

АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО «КАЗАХСКИЙ НАУЧНО-
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ И ПРОЕКТНЫЙ ИНСТИТУТ СТРОИТЕЛЬСТВА
И АРХИТЕКТУРЫ»

На правах рукописи
УДК 624.016

КУРАЛОВ УЛАН САБИТБЕКОВИЧ

**Прочность и деформаций сжатых железобетонных конструкций,
усиленных полимерными фиброармированными сетками, при
статических и динамических нагрузках**

05.23.01 – «Строительные конструкции, здания и сооружения»

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель
доктор технических наук,
профессор академик НИА РК
Беспаев А.А.

город Алматы - 2020

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	3
ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА.....	9
1.1. Общие сведения о композитных материалах, используемых для усиления строительных конструкций.....	9
1.2. Опыт производства и применения композитных материалов в строительстве	10
1.3. Научные исследования	20
Заключения по главе 1	30
ГЛАВА 2. ПРОГРАММА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ	32
2.1. Методика экспериментальных исследований.....	32
2.2. Опытные образцы	35
Заключения по Главе 2	39
ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ СЖАТЫХ БЕТОННЫХ ЦИЛИНДРОВ, УСИЛЕННЫХ ОБЕРТЫВАНИЕМ ПОЛИМЕРНЫМИ СЕТКАМИ	41
3.1. Исследование работы цилиндрических образцов при статическом нагружении	41
3.1.1. Расчетно-теоретический анализ статической прочности сжатых бетонных цилиндров.....	80
3.2. Динамические испытания бетонных цилиндров на сжатие	89
Заключения по Главе 3	102
ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТЫ СЖАТЫХ БЕТОННЫХ ПРИЗМ.....	103
4.1. Исследования сжатых призм при статическом нагружении	103
4.1.1. Расчетно-теоретический анализ прочности сжатых бетонных призм ...	114
4.2. Исследование работы призм с различным усилением сетками при внецентренном сжатии	117
4.3. Исследования работы бетонных призм, усиленных фибро-армированными сетками при динамических нагрузках	123
Заключения по Главе 4	134
Общие выводы.....	136
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	139

ПРИЛОЖЕНИЕ 1- РЕКОМЕНДАЦИИ ПО УСИЛЕНИЮ СЖАТЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ФИБРОАРМИРОВАННЫМИ ПЛАСТИКАМИ	153
П1.1. Общие данные	153
П1.2. Основные расчетные положения	154

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы диссертации. В настоящее время здания и сооружения часто меняют свое назначение, подвергаются реконструкции и реновации, в них повышаются требования по надежности и комфорту, они подвергаются физическому износу и повреждениям. Это вызывает необходимость развития методов усиления строительных конструкций, что особенно важно для усиления и восстановления зданий и сооружений в сейсмических районах строительства, в районах стихийных бедствий, после аварий и террористических актов.

Несущие конструкции зданий и сооружений из бетона и железобетона занимают ведущее место в строительстве, поэтому проблемы развития методов усиления железобетонных конструкций имеют повышенную актуальность. Традиционные методы усиления железобетонных конструкций с использованием металла и бетона весьма трудоемки, требуют вскрышных, сварных и бетонных работ, нуждаются в значительном времени для обеспечения требуемой прочности. Современные методы усиления железобетонных конструкций ориентированы на применение для усиления композитных фибропластиковых материалов, отличающихся высокой прочностью, стойкостью к коррозии и долговечностью.

Наибольшее распространение получил метод поверхностного усиления железобетонных конструкций композиционными фиброармированными сетками, наклеиваемыми непосредственно на бетонную поверхность. Он отличается малой трудоемкостью и простотой выполнения, повышенной прочностью, коррозионной стойкостью и универсальностью, не требует вскрытия защитного слоя бетона, сварочных работ, неизбежно вызывающих повреждения рабочей арматуры, и сложного трудоемкого обетонирования элементов.

