

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»
Архитектурно-строительный институт

(наименование института полностью)

Центр архитектурных, конструктивных решений и организации строительства

(наименование)

08.04.01 «Строительство»

(код и наименование направления подготовки)

Техническая эксплуатация и реконструкция зданий и сооружений

(направленность (профиль))

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ)

на тему Исследование прочности и деформативности сталефибробетонов,
изготовленных на экспериментальном бетоне

Студент

Ю.В. Астаева

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный

канд.техн.наук, доцент, Д.С. Тошин

руководитель

(ученая степень, звание, И.О. Фамилия)

Тольятти 2021

Оглавление

Введение	3
Глава 1 Общие характеристики сталефибробетона	7
1.1 Бетон и его свойства	7
1.2 Свойства экспериментального бетона	12
1.3 Свойства сталефибробетона	15
1.4 Виды фибры	16
1.5 Стальная анкерная фибра	24
Глава 2 Разработка программы экспериментальных исследований	35
2.1 Изготовление образцов, подготовка оборудования и приборов ..	35
2.2 Проведение испытаний	47
2.3 Обработка результатов	50
Глава 3 Сравнение полученных характеристик образцов	55
3.1 Поведение образцов во время испытаний	55
3.2 Сравнение расчетных значений	58
Заключение	66
Список используемой литературы	68
Приложение А Результаты испытаний образцов	74
Приложение Б Диаграммы напряжений бетона	82

Введение

Актуальность

Современное строительство выставляет все более жесткие требования для строительных материалов. Бетон применяется в самых разных областях строительства, а требования к условиям эксплуатации бетонных конструкций повышаются, что влечет за собой увеличение прочности, повышение сопротивления ударам и иным воздействиям, и множество других характеристик бетона тоже должны качественно улучшаться.

Любой способ, улучшающий качества бетонной смеси, влечет за собой повышение стоимости материала. В целях снижения финансовых затрат, заводом ЖБИ была разработана экспериментальная рецептура бетона.

Сталефибробетон зарекомендовал себя как материал, способный выдерживать большие нагрузки, поэтому его чаще всего используют именно в тех конструкциях, которые требуют обеспечения высокой прочности во время воздействия значительных нагрузок. Например, из сталефибробетона производят железнодорожные шпалы, фундаменты, опоры мостов, дуги тоннелей, промышленные полы и прочие конструкции.

Объект исследования бетонные призмы размерами $150 \times 150 \times 600$ мм, изготовленные из экспериментального бетона классов В15 и В30 с добавлением стальной анкерной фибры расходом от 15 до 75 кг/м^3 .

Предмет исследования прочность и деформативность сталефибробетона, изготовленного на экспериментальном бетоне.

Цель исследования определение показателей прочности и деформативности сталефибробетона, изготовленного на экспериментальном бетоне.

Гипотеза исследования состоит в том, что применение экспериментального бетона в сталефибробетонных конструкциях позволит снизить стоимость материала, если показатели прочности и деформативности экспериментального сталефибробетона окажутся не ниже нормативных.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи:**

- изучение состава экспериментального бетона;
- проведение анализа основных типов фибробетона;
- разработка конструктивного решения образцов из экспериментального сталефибробетона;
- изготовление партии образцов для проведения испытаний;
- проведение экспериментов с образцами для определения их прочности и деформативности;
- расчетное определение призмной прочности и модуля упругости образцов;
- сравнение полученных результатов с нормативными показателями.

Теоретико-методологическую основу исследования составили: работы отечественных и зарубежных ученых, изучающих свойства сталефибробетона, работу фибры в конструкции, свойства бетона-матрицы.

Методы исследования:

- теоретический метод – анализ свойств компонентов сталефибробетона и их совместной работы;
- эмпирический метод – проведение эксперимента, проведение расчетов по экспериментальным показателям, сравнение результатов расчета с нормативными показателями.

Опытно-экспериментальная база изготовления образцов производилось на заводе ЖБИ, исследования проводились в лабораториях Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Тольяттинский государственный университет». При проведении исследования применялись: пресс гидравлический, индикаторы часового типа, линейные средства измерения. В экспериментальной работе участвовали преподаватели и магистранты данной организации.

Научная новизна исследования заключается в изучении свойств экспериментального бетона с добавлением стальной анкерной фибры.

Теоретическая значимость исследования заключается в определении целесообразности применения экспериментального бетона в сталефибробетонных конструкциях для получения экономической выгоды.

Практическая значимость исследования заключается в использовании полученных результатов в производстве сталефибробетонных конструкций для снижения финансовых затрат.

Достоверность и обоснованность результатов исследований обеспечивались:

- проведением исследований по методике, описанной в ГОСТ 24452-80;
- использованием в экспериментах поверенных приборов;
- корреляция данных исследований с аналогичными исследованиями других авторов.

Личное участие автора в организации и проведении исследования состоит в разработке конструктивного решения и изготовлении образцов для испытаний, проведении испытаний опытных образцов, обработке полученных во время испытаний данных.

Апробация результатов работы велась в течение всего периода исследования. Его результаты излагались в научных статьях, а также в докладах на научно-исследовательских семинарах:

- научно-исследовательский семинар, Тольяттинский государственный университет, декабрь 2019 г.;
- научно-исследовательский семинар, Тольяттинский государственный университет, май 2020 г.;
- научно-исследовательский семинар, Тольяттинский государственный университет, декабрь 2020 г.;

– научно-исследовательский семинар, Тольяттинский государственный университет, апрель 2020 г.

На защиту выносятся:

- влияние количества фибры на характер разрушения образцов;
- влияние количества фибры на значения призмочной прочности, модуля упругости и предельных деформаций;
- рекомендации по рациональности применения дисперсного армирования в конструкциях и экспериментального бетона;
- рекомендации по оптимальному расходу стальной анкерной фибры в экспериментальном бетоне.

Структура магистерской диссертации.

Работа состоит из введения, 3 глав, заключения, содержит 33 рисунка, 31 таблицу, список используемой литературы (53 источника из которых 5 на иностранном языке), 2 приложения. Основной текст работы изложен на 73 листах печатного текста.

Глава 1 Общие характеристики сталефибробетона

1.1 Бетон и его свойства

Бетон – широко распространенный и наиболее востребованный материал в современном строительстве, состоящий из цементного камня и заполнителя, и его получают в процессе затвердевания бетонной смеси. Бетон должен соответствовать строительным нормам [18, 19, 23].

Бетонная смесь относится к поликомпонентным смесям, содержащим в своем составе вяжущее, воду, дисперсные наполнители и химические добавки. Рассмотрим подробнее компоненты бетонной смеси.

Цемент

Цемент – самый распространенный вяжущий компонент неорганического происхождения для изготовления бетонной смеси.

Можно выделить следующие свойства цемента:

- тонкость измельчения – свойство, непосредственно влияющее на длительность твердения и прочность бетонной смеси;
- коррозионная стойкость – уровень противостояния воздействию окружающей среды;
- стойкость к низким температурам – способность цемента выдерживать значительные перепады температуры;
- прочность – способность материала затвердевать при затворении водой определяется испытаниями образцов на сжатие;
- водопотребность – количество потребной для нормального затворения воды.

Требования к цементам прописаны в ГОСТ 31108-2016 [21]. Несмотря на то, что от свойств цемента зависит прочность и надежность будущей конструкции, сам по себе цемент не может быть прочным монолитом, так как при твердении он довольно неравномерно стягивается, теряет воду и

растрескивается, что приводит к деформации монолита. Такая конструкция не может обладать требуемой прочностью. Для предотвращения растрескивания цемента применяется песок.

Песок

Песок в бетонной смеси распределяет напряжения в массе клейкого цементного связующего и формирует внутренний каркас монолита. Свойства и происхождение песка влияют на качество бетонной смеси. Наилучшим вариантом считается песок речного происхождения. Его песчинки имеют круглую форму, что позволяет им равномерно распределяться в растворе. Это полезное свойство придает массе однородность и служит основой для равномерного распределения напряжений. Кроме того, округлая форма песчинок способствует правильному твердению монолита. Чаще всего используется песок средней и крупной фракции. Песок для приготовления бетонной смеси должен соответствовать требованиям ГОСТ 8736-2014 [24].

Вода

Вода в бетонной смеси должна соответствовать требованиям ГОСТ 23732-2011 [15]. Это важный компонент для приготовления бетонной смеси и не каждая вода отвечает нормативным требованиям. К примеру, вода с избыточным или, напротив – недостаточным количеством минералов может снизить скорость твердения смеси и препятствовать образованию молекулярных связей в структуре камня. Вода с загрязнениями в виде ила или плесени мешает минеральным компонентам вступать в реакцию и кристаллизоваться, кроме того во влажной среде плесень и прочие загрязнения только развиваются и приводят к разрушению конструкции. Количество воды в бетоне так же играет важную роль и зависит от фракции песка и щебня, марки цемента. Следует соблюдать нормируемое водоцементное соотношение потому что избыток воды замедляет гидратацию цемента, следовательно, бетон не наберет ожидаемую прочность, а недостаток воды не позволит компонентам перемешаться должным образом и значительно уменьшит пластичность.

Щебень

Щебень в бетонной смеси является самым крупным заполнителем и выполняет несколько важных функций:

- является в некоторой степени каркасом для песка и цемента;
- предотвращает образование водяной прослойки вокруг мелких частиц смеси;
- увеличивает гидроизоляционные свойства, в связи с тем, что пропускает воду хуже, чем песок или цемент;
- способствует уменьшению количества трещин, повышается упругость, снижается усадка бетонной смеси.

На характеристики щебня для бетонных смесей установлен ГОСТ 32495-2013 [22]. В целом, щебень можно разделить на три вида фракции: мелкую (5-10 мм), среднюю (20-40 мм), крупную (от 40 мм и выше).

Выбор размера фракции зависит от назначения будущей конструкции. Кроме размера, важным фактором является лещадность – форма зерен щебня, которая влияет на образование пустот в смеси. От лещадности зависит и адгезия – способность сцепляться с цементом, которая повышается при пористой поверхности щебня. Количество щебня в бетоне не должно быть слишком большим – это препятствует сцеплению с цементом, и конструкция становится не способна выдерживать требуемые нагрузки. Малое количество щебня ведет к просадке конструкции и снижению прочности бетона.

Существует связь между классом бетона и маркой применяемого щебня, так как прочность конкретного заполнителя, влияет на прочность полученного бетона. Ведь наполнителем могут быть разные твердые породы, например, гранит, керамзит или даже колотый кирпич, но последний ни в коем случае нельзя использовать в ответственных конструкциях. Ниже представлена таблица 1, в которой приведены соответствия марки щебня, которая обозначает его прочность, классу бетона.

Таблица 1 – Соответствие марок щебня классу бетона

Марка щебня	Класс бетона
M1200	B35-B40
M1000	B25
M800	B15
M600	B7,5

Сведения в таблице 1 являются справочными, так как класс бетона зависит и от других компонентов, но на практике для изготовления бетона класса B20 и ниже чаще всего применяется гравий, а бетон класса B25 и выше содержит более прочный наполнитель в виде гранита.

Химические добавки

Химические добавки в бетонной смеси позволяют улучшить те или иные характеристики бетона. Чаще всего применяются так называемые комплексные добавки, которые позволяют улучшить сразу несколько характеристик бетона [29]. В зависимости от эффектов воздействия добавки разделяются на классы:

- регулирующие свойства бетонных смесей (пластифицирующие, стабилизирующие, увеличивающие воздухо- и газосодержание и другие);
- регулирующие свойства бетонов (замедлители или ускорители твердения, повышающие прочность, морозостойкость и прочие характеристики);
- придающие бетонам специальные свойства (противоморозные, гидрофобизирующие, фотокаталитические);
- минеральные добавки (активные и инертные).

Химические добавки в обязательном порядке должны отвечать требованиям ГОСТ 24211-2008 [16].

Из сказанного выше следует, что количество и качество применяемых при производстве бетонной смеси компонентов влияет на основные физико-механические характеристики бетона, например – прочность, плотность,

деформативность, водонепроницаемость, морозостойкость, огнестойкость и прочие [26]. Остановимся на параметрах, которые планируется исследовать в рамках данной магистерской диссертации.

Прочность – это способность бетона сопротивляться разрушению от действия нагрузок. Для определения прочности бетона применяют методы неразрушающего по ГОСТ 22690-2015 [14] и разрушающего контроля по контрольным образцам по ГОСТ 10180-2012 [11] или по образцам, отобраным из конструкций по ГОСТ 28570-2019 [20, 38].

Прочность бетона зависит от следующих факторов:

- активность цемента;
- характеристики окружающей среды;
- количество цемента и воды в смеси;
- свойства щебня и песка и их количество в смеси;
- качество перемешивания смеси;
- степень уплотнения;
- время, потребное для застывания смеси.

Полный набор прочности бетона происходит через 28 дней после заливки смеси.

Деформативность – это изменение формы и размеров бетона под влиянием различных воздействий.

Различают два вида деформаций:

- объемные – развиваются во всех направлениях под влиянием усадки и воздействия окружающей среды;
- силовые – развиваются от воздействия силовых нагрузок.

Силовые деформации подразделяют на деформации при кратковременных нагрузках, деформации при длительном действии нагрузки и деформации при многократно повторном действии нагрузки. В первом случае испытываемый образец нагружают по этапам и замеряют деформации дважды – в начале и в конце этапа, таким образом определяя зависимость

между напряжением и деформацией. Во втором случае неупругие деформации в бетоне со временем увеличиваются. В третьем случае происходит постепенное накапливание неупругих деформаций [47].

Предельные деформации бетона зависят от прочности бетона, класса бетона, его состава, а также длительности приложения нагрузки. Так как практически все характеристики бетона зависят от свойств компонентов бетонной смеси и их количества, изменение этих параметров может существенно повлиять на физико-механические параметры бетона.

1.2 Свойства экспериментального бетона

Долгое время состав бетона был неизменным и базировался на составляющих, о которых говорилось в предыдущем пункте, исключая химические добавки [8]. Следовательно, свойства бетона складывались из свойств составляющих его материалов. С появлением химических добавок появилась реальная возможность значительно влиять на свойства бетона, улучшая их в зависимости от потребностей [27].

Именно разработка и усовершенствование составов химических добавок позволило варьировать и даже заменять компоненты бетонной смеси, извлекая, помимо прочего, еще и экономическую выгоду путем снижения количества дорогостоящих компонентов и увеличения количества более доступных в экономическом плане.

Доктор технических наук Калашников Владимир Иванович в своих разработках пошёл дальше, предложив новую рецептуру высокопрочного порошково-активированного бетона нового поколения, основанную не только на применении пластификаторов, но и на изменении основных компонентов бетонной смеси – цемента и песка [31]. В своих исследованиях Калашников В.И. отмечает, что механизм действия суперпластификаторов заключается в их воздействии исключительно на дисперсную фазу, то есть на цемент. Причем, чем больше доля цемента в смеси, тем эффективнее работают

суперпластификаторы. Таким образом можно сделать вывод, что применение пластификаторов не будет иметь сколько-нибудь явного эффекта в бетонах с расходом цемента 200-300 кг/м³.

Калашников В.И. в [30] предлагает термин «порошково-активированный бетон» или «бетон нового поколения», суть которого заключается в том, что наилучший эффект от применения суперпластификаторов возможен в случае их взаимодействия с высококонцентрированной водно-дисперсной смесью. Важно соблюсти следующее правило – увеличению дисперсной составляющей должно происходить без увеличения количества цемента, а обеспечиваться через добавление порошкового наполнителя к цементу в определенном количестве. Дисперсный порошок может представлять собой молотый кварцевый песок. Кроме молотого порошка требуется применять еще и тонкозернистый кварцевый песок или молотый плотный известняк, диабаз, гранит, базальт. Таким образом, количество составляющих в рецептуре бетона нового поколения составляет 7-8 компонентов, которые химически взаимодействуя между собой способны значительно повысить физико-механические характеристики бетона при уменьшении количества цемента [36]. Показатель удельного расхода цемента характеризует как экономическую эффективность новой рецептуры, но и прогрессивность технологии, в которой использованы последние научно-технические достижения [32]. Потому что производить порошково-активированный бетон возможно только при переносе приоритетов с изучения и производства малоэффективных в применении к классическому бетону суперпластификаторов на изготовление качественных компонентов и заполнителей.

Бетоны нового поколения благодаря заявленным высоким физико-механическим характеристикам возможно применять не только в разнообразных конструкциях, но и с разными вариантами армирования. В данном случае речь идет не только об усилении арматурными стержнями или арматурной сеткой, но и о дисперсном армировании. В своих исследованиях

[34] Калашников В.И. указывает, что теоретически сцепление фибры с бетоном нового поколения должно быть выше, чем сцепление фибры с классическим бетоном за счет более дисперсной матрицы бетона и более мелкого песка. Это происходит из-за возникновения наибольшего количества контактов на единицу поверхности сцепления. Это законно для фибры любого типа, причем чем тоньше фиброволокно, тем сила сцепления выше [35].

В это же время для стальной анкерной фибры важным фактором является материал, из которого изготовлена фибра, а также, тип анкеровки [28]. Считается, что наибольшей эффективностью обладает фибра с каплевидной формой анкера, а также фибра с загнутыми анкерами [33].

В данную программу экспериментальных исследований включен экспериментальный бетон, разработанный заводом ЖБИ на основе рецептуры, предложенной Калашниковым В.И., измененной в связи с условиями производства компонентов.

Исследуемая бетонная смесь, укрупненно состоит из следующих компонентов:

- цемент,
- крупный песок,
- средний песок,
- мелкий песок,
- щебень фр. 20-40,
- суперпластификаторы,
- вода.

Отличительной особенностью экспериментального состава бетонной смеси является применение поликарбоксилатного суперпластификатора с относительно высоким расходом (до 1,5%) и использование разнофракционного песка, обеспечивающих более компактную компоновку инертных в структуре бетона, уменьшение пористости и пониженный расход цемента при сохранении прочностных свойств [7, 48, 49]. В качестве крупного

заполнителя применяется известняковый щебень марки 600 фракции 5-20 мм, в качестве вяжущего – портландцемент марки 500. Расход воды при подготовке экспериментального состава принимался примерно в 2 раза меньше при сохранении одинаковой подвижности (осадка конуса 16-18 см) [48].

1.3 Свойства сталефибробетона

Фибробетон – это материал, который получается в следствии добавления к бетону дисперсных волокон из различных материалов. Материал фиброволокна и класс бетона могут варьироваться в зависимости от области применения фибробетона [4, 10].

Фибробетон становится все более популярным в современном строительстве благодаря таким качествам, как:

- высокая ударная прочность, которая в пять раз превышает аналогичный показатель обычного бетона;
- высокая прочность на срез и растяжение;
- высокая устойчивость к химическим воздействиям
- трещиностойкость, меньшая подверженность сколам;
- морозостойкость;
- водонепроницаемость;
- жаропрочность и пожаростойкость;
- имеет меньший вес в сравнении с арматурным каркасом, что позволяет сооружать легкие конструкции;
- хорошие показатели адгезии;
- уменьшение толщины конструкции, благодаря содержанию фибры, обеспечивающей достаточную прочность конструкции;
- более длительный срок эксплуатации, который обеспечивает добавление фибры.

Кроме того, в процессе затвердевания фибробетон меньше подвержен усадке, чем материал без дисперсного армирования [5]. Благодаря таким характеристикам, фибробетон широко применяется в гражданском и промышленном строительстве, в частности из фибробетона возводят разнообразные резервуары, фундаменты под ударное и динамическое оборудование, реакторные отделы АЭС, своды тоннелей, промышленные полы, покрытия дорог и мостов, гидротехнические сооружения, также применяют при ведении ремонтных работ и при реконструкции зданий и сооружений, и так далее [6, 41].

В любом строительном процессе важную роль играет экономический фактор и в данном вопросе фибробетон имеет как положительные, так и отрицательные стороны.

Основное преимущество фибробетона заключается в отсутствии необходимости использования арматуры или арматурной сетки, что влечет за собой уменьшение сроков проведения работ, расходов на транспортировку и монтаж, а также на сами дополнительные материалы.

Главным недостатком фибробетона является высокая стоимость самого материала.

1.4 Виды фибры

Фибра – это волокно в виде нитей разной длины и из различного материала, применяемое при дисперсном армировании бетонных конструкций.

Волокна фибры могут быть изготовлены из различных материалов, разного размера, но всегда применение фибры повышает прочность конструкции и увеличивает срок ее службы [1]. Изготовленная фибра должна отвечать требованиям ГОСТ 14613-83 [12]

Рассмотрим разновидности фиброволокна.

Базальтовая фибра

Базальтовая фибра на рисунке 4 производится из горной породы – базальта, путем расплава породы при температуре 1800 °С [44].

Главной отличительной чертой базальтовой фибры является стойкость к агрессивным средам.

К достоинствам этого материала относятся следующие качества:

- конструктивная прочность,
- долгий срок службы,
- высокая термостойкость,
- негорючесть,
- морозостойкость,
- водонепроницаемость,
- устойчивость к агрессивным средам,
- экологичность.

