quad (24)$$

где z_{0k} – координата от нейтральной оси u до центра тяжести k -го слоя балки.

Выражение для нормальных напряжений, учитывающее деформацию сдвига, имеет вид:

$$\sigma_k = \sigma_{k,l} + \sigma_{k,sh} = E_k \left[\kappa z_{0k} - \frac{\bar{\kappa}}{c_1} \psi_k(z) \right] = E_k \kappa z_{0k} - \frac{E_k \bar{\kappa}}{c_1} \psi_k(z). \quad (25)$$

Нормальные напряжения в k -ом слое неоднородно армированной балки определяются по формулам:

$$\sigma_{k,sh} = -\frac{E_k \bar{\kappa}}{c_1} \psi_k(z) = -\frac{E_k}{c_1} \psi_k [B] \{z_{sh}\}; \quad \sigma_{k,l} = E_k \kappa z_{0k} = -E_k \frac{d^2 w}{dx^2} z_{0k} = -E_k [B_k] \{z_l\}, \quad (26)$$

где $\{z_l\} = \{w_1 \quad \varphi_1 \quad w_2 \quad \varphi_2\}; \{z_{sh}\} = \{\bar{w}_1 \quad \bar{\varphi}_1 \quad \bar{w}_2 \quad \bar{\varphi}_2\}$.

Очевидно, что при $c_1 = c_2 = 0$ конечный элемент вырождается в простой стержневой элемент, полученный на основе гипотезы Бернулли.

Для оценки достоверности результатов с использованием разработанного конечного элемента, интегрированного в вычислительный комплекс ПРИНС, в диссертации выполнено решение ряда тестовых задач.

Первая тестовая задача была поставлена в линейно-упругой постановке, для которой известно точное аналитическое решение. Для расчета была рассмотрена шарнирно опертая трехслойная балка пролетом $12h$, нагруженная сосредоточенной силой в середине пролета равной 75 Н. Материал балки принимался однородным и изотропным ($E = 7 \cdot 10^7$ кН/м²). Высота балки h , ширина балки $1,78h$, высота слоев составляла $h_1 = 0,045 \cdot 10^{-2}$ м; $h_2 = 1,02 \cdot 10^{-2}$ м; $h_3 = 0,045 \cdot 10^{-2}$ м. Аналитическое решение данной задачи для прогиба, получено в работах С.П. Тимошенко и имеет вид:

$$w_{\max} = \frac{Pa^3}{48EI_y} \left(1 + 2,85 \frac{h^2}{a^2} - 0,84 \frac{h^3}{a^3} \right) \quad (27)$$

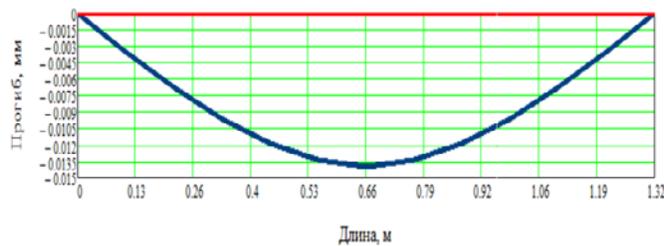
Результаты расчетов приведены в таблице 6. Расхождения в вычислениях составили не более 5,6% в зависимости от соотношения a/h .

Таблица 6. Результаты тестового расчета трехслойной балки

Соотношение a/h	Величина прогиба в середине пролета ($l=a/2$), м		Погрешность Δ , %
	КЭ многослойной балки	По формуле (4.6.1) С.П. Тимошенко	
6	$2,974 \times 10^{-6}$	$3,149 \times 10^{-6}$	5,56
8	$7,002 \times 10^{-6}$	$7,239 \times 10^{-6}$	3,29
10	$1,363 \times 10^{-5}$	$1,393 \times 10^{-5}$	2,15
12	$2,352 \times 10^{-5}$	$2,388 \times 10^{-5}$	1,51
14	$3,731 \times 10^{-5}$	$3,773 \times 10^{-5}$	1,12
16	$5,565 \times 10^{-5}$	$5,614 \times 10^{-5}$	0,87
18	$7,920 \times 10^{-5}$	$7,975 \times 10^{-5}$	0,69
20	$10,861 \times 10^{-5}$	$10,922 \times 10^{-5}$	0,56

В рамках другой тестовой задачи были выполнены расчеты неоднородно армированной многослойной сталефибробетонной балки. Геометрические размеры, количество армирующих слоев и их физико-механические характеристики соответствовали экспериментальной балке, результаты испытания которой приведены в главе 3. Прогобы балки, а также значения нормальных напряжений в середине пролета (рисунок 15, 16), полученные по результатам расчета, сравнивались с экспериментальными данными.