Значительная доля усиливаемых железобетонных конструкций нуждается в повышении прочности при сжатии.

Разработанной редакцией Европейских норм (Eurocode 2: Design of concrete structures [1]) планируется введен раздел по проектированию усиления железобетонных конструкций фиброармированными пластиками.

Поэтому проведение исследований по выбранной теме весьма актуально и необходимо для строительной отрасли Казахстана и Средней Азии.

Связь темы диссертации с крупными научными программами, основными научно-исследовательскими работами, проводимыми научными учреждениями. Диссертация выполнена в рамках государственной программы Комитета по делам строительства и жилищно-коммунального хозяйства Республики Казахстан по теме: Прочность и деформаций сжатых железобетонных конструкций, усиленных полимерными фиброармированными сетками, при статических и динамических нагрузках

Цель и задачи исследования. Целью исследований является изучение работы сжатых железобетонных конструкций, усиленных обоймами из карбонатных фиброармированных сеток, при статических и динамических нагрузках.

В диссертации решены следующие задачи:

- изучение физико-механических характеристиках новых типов фиброармированных сеток;
- исследование прочности и деформаций, сжатых цилиндрических железобетонных элементов, усиленных обоймами из фиброармированных материалов;
- исследование прочности и деформаций сжатых призматических железобетонных элементов, усиленных обоймами из фиброармированных сеток;
- определение несущей способности внецентренно сжатых призматических железобетонных элементов, усиленных обоймами их фиброармированных сеток;

- изучение влияния повторных динамических нагрузок на прочность и деформативность железобетонных элементов, усиленных обоймами из фиброармированных сеток;
- оценка эффективности усиления обоймами из фиброармированных пластиков сжатых железобетонных конструкций;
- разработка рекомендаций по усилению сжатых железобетонных конструкций усиленными фиброармированными сетками.
- разработать методику расчетов по усилению сжатых железобетонных конструкций усиленными фиброармированными сетками.

Научная новизна полученных результатов:

- получены данные по прочности и характер разрушения сжатых железобетонных конструкций, усиленных обоймами из различных типов фиброармированных сеток;
- получены сведения о напряженном состоянии внецентренно сжатых элементов железобетонных конструкций, усиленных фиброармированными сетками;
- изучена влияние циклических динамических нагрузок на работу сжатых железобетонных конструкций, усиленных фиброармированными сетками.

Практическая значимость полученных результатов. Получены сопоставительные данные по применению новых типов фиброармированных сеток для усиления сжатых железобетонных конструкций.

Даны предложения по величине учитываемых в расчетах предельных деформаций фиброармированных пластиков при различных типах нагрузок.

Разработанные рекомендации позволяют проектировать усиление сжатых железобетонных конструкций, усиленных обоймами из фиброармированных сеток, применяемых в обычных и сейсмических районах.

Экономическая значимость полученных результатов. Применение результатов испытаний сжатых железобетонных конструкций усиленных фиброармированными сетками позволят улучшить следующие экономические показатели:

- сокращение сроков выполнения работ, а также привлечение исполнителей к работам по усилению железобетонных конструкций;
- не большие размеры и собственный вес материалов (ФАП), что в значительной степени сокращает расходы на привлечение дополнительной техники и людей по доставке материалов на строительный объект;
- отсутствие дополнительных конструктивных элементов от усиления несущих конструкций, в связи с чем не изменяется существующая полезная площадь усиливаемого объекта;
- сокращение времени по выполнению следующих этапов работ после усиления;

Основные положения диссертации, выносимые на защиту:

- зависимости поперечных сжимающих напряжений, создаваемых обоймой из фиброармированных пластиков, от величины внешних сжимающих усилий и возраста бетона, а также формы поперечного сечения;
- последовательность образования и развития микротрещин в сжимаемом бетоне, усиленном обоймами из фиброармированных сеток;
- схемы разрушения сжатых железобетонных конструкций, усиленных обоймами из фиброармированных сеток, при которых происходит разрыв сеток усиления или повреждение стыков сопряжения сеток;
- предельные деформации в волокнах обоймы из фибропластиковых пластиков и продольных деформаций бетона при осевом сжатии железобетонных элементов;