Расход базальтовой фибры на 1 м³ раствора:

- добавление в сухие смеси, в раствор для декоративных изделий, в пенобетон, газобетон – от 0,3 до 0,9 кг;
- устройство автостоянок, дорог, испытывающих небольшие нагрузки, промышленных полов — от 0,9 до 1,8 кг;
- строительство мостов, магистралей, аэродромных полос, конструкций, испытывающих сильные нагрузки, гидротехнических сооружений – от 1,8 до 2,7 кг.

Область применения базальтовой фибры:

- гражданское строительство;
- устройство промышленных полов;
- сооружения с повышенным износом поверхности (водохранилища, морские сооружения, углехранилища и т.д.);
- сооружение мостов, дорог (особенно, когда требуется повышенная стойкость к реагентам);
- строительство тоннелей;
- изготовление тротуарной плитки, декоративных элементов.

Стекловолоконная фибра

Стекловолокно – материал экологически чистый. Он не содержит вредных веществ, не боится коррозии и гниения. Стеклофибра представлена на рисунке 5 – это тончайшие стеклонити длиной до 12 см.

Отличительной чертой стекловолокна по сравнению с другими видами фибры является повышение трещиностойкости, а также уменьшение выделения цементного «молочка», уменьшение величины деформации при усадке.

Стекловолокна, предназначенные для внешнего армирования, подразделяются на три типа: Е-стекловолокно, А-стекловолокно и АR-стекловолокно, имеющее высокую сопротивляемость щелочным воздействиям. Е-стекловолокно содержит большое количество борной кислоты и алюмината и плохо сопротивляется щелочной агрессии. А-стекловолокно является более прочным, но практически не выдерживает щелочных воздействий. В АR-стекловолокне для предотвращения негативных воздействий щелочной агрессии на контакте с усиливаемой железобетонной конструкцией вводится значительное количество циркония. Прочностные и деформационные свойства этого стекловолокна сопоставимы с Е-стекловолокном. Достоинством всех стекловолокон является их небольшая стоимость.

В среднем расход стеклофибры на один кубометр бетона составляет от 0,3 до 1,2 кг.

Стеклофибра нашла применение в производстве ячеистых бетонов, заливных стяжек, штукатурки.

Полипропиленовая фибра

Полипропиленовая фибра показана на рисунке 6, производится методом экструзии и вытяжки из полипропилена через нагревание материала. Специально наносимый верхний слой помогает фибре лучше рассеиваться и повышает сцепление с бетоном.

Полипропиленовая фибра незаменима в микроармировании. Она препятствует появлению микротрещин и переходу их в стадию трещин, что повышает прочность конструкции. А также полипропилен устойчив к воздействию агрессивных сред.

Расход полипропиленового волокна на 1 м³ раствора:

- при высоких нагрузках – от 1,8 до 2,7 кг;
- при средних нагрузках – от 1 кг;
- при слабых нагрузках – 0,6 кг.

Применяется полипропиленовая фибра в строительстве дорог, тоннелей, производстве полов и аэродромных полос, в составе строительных смесей.

Арамидная фибра

Арамидные волокна анизотропны по своей структуре и по сравнению с другими имеют более высокие прочность и модуль упругости в поперечном направлении. Их диаметр составляет приблизительно 12 мкм. Они более пластичны при действии растягивающих нагрузок, но при сжатии остаются упругими вплоть до разрушения. Арамидные волокна обладают хорошими выносливостью и жесткостью.

Углеродная фибра

Углеродные волокна изготавливаются на основе исходных смолы или полиакрилонитрила (PAN). Первый тип волокон изготавливается из очищенных нефти или угля, пропускаемых под большим давлением через очень тонкое сопло и впоследствии отверждаемых термопроцессом. Полиакрилонитриловые волокна изготавливаются из полиакрилонитрила путем его карбонизации под воздействием высокой температуры. Диаметр волокон при этом способе их получения меньше и составляет 5 – 8 мкм. Структура волокон определяется степенью их карбонизации и ориентацией кристаллов. Изображение углеродной фибры показано на рисунке 7.

Расход углеродной фибры составляет 0,6-1,1 кг/м³.

Область применения углеродной фибры:

- ячеистые бетоны,
- инженерные и гидротехнические сооружения,
- тонкостенные элементы и конструкции,
- торкретбетон,
- высокопрочные бетоны,
- наливные полы.

Металлическая фибра

Металлическая фибра может быть вырезанной из стального листа или из проволоки, может быть разной длины, иметь прямую или волнообразную форму. Так же стальную фибру можно покрыть слоем латуни для повышения сцепления с бетоном.

Чаще всего используют стальную анкерную фибру [2], которая отличается многообразием форм и анкеровки.

Стальную анкерную фибру производят из низкоуглеродистой проволоки общего назначения.

Применение такой фибры дает следующие результаты [52]:

- увеличение прочности на сжатие до 25%;
- увеличение прочности на растяжение при изгибе до 250%;
- увеличение прочности при осевом растяжении до 60-80%;
- увеличение сопротивляемости удару до 10-12 раз;
- увеличение модуля упругости до 20%;
- увеличение срока службы конструкций;
- увеличение морозостойкости, водонепроницаемости, стойкости к образованию трещин, перепадам температуры.

Расход стальной фибры на 1 м³ раствора:

- при малых нагрузках – 15-20 кг/м³;
- при средних нагрузках – 30-45 кг/м³;
- при больших нагрузках – 45-75 кг/м³;
- в особых случаях – 75-150 кг/м³.

Стальную фибру применяют для:

- производства железнодорожных шпал, оснований зданий, покрытий мостов, волнорезов;
- транспортных тоннелей и полов, способных выдерживать значительные усилия;
- тротуарного, дорожного покрытия, оснований аэродромов;
- декоративной плитки, бордюров;
- монолитных конструкций, каркасов зданий;
- подземных водоотводящих магистралей, специальных коммуникационных колодцев, гидротехнических сооружений, водоочистных конструкций.

Выбор типа фибры для использования в строительных конструкциях зависит от многих факторов: типа конструкции и условий ее работы; ожидаемой нагрузки, вида и степени воздействия агрессивных внешних факторов и т. д.

Суммируя основные характеристики наиболее используемых видов фибры, можно составить сводную по их характеристикам, приведенную в таблице 2.

Таблица 2 – Сравнительная характеристика различных фибры

Показатель	Базальтовая фибра	Полипропиленовая фибра	Стекловолоконная фибра	Стальная (металлическая) фибра
1	2	3	4	5
Материал	Базальтовое волокно	Полипропилен	Стекловолокно	Проволока из углеродистой стали
Прочность на растяжение, МПа	3500	150-600	1500-500	600-1500
Диаметр волокна	13-17 мкм	10-25 мкм	13-15 мкм	0,5-1,2 мм

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4	5
Длина волокна	3,2-15,7 мм	6-18 мм	4,5-18 мм	30-50 мм
Модуль упругости ГПа	Не менее 75	35	75	190
Коэффициент удлинения, %	3,2	20-150	4,5	3-4
Температура плавления, °С	1450	160	860	1550
Стойкость к щелочам и коррозии	Высокая	Высокая	Только у щелочестойкого волокна	Низкая
Плотность, г/см ³	2,60	0,91	2,60	7,80

Рассмотрим кратко основные свойства фибры, учитываемые при выборе конструкции [3]:

Стойкость к химическим воздействиям: углеродные и арамидные волокна хорошо сопротивляются многим химическим воздействиям – щелочам, кислотам, хлоридам, сульфатам, нитратам и другим. Многие типы стекловолокон подвержены щелочной коррозии, но мало поддаются воздействию солей, а большая концентрация солей может привести к изменению кристаллической решетки у всех типов волокон, а, следовательно, к их разрушению. Арамид по сравнению с другими волокнами обладает большей водопроницаемостью.

Сопротивление ультрафиолетовому излучению: стекло- и углеродные волокна не подвержены воздействию ультрафиолетового излучения, арамидные волокна меняют цвет, и снижается их прочность на растяжение.

Электропроводимость: арамидные и стекловолоконные являются диэлектриками и могут быть использованы для защиты линий электропередач и инженерных коммуникаций, углеродные волокна проводят электрический ток, но и они могут быть использованы в строительных конструкциях, имеющих косвенное отношение к действию электрического тока (например, железнодорожные мосты с электровозным транспортом). Они должны быть

хорошо изолированы от стальной арматуры, являющейся проводником электрического тока.

Прочность на сжатие: углеродные и стекловолокна имеют прочность на сжатие, сопоставимую с прочностью на растяжение, у арамидных волокон прочность на сжатие значительно меньше.

Жесткость: модуль упругости углеродного волокна сопоставим или значительно выше модуля упругости арматурной стали, модуль упругости арамидных волокон меньше, а стекловолокон – значительно меньше чем у стали.

Сопротивление ударным нагрузкам: поведение волокон во время приложения ударной нагрузки определяется полученной ими энергией при упругом деформировании, волокна, сочетающие высокую прочность на растяжение (более 3500 МПа) и значительное относительное удлинение (более 2%), являются благоприятным материалом для восприятия ударной нагрузки. Этим требованиям отвечают многие типы углеродных, арамидных и стекловолокон.

Воздействие огня: стекловолокна сохраняют свою прочность вплоть до точки плавления (более 1000 °С), тогда как углеродные волокна окисляются на воздухе при температуре около 650 °С, арамидные волокна не могут использоваться при температуре свыше 200 °С. Все типы волокон не поддерживают горение. В композитных материалах при пожаре определяющим будет поведение отверждающего полимера, при возгорании которого могут выделяться токсичные вещества.

Безопасность и санитария: все типы волокон не представляют опасности для здоровья в условиях нормальной эксплуатации. Отдельные части фибры могут привести к раздражению кожи, глаз и слизистых оболочек, поэтому при выполнении работ с ними необходимо пользоваться индивидуальными средствами защиты. Арамидные, углеродные и стекловолокна являются инертными материалами, не содержащими токсических веществ. Они не

содержат вредных примесей, способных загрязнять воздух или проникать в почву при их применении для усиления подземных сооружений.

1.5 Стальная анкерная фибра

Стальная анкерная фибра [50], которую было решено применять в качестве дисперсного армирования при исследовании прочности и деформативности экспериментального бетона, отвечает всем вышеперечисленным требованиям, что делает ее незаменимым материалом при армировании конструкций высокой прочности [40]. Особенно часто фибру используют в конструкциях, подверженных ударным нагрузкам или вибрациям. Или в конструкциях, призванных выдерживать большой вес, например, в промышленных полах логистических центров, где учитывается нагрузка от стеллажей с располагающимися на них грузами и нагрузка от колесной техники – погрузчиков, которые сами по себе имеют значительный вес [9].

Фибра, добавленная в бетон, образует в теле бетона трехмерный каркас, придавая конструкции дополнительные характеристики:

- увеличение прочности на растяжение при изгибе в 2 раза;
- увеличение предельной деформации в 20 раз;
- увеличение устойчивости к ударным нагрузкам;
- стальная фибра может работать в комбинированном армировании

вместе со сварной сеткой или арматурными стержнями.

При комбинированном армировании прочность и трещиностойкость увеличиваются – арматура работает на растяжение, а фибра сдерживает возникновение трещин и не дает им раскрыться в случае их возникновения.

Не только материал важен при выборе фибры, но даже ее форма. Этот параметр применим для стальной фибры, которая производится самой разной формы и размера.

Форма фибры зависит от метода изготовления фибры. Это может быть резка из проволоки, фрезерование, рубка из листа или вытягивание, выплавление.

В таблице 3 приведены основные характеристики стальной фибры в зависимости от метода ее производства.

Таблица 3 – Характеристика фибры по разным способам изготовления

Метод производства	Длина фибры, мм	Форма и площадь поперечного сечения, мм ²	Виды анкеров	Поверхность	Временное сопротивление разрыву, Н/мм ²
Резка из проволоки	15-100	Круг, 0,25-1,2	Прямая, изогнутая на концах	Гладкая или рефленая	1000-2000
Фрезерования сляба	15-60	Серповидная, 0,2-1,0	Прямая, изогнутая на концах	Шероховатая	700-1000
Рубка из листа	20-60	Прямоугольник, 0,2-0,8	Прямая, изогнутая на концах	Гладкая или рефленая	400-1000
Вытяжка из расплава	40-60	Сегмент, 0,4-0,8	Прямая	Гладкая	500-1000

В данной программе исследований применяется фибра стальная анкерная типа Hendix 1/50 производства компании ПАО «Северсталь». Это стальная проволочная фибра, имеющая анкера в виде загнутых концов. На рисунке 1 показана форма с обозначением геометрических параметров данной фибры.

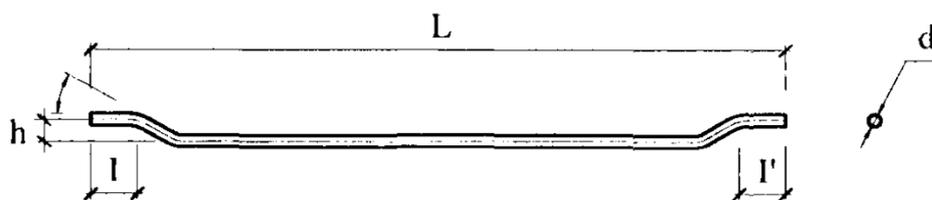


Рисунок 1 – форма и обозначение геометрических параметров фибры Hendix 1/50

Данная фибра имеет следующие характеристики:

- диаметр фибры, $d - 1,0 \text{ мм} \pm 0,04 \text{ мм}$;
- длина фибры, $L - 50,0 \text{ мм} \pm 2,0 \text{ мм}$;
- длина концов, I и $I' - 2,0-1,0/\pm 2,0 \text{ мм}$;
- высота изгиба, $h - 2,1 \pm 0,5/-0,0 \text{ мм}$;
- угол изгиба, $\alpha - 45^\circ$ (не менее 30°);
- прочность при растяжении – $1235,0 \text{ МПа}$;
- модуль упругости – не менее 200000 МПа .

Данная фибра предназначена для применения в виде дисперсного армирования бетона взамен арматурных сеток или арматурных стержней в бетонных конструкциях различного назначения. Возможно также комбинированное армирование – сочетание арматуры и сварной сетки с фиброй. По словам производителя, фибра Hendix 1/50 показывает хорошие армирующие свойства, а также низкую склонность к комкованию. Данная фибра сертифицирована и отвечает всем требованиям нормативно-технической документации.

Следует отметить, что из источников с аналогичными исследованиями [46] становится ясно, что геометрические параметры фибры имеют большое влияние на трещинообразование в конструкции.

Главным минусом стальной фибры является подверженность коррозии, кроме того, в следствии эрозии бетона стальная фибра со временем может выходить наружу [53].

Тем не менее, в некоторых случаях вполне возможно заменить арматуру на фибровое армирование без потери прочности и снижения трещиностойкости конструкции.

Расход фибры Hendix 1/50 определяется расчетом, который часто предоставляется вместе с партией материала, но в характеристиках указывается средний расход данной фибры, который составляет $25-40 \text{ кг/м}^3$. Так же можно произвести расчет требуемого материала, опираясь на нормы

проектирования сталефибробетонных конструкций. Зная средний расход стальной фибры и опираясь на сведения аналогичных исследований, определяем граничные значения расхода – от 15 до 75 кг/м³. Средний расход определяем через среднее арифметическое значение – 45 кг/м³.

Изготовление сталефибробетона

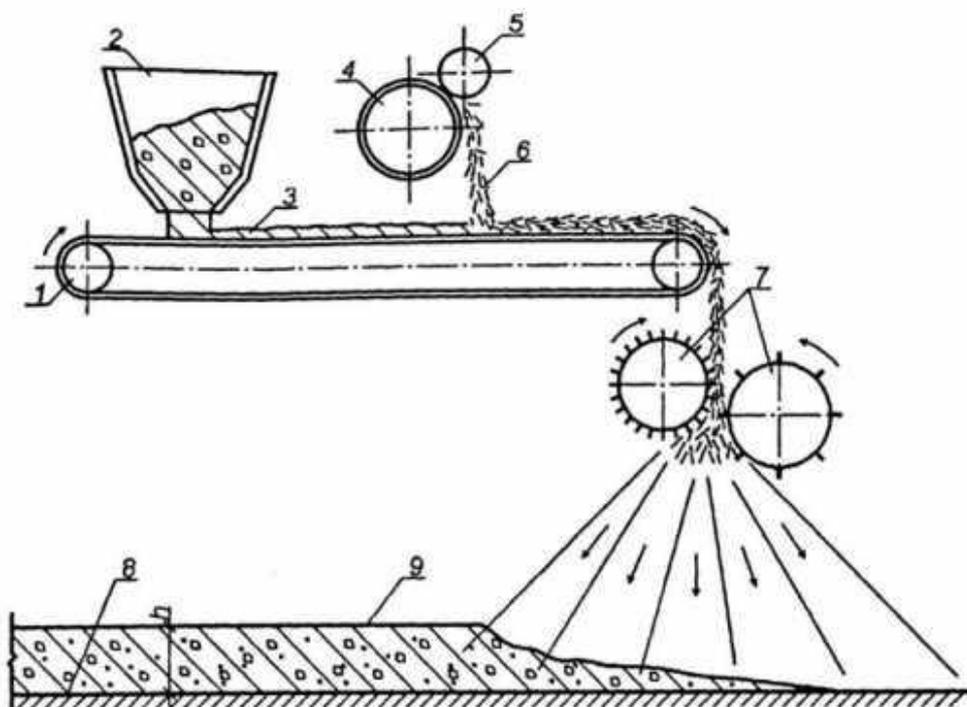
Качество сталефибробетонных конструкций зависит не только от характеристик компонентов, применяемых в бетоне-матрице и свойств металла из которого изготовлена фибра. Большую роль играет технология производства сталефибробетонной смеси. Основные правила – это обеспечение равномерного распределения фибры в бетонной смеси, исключаящее комкование фибры и появление так называемых «ежей», хорошее сцепление волокон с бетоном-матрицей [39].

Технологию производства фибробетона в целом можно разделить за два вида – технология совместного перемешивания компонентов и технология раздельной укладки компонентов.

В первом случае все компоненты перемешиваются вместе одновременно, в это же время происходит затворение компонентов водой. Во втором случае в опалубку бетонирования укладывают фиброкаркас и только после этого вводят бетонную смесь методом литья.

Для введения фибры в бетон-матрицу в разное время было придумано немало изобретений, позволяющих исключить комкование фибры в бетоне. Например, установки с барабанами, похожими по конструкции на «беличье колесо», применяются чаще всего при добавлении стальной фибры в бетон. Кроме того, придуман метод вдувания волокна через вибросита, так же чаще применяющийся для стальной фибры.

Технология производства сталефибробетона отличается в первую очередь тем, что армирование смеси происходит на стадии ее производства – на бетонном заводе фибру добавляют в смесь и перемешивают. На рисунке 2 для примера показана схема формования сталефибробетонных изделий по ротационной технологии.



1 – ленточный конвейер; 2 – расходный бетоносмеситель; 3 – бетонная смесь;
 4 – бухта-лента из тонколистового проката; 5 – станок для нарезки из листа
 фибр; 6 – поток фибр; 7 – большой и малый лопастные роторы; 8 – поддон-
 форма; 9 – формируемое изделие.

Рисунок 2 – Схема формирования сталефибробетонных изделий по ротационной (безвибрационной) технологии

Перемешивание смеси – одна из самых ответственных операций. Существует несколько видов мешалок для перемешивания фибробетонной смеси:

- барабанные,
- с принудительным лопастным перемешиванием,
- гравитационные,
- прутково-шнековые,
- спирально-вихревые.

Кроме того, были изучены различные способы перемешивания, от ручного до применения разнообразных бетоносмесителей, в результате чего

удалось установить наиболее оптимального способа – это использование бетоносмесителя принудительного действия.

Выделим три основных метода производства фибробетонов.

Первый метод – это метод принудительного перемешивания, суть которого состоит в последовательном добавлении компонентов в смесь. В первую очередь смешивают цемент и песок, после чего вводят фиброволокно. Эти три компонента перемешиваются в течении 45 секунд, после чего к ним добавляют щебень, а после – воду. После этого производят еще одно перемешивание. В общей сложности, процесс перемешивания не должен превышать пяти минут. Для уплотнения фибробетона, приготовленного по этому методу возможно применять только площадочные вибраторы, потому что применение глубинного вибратора ведет к появлению цементно-песчаных пробок в теле бетона.

Второй метод – метод виброэкструзии. Такой метод позволяет получать фибробетон с ориентированным расположением волокон фибры, что влияет на физико-механические характеристики бетона. К примеру, у фибробетона, приготовленного по этому методу, показатели прочности при растяжении на 15-20% выше, чем у фибробетона, приготовленного по методу принудительного перемешивания. Самым сложным фактором в изготовлении такого фибробетона является технологическая оснащенность – требуется линейное оборудование с виброэкструзером. Кроме того, у этой технологии есть существенный недостаток – возможность изготовления конструкций исключительно прямолинейных форм.

Третий метод – метод набрызга. Бетонная смесь подается под давлением с одновременным вводом волокон фибры в опалубку под действием воздушного потока. Такой метод используется при изготовлении купольных конструкций, торкретировании подземных туннелей, при создании тонкостенных архитектурных элементов.