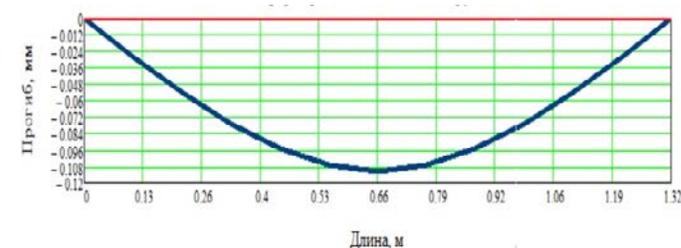
а)



а)



б)



б)

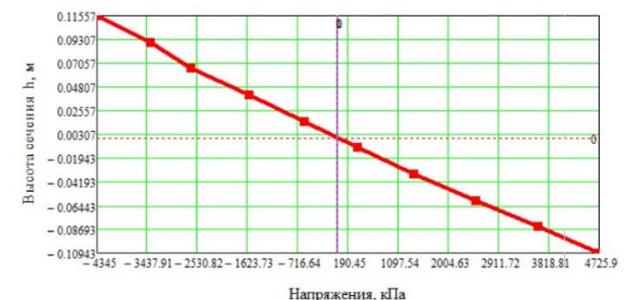
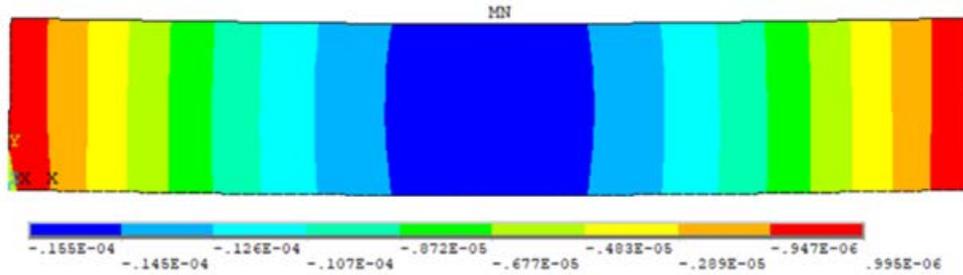


Рисунок 15 – Деформированная схема исследуемой балки: а – прогибы при нагрузке $P=1,2$ кН; б – прогибы при нагрузке $P=9,6$ кН

Рисунок 16 – Эпюры максимальных нормальных напряжений: а – при нагрузке $P=1,2$ кН; б – при нагрузке $P=9,6$ кН

Для верификации результатов расчета, полученных с использованием разработанного конечного элемента, были выполнены нелинейные расчеты исследуемой балки в программном комплексе Ansys Mechanical (рисунок 17, 18). При этом конечно-элементная модель балки состояла из 3920 объемных восьмиузловых элементов и имела 31360 узловых неизвестных. Для моделирования сталефибробетонна использовался объемный восьмиузловой КЭ Сопс65, использующий в своей основе трехосный критерий прочности бетона Виллама и Варнке. Параметры критерия Виллама и Варнке принимались на основании полученных в 3 главе экспериментальных данных. При этом прочность бетона на равномерное двухосное сжатие была принята равной $1,2R_{fb}$

а)



б)