- эпюры сжимающих напряжений в бетоне и предельные деформации бетона и волокон фиброармированных пластиков при внецентренном сжатии железобетонных элементов, усиленных обоймами из фиброармированных сеток;
- картину накопления повреждений в сжатых железобетонных конструкциях, усиленных обоймами из фиброармированных сеток, при действии динамических повторных нагрузок;
- зависимости прочности железобетонных конструкций, сжатых железобетонных конструкций, усиленных обоймами из фиброармированных сеток, от количества повторных нагружений и амплитуды динамической нагрузки.

Личный вклад соискателя. Выполнен обзор работ по опыту применения и изучению работы сжатых железобетонных конструкций, усиленных обоймами из фиброармированных сеток.

Выполнены экспериментальные исследования работы железобетонных элементов, усиленных обоймами из различных типов фиброармированных сеток, при осевом и внецентренном сжатии, а также динамическом характере нагружения.

Проведен анализ опытных данных и выполнен расчетно-теоретический анализ результатов исследований.

Разработана методика расчета прочности сжатых железобетонных конструкций, усиленных обоймами из фиброармированных сеток, применяемых в обычных и сейсмических районах.

Апробация результатов исследования. Результаты исследований доложены и обсуждены на ряде международных и республиканских конференциях и совещаниях, в том числе на:

1. IV Международной научно-практической конференции «Строительство в сейсмических районах», 16-19 октября 2012, КазНИИСА, г. Алматы;

2. Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы и перспективы развития строительных конструкций: инновации, модернизация и энергоэффективность в строительстве». 19-23 декабря 2013 г. КазГАСА, Алматы;

3. X Юбилейная всеукраинской конференции «Строительство в сейсмических районах Украины», 2015 г. Одесса;

4. II международной конференции молодых ученых "Современные задачи геофизики, инженерной сейсмологии и сейсмостойкого строительства" Институт геофизики и инженерной сейсмологии им. А. Назарова НАН РА 2015 г. Армения, Ереван;

5. Международной научно-практической конференции «Современная строительная наука, состояние и перспективы развития», 2016 г., КазНИИСА, Алматы;

6. Международная научно-практическая конференция «Новые строительные тренды в XXI веке, 2017 г. НИА РК, Алматы.

Полнота отражения результатов диссертации в публикациях. По результатам диссертационной работы опубликованы 16 научных трудов в различных научных изданиях, в том числе журналах РИНЦ из перечня рецензируемых научных изданий, утверждаемых президиумом ВАК Кыргызской Республики и строго соответствуют теме диссертации.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, основных выводов, списка использованных литературы из 101 наименований. Текстовая часть изложена на 146 страницах машинописного текста. В работе содержится 20 таблиц, 112 рисунка и 1 приложение.

ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

1.1. Общие сведения о композитных материалах, используемых для усиления строительных конструкций

Современное человечество переживает смену технической модели цивилизации, сопровождающуюся вытеснением традиционных материалов и технологий на энергосберегающие и материалоеффективные решения. При этом полимерные материалы и полимерные композиты приобретают очень важную роль, в которой особое место занимают армированные полимерные композитные материалы, являющиеся системой армирующих высокопрочных волокон в полимерной матрице. Мировой объем рынка в секторе полимерных композитных материалов приближается к 100 млрд евро, основная доля которых приходится на аэрокосмическую и оборонную технику.