Некоторые технологии производства фибробетона нацелены только на приготовление фибробетонной смеси без возникновения комков фибрового

волокна, другие позволяют влиять на ориентацию фибры в бетоне-матрице, что в свою очередь влияет на физико-механические свойства конструкции. Например, фибробетонная конструкция лучше воспринимает растягивающие усилия, если большая часть волокон фибры, содержащаяся в бетоне, расположена по направлению растягивающего напряжения. То есть, фибра расположена перпендикулярно к плоскости возникновения трещин, значит препятствует их возникновению.

Существует такой показатель, как сыпучесть фибры.

Сыпучесть – это способность материала перемещаться в емкостях под действием гравитационных сил.

Критерий сыпучести $K_{сын}$ имеет количественную оценку и характеризуется типоразмером стальной фибры по формуле (1).

$$K_{сын} = \frac{l}{n \cdot d_{экв}}, \quad (1)$$

где l – длина фибры;

$d_{экв}$ – эквивалентный диаметр фибры;

n – характеристика формы поперечного сечения фибры.

Характеристика формы поперечного сечения фибры – величина расчетная и определяется по формуле (2).

$$n = \frac{b}{t}, \quad (2)$$

где l и t – больший и меньший прямоугольного сечения фибры соответственно или, если сечение фибры треугольное – длина его основания и высота.

То есть, если фибра способна свободно высыпаться из бункера без применения дополнительных усилий, значит она обладает свойством

сыпучести. Если при высыпании требуется встряхнуть емкость или создать вибрацию, то есть применить механические приемы воздействия, значит фибра обладает ограниченной сыпучестью. И считается, что фибра не обладает сыпучестью если не высыпается из емкости даже после применения механических воздействий, а не только гравитации.

Фибра разной формы и из разного материала показывает различные показатели сыпучести. Из этого можно сделать вывод, что на качество смеси влияют следующие факторы – оптимальный расход фибрового волокна, сочетание геометрических характеристик компонентов смеси, а также режим перемешивания, который зависит от типа устройства для дозирования фибры и перемешивания фибробетона. Проводились исследования по изучению всех вышеперечисленных факторов, на основе которых были составлены специальные рекомендации по выбору типов смесителей для сталефибробетонов.

Стальная фибра отечественного производства

За рубежом теме фибробетона уделяют гораздо больше внимания, чем в России, поэтому фибра иностранного производства имеет более широкий ассортимент. Варьируется толщина фибры, длина, вид анкеровки. Как уже было сказано ранее, производство фибры – процесс трудоемкий и экономически затратный. Тем не менее, отечественные производители стараются расширять технологию производства фибр для того, чтобы добиться наибольшего эффекта от ее применения.

По результатам исследований стальной фибры разных производителей, можно произвести краткий сравнительный анализ применяемых в России видов фибр.

Стальная фрезерная фибра типа Narex выглядит как пластина серповидного поперечного сечения, имеющая на концах анкеры, длина которых может достигать двух миллиметров. Длина такой фибры – 32 ± 2 мм, ширина $3,0 \pm 1,2$ мм.

Материалом для изготовления данной фибры служат стальные слябы из углеродистой стали обычного качества. Процесс резки происходит под высокой температурой без использования смазывающих веществ путем сухого фрезерования. В итоге чего получается стальное волокно, одна поверхность которого гладкая, а другая шероховатая. Так же поверхность фибры покрыта окисным слоем, что придает ей синеватый оттенок. Такой слой защищает волокно от коррозии.

Проволочная анкерная фибра типа Dramix (Hendix 1/50) производится из нарезанной стальной высокоуглеродистой или низкоуглеродистой проволоки с загнутыми концами. Эта фибра может иметь медное, латунное бронзовое покрытие или не иметь покрытия совсем.

Фибра типа Fibax также проволочная, но не прямая, а гофрированная.

Гофра имеет следующие параметры:

- длина – $8,0 \pm 1,0$ мм;
- высота $2,2 \pm 0,8$ мм.

Длина самой фибры может варьироваться от 40 до 80 мм. Для нее также применяют различные покрытия типа меди, латуни или бронзы.

Проволочная фибра Mixart имеет отличительную от других видов фибры черту – ее анкеры изготовлены в форме шляпки диаметром 1,8 мм. Длина такой фибры составляет 54 ± 4 мм.

Фрезерованная из листа фибра типа Челябинка имеет анкеры в виде крючков и поставляется полосами из склеенной специальным клеем фибры. Этот клей растворяется в бетонной смеси и полоски распадаются на отдельные волокна фибры. Производители Челябинки утверждают, что такой метод способствует равномерному распределению волокон в смеси и снижает риск комкования фибры.

Существует такой параметр фибры, как длина заделки фибры в бетоне, обеспечивающая ее разрыв при выдергивании $l_{f,an}$. Его можно рассчитать по формуле (3)

$$l_{f,an} = \frac{\eta_f d_{f,red} R_{f,ser}}{R_{b,ser}}, \quad (3)$$

где η_f – коэффициент анкеровки фибры;

$d_{f,red}$ – приведенный диаметр фибры, мм;

$R_{f,ser}$ – расчетное сопротивление растяжению материала фибры для предельных состояний второй группы, МПа;

$R_{b,ser}$ – расчетное значение сопротивления бетона-матрицы для предельных состояний второй группы, МПа.

Для наглядности в таблице 4 приведено сравнение видов фибры по геометрическим параметрам и основным характеристикам

Таблица 4 – Сводная таблица основных характеристик фибр

Вид фибры	η_f	$d_{f,red}$	$R_{f,ser}$	$R_{b,ser}$	$l_{f,an}$
Нарех	0,8	0,98	440 условно	22	15,7
Dramix (Hendix 1/50)	0,9	1	440 условно	22	18
Fibax	0,85	0,8	440 условно	22	13,6
Mixarm	0,7	1	440 условно	22	14
Челябинка	0,6	0,65	440	22	7,8

По результатам испытаний на сжатие были определены такие параметры, как призмная прочность, модуль упругости и коэффициент Пуассона. Результаты можно увидеть в таблице 5.

Таблица 5 – Сводная по результатам испытаний

Параметры	Нарех	Dramix (Hendix 1/50)	Fibax	Mixarm	Челябинка
1	2	3	4	5	6
Призмная прочность R_{np} , МПа	50,0	47,2	49,2	48,0	49,4

Продолжение таблицы 5

1	2	3	4	5	6
Модуль упругости E_b , МПа	40500	40500	39500	40300	41700
Коэффициент Пуассона μ	0,22	0,27	0,26	0,26	0,26

Результаты данных и аналогичных им исследований можно использовать как справочный материал при выборе фибры для проведения испытаний.

Выводы по первой главе

Фибробетон – распространенный материал, хорошо зарекомендовавший себя в строительстве, обладающий многими качествами, выгодно отличающими его от железобетона.

Его применение снижает сроки выполнения работ, повышает качество конструкции. За счет уменьшения толщины конструкции происходит уменьшение количества используемого материала, что напрямую влияет на снижение стоимости работ.

Тем не менее, фибробетон остается не дешевым материалом. Это, пожалуй, самый большой его недостаток. Следовательно, при всех неоспоримых преимуществах, важной задачей становится поиск экономически выгодного материала, позволяющего снизить стоимость фибробетона, но при этом без потерь прочностных характеристик фибробетонных конструкций.

Таким материалом может послужить экспериментальный бетон, разработанный с целью уменьшить расход цемента и повысить экономическую выгоду.

Глава 2 Разработка программы экспериментальных исследований

2.1 Изготовление образцов, подготовка оборудования и приборов

В рамках научно-исследовательской работы проводилось сравнение показателей прочности и деформативности образцов из экспериментального сталефибробетона и образцов без дисперсного армирования [25].

Определение показателей прочности и деформативности бетона заключается в определении минимальных усилий, действующих на образцы для испытаний [25], на основе которых можно будет расчетным путем определить следующие значения:

- напряжения, возникающие образце;
- деформации, происходящие от напряжений;
- призмную прочность, для которой требуется установить разрушающую нагрузку;
- модуль упругости, для которого требуется определить нагрузку, составляющую 30% от разрушающей;
- предельные деформации, возникающие в момент разрушения образца.

Изготовление образцов

Для проведения испытаний было изготовлено 16 образцов-призм размерами 150×150×600 мм. Для изготовления образцов применялся экспериментальный бетон классов по прочности на сжатие В15 и В30. Образцы армированы стальной анкерной фиброй Hendix 1/50 расходом 15, 45 и 75 кг/м³.

Для каждого класса бетона изготовлены:

- 2 образца без армирования;
- 2 образца с добавлением стальной анкерной фибры Hendix 1/50 в количестве 0,2 кг (15 кг/м³);

– 2 образца с добавлением стальной анкерной фибры Hendix 1/50 в количестве 0,6 кг (45 кг/м³);

– 2 образца с добавлением стальной анкерной фибры Hendix 1/50 в количестве 1,0 кг (75 кг/м³).

В таблице 6 представлены основные характеристики опытных образцов.

Таблица 6 – Виды образцов

Маркировка образца	Класс бетона	Количество фибры, кг/м ³	Возраст бетона на момент проведения испытаний, суток
П15.0.1	V15	0	161
П15.0.2	V15	0	165
П15.15.1	V15	15	165
П15.15.2	V15	15	161
П15.45.1	V15	45	168
П15.45.2	V15	45	168
П15.75.1	V15	75	168
П15.75.2	V15	75	175
П30.0.1	V30	0	148
П30.0.2	V30	0	152
П30.15.1	V30	15	148
П30.15.2	V30	15	155
П30.45.1	V30	45	155
П30.45.2	V30	45	155
П30.75.1	V30	75	162
П30.75.2	V30	75	162

Опытные образцы были изготовлены на территории завода ЖБИ в два этапа по 8 штук. Первая партия образцов из бетона класса V15 была изготовлена 01.02.2020 г., вторая партия из бетона класса V30 была изготовлена 14.02.2020 г.

Образцы класса V15 после распалубливания были обернуты в пленку для предотвращения преждевременного испарения влаги, в то время как опалубка использовалась для изготовления образцов класса V30.

При изготовлении образцов применялись следующие инструменты, материалы и приспособления:

– экспериментальный бетон классов V15 – 0,108 м³, V30 – 0,108 м³;

- фибра стальная анкерная Hendix 1/50 – 5,44 кг;
- опалубка фанерная на 4 образца – 2 шт;
- пленка полиэтиленовая – 2 м²;
- ручной глубинный вибратор – 1 шт;
- ручной строительный миксер – 1 шт;
- ведро пластиковое 70 л – 1 шт;
- шпатели – 3 шт;
- ветошь.

Перед началом работ были проверены все инструменты и материалы, опалубки обеспылены и обезжирены. Экспериментальный бетон заводского изготовления помещался в ведро. Фибра добавлялась в бетон вручную. В начале укладывалась часть бетона, далее равномерно насыпалась часть фибры, поверх снова укладывался слой бетона и насыпался слой фибры. Далее материал перемешивался ручным миксером на низкой скорости и не дольше 40 секунд для предотвращения комкования фибры.

Полученная смесь вручную выкладывалась в опалубку. Глубинным вибратором смесь уплотнялась до прекращения возникновения пузырьков на поверхности. Разравнивание поверхности не производилось, так как это могло привести к возникновению «заусенцев» из фибры, особенно при высоком ее содержании в бетоне. По окончании работ образцы накрывались пленкой для предотвращения преждевременного испарения влаги.

Образцы набирали прочность в естественных условиях. Распалубливание производилось через 2 недели после заливки бетона.

Транспортировка образцов в лабораторию производилась через месяц после распалубливания первой партии образцов с соблюдением всех мер, предотвращающих образование трещин, сколов и других дефектов.

В лаборатории образцы хранились при комнатной температуре от 148 от 175 суток до начала испытаний.

Испытания проводились в лабораториях Тольяттинского государственного университета по методике, описанной в ГОСТ 24452-80 «Бетоны. Методы определения призмочной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона» [17].

Машины, приборы и средства измерения

Для проведения испытаний использовались машины, приборы и средства измерения, перечень которых приведен в таблице 7.

Таблица 7 – Перечень машин, приборов и средств измерения

Наименование, тип, марка оборудования или средств измерения	Технические характеристики	Примечание
Линейки металлические с ценой деления 1 мм	ГОСТ 427-75	Измерение образцов и определение расположения прижимных приспособлений
Пресс гидравлический МОД П-250	ГОСТ 28840-90	Проведение испытаний на сжатие
Рамки стальные	–	Фиксирование на образцах приборов для измерений
Тензометры	ГОСТ 18957-73	Измерение деформаций
Центрирующее устройство	ГОСТ 10180-2012	Центрирование образцов на плите пресса

Все средства измерения должны быть поверены, о чем должна быть сделана запись в паспорте средства измерения с приложением свидетельства о поверке.

На рисунке 3 показан пресс гидравлический МОД П-250, который применялся при проведении испытаний.



Рисунок 3 – Пресс гидравлический МОД П-250

Данный пресс предназначен для проведения испытаний строительных материалов, в частности бетона, на сжатие. Отображение создаваемой на образец нагрузки выводится на аналоговый циферблат. Нагружающий модуль прессов оснащены двумя вертикальными колоннами, с помощью центрального винта вручную перемещается подвижная траверса.

В таблице 8 приведены основные характеристики испытательного пресса.

Таблица 8 – Технические характеристики пресса испытательного П-250

Характеристика	Значение
1	2
Наибольшая создаваемая нагрузка, кН	2500
Тип привода и силоизмерителя	Электрогидравлический, торсионный
Отображение данных испытания	Аналоговый циферблат
Диапазон измерения основной/дополнительный, кН	250-1250/500-2500

Продолжение таблицы 8

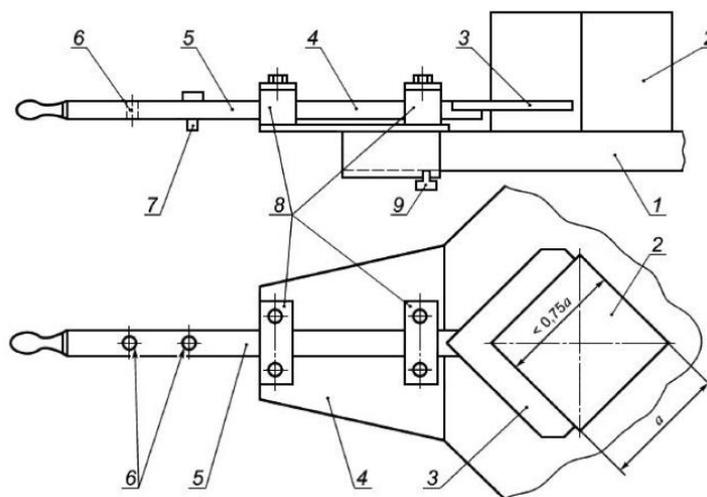
1	2
Погрешность при нагружении, %	±2
Рабочий ход гидравлического поршня, мм	50
Высота рабочего пространства, включая ход гидравлического поршня, мм	1000
Максимальная скорость перемещения гидравлического поршня, мм/мин	20
Расстояние между колоннами, мм	530
Размеры плит сжатия, мм	500×500
Габаритные размеры (Д×Ш×В), мм	2100×900×2715
Масса испытательной машины, кг	3530
Мощность, кВт	3,5
Электропитание	~380V/50Hz (с нулевым проводом)

Производители испытательных машин данного типа отмечают такие особенности, как:

- ручное управление процессом нагружения;
- гидравлическая система создания нагрузки;
- визуализация действительного и максимального значения нагрузки на аналоговом циферблате;
- автоматическое поддержание скорости нагружения;
- тип силоизмерителя – торсионный электрогидравлический однодиапазонный;
- модульная конструкция: силозадающий модуль, электрогидравлический шкаф управления, модуль управления;
- вертикальное двухколонное однозонное исполнение силовой рамы;
- цельнолитая траверса со встроенным силовым гидроцилиндром;
- высокая жесткость силовой рамы.

Все вышеперечисленные особенности помогают провести испытания максимально точно и достоверно.

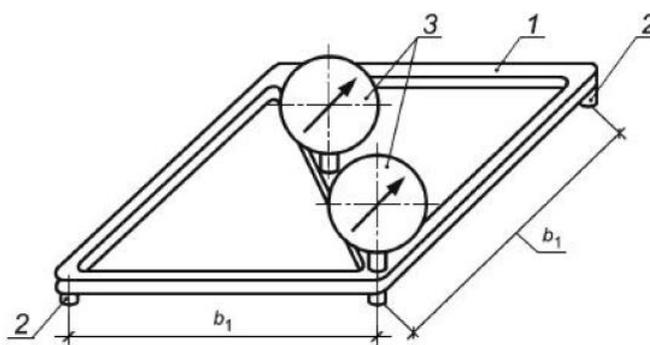
На рисунке 4 показано приспособление для центрирования контрольных образцов на нижней опорной плите пресса.



1 – плита пресса, 2 – образец, 3 – угольник, 4 – основание приспособления, 5 – шток, 6 – гнезда для установки ограничителя, 7 – ограничитель, 8 – направляющие, 9 – крепежные болты.

Рисунок 4 – Приспособление для центрирования контрольных образцов

Для измерения отклонений от плоскости возможно применять специальный прибор, показанный на рисунке 5.



b_1 – база прибора; 1 – корпус (рамка); 2 – опора; 3 – индикатор

Рисунок 5 – Схема прибора для измерения отклонений от плоскости

Значения отклонений A определяются по показаниям индикаторов по формуле (4).

$$A = C_1 \frac{O_1}{2}, \quad (4)$$

где O_1 – показание углового индикатора, мм;

C_1 – постоянная прибора.

Постоянная прибора C_1 так же величина расчетная и определяется по формуле (5).

$$C_1 = \frac{100}{b_1}, \quad (5)$$

где 100 – длина, к которой относится допуск, мм;

b_1 – база прибора, мм.

Кроме того, следует проверить образцы на вогнутость (выпуклость), B . Данный параметр можно рассчитать по формуле (6).

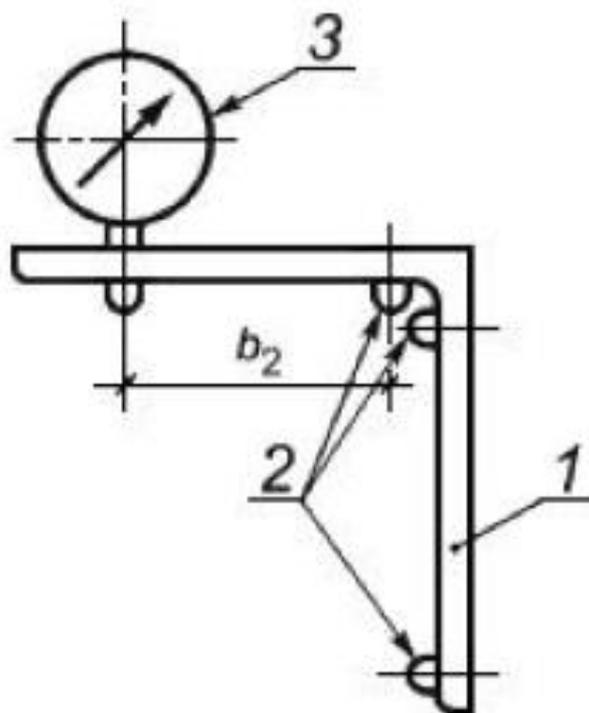
$$B = C_1 \left(O_2 - \frac{O_1}{4} \right), \quad (6)$$

где O_2 – показание индикатора, установленного в середине, мм;

C_1 – постоянная прибора.

Если значение параметра B оказалось отрицательным, значит грань образца вогнутая. В противном случае – выпуклая.

Отклонение от перпендикулярности тоже требует измерения, которое можно произвести прибором, показанным на рисунке 6.



b_2 – база прибора; 1 – корпус (угольник); 2 – опора; 3 – индикатор

Рисунок 6 – Схема прибора для измерения отклонения от перпендикулярности

Данный прибор показывает отклонение через показания индикатора, устанавливая прибор к измеряемой грани образца. Полученные на индикаторе значения для определения отклонения C , обрабатывают по формуле (7).

$$C = C_2 O_3, \quad (7)$$

где O_3 – показание индикатора, мм;

$$C_1 = \frac{100}{b_1} \text{ – постоянная прибора;}$$

100 – длина, к которой относится допуск, мм;

b_2 – база прибора, мм.

Грань, открытую для бетонирования, не принимают во внимание, отклонение определяют по оставшимся граням – опорные относительно смежных.

Перед проведением испытаний были произведены следующие подготовительные мероприятия:

- были подготовлены все приборы и механизмы, проверено наличие поверок приборов, очищены от возможных загрязнений.

- перед проведением испытаний образцы были осмотрены на предмет наличия дефектов и сколов, по необходимости неровности зачищались, все образцы были проверены на соответствие проектным размерам, отклонений обнаружено не было, несмотря на то, что при изготовлении образцов применялись некалиброванные формы.

- каждый образец был размечен под расположение рамок и для центрирования по оси прессы: исходя из размеров образцов (150×150×600 мм) и из требования не превышать 2/3 высоты образца и располагаться на одинаково удаленном расстоянии от граней образца был установлен размер базы – 300 мм.

- на образцы были установлены рамки для крепления индикаторов для измерения деформаций: крепление средств измерения производилось согласно схеме установки приспособлений для крепления индикаторов при измерении продольных и поперечных деформаций образца по гост 24452-80. схема крепления рамок приведена на рисунке 7.