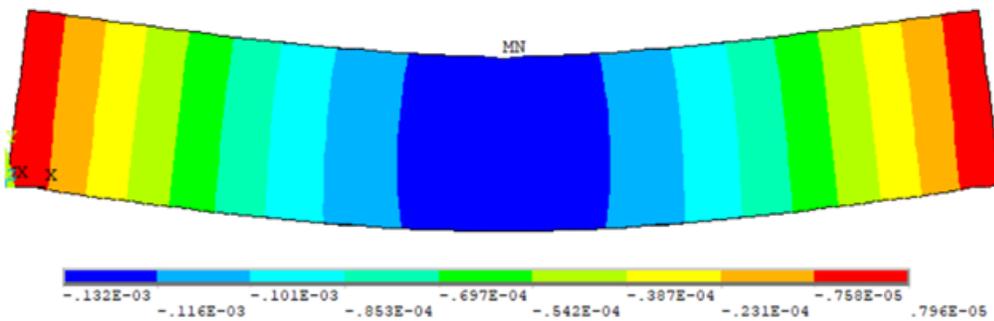
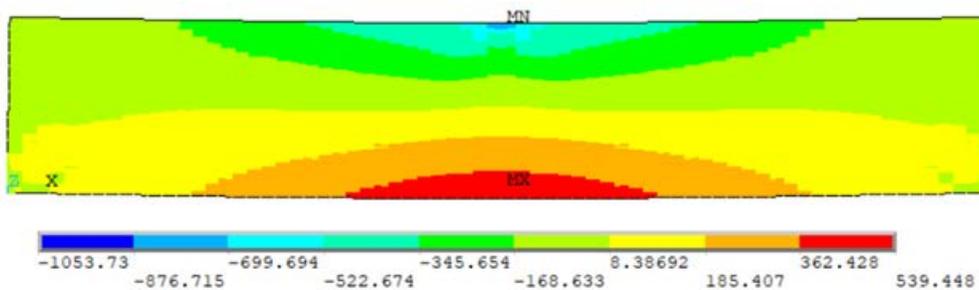


Рисунок 17 – Поля вертикальных перемещений [мм], полученные для нагрузки: а – 1,2 кН; б – 9,6 кН

а)



б)

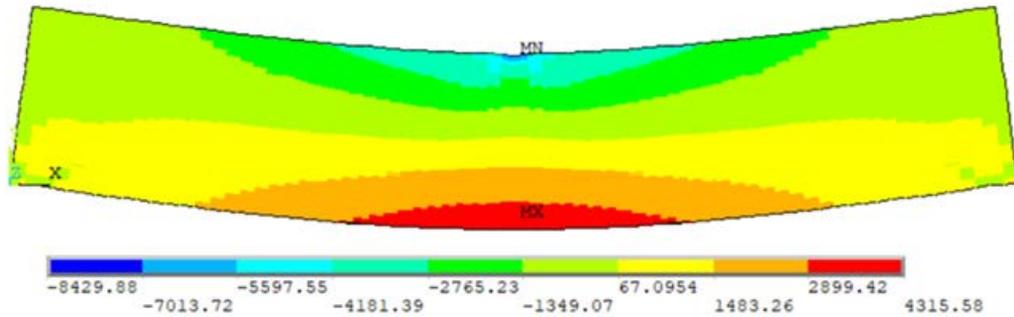


Рисунок 18 – Поля нормальных напряжений [кПа], полученные для нагрузки:
а – 1,2 кН; б – 9,6 кН

Сопоставление экспериментальных данных и результатов расчетов приведено в таблице 7. Отмечено, что расхождение в значениях, полученных по результатам конечно-элементных расчетов и экспериментальных данных, не превышают 6% при нагрузке 1,2 кН и 11% при нагрузке 9,6 кН. Результаты конечно-элементных расчетов расходятся между собой на 11% при величине нагрузки 1,2 кН и 15,1% при значении нагрузки 9,6 кН, близкой к разрушающей.

Таблица 7. Сводные данные результатов расчета балки

	Значение прогиба балки в середине пролета (мм) при нагрузке		Нормальные растягивающие напряжения σ_{fbt} , кПа при нагрузке		Нормальные сжимающие напряжения σ_{fb} , кПа при нагрузке	
	1,2кН	9,6кН	1,2кН	9,6кН	1,2кН	9,6кН
Результаты эксперимента по НСФБ1 (см. 3 главу)	0,0132	0,102	+555,13	+4265,0	-511,84	-3938,4
Результаты расчета по разработанному КЭ балки многослойного армирования	0,0140	0,112	+590,74	+4725,9	-543,13	-4345
Результаты расчета в программе Ansys	0,0155	0,132	+539,49	+4315,6	-522,7	-4036,1
Расхождение, %	$\frac{6,0}{10,7}$	$\frac{9,8}{15,1}$	$\frac{6,4}{9,5}$	$\frac{10,8}{9,5}$	$\frac{5,8}{3,9}$	$\frac{10,3}{7,7}$