В последние десятилетия быстро расширяется объем применения композитных материалов в строительстве. Рынок композитов в строительстве составляет около 5 млрд евро, а ведущее место в них занимают композиционные углеродные материалы, которые используются прежде всего при восстановлении несущей способности и усилении различных инженерных сооружений, промышленных и гражданских зданий. Композитные материалы применяются для усиления строительных конструкций из различных материалов. Более 80% усиливаемых железобетонных конструкций в США, Японии, Канаде, Германии, Англии и других развитых странах выполнено системами внешнего армирования с использованием фибропластиковых материалов.

Композиционные материалы, используемые для усиления строительных конструкций, представляют собой многокомпонентные материалы, состоящие из пластичной матрицы, армированной волокнами наполнителя из углепластиковых волокон. Углеродные волокна получают из синтетических и природных волокон на основе целлюлозы, сополимеров акрилонитрила, нефтяных и каменноугольных пеков и т.д.

Карбоновые волокна имеют следующие преимущества:

- они обладают высокой прочностью на растяжение, превосходящей сталь;
- имеют малую плотность, они легче алюминия на 20%;
- выдерживают температуру до 1600⁰С;
- являются хорошим энергопоглотителем.

Недостатки карбоновых волокон:

- высокая стоимость;
- сложность ремонта или восстановления в случае повреждения;
- электропроводность;
- повреждается под солнечными лучами;
- карбон из углепластика и резины может выдержать мощнейшие ударные нагрузки, но раскалывается хрупко.

1.2. Опыт производства и применения композитных материалов в строительстве

Для композитных материалов в виде фиброармированных пластиков (ФАП), производимых на основе полимерных материалов и армирующего волокна, основными компонентами являются полимерные смолы (чаще всего, полиэфирная, эпоксидная, винил эфирная и фенольная) и армирующие их волокна (углеродное, базальтовое, арамидное и стекловолокно). Они поставляются на строительный рынок в виде листов, пластин, реек, тканей, мягких изоляционных материалов, решеток, а также стержневой и прядевой арматуры «см. табл.1.1».

Производство и применение композитных материалов в разных странах имеет свои особенности и свою историю. В начале 60-х годов прошлого века в Великобритании были разработаны углеволокна, а США- борные волокна, что и послужило толчком к развитию нового поколения композитных материалов. В Японии использование композитов впервые имело место в 1970-х годах, когда были предприняты первые попытки замены стальной арматуры на стержни ФАП в конструкциях из бетона [1].

Таблица 1.1- Физико-механические свойства различных марок тканей ФАП

Марка фирмы производителя	Тип	Толщина мм	Ширина мм	Модуль упругости ГПа	Прочность на растяжение МПа	Деформация при разрыве %	Поверхностная плотность г/м ²
УОЛ-300-2	К	0,175	300	120	1400	1,16	
Sika Wrap® Hex 230C	В	-	305; 610	230	3450	1,5	230
	К	0,381	-	65,4	894	1,33	
Wabo®MBrace CF 130	В	0,165		228	3790	1,7	
Wabo®MBrace CF 530	В	0,165		372	3517	0,9	
S&P® C Sheet 640	В	0,19	150; 300	640	2650	0,4	430
S&P® C Sheet 240 - 200, S&P® C Sheet 240 - 300	В	0,117; 0,176	300; 1000	240	3800	1,55	230; 330
MapeWrap® C UNI-AX 300/10; 300/20; 300/40;	В	0,167	100; 200; 400	230	4800	2,1	300
MapeWrap® C UNI-AX 600/10; 600/20; 600/40;	В	0,335	100; 200; 400	230	4800	2,1	600
Tyfo®SCH-11UP	В	0,127	600	230	3790	1,7	298
	К	0,25	-	102	1062	1,05	-
Tyfo® SCH-35	К	0,89	600	78,6	991	1,26	-
Tyfo® SCH-41	В	0,28	600	230	3790	1,7	644
	К	1	-	72,4	876	1,2	-

Главные факторы, мотивировавшие развитие материалов ФАП и их исследования, были: коррозия бетона в морской воде, заинтересованность производителей композитов в распространении своей продукции, а также подготовленность научной базы к созданию новых материалов.