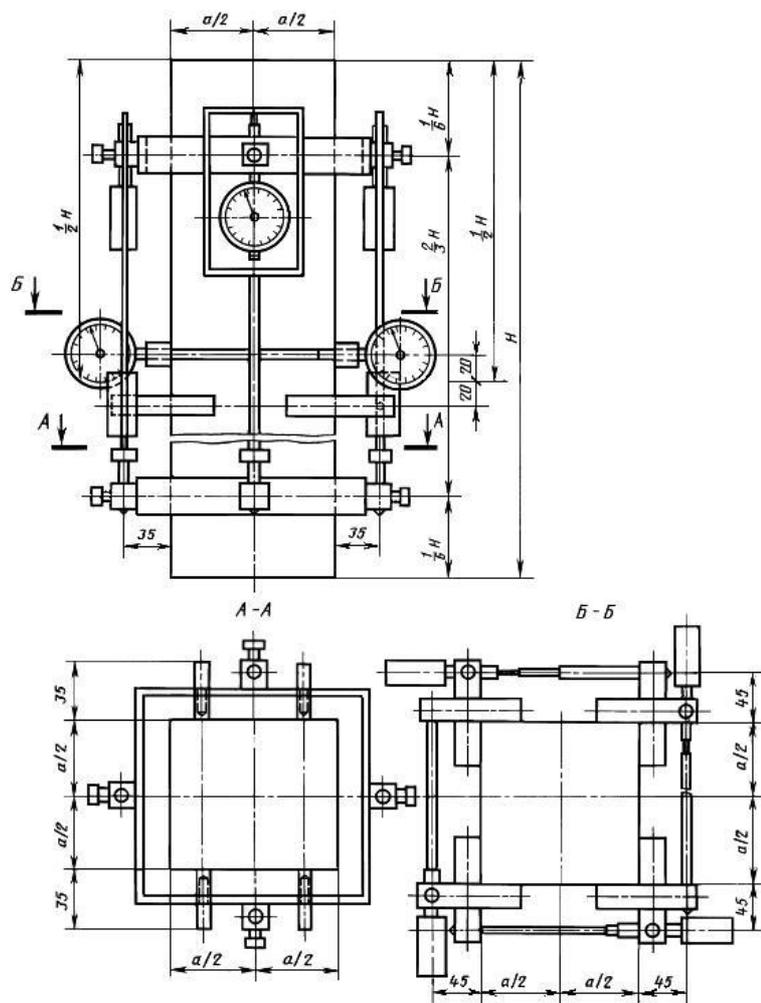


Рисунок 7 – Схема установки приспособлений для крепления индикаторов при измерении продольных и поперечных деформаций образца

Индикатор часового типа применялся для измерения деформаций, возникающих на каждой стороне образца на каждом шаге нагружения. Индикаторы типа, представленного на рисунке 8, применялись при проведении данных исследований и имеют цену деления 0,01 мм.



Рисунок 8 – Индикатор часового типа

В таблице 9 приведены основные технические данные по паспорту индикатора часового типа ИЧ-10.

Таблица 9 – Технические данные индикатора часового типа ИЧ-10

Наименование	Значение
Пределы измерений, мм	0-10
Цена деления, мм	0,01
Класс точности	0 1
Основная погрешность, мкм, в пределах:	
0,1 мм на любом участке шкалы	4 6
1 мм на любом участке шкалы	8 10
Всего предела измерения	15 20
Размах показаний, мкм	3
Наибольшее измерительное усилие, гс	150
Колебание измерительного усилия, гс, при прямом или обратном ходах, не более	60
Присоединительный размер (диаметр гильзы), мм	8С ₂ а

Для индикаторов часового типа существуют правила эксплуатации, которые прописаны в паспорте на измерительный прибор и включают в себя следующие основные положения:

- недопустимо присутствие на поверхности индикатора воды или масла, следует исключить попадание на прибор этих веществ, а в случае попадания, следует протереть прибор мягкой тканью;

- ходы измерительного стержня должны быть плавными, так как удары вредят прибору и могут привести к погрешности результатов измерений, а в случае возникновения неплавного хода стрелки допустимо произвести частичную разборку прибора для промывки механизма авиационным бензином.

2.2 Проведение испытаний

Испытания проводились по ГОСТ 24452-80 [17].

Перед проведением испытаний были определены ожидаемые значения разрушающих нагрузок (P_p) для классов бетона В15 и В30.

Ожидаемые значения разрушающих нагрузок позволили определить значение шкалы силоизмерителя – 250 тс с ценой деления 500 кгс, что соответствует требованиям п. 4.1 ГОСТ 24452-80 – ожидаемое значение разрушающей нагрузки должно быть от 70% до 80% от максимальной, допускаемой выбранной шкалой, а так как ожидаемое значение разрушающей нагрузки для бетона класса В15 таково, что шкалу силоизмерителя можно было принять 125 тс, было решено использовать единую шкалу для испытания всех образцов и ее значение было установлено с ориентированием на наибольшее значение ожидаемой разрушающей нагрузки, кроме того, при выборе шкалы принималось во внимание, что заявленные показатели прочности экспериментального бетона выше, чем у классического, а также учитывалось влияние дисперсного армирования образцов.

Готовый к испытаниям образец установили на нижнюю опорную плиту прессы на слой гипса и центрировали. На рисунке 9 показан образец, подготовленный для проведения испытаний.



Рисунок 9 – Образец, подготовленный для проведения испытаний

Для выравнивания опорных поверхностей образцов использовалась быстротвердеющая смесь – гипс, толщина смеси не должна превышать 5 мм.

Верхнюю грань образца так же покрывали слоем гипса. До момента застывания гипсового слоя, верхнюю плиту прессы вплотную совместили с верхней плоскостью образца так, чтобы плита была параллельна полу.

Нагружение образца производилось ступенями, для чего потребовалось определить величину нагружения, для определения которой был использован расчетный способ, шаг нагружения составил 10 тонн (10% от ожидаемой разрушающе нагрузки).

В нормативной документации [13] указано, что время выдерживания нагрузки должно составлять 4-5 минут, но из-за большого количества образцов решено было сократить время выдерживания нагрузки до 1,5 минут.

За условный ноль принимали начальное усилие обжатия образца, при условии, что оно не превышает 2% от показателя ожидаемой разрушающей нагрузки.

Учитывались также отклонения деформаций по каждой грани – устанавливалось среднее арифметическое значение граней и, если нагрузка, равная $15 \pm 5\%$ от ожидаемой разрушающей нагрузки, превышала 15% этого значения, образец разгружался и сдвигался в сторону значения больших деформаций и далее процесс нагружения повторялся.

Показания приборов снимали на каждом шаге нагружения и заносили в журнал отсчетов по приборам, приведенный в таблице 10.

Таблица 10 – Журнал отсчетов по приборам при определении призмной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона

Номер ступени нагрузки	Время приложения ступени нагрузки, мин	Нагрузка на образец, МПа	Показания приборов при измерениях продольных (поперечных) деформаций $\Delta l \cdot 10^3$ мм ($\varepsilon \cdot 10^5$)								Среднее приращение $\Delta l \cdot 10^3$ мм ($\varepsilon \cdot 10^5$)	
			4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	2	3										
0												
1												
2												
3												
...												

Нагружение производилось до момента разрушения образцов, что позволило определить не только значения призмной прочности и модуля упругости, но и изучить характер разрушения и схемы образования трещин.

Перед установкой каждого следующего образца со всех плит пресса удаляются остатки бетона, гипсовые крошки и прочий мусор.

2.3 Обработка результатов

Обработка результатов представляла собой проведение расчетов призмной прочности R_{np} для каждого образца по формуле (8):

$$R_{np} = \frac{P_p}{F}, \quad (8)$$

где P_p – разрушающая нагрузка, измеренная по шкале силоизмерителя прессы;

F – среднее значение площади поперечного сечения образца, определяемое по его линейным размерам.

Модуль упругости E_σ определяется для каждого образца по формуле (9):

$$E_\sigma = \frac{\sigma_1}{\varepsilon_{1y}}, \quad (9)$$

где σ_1 – приращение напряжения от условного нуля до уровня внешней нагрузки;

ε_{1y} – приращение упругомгновенной относительной продольной деформации образца.

Для подсчета модуля упругости E_σ использовался уровень нагрузки, составляющий 30% от полученной в ходе экспериментов разрушающей нагрузки и определялся отдельно для каждого образца.

Приращение напряжения σ_1 рассчитывается по формуле (10).

$$\sigma_1 = \frac{P_1}{F}, \quad (10)$$

где P_1 – соответствующее приращение внешней нагрузки.

Приращение упругомгновенной относительной продольной деформации образца ϵ_{Iy} должно соответствовать уровню нагрузки $P_I=0,3 P_p$. В пределах ступени нагружения деформации определяют по линейной интерполяции.

Для определения средних значений призмочной прочности и модуля упругости следует исключить результаты испытаний, которые значительно отличаются от средних показателей.

Чтобы отбраковать аномальные результаты, необходимо сравнить полученные значения по отдельным образцам со средними значениями \bar{y} , которые определяются по формуле (11).

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i, \quad (11)$$

где y_i – значение величин по отдельным образцам;

n – число образцов в серии.

При отбраковке результатов, прочность бетона определяется по оставшимся образцам. В случае, если после отбраковки останется только один образец, результаты испытаний не должны учитываться.

При проверке результатов испытаний, не было выявлено ни одного бракованного образца, следовательно, анализ данных производится по всем шестнадцати образцам-призмам.

В таблице 11 приведен пример заполнения журнала отсчетов по приборам на примере образца П15.0.1.

Таблица 11 – Заполнения журнала отсчетов по приборам образца П15.0.1

Номер ступени нагрузки	Нагрузка на образец, тонн	Показания индикаторов			
		1	2	3	4
1	2	3	4	5	6
1	10	0.04	0.04	0.03	0.04
2	20	0.09	0.08	0.07	0.08

Продолжение таблицы 11

1	2	3	4	5	6
3	30	0.13	0.12	0.12	0.13
4	30	0.14	0.12	0.12	0.14
5	40	0.17	0.18	0.13	0.19
6	50	0.22	0.24	0.27	0.25
7	60	0.29	0.33	0.38	0.34
8	70	0.42	0.48	0.54	0.49
9	76	0.45	0.50	0.56	0.54

На основе этих результатов были определены значения напряжений и деформаций на каждой ступени нагружения для каждого образца. Пример расчета для образца П.15.0.1 приведен в таблице 12.

Таблица 12 – Значения напряжения и деформаций для образца П.15.0.1

Номер ступени нагрузки	ϵ , мм	σ , МПа
1	0	0
2	0.000125	44.44
3	0.0002667	88.89
4	0.0004333	133.33
5	0.0005583	177.78
6	0.0008167	222.22
7	0.0011167	266.67
8	0.0016083	311.11
9	0.002175	337.78

В таблицах А.1-А.15 приложения А приведены журналы отсчетов по приборам испытаний остальных образцов-призм. Кроме того, данные таблицы включают в себя рассчитанные значения напряжений и деформаций для каждого образца.

В приложении Б приведены диаграммы деформирования бетонов исследуемых образцов, при определении которых был изучен диаграммный метод деформирования бетона и арматуры [37].

Далее расчетным методом были вычислены значения призмной прочности и модуля упругости.

Для более точной оценки полученных результатов следует установить расчетные значения призмной прочности R_{np} и модуля упругости E_{σ} для каждого образца.

«Нормативные и расчетные значения сопротивления сталефибробетона осевому сжатию (призмная прочность) принимают равными их значениям, установленным в СП 63.13330 для аналогичного класса обычного бетона» [42, 43].

Модуль упругости сталефибробетона E_{fb} – величина расчетная. Определить ее можно по формуле (12):

$$E_{fb} = E_b (1 - \mu_{fv}) + E_f \mu_{fv}, \quad (12)$$

где E_b – модуль упругости бетона-матрицы;

μ_{fv} – коэффициент фибрового армирования;

E_f – модуль упругости фибры.

Коэффициент фибрового армирования μ_{fv} определяется как отношение количества фибры к единице объема бетона [45].

Модуль упругости фибры E_f принимается по данным от производителя фибрового волокна.

Таким образом, имея все нужные данные, можно определить основные параметры сталефибробетонных образцов для дальнейшего сравнения с данными, полученными по результатам испытаний.

Было решено для определения проектного показателя модуля упругости сталефибробетона применять не нормативный показатель бетона-матрицы по классу из СП 63.13330, а полученные по результатам испытаний показатели данного параметра, так как в работе проводится исследование

экспериментального бетона завода ЖБИ, следовательно его показатели и должны приниматься во внимание.

Выводы по второй главе

С соблюдением всех требований по изготовлению, хранению и транспортировке опытных образцов, в заводских условиях были изготовлены образцы-призмы в количестве 16 штук для проведения испытаний из экспериментального бетона без армирования и армированные стальной анкерной фиброй в количестве от 15 до 75 кг/м³. Изучены расчетные и экспериментальные методы определения прочности и деформативности бетонных образцов и подобрана самая оптимальная методика исследования. Расчетным методом определены основные прочностные показатели образцов. С соблюдением всех требований и техники безопасности проведены испытания образцов на сжатие. По результатам испытаний проведены расчеты призмной прочности R_{np} и модуля упругости E_{σ} для каждого образца. Построены графики зависимости деформации от напряжения для каждого образца.

Глава 3 Сравнение полученных характеристик образцов

3.1 Поведение образцов во время испытаний

При изучении аналогичных исследований других авторов [52], было установлено, что разрушение сталефибробетонных образцов зачастую происходит не по классической схеме разрушения бетонных призм. В первую очередь появляются трещины у опорных граней элемента, которые можно увидеть на рисунке 10.



Рисунок 10 – Трещины у опорных граней образца

Появление подобных трещин обуславливается технологическими особенностями изготовления сталефибробетонных образцов – как правило зона в углах и боковых гранях таких призм остается недоармированной.

Далее можно различить характерный треск внутри образца, который обусловлен выдергиванием фибры из тела бетона, а при достижении

разрушающей нагрузки происходит хлопок и образуются широкие, часто ветвящиеся наклонные трещины, проходящие по всей высоте объекта. Пример таких трещин, образовавшихся в образцах бетона при достижении разрушающей нагрузки, показан на рисунке 11.



Рисунок 11 – Разрушенный после испытаний образец

Описанный характер разрушения с образованием магистральных трещин, громким «хлопком» и даже отлетающими кусками бетона был свойственен для образцов обоих классов бетона, но только при содержании фибры 15 кг/м^3 . Образцы с содержанием фибры 45 кг/м^3 при достижении состояния разрушения вели себя аналогичным образом, возможно, чуть более сдержанно. Зато образцы с количеством фибры 75 кг/м^3 показали совершенно иной характер разрушения. Образцы этой группы при достижении разрушающей нагрузки издавали треск, затем покрывались трещинами и от граней отслаивались тонкие пласты бетона, но сами призмы сохраняли форму

и даже на углах, в заведомо недоармированных областях, не наблюдалось скалывания бетона. Пример подобного разрушения образца П30.75.2 показан на рисунке 12.



Рисунок 12 – Разрушение образца П30.75.2

Как показали наблюдения, класс бетона не влиял на характер образования трещин – и при классе В15 и при классе В30 с одинаковым количеством фибры этот показатель оказался идентичным. Таким образом можно сделать вывод, что решающим фактором при образовании трещин, их ширине и направлении является все-таки количество содержащейся в бетоне фибры.

Показатель разрушающей нагрузки в образцах каждого класса бетона повышался с увеличением количества фибры в образцах, а также увеличивалось время проведения испытаний.

По поводу работы самой фибры в образцах можно сказать, что фибра в момент разрушения не рвалась, а именно выдергивалась из тела бетона, что отлично видно на рисунке 13.



Рисунок 13 – Состояние фибры в бетоне после разрушения образца

Следовательно, фибра произведена из достаточно прочного материала, склонного к растягиванию, а не к хрупкому разрыву.

3.2 Сравнение расчетных значений

После обработки полученных в результате испытаний значений, были проведены расчеты призмочной прочности и модуля упругости, сравнив которые можно сделать определенные выводы о физико-механических свойствах образцов.

Таблица 13 представляет собой сводную по расчётам образцов, где указаны значения призмной прочности, модуля упругости и предельных деформаций образцов.

Таблица 13 – Результаты расчетов по данным испытаний

Марка образца	Разрушающая нагрузка P_p , Н	Призмная прочность R_{np} , МПа	Модуль упругости E_b , МПа	Предельные деформации ϵ_{ult}
П15.0.1	760000	33.78	32340	0.0022
П15.0.2	880000	39.11	32897	0.0028
П15.15.1	830000	36.89	28364	0.0028
П15.15.2	770000	34.22	31679	0.0016
П15.45.1	900000	40.00	29328	0.0029
П15.45.2	900000	40.00	31579	0.0029
П15.75.1	900000	40.00	35208	0.0026
П15.75.2	900000	40.00	34368	0.0019
П30.0.1	1340000	59.56	36131	0.0028
П30.0.2	1200000	53.33	35955	0.0023
П30.15.1	1350000	60.00	36090	0.0028
П30.15.2	1290000	57.33	37493	0.0023
П30.45.1	1350000	60.00	36120	0.0026
П30.45.2	1285000	57.11	37022	0.0020
П30.75.1	1400000	62.22	41177	0.0024
П30.75.2	1420000	63.11	35269	0.0031

Для более наглядного сравнения результатов была рассчитана процентная разница данных между значениями бетона-матрицы и дисперно армированного бетона. Сводная приведена в таблице 14.

Таблица 14 – Сравнение результатов расчетов

Марка образца	Разница призмной прочности R_{np} между матрицей и СФБ, %	Разница модуля упругости E_b между матрицей и СФБ, %	Разница предельных деформаций ϵ_{ult} между матрицей и СФБ, %
1	2	3	4
П15.15.1	1.2%	-13.0%	12%
П15.15.2	-6.1%	-2.9%	-37%
П15.45.1	9.8%	-10.1%	18%
П15.45.2	9.8%	-3.2%	17%

Продолжение таблицы 14

1	2	3	4
П15.75.1	9.8%	7.9%	3%
П15.75.2	9.8%	5.4%	-25%
П30.15.1	6.3%	0.1%	10%
П30.15.2	1.6%	4.0%	-11%
П30.45.1	6.3%	0.2%	1%
П30.45.2	1.2%	2.7%	-21%
П30.75.1	10.2%	14.2%	-7%
П30.75.2	11.8%	-2.1%	21%

По результатам расчетов мы видим, что показатели призмной прочности сталефибробетонных образцов для классов В15 и В30 на 6-10% выше данного параметра образцов без дисперсного армирования. А показатели модуля упругости сталефибробетонных образцов для класса бетона В15 в среднем на 6% ниже данного параметра образцов без дисперсного армирования. Показатели модуля упругости сталефибробетонных образцов для класса бетона В30 в среднем на 3% выше данного параметра образцов без дисперсного армирования.

Показатели модуля упругости экспериментального бетона, особенно для класса В30 оказались неоднозначными, поэтому для более детального анализа был определен примерный класс экспериментального бетона через кубиковую прочность.

Известно, что существует прямая связь между призмной и кубиковой прочностью. Кубиковая прочность определялась из призмной прочности по формуле (14).

$$R_{\text{куб}} = \frac{R_{\text{пр}}}{0,8}, \quad (14)$$

где $R_{\text{пр}}$ – призмная прочность;

0,8 – среднее значение коэффициента кубиковой прочности.

Значение коэффициента кубиковой прочности варьируется от 0,7 до 0,83 в зависимости от класса бетона. Так как определение класса бетона подобным методом несет приблизительный характер, было решено применять среднее значение этого коэффициента.

Далее определялся условный класс бетона B с коэффициентом вариации 0,135 по формуле (15).

$$B = R_{\text{куб}} (1 - 1,64 \cdot 0,135), \quad (15)$$

Полученное значение являлось условным классом бетона, по которому можно было определить модуль упругости полившегося условного класса. В таблице 15 объединены расчеты условного класса бетона для всех образцов.

Таблица 15 – Условные классы бетона образцов

Марка образца	R_{np} , МПа	$R_{\text{куб}}$, МПа	Условный класс бетона	Модуль упругости по условному классу E_b , МПа	Соответствующий класс бетона
П15.0.1	33.78	42.22	32.9	32500	B30
П15.0.2	39.11	48.88	38.1	34500	B35
П15.15.1	36.89	46.11	35.9	34500	B35
П15.15.2	34.22	42.78	33.3	32500	B30
П15.45.1	40.00	50.00	38.9	34500	B35
П15.45.2	40.00	50.00	38.9	34500	B35
П15.75.1	40.00	50.00	38.9	34500	B35
П15.75.2	40.00	50.00	38.9	34500	B35
П30.0.1	59.56	74.44	58.0	39000	B55
П30.0.2	53.33	66.67	51.9	38000	B50
П30.15.1	60.00	75.00	58.4	39000	B55
П30.15.2	57.33	71.67	55.8	39000	B55
П30.45.1	60.00	75.00	58.4	39000	B55
П30.45.2	57.11	71.39	55.6	39000	B55
П30.75.1	62.22	77.78	60.6	39500	B60
П30.75.2	63.11	78.89	61.4	3500	B60

Из таблицы 15 видно, что условный класс бетона почти в два раза выше заявленного класса, из чего можно предположить причину, по которой

содержание фибры в бетоне особенно класса В30 не оказало какого-либо влияния на прочностные характеристики образцов. Предположительно, дело в том, что образцы с таким высоким условным классом бетона оказались недоармированы. То есть для корректной работы фибры в подобном бетоне следует рассчитывать ее расход как для класса бетона В60 вместо В30 и В30 как для В15.