* над чертой представлено сравнение экспериментальных данных с результатами, полученными с использованием КЭ балки многослойного армирования; под чертой представлено сравнение результатов, полученных с использованием КЭ балки многослойного армирования с полученными в программе Ansys Mechanical.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате диссертационного исследования получены следующие основные выводы и результаты:

1. Проведенный анализ современного состояния вопроса, касающегося дисперсно-армированных бетонов, позволил установить наиболее перспективные области применения сталефибробетона, влияние дисперсных волокон в составе бетонной матрицы на прочностные и деформационные характеристики строительных конструкций.

2. На основании результатов проведенных экспериментов построены действительные диаграммы деформирования образцов-кубов с различным видом фибрового волокна (фибра проволоочная анкерная и волновая) и процентом армирования (в диапазоне от 0,5 до 2,0%), а также определены их физико-механические характеристики.

3. На основе полученных диаграмм деформирования образцов предложена зависимость между напряжениями и деформациями сталефибробетона в виде полиномиальной функции четвертой степени, коэффициенты которой определяют вид соответствующей кривой функции $\sigma(\varepsilon)$.

4. Проведенные экспериментальные исследования дисперсно-армированного бетона на сжатие с применением стального волокна показали более высокие прочностные и деформационные характеристики по сравнению с обычным тяжелым бетоном того же класса. Кубиковая прочность на осевое сжатие при максимальном проценте армирования увеличилась в среднем на 21%. Предельные деформации сжатия уменьшились в среднем на 23%. Начальный модуль упругости увеличился в среднем до 33%. При этом величины остаточных деформаций уменьшаются с ростом процента содержания стального волокна в составе бетонной матрицы.

5. Установлено, что использование в качестве дисперсного армирования стальных волокон анкерного профиля является более эффективным, чем применение волокон волнового профиля.

6. Экспериментальные исследования работы дисперсно-армированных балок на изгиб с применением стального волокна анкерного профиля показали более высокие прочностные и деформационные характеристики по сравнению с обычным тяжелым бетоном того же класса. Несущая способность образцов-балок на изгиб при максимальном проценте армирования увеличилась до 73%. При этом с ростом процентного содержания армирующих волокон предельные деформации растяжения при изгибе увеличиваются в среднем на 15%.

7. В результате испытаний неоднородно армированной сталефибробетонной балки с применением стального волокна анкерного профиля подтверждено предположение о рациональности увеличения процентного содержания армирующих волокон в наиболее напряженных участках конструкции. Тем самым несущая способность неоднородно армированной балки на изгиб возросла в среднем на 6% по сравнению с однородно армированной балкой с содержанием армирующего волокна в пределах 1,5%.

8. Разработан физически нелинейный конечный элемент балки многослойного армирования, позволяющий учитывать неоднородность армирования элемента. Значения прогибов и нормальных напряжений, соответствующие неоднородно армированной экспериментальной балке, сопоставлялись с результатами расчетов с использованием разработанного конечного элемента и данными, полученными с применением программы Ansys Mechanical. Так, расхождение с экспериментальными данными составило от 6 до 11%, а с результатами расчетов, полученными в программе Ansys Mechanical от 11 до 15%, в зависимости от параметра нагрузки $P/P_{кр}$.

Перспективы дальнейшей разработки темы. Дальнейшее развитие исследуемой в настоящей работе темы может быть направлено на совершенствование методов расчета фибробетонных элементов с различными вариантами формы их поперечного сечения, параметров

и видов дисперсного армирования. Перспективным также видится возможность применения смешанного дисперсного армирования в строительных конструкциях, особенно, базальто-стального, что потребует проведения исследований, направленных на определение и уточнение физико-механических характеристик таких видов фибробетонов.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в журналах, индексируемых ВАК:

1. Маркович А.С., Абу Махади М.И., **Милосердова Д.А.**, Акифьева К.С., Асад М. Проблема численного анализа жесткости изгибаемых железобетонных элементов // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. - 2018. - Т. 14. - №3. - С. 233-241. doi: 10.22363/1815-5235-2018-14-3-233-241