Основной областью применения композитных материалов ФАП в Японии было усиление существующих конструкций и ремонт сооружений [2]-[4]. Особенно актуальным это стало после сильного землетрясения 1995 г. в городе Коба. Японские власти ввели национальную программу сейсмозащиты, частью которой являлось усиление опор мостов листами ФАП с углеродным волокном. Применение композита для усиления сжатых колонн было экономически оправданным и конструктивно эффективным. Использование композитов в промышленном строительстве в стране за период с 1995 по 1997 г.г. возросло в пять раз. Наиболее широкое применение нашли листовые композитные материалы, преимущественно на основе углеродного волокна [5]-[11]. Примером могут служить конструкции здания госпиталя в г. Иседзаки Сити (префектура Гуама), где были усилены колонны здания листами ФАП [12]. В настоящее время в Японии более 200 видов конструкций усиливают с помощью ФАП, включая офисные здания, школы, больницы, музеи, автодороги, резервуары для воды и т.д.

В Великобритании развитие исследований и применение композитных материалов ФАП относится к периоду 1980-х годов [13]. Эти материалы были использованы при проектировании конструкций виадука A19 Tees, который был первым сооружением с листовым покрытием ФАП. Тогда была разработана конструктивная система Advanced Composites Construction System (ACCS), предназначенная для использования в конструкциях настилов, и испытанная в строительстве нового моста. Одним из первых осуществленных проектов с использованием этой системы был пешеходный мост в г. Аберфелд.

Композитные листы ФАП на основе углеродного волокна были использованы также для усиления конструкций инфраструктуры Лондонского метрополитена. Листы применялись для укрепления конструкций туннелей: была выполнена облицовка старинных литых чугунных балок, уложенных между опорами стен туннеля и центральной стеной, пустоты между листами облицовки и балками заполнены бетоном.

В середине 1990-х годов Агентством скоростных автодорог Великобритании были проведены исследования, которые открыли дорогу применению композитов на арамидном волокне. Такие листы позволили увеличить ударную прочность колонн мостов и туннелей, которые подвержены риску ударов от транспортных средств [14]-[15]. По заданию указанного Агентства Лабораторией транспортных исследований (TRL) была проведена серия испытаний и на их результатах разработаны правила и инструкции, которые должны быть опубликованы в качестве нормативных документов [16].

В Великобритании для усиления конструкций чаще всего используются листы и пластины из композита ФАП, произведенного как на углеродном, так и на арамидном волокне. Наиболее широко применяются листы в настилах пролетного строения мостов скоростных автомагистралей. Стержневые конструкции ФАП в качестве арматуры железобетонных конструкций не получили широкого распространения, главным образом, по причине их высокой стоимости. В Сюррейском университете был разработан и положен в основу нормативных документов проект усиления металлических конструкций с применением композитных материалов [17].

В Швейцарии впервые было осуществлено усиление конструкций с применением пластин ФАП на основе углеродного волокна для моста в г. Люцерн. На основе разработок, проведенных в федеральной исследовательской лаборатории по тестированию и исследованию (ЕМРА), была создана технология по осуществлению усиления железобетонных балок на срез. Исследования и испытания проведенные в ЕМРА позволили разработать систему анкеровки, включающую базовые элементы из керамики и эпоксидной смолы, с вариацией модулей для передачи нагрузок. Первое применение канатов из ФАП на углеродном волокне имело место в 1996 г. на строительстве нового канатно-подвесного моста пролетом 124 м в г. Винтертур. В этом случае в конструкцию

наклонных стальных канатных подвесок были включены два каната ФАП на основе углеродного волокна, с анкерровкой по системе ЕМРА [18].