Кроме результатов в табличной форме, были построены диаграммы. Зависимости деформации от напряжений оформлены в графическом виде. Для класса бетона В15 на рисунке 14.

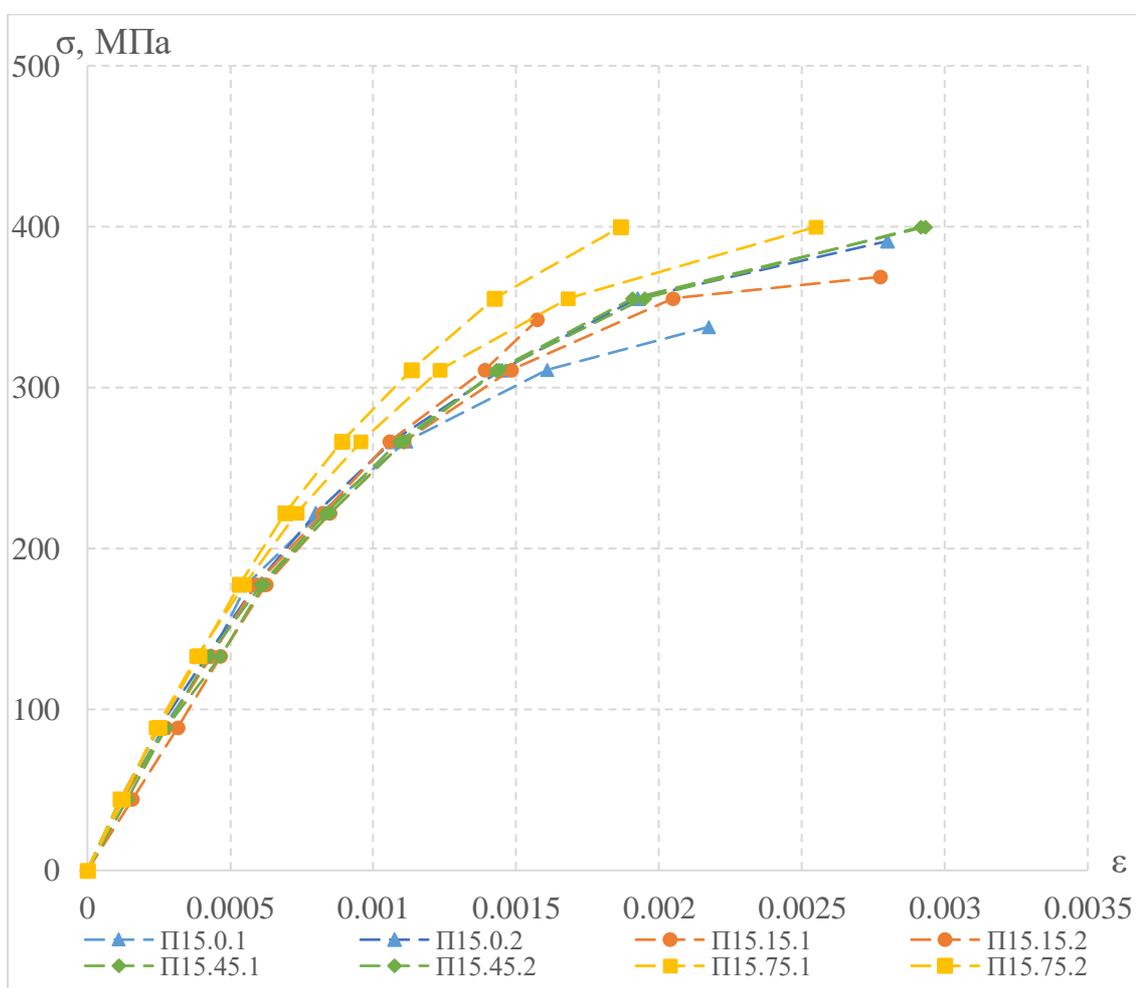


Рисунок 14 – Экспериментальная зависимость «деформации-напряжение» для призм класса В15

На графиках для класса бетона В15 мы видим, что значение напряжений для П15.75 и П15.45 оказалось одинаковым, но при этом деформации в П15.45 выше, чем для П15.75. Показатели образцов П15.15 оказались самыми низкими.

Зависимости деформации от напряжений для класса бетона В30 показаны на рисунке 15.

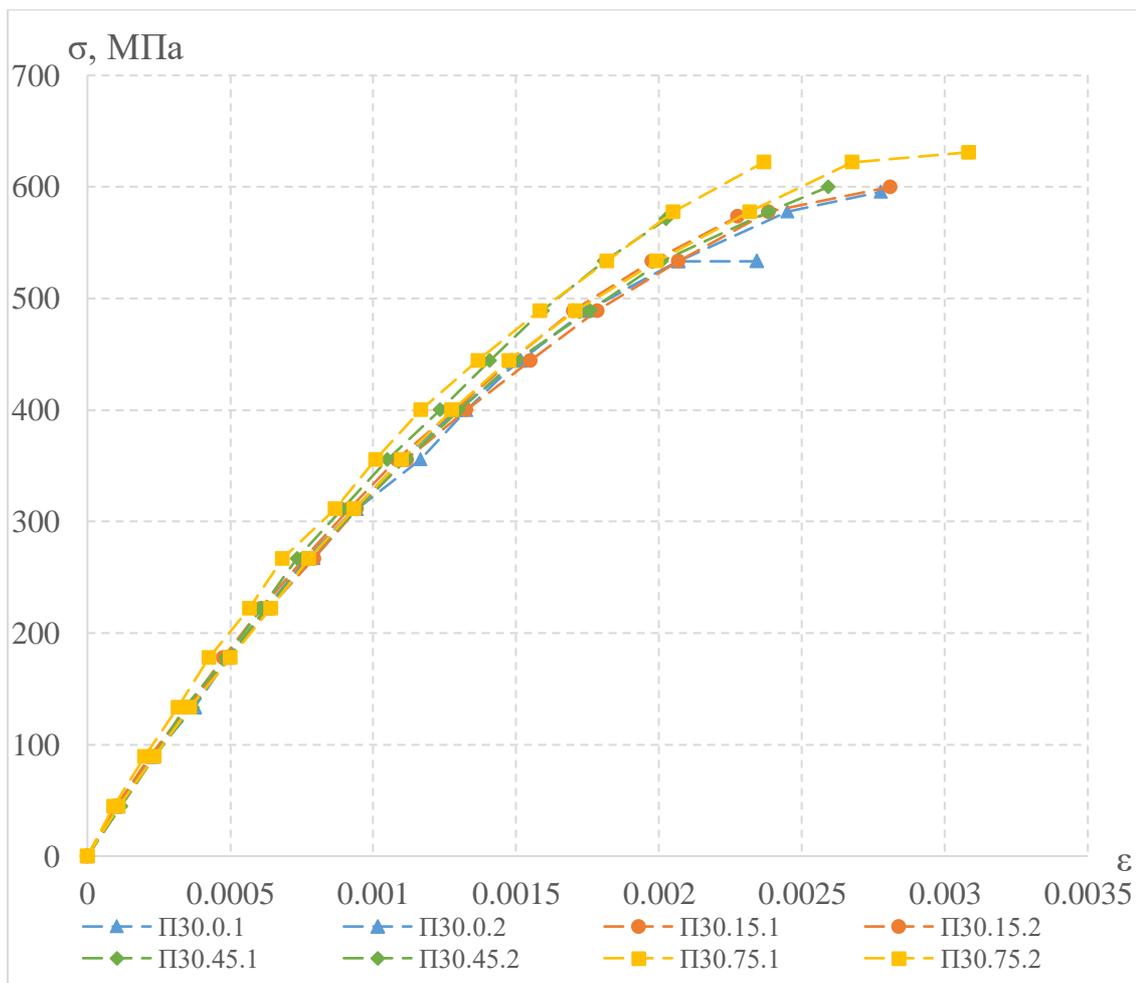


Рисунок 15 – Экспериментальная зависимость «деформации-напряжение» для призм класса В30

Для бетона класса В30 самые высокие значения напряжений показали образцы П30.75, но при этом показатели деформаций оказались приблизительно такими же, как и у остальных образцов.

Из увиденного на графиках можно заключить, что наличие фибры влияет на развитие деформаций, как и на характер разрушения, превращая хрупкое разрушение в пластичное не зависимо от класса бетона.

Кроме того, было проведено сравнение экспериментальных показателей модуля упругости с расчетными из которых видно, что экспериментальный модуль упругости сталефибробетона класса В15 в среднем на 16% выше расчетного. В то же время аналогичные показатели для сталефибробетона класса В30 на 5% выше, расчетных показателей. Полученные значения являются проектными, но фактически показатели прочности больше. Результаты расчетов представлены в таблице 16.

Таблица 16 – Расчетные значения модуля упругости сталефибробетона и бетона без дисперсного армирования

Марка образца	Экспериментальный модуль упругости E_{fb} , МПа	Расчетный модуль упругости E_{fb} , МПа	Разница между расчетом и экспериментом, %
П15.15.1	34500	25100	13
П15.15.2	32500	25100	26
П15.45.1	34500	27300	7
П15.45.2	34500	27300	16
П15.75.1	34500	29500	19
П15.75.2	34500	29500	17
П30.15.1	39000	33547	8
П30.15.2	39000	33547	12
П30.45.1	39000	35641	1
П30.45.2	39000	35641	4
П30.75.1	39500	37734	9
П30.75.2	35000	37734	-7

На рисунке 16 показаны все образцы-призмы после проведения испытаний по порядку маркировки.



Рисунок 16 – Образцы после проведения испытаний

На рисунке 16 также наглядно видно схему образования трещин дисперсно армированных образцов, которая довольно сильно отличается от классической схемы разрушения призм, что по-видимому обусловлено наличием фибры в теле бетона.

Выводы по третьей главе

Анализ результатов проведенных испытаний позволил сделать некоторые выводы по работе стальной анкерной фибры в теле экспериментального бетона. Особенно о влиянии фибры на характер разрушения, а также о параметрах, на которые фибра не оказывает особого влияния. Удалось установить примерные причины таких результатов.

Составленные сравнительные таблицы позволили судить о показателях призмной прочности, модуля упругости и предельных деформациях экспериментального бетона с дисперсным армированием.

Построенные графики зависимостей деформаций от напряжений по классам бетона дали представление о возникающих в подобных бетонах напряжениях и о влиянии присутствующей фибры на образующиеся деформации.

Заключение

По окончании работы над данными исследованиями можно сказать, что все задачи, поставленные для достижения цели исследования выполнены в полном объеме:

- был изучен состав экспериментального бетона;
- проведен анализ основных типов фибробетона;
- разработано конструктивное решение образцов из экспериментального сталефибробетона.
- изготовлена партия образцов для проведения испытаний;
- проведены эксперименты с образцами для определения их прочности и деформативности;
- определены показатели призмочной прочности и модуля упругости образцов расчетным методом;
- проведено сравнение полученных результатов.

Таким образом можно утверждать, что цель исследования достигнута в полной мере – определены показатели прочности и деформативности сталефибробетона, изготовленного на экспериментальном бетоне.

Суммируя полученные по окончании исследования результаты можно сделать следующие выводы.

1. Образование трещин в образцах без армирования происходило по схеме, приближенной к классической схеме разрушения бетонных призм, в то время как в дисперсно армированных образцах появлялись широкие наклонные трещины, проходящие по всей высоте призмы.

2. Параметры разрушения сталефибробетонных образцов из экспериментального бетона соответствуют характерным параметрам разрушения классического сталефибробетона.

3. Полученные показатели призмочной прочности сталефибробетонных образцов для классов В15 и В30 на 6-10% выше данного параметра образцов без дисперсного армирования.

4. Чем больше процентное содержание фибры в образце, тем выше его призмочная прочность.

5. Полученные показатели модуля упругости сталефибробетонных образцов для класса бетона В15 в среднем на 6% ниже данного параметра образцов без дисперсного армирования.

6. Полученные показатели модуля упругости сталефибробетонных образцов для класса бетона В30 в среднем на 3% выше данного параметра образцов без дисперсного армирования.

7. Количество фибры влияет на характер разрушения – образцы с наибольшим содержанием фибры после разрушения сохраняли свою геометрическую форму, в остальных образцах появлялись широкие наклонные трещины, откалывались куски бетона.

Список используемой литературы

1. Abdoullah Namdar, Ideris Bin Zakaria, Azimah Bt Hazeli, Sayed Javid Azimi, Abdul Syukor Bin Abd. Razak Anexperimental study on flexural strength enhancement of concrete by means ofsmall steel fibers // A. Namdar et alii, *Frattura ed Integrità Strutturale*. 2013. №26. С. 22-30.
2. Jose Luis Sánchez Pérez, Maria de las Nieves González Garcia, Maria Isabel Prieto Barrio, Gregorio García López de la Osa. Experimental rheological study of a self-compacting concrete reinforced with steel fibers // *Anales de Edificación*. 2019. №5(2). С. 80-86.
3. Marek Ďubek Affiliation, Peter Makýš Affiliation, Silvia Ďubek Affiliation, Marek Petro. The evaluation of the content of fibers in steel fiber reinforced structures and image analysis // *Journal of Civil Engineering and Management*. 2018 №24 (3). С. 35-38.
4. Mehran Shirani Bid Abadi, Mahmood Akbari. Evaluation of mechanical properties of fiber reinforced recycled concrete: effect of size and amount of recycled aggregate, type and amount of fibers // *Journal of Structural and Construction Engineering*. 2017. №4(1). С. 138-150.
5. T. E. T. Buttignol, J. L. A. O. Sousa, T. N. Bittencourt. Ultra High-Performance Fiber-Reinforced Concrete (UHPFRC): a review of material properties and design procedures // *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*. 2017. №10(4). С.957-971.
6. Астаева Ю. В., Бесшовные полы из сталефибробетона // *Наука и инновации - современные концепции*, Том 1. 2021. С. 84-87.
7. Астаева Ю. В., Хутова Е. Э. Определение призмной прочности и модуля упругости экспериментального бетона завода ЖБИ // *Высшая школа: научные исследования*. Том 1. 2021. С. 99-104.
8. Баженов Ю. М., Чернышов Е. М., Коротких Д. Н. Конструирование структур современных бетонов: определяющие принципы и технологические платформы // *Строительные материалы*. 2014. №3. С. 6-14.

9. Войлоков И. А. Сталефибробетон в слоях износа покрытий промышленных полов // промышленное и гражданское строительство. 2010. №9. С. 58.
10. Войлоков И. А., Лушанкин П. В., Васильев Г. П., Дорофеев К. А. Типоразмер фибры как ключевой фактор повышения характеристик бетонного дисперсно-армированного композита // Вестник гражданских инженеров. 2019. №3(74). С. 99-105.
11. ГОСТ 10180-2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. – Введ. 2013-07-01. – М. : Стандартинформ, 2018. 36 с.
12. ГОСТ 14613-83. Фибра. Технические условия. – Введ. 1985-01-01. – М. : Стандартинформ, 1991. 28 с.
13. ГОСТ 18105-2018. Бетоны. Правила контроля и оценки прочности. – Введ. 2020-01-01. – М. : Стандартинформ, 2019. 20 с.
14. ГОСТ 22690-2015. Бетоны. Определение прочности механическими методами неразрушающего контроля. – Введ. 2016-04-01. – М. : Стандартинформ, 2019. 23 с.
15. ГОСТ 23732-2011. Вода для бетонов и строительных растворов. Технические условия. – Введ. 2012-10-01. – М. : Стандартинформ, 2012. 16 с.
16. ГОСТ 24211-2008. Добавки для бетонов и строительных растворов. Общие технические условия. – Введ. 2011-01-01. – М. : Стандартинформ, 2010. 15 с.
17. ГОСТ 24452-80. Бетоны. Методы определения призмочной прочности, модуля упругости и коэффициента Пуассона. – Введ. 1982-01-01. – М. : Стандартинформ, 2005. 14 с.
18. ГОСТ 25192-2012. Бетоны. Классификация и общие технические требования. – Введ. 2013-07-01. – М. : Стандартинформ, 2019. 10 с.
19. ГОСТ 26633-2015. Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия. – Введ. 2016-09-01. – М. : Стандартинформ, 2019. 15 с.

20. ГОСТ 28570-2019. Бетоны. Методы определения прочности по образцам, отобранным из конструкций. – Введ. 2019-09-01. – М. : Стандартиформ, 2019. 16 с.
21. ГОСТ 31108-2016. Цементы общестроительные. Технические условия. – Введ. 2017-03-01. – М. : Стандартиформ, 2019. 18 с.
22. ГОСТ 32495-2013. Щебень, песок и песчано-щебеночные смеси из дробленого бетона и железобетона. Технические условия. – Введ. 2015-01-01. – М. : Стандартиформ, 2019. 8 с.
23. ГОСТ 7473-2010. Смеси бетонные. Технические условия. – Введ. 2012-01-01. – М. : Стандартиформ, 2018. 19 с.
24. ГОСТ 8736-2014. Песок для строительных работ. Технические условия. – Введ. 2015-04-01. – М. : Стандартиформ, 2019. 11 с.
25. Жаворонков М. И. Определение характеристик разрушения и модуля упругости фибробетона // Вестник волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: строительство и архитектура. 2015. №41(60). С. 34-43.
26. Ивлев М. А., Струговец И. Б., Недосеко И. В. Сравнительная оценка несущей способности, трещиностойкости и деформативности перемычек со стандартным и дисперсным армированием // Известия казанского государственного архитектурно-строительного университета. 2012. №4(22). С. 117-123.
27. Калашников В. И., Хвастунов А. В., Хвастунов В. Л. Физико-механические и гигрометрические свойства порошково-активированных высокопрочных щебеночных бетонов и фибробетонов с низким удельным расходом цемента на единицу прочности // Бетон и железобетон. 2005. С. 161-164.
28. Калашников В. И., Скачков Ю. П., Ананьев С. В., Троянов И. Ю. Геометрические параметры фибры для высокопрочных бетонов // Региональная архитектура и строительство. 2011. №1. С. 27-33

29. Калашников В. И. Как превратить бетоны старого поколения в высокоэффективные бетоны нового поколения // Бетон и железобетон. 2012. №1(6). С. 82-89.
30. Калашников В. И. Терминология науки о бетоне нового поколения // Строительные материалы. 2011. С. 103-106.
31. Калашников В. И. Что такое порошково-активированный бетон нового поколения // Строительные материалы. 2012. С. 70-71.
32. Калашников В. И., Демьянова В. С., Володин В. М., Гусев А. Д. Ресурсосберегающие порошковые фибробетоны с использованием техногенных отходов // Строительные материалы. 2012. №8. С. 52-53.
33. Калашников В. И., Миненко Е. Ю., Грачева Ю. В., Кижватова Т. С. Исследование влияния фибры на прочность бетона для дорожных покрытий // Вестник волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия: строительство и архитектура. 2013. №32(51). С. 55-59.
34. Калашников В. И., Ананьев С. В. Высокопрочные и особовысокопрочные бетоны с дисперсным армированием // Строительные материалы. 2009. №6. С. 59-61.
35. Калашников В. И., Скачков Ю. П., Ананьев С. В., Троянов И. Ю. Геометрические параметры фибры для высокопрочных бетонов // Строительные материалы и изделия. 2011. №1. С. 27-33.
36. Калашников В. И., Тараканов О. В., Кузнецов Ю. С., Володин В. М., Белякова Е. А. Бетоны нового поколения на основе сухих тонкозернисто-порошковых смесей // Magazine of Civil Engineering. 2012. №8. С. 47-99.
37. Карпенко Н. И. К определению деформаций изгибаемых железобетонных элементов с использованием диаграмм деформирования бетона и арматуры // Строительство и реконструкция. 2012. № 2. С. 11-19.
38. Коноплёв С. Н. Организация контроля прочности бетона монолитных конструкций по образцам. Часть 1 // Электрон. журнал Москва: Композит XXI век. 2015. №3-4. С. 36-39. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=23464977> (дата обращения: 13.09.2020)

39. Пухаренко Ю. В. Особенности приготовления фибробетонных смесей // Вестник гражданских инженеров. 2012. №1(30). С. 157-162.
40. Русано В. Е. Определение прочностных и деформативных свойств сталефибробетона для расчета тоннельных обделок // Вестник МГСУ. 2010. №2. С. 189-197.
41. Соловьев В. Г., Бурьянов А. Ф., Елсуфьева М. С. Особенности производства сталефибробетонных изделий и конструкций // Строительные материалы. 2014. №3. С. 18-21.
42. СП 360.1325800.2017. Конструкции сталефибробетонные. Правила проектирования. – Введ. 2018-06-12. – М. : Стандартинформ, 2018. 74 с.
43. СП 63.13330.2018. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения – Введ. 2019-06-20. – М. : Стандартинформ, 2019. 124 с.
44. СТО 23.99.19-005-57231417-2016. Фибра базальтовая. ООО «СМП-Механика». 2016. 5 с.
45. Султанова Ю. Р., Каптюшина А. Г. Определение оптимального состава сталефибробетона // Вестник череповецкого государственного университета. 2012. №4(43). С. 34-37.
46. Талантова К. В., Михеев Н. М. Исследование влияния свойств стальных фибр на эксплуатационные характеристики сталефибробетонных конструкций // Ползуновский вестник. 2011. №1. С. 194-198.
47. Тошин Д. С. Работа бетона при усилении конструкции под нагрузкой // Академический вестник УралНИИпроект РААСН. 2015. № 3. С. 66-68.
48. Тошин Д. С., Хутова Е. Э., Астаева Ю. В. Комплексная оценка экспериментального бетона завода ЖБИ на кубах, призмах и железобетонных балках // Эксперт: теория и практика. 2021. №3(12). С. 36-40.
49. Тошин Д. С., Хутова Е. Э., Астаева Ю. В. прочность и жесткость железобетонных балок, изготовленных на экспериментальном бетоне завода ЖБИ // Градостроительство и архитектура. 2021. № 1. С. 34-38.