2. Маркович А.С., **Милосердова Д.А.** Свойства дисперсных волокон для эффективного армирования бетонов // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. - 2022. - Т. 18. - №2. - С. 182-192. doi: 10.22363/1815-5235-2022-18-2-182-192

Публикации в журналах, индексируемых в международных реферативных базах Scopus, Web of Science:

1. Markovich A.S., Koroteev D.D., Abu Mahadi M.I., **Miloserdova D.A.** Analysis Of The Theory Of Calculation Of Fiber-Reinforced Concrete With Non-Steel Fibers // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 2019, 675(1), 012013. DOI: 10.1088/1757-899X/675/1/012013

2. M.I. Abu Mahadi, A.S. Markovich, K.S. Akifyeva, **D.A. Miloserdova.** The Problem of Numerical Analysis of Rigidity in Binded Reinforced Concrete Elements // Journal of Mechanics of Continua and Mathematical Sciences, Special Issue-1, March (2019) pp 400-409. <https://doi.org/10.26782/jmcms.2019.03.00039>

3. Alexey S. Markovich, Mohammed I. Abu Mahadi, **Darya A. Miloserdova**, Mohamad S. A. Asad. The stress-strain state of the external wall panel with opening of residential building in case bias. AIP Conf. Proc. 16 August 2022. 2559 (1): 050013. <https://doi.org/10.1063/5.0099222>

4. Alexey S. Markovich, **Darya A. Miloserdova.** Properties of dispersed fibers for efficient concrete reinforcement. AIP Conf. Proc. 10 November 2023. 2936 (1): 040003. <https://doi.org/10.1063/5.0180333>

АННОТАЦИЯ ДИССЕРТАЦИИ

Голишевская Дарья Александровна

«Напряженно-деформированное состояние неоднородно армированных сталефибробетонных элементов и методика их расчета»

Диссертационная работа посвящена исследованию напряженно-деформированного состояния дисперсно-армированного бетона на основе стального волокна и разработке физически нелинейных методов расчета сталефибробетонных элементов с учетом неоднородного армирования по высоте сечения элемента. В рамках диссертационного исследования получены новые данные о напряженно-деформированном состоянии сжатых и изгибаемых элементов с различным процентом содержания фибрового стального волокна в составе бетонной матрицы с учетом нелинейной работы и влияния пластических деформаций. Разработана методика экспериментального определения физико-механических характеристик сталефибробетона, в том числе: модуль упругости, коэффициент поперечных деформаций, значения предельных деформаций при сжатии и растяжении, прочность сталефибробетонных элементов с различным процентом дисперсного армирования. В работе описаны предпосылки для разработки физически нелинейных методов расчета неоднородно армированных сталефибробетонных элементов, на основании которых была разработана методика численного расчета и построен конечный элемент неоднородно армированной балки. Разработанный конечный элемент интегрирован в вычислительный комплекс ПРИНС, и может быть использован для расчета неоднородных дисперсно-армированных элементов специалистами проектных и научных организаций.

ABSTRACT OF THE DISSERTATION

Golishevskaja Darya Aleksandrovna

«Stress-strain state of steel fiber-reinforced concrete elements with non-uniform reinforcing and methods for calculation»

The thesis is devoted to the study of the stress-strain state of dispersed reinforced concrete based on steel fiber and the development of physically nonlinear methods for calculating steel fiber concrete elements taking into account non-uniform reinforcement along the height of the element section. As part of this dissertation research, new data were obtained on the stress-strain state of compressed and bending elements with different percentages of steel fiber content in the concrete matrix, taking into account nonlinear work and the influence of plastic deformations. A method has been developed for experimental determination of the parameters of the stress-strain state of steel fiber reinforced concrete, including: modulus of elasticity, Poisson's ratio, values of limiting strains in compression and tension, strength characteristics of elements with different percentages of dispersed reinforcement. The paper describes the prerequisites for the development of physically nonlinear methods for calculating non-uniformly reinforced steel-fiber concrete elements, on the basis of which a numerical calculation technique was developed and the final element of a beam section non-uniformly reinforced along the height was constructed. The developed finite element of a beam of multilayer reinforcement is integrated into the PRINS computer complex, and can be used to calculate heterogeneous dispersed reinforced elements by specialists from design and scientific organizations.