В Канаде, где в сети автомобильных дорог актуальна проблема очистки дорожного полотна от снега и льда, сделана попытка внедрения в конструкции настилов арматуры из ФАП, поскольку стальная арматура подвержена коррозии. Композиты FRP в 1990-е годы были использованы в плитах настилов, а также в балках и ограждениях вновь строящихся мостов. В 1993 г. в г. Калгари был открыт мост Bed-dington Trail Bridge [19], который был одним из первых мостов в конструкции которых были использованы преднапряженные затяжки из FRP на основе углеродного волокна. Конструкция двухпролетного моста (с пролетами 23 и 19 м) включала 13 сборных железобетонных преднапряженных балок Т-образного сечения. Для предварительного напряжения в шести балках были использованы два типа затяжек FRP на углеродных волокнах. В 1998 г. в провинции Манитоба был открыт мост Taylor Bridge в Хединли. Двухполосный мост длиной 165 м включал несущую конструкцию из четырех сборных преднапряженных железобетонных балок, в которых была использована напрягаемая арматура с применением канатов FRP на углеродном волокне. Стержни FRP со стекловолокном были использованы для армирования стенки бокового ограждения моста.

Уникальный мост Crowchid Trail Bridge, в конструкции которого не использовалась стальная арматура, был построен в Калгари [20]. Новый мост длиной 90 м, шириной 11 м, с двухполосным движением транспорта, включал три пролета. Конструкция настила пролетного строения моста содержит плиту, выполненную без стального армирования, и пять несущих стальных балок. Плита настила с поперечными консолями была армирована стержнями ФАП на основе стекловолокна. Кроме того, в бетон было добавлено рубленое полиэтиленовое волокно для предотвращения развития трещин и для создания дополнительной изгибной прочности настила.

В США композитные материалы ФАП находят достаточно широкое применение, они используются для усиления существующих конструкций и в настилах пролетных строений 91 вновь строящихся мостов. В качестве примера может быть приведен настил моста King Stromwater Channel Bridge в Калифорнии [20]. В Калифорнийском департаменте транспорта были использованы исследовательские разработки, проведенные в университете г. Сан Диего, целью которых было расширение области применения композитных материалов ФАП в новых конструкциях. Эти материалы достаточно широко используются в ремонтных работах для усиления колонн мостов и других несущих элементов конструкции. Особенно перспективным является использование этих материалов для усиления конструкций подверженных сейсмическим нагрузкам. Было исследовано применение стеклянного и углеродного волокна, выполненное на моделях мостов в масштабе 1:2 для определения податливости колонн по сравнению с железобетонными. В США также существует программа антисейсмической защиты, подобная японской.

Рисунки 1.2-1.11 иллюстрируют некоторые примеры применения усиления различных строительных объектов фиброармированными пластиками.



Рис. 1.2. Настил моста King Stromwater Channel Bridge из композиционных материалов в Калифорнии.



Рис. 1.3. Усиление кирпичной трубы в Бразилии



Рис. 1.4. Наклейка ткани из карбоновых фиброволокон



Рис. 1.5. Усиление ригелей в общественном здании



Рис. 1.6. Усиление колонн в общественном здании



Рис. 1.7. Усиление конструкций в общественном здании в Твери с использованием углехолста



Рис. 1.8. Усиление перекрытий в здании торгового центра



Рис. 1.9. Восстановление поврежденных участков бетона и установка пакеров для инъецирования



Рис.1.10. Инъецирование



Рис.1.11. Усиление перекрытий углехолстом

Стоимость композитных материалов является критическим фактором их применения. Долгое время эта стоимость была значительно выше стоимости бетона и стали. Однако относительная суммарная стоимость разных факторов их производства в последнее время существенно сблизил эти материалы.

1.3. Научные исследования

Первые экспериментальные исследования несущей способности усиленных железобетонных элементов с помощью композиционных материалов, были начаты в дальнем зарубежье. Испытанию подвергались железобетонные конструкции, усиленные композиционными материалами на основании стеклянных, арамидных, углеродных и других волокон. Впоследствии было выявлено эффективность усиления конструкций композитными материалами на основании углеродных волокон.