50. ТУ 1231-001-70832021-2010. Фибра стальная. ООО «НПК «Волвек Плюс». 2010. 7 с.

51. ТУ 1916-067-38276489-2017. Углеродные однонаправленные ленты для системы внешнего армирования. ООО «НЦК». 2017. 7 с.

52. Хегай А. О., Кирилин Н. М., Хегай Е. О. Экспериментальные исследования прочностных свойств сталефибробетона повышенных классов // Вестник гражданских инженеров. 2019. №1(72). С. 56-60.

53. Черноусов Н. Н., Черноусов Р. Н., Суханов А. В. Исследование анкеровки стальной фибры в цементно-песчаном бетоне // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2014. №2(662). С. 96-103.

Приложение А
Результаты испытаний образцов

Таблица А.1 – Результаты испытаний призмы П15.0.2

Номер ступени нагрузки	Нагрузка на образец, тонн	Показания индикаторов				$\Delta l \cdot 10^3$, мм	ε	σ , МПа
		1	2	3	4			
1	0	0.00	0.00	0.00	0.00		0	0
2	10	0.02	0.04	0.04	0.04	0.04	0.0001167	44.44
3	20	0.05	0.08	0.09	0.08	0.08	0.00025	88.89
4	30	0.11	0.13	0.13	0.13	0.13	0.0004167	133.33
5	40	0.16	0.18	0.18	0.19	0.18	0.0005917	177.78
6	50	0.22	0.24	0.25	0.25	0.24	0.0008	222.22
7	60	0.30	0.31	0.33	0.34	0.32	0.0010667	266.67
8	70	0.41	0.42	0.45	0.46	0.44	0.00145	311.11
9	80	0.55	0.55	0.59	0.62	0.58	0.001925	355.56
10	88	0.78	0.75	0.90	0.93	0.84	0.0028	391.11

Таблица А.2 – Результаты испытаний призмы П15.15.1

Номер ступени нагрузки	Нагрузка на образец, тонн	Показания индикаторов				$\Delta l \cdot 10^3$, мм	ε	σ , МПа
		1	2	3	4			
1	0	0.00	0.00	0.00	0.00		0	0
2	10	0.05	0.05	0.06	0.03	0.05	0.0001583	44.44
3	20	0.09	0.10	0.11	0.08	0.10	0.0003167	88.89
4	30	0.10	0.14	0.20	0.12	0.14	0.0004667	133.33
5	40	0.12	0.19	0.27	0.17	0.19	0.000625	177.78
6	50	0.15	0.25	0.38	0.24	0.26	0.00085	222.22
7	60	0.20	0.33	0.47	0.33	0.33	0.0011083	266.67
8	70	0.26	0.43	0.64	0.45	0.45	0.0014833	311.11
9	80	0.40	0.56	0.86	0.64	0.62	0.00205	355.56
10	83	0.54	0.75	1.06	0.98	0.83	0.002775	368.89

Продолжение Приложения А

Таблица А.3 – Результаты испытаний призмы П15.15.2

Номер ступени нагрузки	Нагрузка на образец, тонн	Показания индикаторов				$\Delta l \cdot 10^3$, мм	ε	σ , МПа
		1	2	3	4			
1	0	0.00	0.00	0.00	0.00		0	0
2	10	0.04	0.03	0.04	0.04	0.04	0.000125	44.44
3	20	0.08	0.08	0.09	0.08	0.04	0.000275	88.89
4	30	0.13	0.12	0.14	0.13	0.09	0.0004333	133.33
5	40	0.18	0.17	0.19	0.17	0.13	0.0005917	177.78
6	50	0.26	0.31	0.25	0.17	0.13	0.000825	222.22
7	60	0.34	0.41	0.31	0.21	0.17	0.0010583	266.67
8	70	0.45	0.48	0.41	0.33	0.29	0.0013917	311.11
9	77	0.52	0.50	0.48	0.39	0.35	0.001575	342.22

Таблица А.4 – Результаты испытаний призмы П15.45.1

Номер ступени нагрузки	Нагрузка на образец, тонн	Показания индикаторов				$\Delta l \cdot 10^3$, мм	ε	σ , МПа
		1	2	3	4			
1	0	0.00	0.00	0.00	0.00		0	0
2	10	0.03	0.05	0.05	0.04	0.04	0.0001417	44.44
3	20	0.05	0.06	0.11	0.11	0.08	0.0002750	88.89
4	30	0.08	0.07	0.20	0.21	0.14	0.0004667	133.33
5	40	0.10	0.09	0.26	0.29	0.19	0.0006167	177.78
6	50	0.15	0.11	0.35	0.41	0.26	0.0008500	222.22
7	60	0.20	0.15	0.45	0.53	0.33	0.0011083	266.67
8	70	0.28	0.20	0.57	0.67	0.43	0.0014333	311.11
9	80	0.40	0.29	0.72	0.88	0.57	0.0019083	355.56
10	90	0.56	0.43	1.10	1.43	0.88	0.0029333	400.00

Таблица А.5 – Результаты испытаний призмы П15.45.2

Номер ступени нагрузки	Нагрузка на образец, тонн	Показания индикаторов				$\Delta l \cdot 10^3$, мм	ε	σ , МПа
		1	2	3	4			
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	0.00	0.00	0.00	0.00		0	0
2	10	0.03	0.04	0.04	0.03	0.04	0.0001167	44.44

Продолжение Приложения А

Продолжение таблицы А.5

1	2	3	4	5	6	7	8	9
3	20	0.07	0.08	0.10	0.08	0.08	0.0002750	88.89
4	30	0.10	0.11	0.15	0.15	0.13	0.0004250	133.33
5	40	0.15	0.15	0.21	0.22	0.18	0.0006083	177.78
6	50	0.20	0.20	0.30	0.30	0.25	0.0008333	222.22
7	60	0.28	0.26	0.37	0.40	0.33	0.0010917	266.67
8	70	0.37	0.33	0.49	0.54	0.43	0.0014417	311.11
9	80	0.50	0.45	0.65	0.74	0.59	0.0019500	355.56
10	90	0.75	0.55	1.05	1.15	0.88	0.0029167	400.00

Таблица А.6 – Результаты испытаний призмы П15.75.1

Номер ступени нагрузки	Нагрузка на образец, тонн	Показания индикаторов				$\Delta l \cdot 10^3$, мм	ε	σ , МПа
		1	2	3	4			
1	0	0.00	0.00	0.00	0.00		0	0
2	10	0.04	0.04	0.04	0.03	0.04	0.0001250	44.44
3	20	0.08	0.06	0.07	0.08	0.07	0.0002417	88.889
4	30	0.11	0.08	0.12	0.15	0.12	0.0003833	133.33
5	40	0.16	0.10	0.17	0.23	0.17	0.0005500	177.78
6	50	0.23	0.13	0.21	0.31	0.22	0.0007333	222.22
7	60	0.31	0.16	0.27	0.41	0.29	0.0009583	266.67
8	70	0.41	0.20	0.33	0.54	0.37	0.0012333	311.11
9	80	0.59	0.25	0.43	0.75	0.51	0.0016833	355.56
10	90	0.76	0.27	0.53	1.50	0.77	0.0025500	400.00

Таблица А.7 – Результаты испытаний призмы П15.75.2

Номер ступени нагрузки	Нагрузка на образец, тонн	Показания индикаторов				$\Delta l \cdot 10^3$, мм	ε	σ , МПа
		1	2	3	4			
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	0.00	0.00	0.00	0.00		0	0
2	10	0.03	0.04	0.03	0.04	0.04	0.0001167	44.44
3	20	0.07	0.08	0.07	0.08	0.08	0.0002500	88.89
4	30	0.11	0.12	0.11	0.13	0.12	0.0003917	133.33
5	40	0.15	0.16	0.14	0.19	0.16	0.0005333	177.78

Продолжение Приложения А

Продолжение таблицы А.7

1	2	3	4	5	6	7	8	9
6	50	0.20	0.20	0.17	0.26	0.21	0.0006917	222.22
7	60	0.27	0.25	0.20	0.35	0.27	0.0008917	266.67
8	70	0.35	0.30	0.26	0.45	0.34	0.0011333	311.11
9	80	0.47	0.37	0.27	0.60	0.43	0.0014250	355.56
10	90	0.60	0.42	0.37	0.85	0.56	0.0018667	400.00

Таблица А.8 – Результаты испытаний призмы ПЗ0.0.1

Номер ступени нагрузки	Нагрузка на образец, тонн	Показания индикаторов				$\Delta l \cdot 10^3$, мм	ε	σ , МПа
		1	2	3	4			
1	3	0.00	0.00	0.00	0.00		0	0
2	0	0.04	0.03	0.02	0.04	0.03	0.0001083	44.44
3	10	0.09	0.06	0.05	0.08	0.07	0.0002333	88.89
4	20	0.12	0.10	0.09	0.13	0.11	0.0003667	133.33
5	30	0.16	0.13	0.13	0.17	0.15	0.0004917	177.78
6	40	0.20	0.17	0.18	0.21	0.19	0.0006333	222.22
7	50	0.26	0.21	0.22	0.26	0.24	0.0007917	266.67
8	60	0.32	0.26	0.25	0.30	0.28	0.0009417	311.11
9	70	0.40	0.32	0.31	0.37	0.35	0.0011667	355.56
10	80	0.44	0.38	0.36	0.41	0.40	0.001325	400.00
11	90	0.48	0.43	0.42	0.48	0.45	0.0015083	444.44
12	100	0.57	0.50	0.48	0.55	0.53	0.00175	488.89
13	110	0.66	0.59	0.58	0.65	0.62	0.0020667	533.33
14	120	0.78	0.70	0.70	0.76	0.74	0.00245	577.78
15	130	0.82	0.84	0.85	0.82	0.83	0.002775	595.56

Таблица А.9 – Результаты испытаний призмы ПЗ0.0.2

Номер ступени нагрузки	Нагрузка на образец, тонн	Показания индикаторов				$\Delta l \cdot 10^3$, мм	ε	σ , МПа
		1	2	3	4			
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	0.00	0.00	0.00	0.00		0	0
2	10	0.02	0.05	0.03	0.02	0.03	0.0001	44.44
3	20	0.04	0.10	0.08	0.05	0.07	0.000225	88.89

Продолжение Приложения А

Продолжение таблицы А.9

1	2	3	4	5	6	7	8	9
4	30	0.10	0.13	0.12	0.10	0.11	0.000375	133.33
5	40	0.12	0.18	0.16	0.13	0.15	0.0004917	177.78
6	50	0.15	0.22	0.21	0.17	0.19	0.000625	222.22
7	60	0.19	0.27	0.25	0.21	0.23	0.0007667	266.67
8	70	0.23	0.32	0.31	0.26	0.28	0.0009333	311.11
9	80	0.27	0.37	0.37	0.31	0.33	0.0011	355.56
10	90	0.32	0.42	0.43	0.38	0.39	0.0012917	400.00
11	100	0.38	0.48	0.51	0.45	0.46	0.0015167	444.44
12	110	0.42	0.54	0.59	0.54	0.52	0.0017417	488.89
13	120	0.47	0.58	0.73	0.70	0.62	0.0020667	533.33
14	120	0.63	0.67	0.78	0.73	0.70	0.0023417	533.33

Таблица А.10 – Результаты испытаний призмы ПЗ0.15.1

Номер ступени нагрузки	Нагрузка на образец, тонн	Показания индикаторов				$\Delta l \cdot 10^3$, мм	ε	σ , МПа
		1	2	3	4			
1	0	0.00	0.00	0.00	0.00		0	0
2	10	0.02	0.02	0.04	0.04	0.03	0.0001	44.44
3	20	0.06	0.06	0.07	0.07	0.07	0.0002167	88.89
4	30	0.11	0.13	0.09	0.09	0.11	0.00035	133.33
5	40	0.16	0.20	0.13	0.10	0.15	0.0004917	177.78
6	50	0.21	0.27	0.16	0.12	0.19	0.0006333	222.22
7	60	0.26	0.33	0.20	0.16	0.24	0.0007917	266.67
8	70	0.32	0.40	0.24	0.17	0.28	0.0009417	311.11
9	80	0.38	0.47	0.29	0.20	0.34	0.0011167	355.56
10	90	0.45	0.55	0.34	0.25	0.40	0.001325	400.00
11	100	0.52	0.63	0.40	0.31	0.47	0.00155	444.44
12	110	0.61	0.70	0.46	0.37	0.54	0.0017833	488.89
13	120	0.70	0.82	0.53	0.43	0.62	0.0020667	533.33
14	130	0.81	0.90	0.62	0.53	0.72	0.0023833	577.78
15	135	0.91	0.96	0.80	0.70	0.84	0.0028083	600.00

Продолжение Приложения А

Таблица А.11 – Результаты испытаний призмы ПЗ0.15.2

Номер ступени нагрузки	Нагрузка на образец, тонн	Показания индикаторов				$\Delta l \cdot 10^3$, мм	ε	σ , МПа
		1	2	3	4			
1	0	0.00	0.00	0.00	0.00		0	0
2	10	0.03	0.04	0.04	0.02	0.03	0.0001083	44.44
3	20	0.07	0.08	0.07	0.05	0.07	0.000225	88.889
4	30	0.11	0.13	0.11	0.07	0.11	0.00035	133.33
5	40	0.14	0.18	0.15	0.10	0.14	0.000475	177.78
6	50	0.18	0.24	0.19	0.12	0.18	0.0006083	222.22
7	60	0.22	0.31	0.24	0.14	0.23	0.0007583	266.67
8	70	0.26	0.37	0.29	0.18	0.28	0.0009167	311.11
9	80	0.31	0.43	0.34	0.22	0.33	0.0010833	355.56
10	90	0.37	0.49	0.41	0.27	0.39	0.0012833	400.00
11	100	0.42	0.56	0.47	0.33	0.45	0.0014833	444.44
12	110	0.48	0.62	0.55	0.39	0.51	0.0017	488.89
13	120	0.56	0.70	0.63	0.48	0.59	0.001975	533.33
14	129	0.62	0.73	0.70	0.68	0.68	0.002275	573.33

Таблица А.12 – Результаты испытаний призмы ПЗ0.45.1

Номер ступени нагрузки	Нагрузка на образец, тонн	Показания индикаторов				$\Delta l \cdot 10^3$, мм	ε	σ , МПа
		1	2	3	4			
1	0	0.00	0.00	0.00	0.00		0	0
2	10	0.03	0.03	0.04	0.04	0.04	0.0001167	44.44
3	20	0.06	0.07	0.08	0.07	0.07	0.0002333	88.89
4	30	0.10	0.12	0.12	0.10	0.11	0.0003667	133.33
5	40	0.13	0.17	0.17	0.12	0.15	0.0004917	177.78
6	50	0.16	0.21	0.22	0.16	0.19	0.000625	222.22
7	60	0.20	0.26	0.27	0.20	0.23	0.000775	266.67
8	70	0.25	0.32	0.32	0.24	0.28	0.0009417	311.11
9	80	0.30	0.37	0.38	0.29	0.34	0.0011167	355.56
10	90	0.35	0.43	0.43	0.35	0.39	0.0013	400.00
11	100	0.41	0.49	0.49	0.41	0.45	0.0015	444.44
12	110	0.49	0.57	0.57	0.48	0.53	0.0017583	488.89
13	120	0.57	0.65	0.64	0.55	0.60	0.0020083	533.33
14	130	0.68	0.76	0.76	0.66	0.72	0.0023833	577.78
15	135	0.76	0.83	0.80	0.72	0.78	0.0025917	600.00

Продолжение Приложения А

Таблица А.13 – Результаты испытаний призмы ПЗ0.45.2

Номер ступени нагрузки	Нагрузка на образец, тонн	Показания индикаторов				$\Delta l \cdot 10^3$, мм	ε	σ , МПа
		1	2	3	4			
1	0	0.00	0.00	0.00	0.00		0	0
2	10	0.03	0.04	0.04	0.03	0.04	0.0001167	44.44
3	20	0.05	0.08	0.09	0.06	0.07	0.0002333	88.89
4	30	0.08	0.11	0.13	0.09	0.10	0.0003417	133.33
5	40	0.11	0.15	0.18	0.14	0.15	0.0004833	177.78
6	50	0.15	0.18	0.22	0.18	0.18	0.0006083	222.22
7	60	0.18	0.22	0.26	0.22	0.22	0.0007333	266.67
8	70	0.23	0.26	0.31	0.27	0.27	0.0008917	311.11
9	80	0.27	0.30	0.37	0.32	0.32	0.0010500	355.56
10	90	0.32	0.35	0.42	0.39	0.37	0.0012333	400.00
11	100	0.38	0.40	0.47	0.44	0.42	0.0014083	444.44
12	110	0.44	0.45	0.52	0.50	0.48	0.0015917	488.89
13	120	0.52	0.49	0.58	0.58	0.54	0.0018083	533.33
14	128.5	0.58	0.54	0.63	0.68	0.61	0.0020250	571.11

Таблица А.14 – Результаты испытаний призмы ПЗ0.75.1

Номер ступени нагрузки	Нагрузка на образец, тонн	Показания индикаторов				$\Delta l \cdot 10^3$, мм	ε	σ , МПа
		1	2	3	4			
1	0	0.00	0.00	0.00	0.00		0	0
2	10	0.03	0.04	0.02	0.02	0.03	0.0000917	44.44
3	20	0.06	0.07	0.05	0.06	0.06	0.0002000	88.89
4	30	0.10	0.10	0.08	0.10	0.10	0.0003167	133.33
5	40	0.12	0.14	0.11	0.14	0.13	0.0004250	177.78
6	50	0.16	0.18	0.15	0.19	0.17	0.0005667	222.22
7	60	0.20	0.22	0.17	0.23	0.21	0.0006833	266.67
8	70	0.25	0.27	0.23	0.29	0.26	0.0008667	311.11
9	80	0.30	0.31	0.26	0.34	0.30	0.0010083	355.56
10	90	0.35	0.36	0.29	0.40	0.35	0.0011667	400.00
11	100	0.41	0.42	0.34	0.47	0.41	0.0013667	444.44
12	110	0.48	0.48	0.38	0.56	0.48	0.0015833	488.89
13	120	0.55	0.55	0.42	0.66	0.55	0.0018167	533.33
14	130	0.64	0.62	0.42	0.78	0.62	0.0020500	577.78
15	140	0.77	0.70	0.42	0.95	0.71	0.0023667	622.22

Продолжение Приложения А

Таблица А.15 – Результаты испытаний призмы ПЗ0.75.2

Номер ступени нагрузки	Нагрузка на образец, тонн	Показания индикаторов				$\Delta l \cdot 10^3$, мм	ε	σ , МПа
		1	2	3	4			
1	0	0.00	0.00	0.00	0.00		0	0
2	10	0.03	0.04	0.04	0.02	0.03	0.0001083	44.44
3	20	0.07	0.09	0.07	0.05	0.07	0.0002333	88.89
4	30	0.12	0.13	0.10	0.08	0.11	0.0003583	133.33
5	40	0.17	0.17	0.14	0.12	0.15	0.0005000	177.78
6	50	0.22	0.22	0.17	0.16	0.19	0.0006417	222.22
7	60	0.26	0.26	0.21	0.20	0.23	0.0007750	266.67
8	70	0.32	0.31	0.25	0.24	0.28	0.0009333	311.11
9	80	0.37	0.36	0.30	0.29	0.33	0.0011000	355.56
10	90	0.43	0.41	0.35	0.34	0.38	0.0012750	400.00
11	100	0.49	0.47	0.41	0.40	0.44	0.0014750	444.44
12	110	0.57	0.54	0.47	0.47	0.51	0.0017083	488.89
13	120	0.66	0.63	0.55	0.55	0.60	0.0019917	533.33
14	130	0.77	0.72	0.65	0.64	0.70	0.0023167	577.78
15	140	0.87	0.82	0.77	0.75	0.80	0.0026750	622.22
16	142	1.09	0.86	0.90	0.85	0.93	0.0030833	631.11

Приложение Б
Диаграммы напряжений бетона

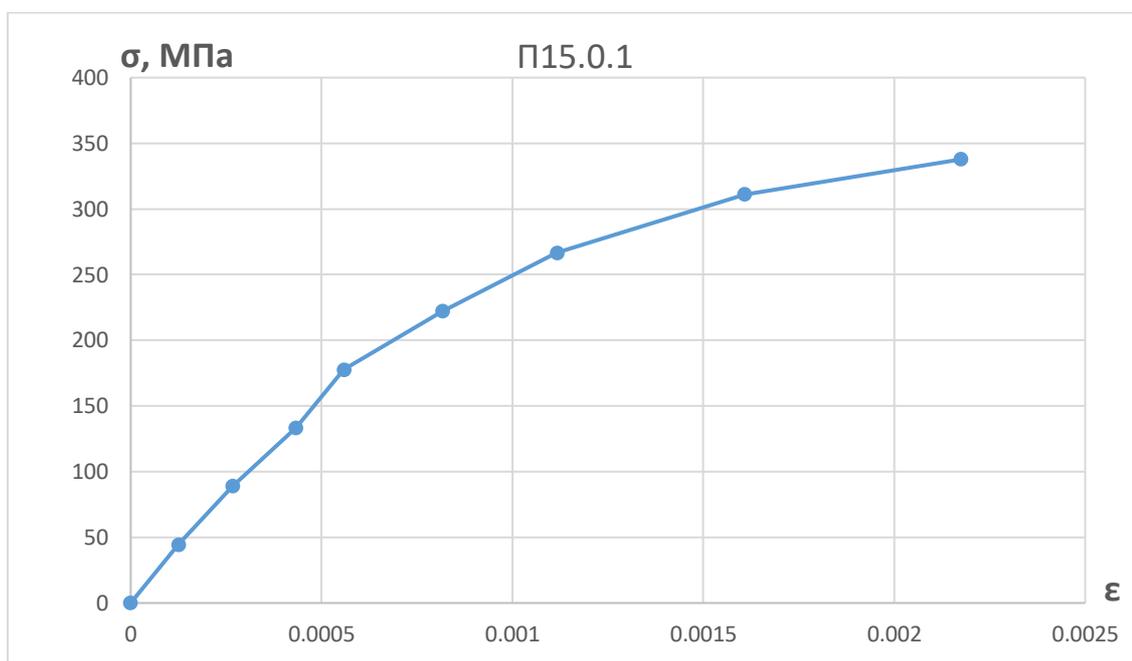


Рисунок Б.1 – Диаграмма напряжения бетона образцов П15.0.1

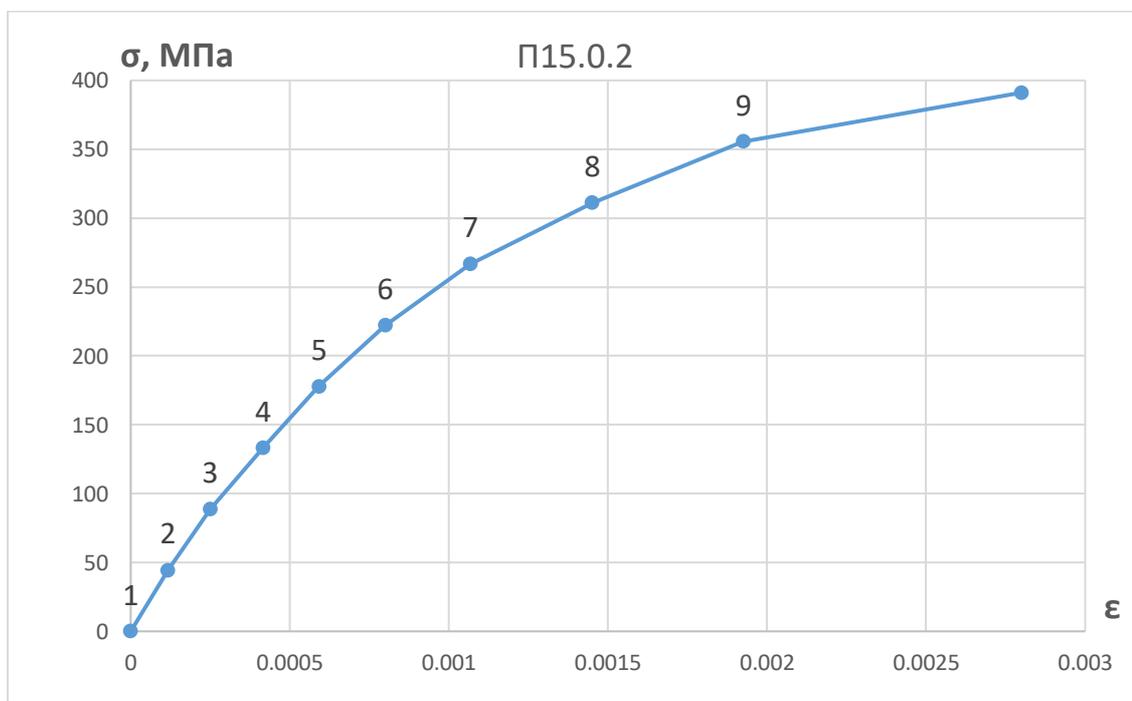


Рисунок Б.2 – Диаграмма напряжения бетона образца П15.0.2

Продолжение Приложения Б

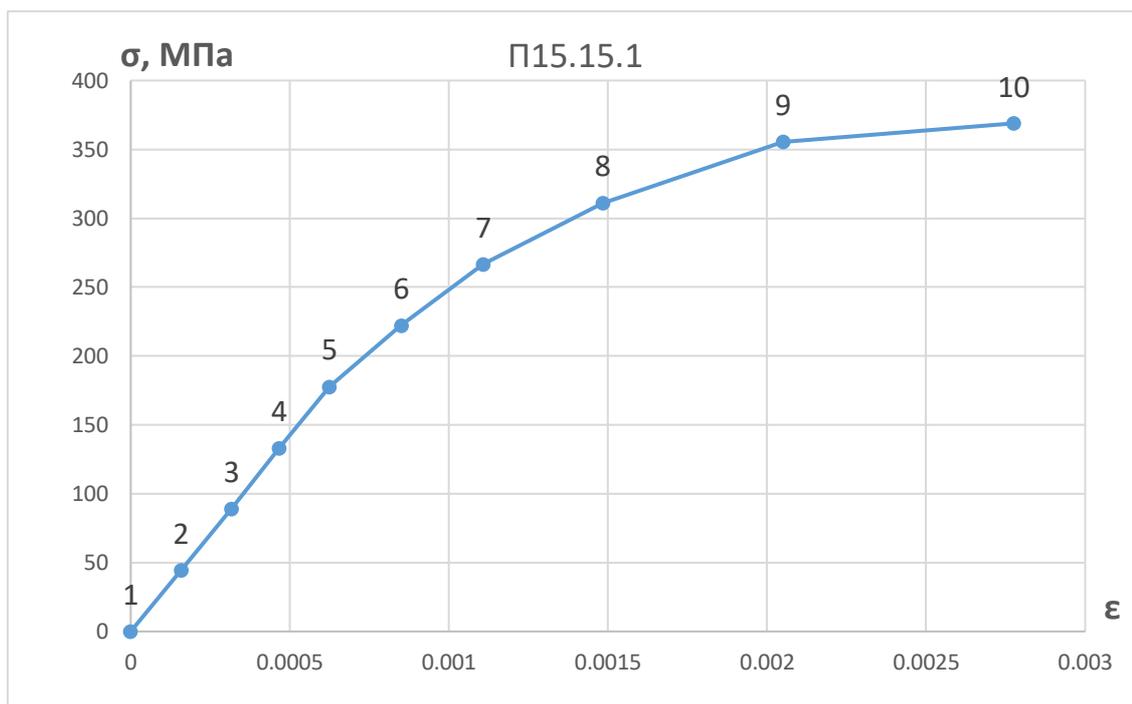


Рисунок Б.3 – Диаграмма напряжения бетона образца П15.15.1

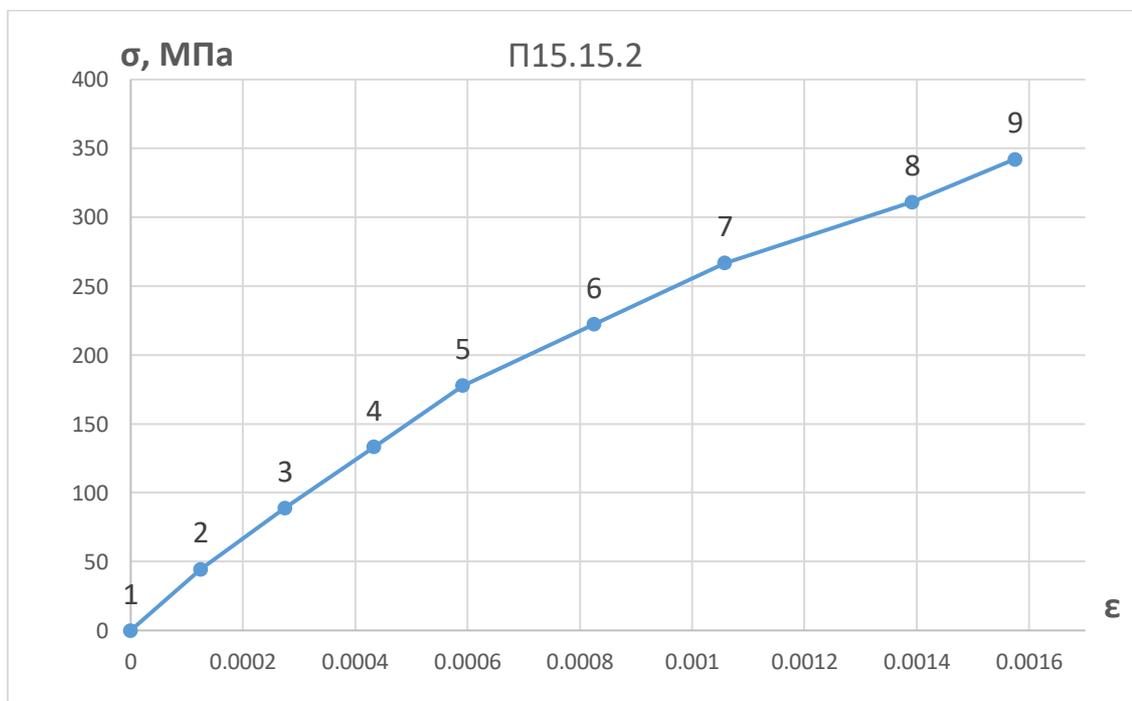


Рисунок Б.4 – Диаграмма напряжения бетона образца П15.15.2

Продолжение Приложения Б

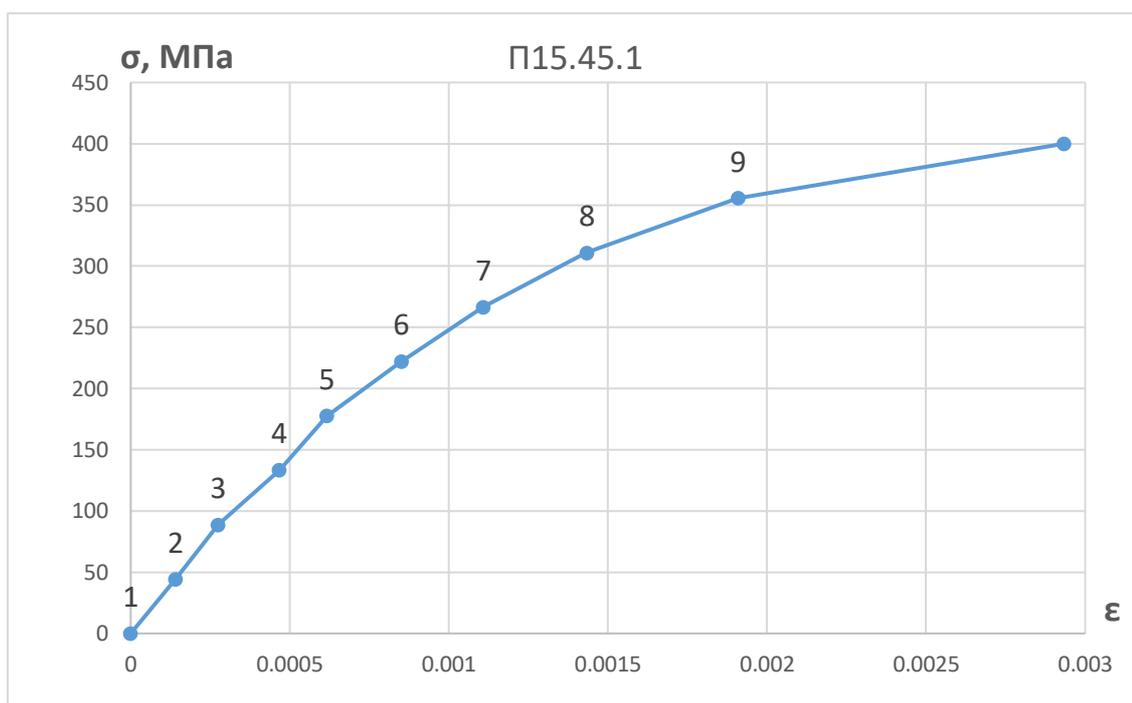


Рисунок Б.5 – Диаграмма напряжения бетона образца П15.45.1

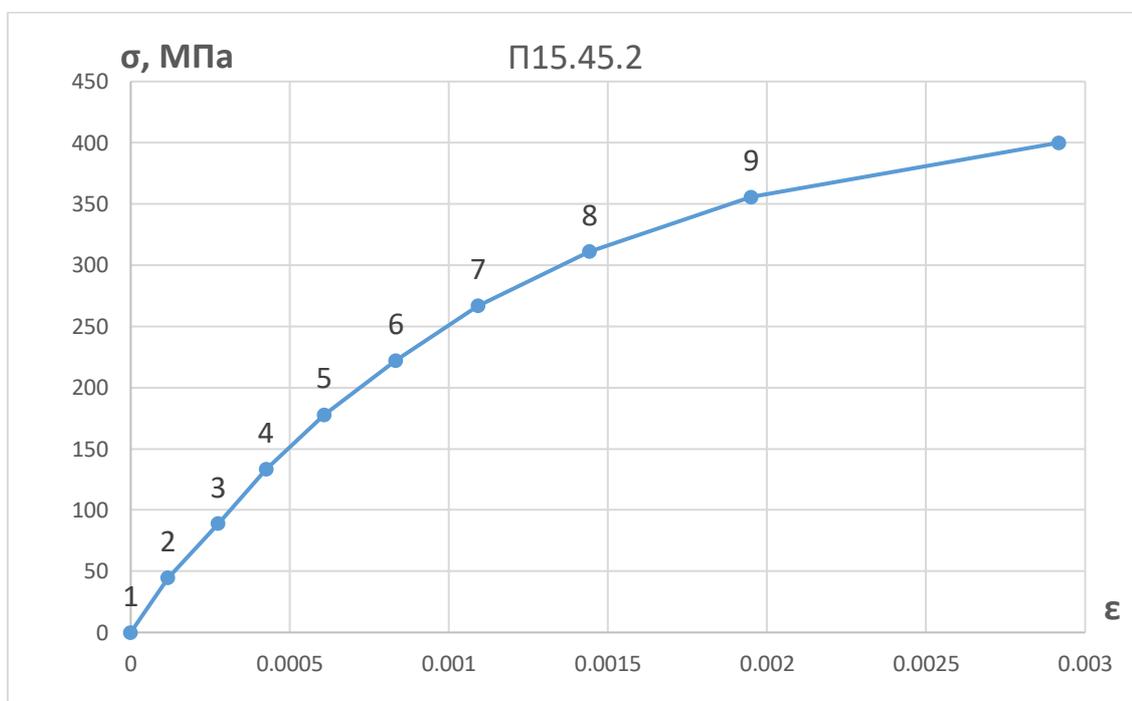


Рисунок Б.6 – Диаграмма напряжения бетона образца П15.45.2

Продолжение Приложения Б

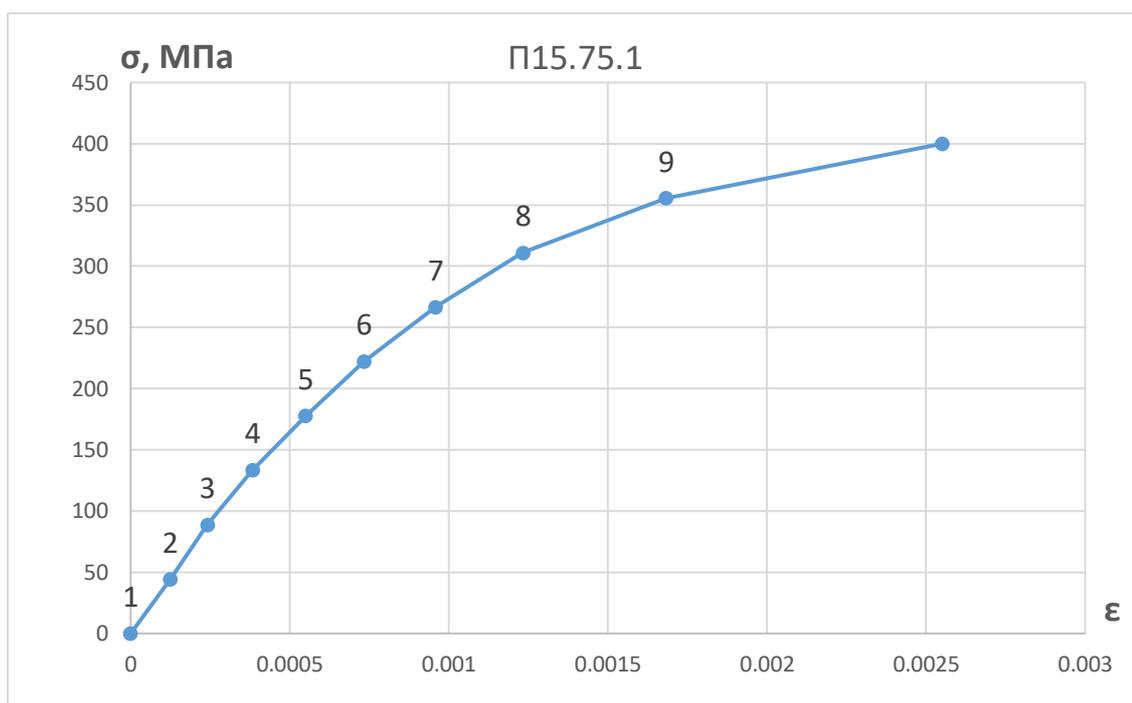


Рисунок Б.7 – Диаграмма напряжения бетона образца П15.75.1

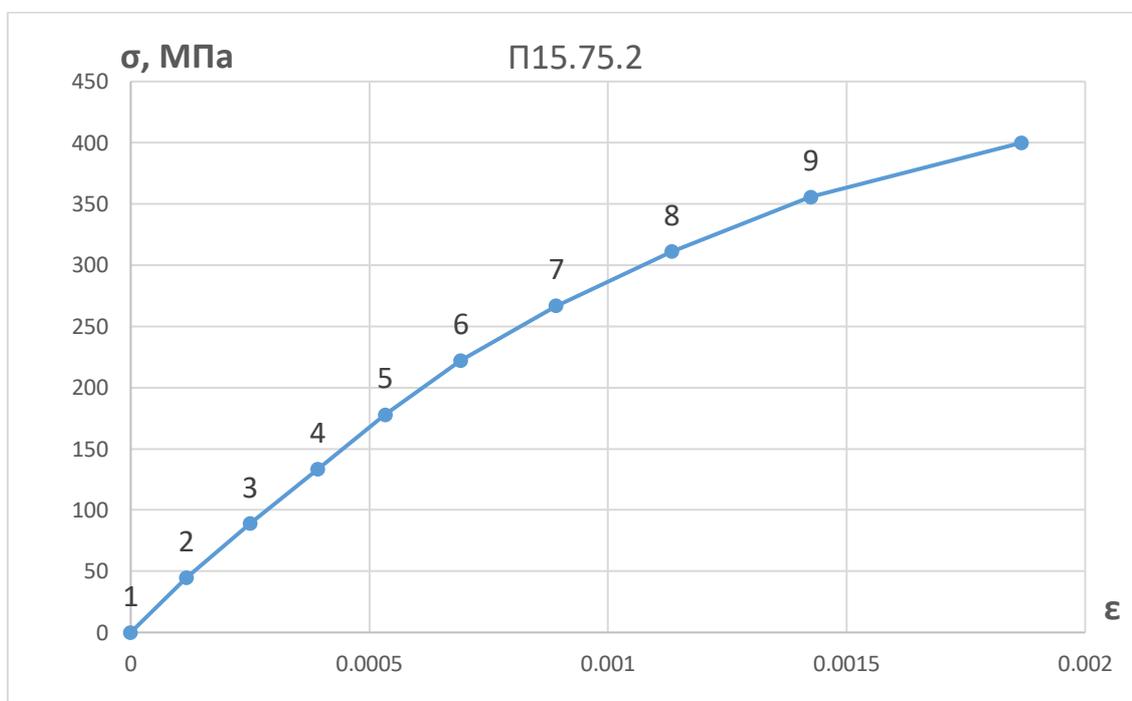


Рисунок Б.8 – Диаграмма напряжения бетона образца П15.75.2