Активное изучение, производство и применение полимерных композитных материалов на основе различных волокон (углеродных, арамидных, стеклянных и др.) в строительстве началось в середине XX века. В 80-х годах в Японии впервые композитные материалы использовали для усиления колонн путем создания охватывающей обоймы [21]. Основными преимуществами данного метода усиления являлись меньшая трудоемкость, удобство выполнения, малый собственный вес, низкая стоимость производства работ.

Базовой работой по изучению напряженного состояния бетона в обойме является работа американских ученых в Иллинойском университете [22]. Их исследование посвящено изучению работы бетона при трехосном сжатии, бетонные образцы испытывались в стабилометре, создающем постоянное гидростатическое давление. По результатам исследований предложена зависимость прочности усиленного бетона от прочности исходного бетона, радиального напряжения в обойме и угла внутреннего трения:

$$R_{bo} = R_{bo} + \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi} \sigma_r; \quad (1.1)$$

В последующих исследованиях [1] в железобетонных образцах, усиленных обоймами из фиброармированных пластиков, напряжения в материале усиления были переменными, что позволило предложить более совершенную эмпирическую зависимость прочности усиленного бетона:

$$R_{bo} = 2,254 \cdot R_b \cdot \sqrt{1 + 7,94 \frac{\sigma_r}{R_b} / - 2 \frac{\sigma_r}{R_b} - 1,254}; \quad (1.2)$$

В работах [3]-[7] разработаны принципы расчета сжатых железобетонных элементов, усиленных фибропластиковой оболочкой, по которым разрушение может происходить из-за разрыва материала оболочки или отслоения материала оболочки в зоне перехлеста материала. При этом предлагаются различные

эмпирические зависимости для определения прочности бетона железобетонных колонн, усиленных обоймами из фиброармированных пластиков:

$$R_{bo} = R_b \left(1 + 6,0 \frac{\sigma_r^{0,7}}{R_b}\right); \quad (1.3)$$

$$R_{bo} = R_b \left[1 + 2,2 \cdot \left(\frac{\sigma_r}{R_b}\right)^{0,84}\right]; \quad (1.4)$$

$$R_{bo} = R_b \left(1 + 2,98 \frac{\sigma_r^{0,7}}{R_b}\right); \quad (1.5)$$

$$R_{bo} = R_b \left(1 + 2,3 \left(\frac{\sigma_r}{R_b}\right)^{0,85}\right); \quad (1.6)$$

В работе [12] приведен анализ напряженно-деформированного состояния железобетонных колонн, усиленных композиционными материалами, которые показывают, что зависимости (1.3-1.6) дают высокую точность только для круглых колонн, а для колонн другой формы сечения получаются значительные расхождения.

В работе [11] показано, что помимо того, что помимо трехосного напряженного состояния в бетоне, связанного с наличием фиброармированной оболочки, сама обойма из фиброармированных пластиков также приобретает объемное напряженное состояние:

- возникают растягивающие от бокового направления в продольном направлении;
- действует пассивный отпор бетона в радиальном направлении;
- возникают сжимающие напряжения, действующие поперек волокон.

Кроме того, обойма из фиброармированных пластиков упруго деформируется вплоть до разрушения усиленного элемента, создавая возрастающее пассивное давление на бетон. Это отличает от работы металлической обоймы, которая при достижении металлом предела текучести прекращает увеличивать давление на

бетон. В связи с тем, фиброармированные пластики прочнее металла, то и усиление с помощью первых гораздо эффективнее.

Еще одна особенность работы обоймы из фиброармированных пластиков заключается в том, что для усиливаемых элементов прямоугольного сечения появляются зоны с ослабленным эффектом упрочнения.