Продолжение Приложения Б

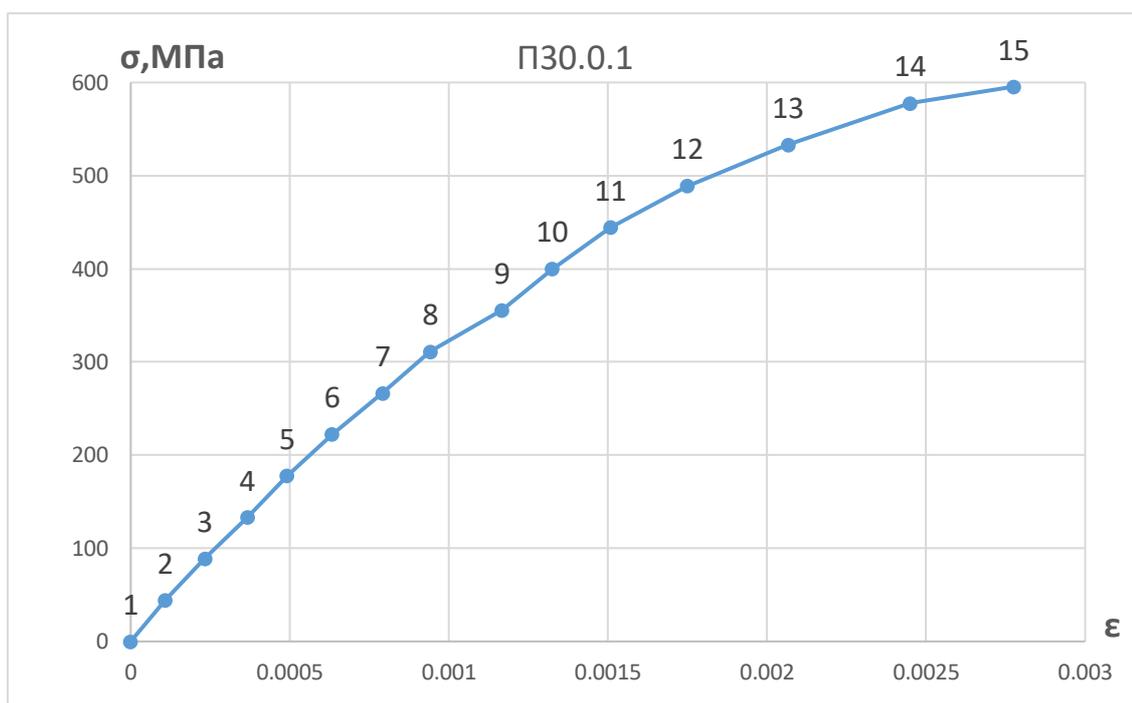


Рисунок Б.9 – Диаграмма напряжения бетона образца ПЗ0.0.1

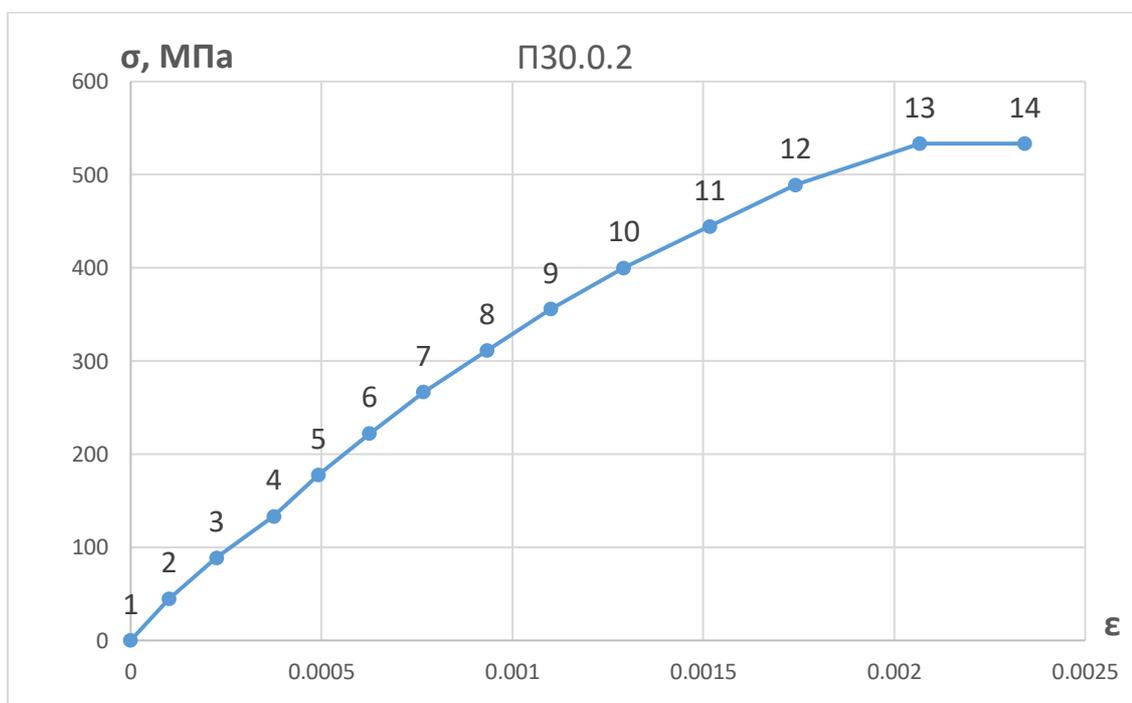


Рисунок Б.10 – Диаграмма напряжения бетона образца ПЗ0.0.2

Продолжение Приложения Б

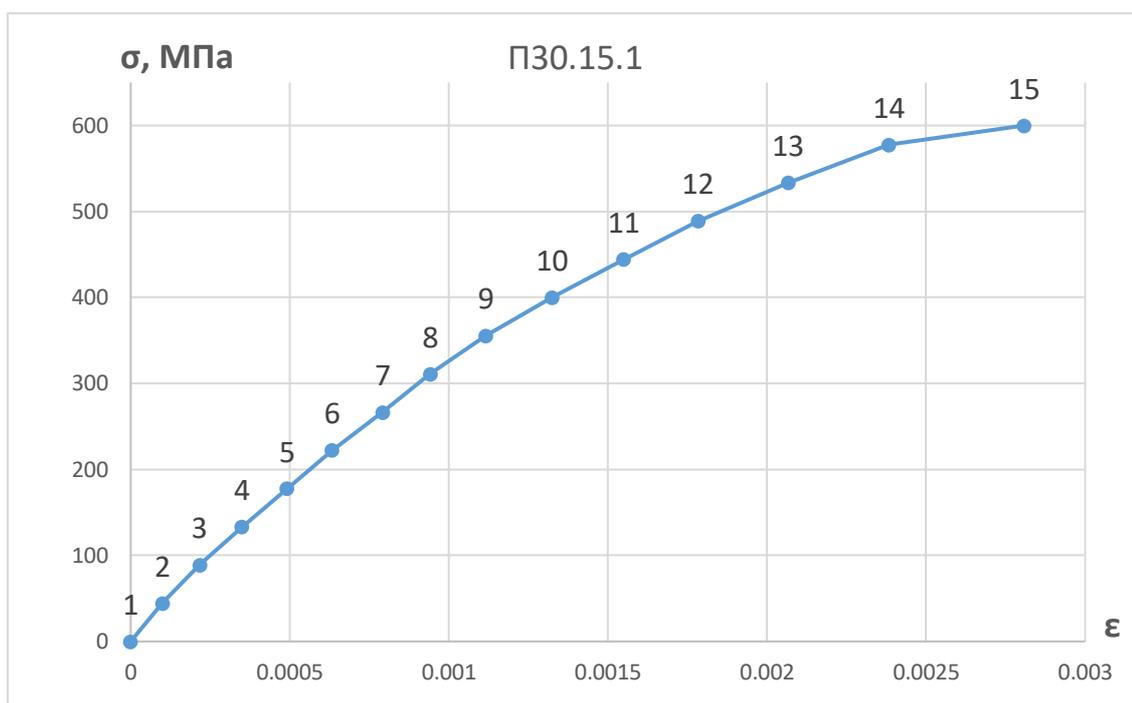


Рисунок Б.11 – Диаграмма напряжения бетона образца П30.15.1

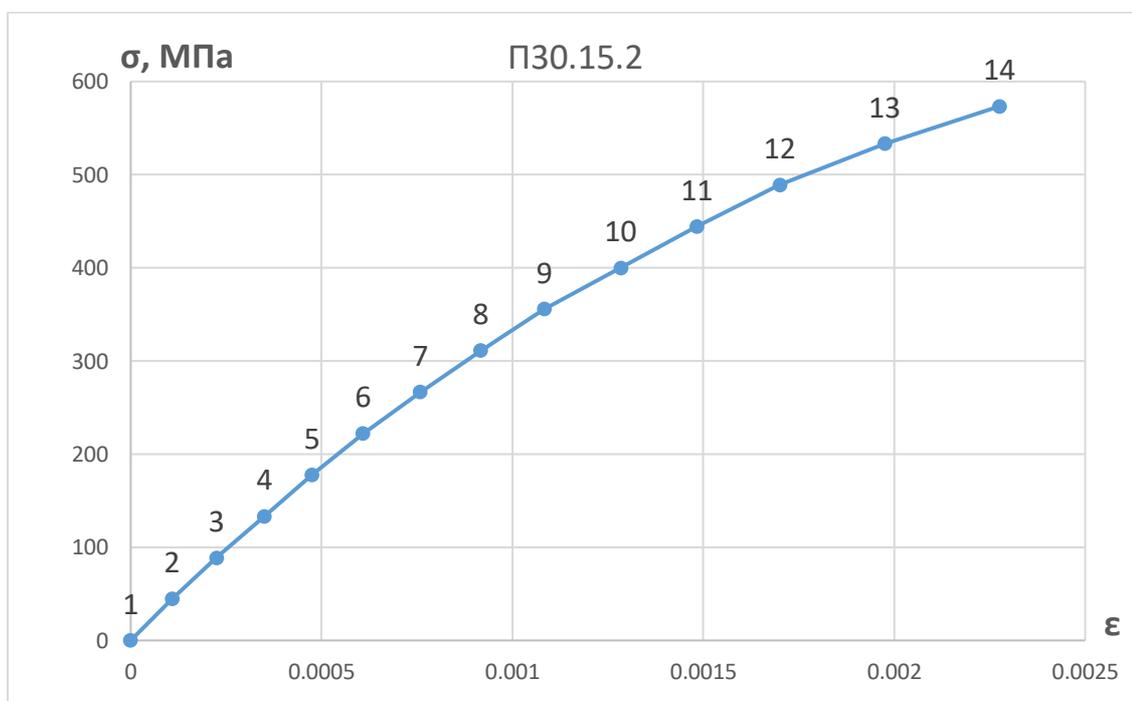


Рисунок Б.12 – Диаграмма напряжения бетона образца П30.15.2

Продолжение Приложения Б

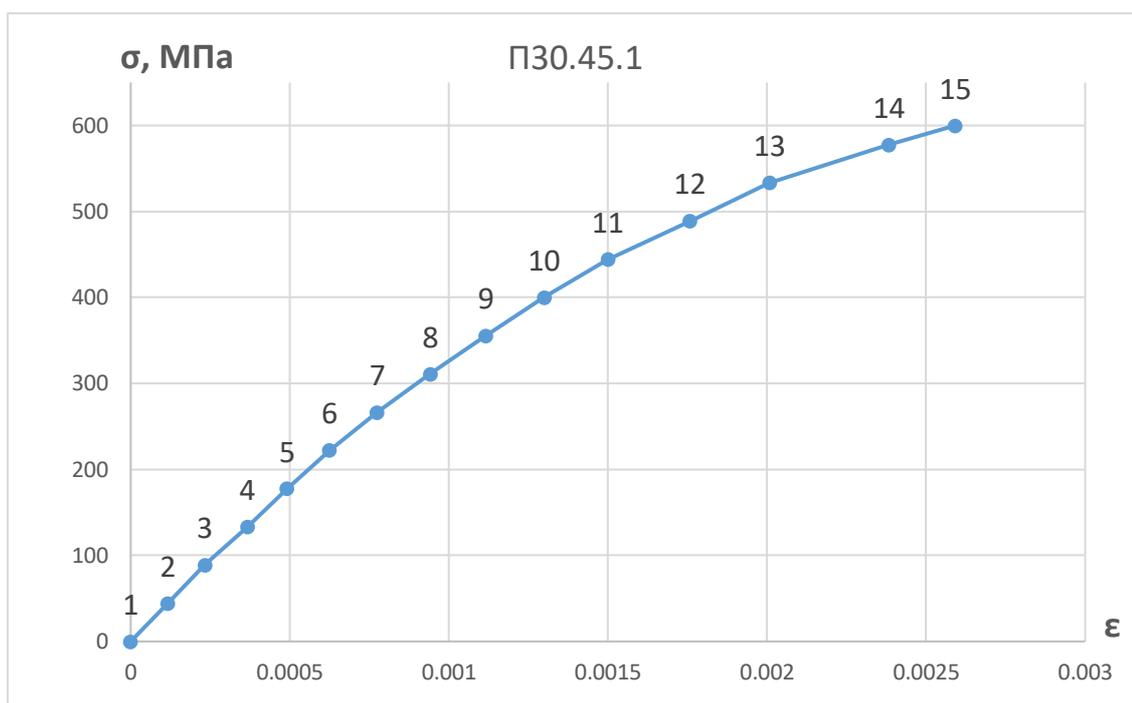


Рисунок Б.13 – Диаграмма напряжения бетона образца ПЗ0.45.1

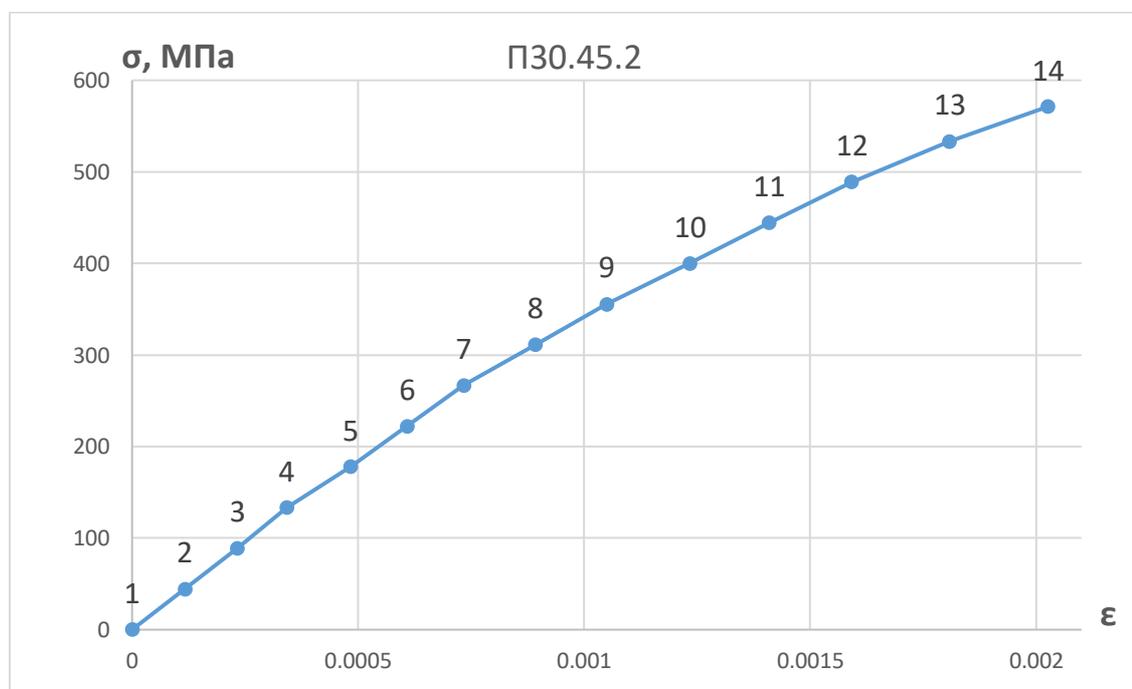


Рисунок Б.14 – Диаграмма напряжения бетона образца ПЗ0.45.2

Продолжение Приложения Б

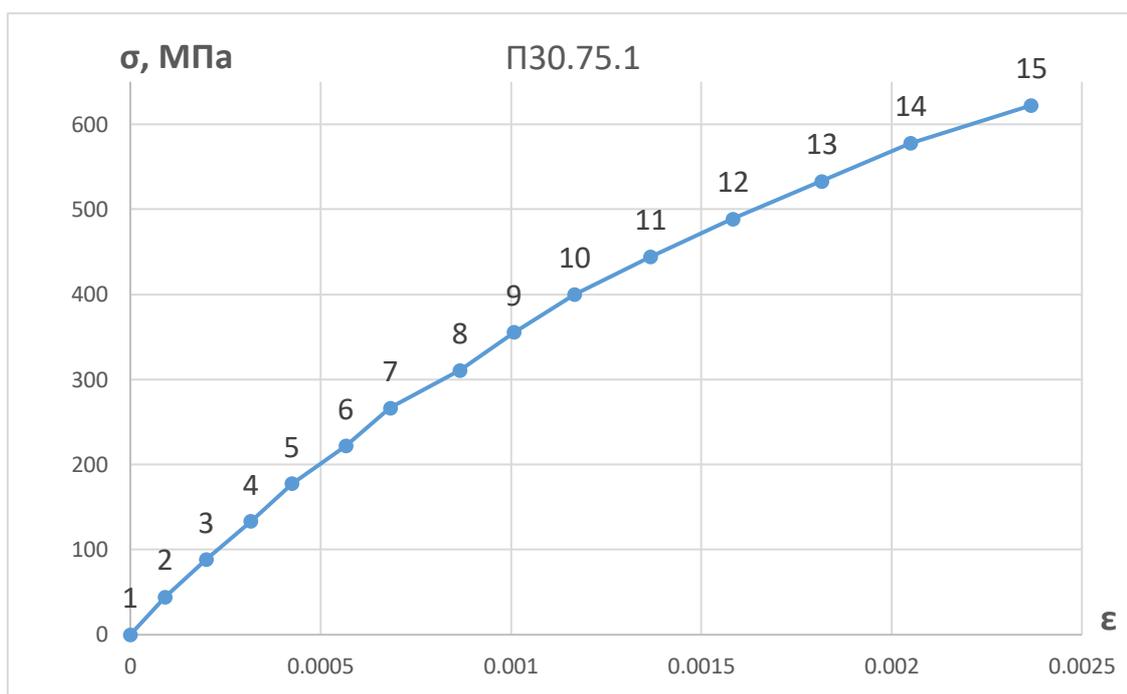


Рисунок Б.15 – Диаграмма напряжения бетона образца П30.75.1

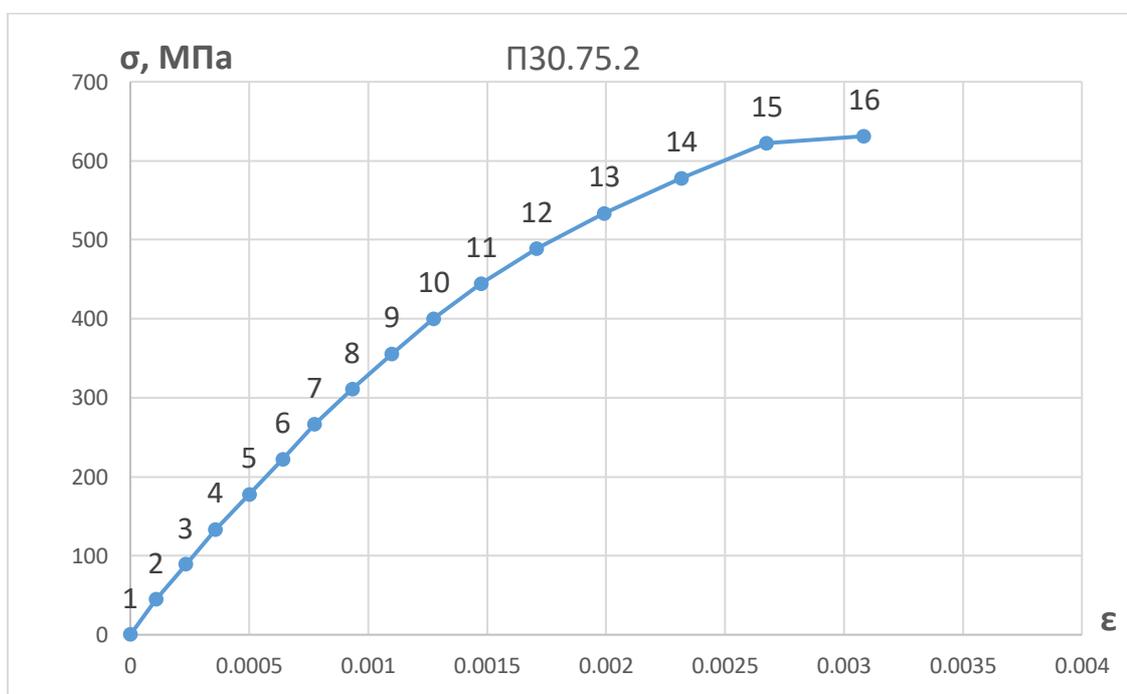


Рисунок Б.16 – Диаграмма напряжения бетона образцов П30.75.2