Американские нормативные документы по проектированию сжатых железобетонных конструкций, усиленных фиброармированными пластиками [2], рассматривают две схемы разрушения:

- разрыв материала оболочки;
- отслоение материала оболочки в стыков материала «внахлест».

Для предотвращения первого предельного состояния деформации фиброармированных пластиков ограничиваются деформации величиной, составляющей 75% от предельных деформаций фиброармированного материала при разрыве.

Для предотвращения отслоения материала в местах стыков «внахлест» вводят конструктивные требования по величине нахлеста фиброволокна, который должен быть не менее 100 мм.

Первые исследования сейсмостойкости колонн, усиленных композитными материалам, были проведены в Японии [11, 23] в середине 80-х годов прошлого века. Было проверено два способа усиления: наклеиванием полос композиционного материала на боковые поверхности колонн и создания обойм из композиционного материала на всей высоте усиливаемых колонн. В дальнейшем оба способа усиления получили развитие при восстановлении железобетонных и каменных стен, а также колонн [4, 8].

Успешный опыт восстановления аварийных колонн 7-ми этажной гостиницы в Лос-Анджелесе, поврежденных при землетрясении в июне 1992 года [24], путем устройства обойм из холстовых композитных материалов.

В сообщении [25] приводятся сведения о применении композитных материалов в строительстве.

В последние годы в России накоплен большой опыт усиления [26] ОАО ЦНИИС, НИИЖБ, Гормост, РосдорНИИ, ЗАО «Триада-Холдинг».

В ЦНИИСК им. В.А.Кучеренко выполнены исследования прочности кирпичных и ячеистобетонных простенков, усиленных холстами из углеволокнистой ткани [27], [28] при статической сдвигающей нагрузке.

Исследования сжатых железобетонных колонн и кирпичных столбов, усиленных композиционными материалами, было выполнено А.Н. Костенко [29] при осевом и внецентренном сжатии.

В работе Гапонова В.В. [30] приводятся результаты испытаний железобетонных балок, имитирующих ребра жесткости в сборных плитах, а также натуральных плитах ДП-15-1т пролетом 5,4 м и 4,2 м, усиленных поверхностным наклеиванием углеродной сетки. Коэффициент усиления изменялся в диапазоне 1,5-6,0. Разрушение по поперечной силе происходило по наклонному сечению в месте окончания усиления.

В статье Литвинова Артема [31] приведены сведения о свойствах карбоновых фибропластиков, применяемых в строительных конструкциях.

В работе [32] предлагаются четыре конечно-элементные модели для программного комплекса SCAD Office:

- монолитные колонны, обернутые углеволокном по всей длине с расположением волокон перпендикулярно продольной оси колонны;
- монолитные колонны, обернутые обоями из углеволокна шириной 300 мм через 150 мм;
- монолитные колонны, обернутые обоями из углеволокна шириной 200 мм с неравномерным шагом;
- монолитные колонны без внешнего армирования.

В результате работы сформирована методика моделирования внешнего армирования колонн в программном комплексе SCAD Office.

В Москве были [33] были проведены исследования прочности железобетонных колонн, усиленных наклеиванием с боковых сторон в один слой углеволокнистой ткани Sika Wrap и полосами шириной 50 мм, наклеенных в два слоя с шагом около 200 мм. Прочность колонн, усиленных бандажами из полос увеличилась на 80%, а образцов усиленных по боковым сторонам слоем углепластика – на 100%.

В работе [34] рассматривается методика расчета металлических конструкций, усиливаемых фиброармированными пластиками, методом предельного равновесия. Излагаются особенности расчета конструкций как в неповрежденном состоянии, так и в поврежденном (например, от коррозии). Учитываются пять схем возможных разрушений: разрушение от растяжения в усиливаемой балке, разрушение от растяжения фиброармированного пластика, местное выпучивание усиливаемой балки, расслоение фиброармированного пластика, разрушение от сдвига. При этом вводятся следующие допущения: надежное сцепление усиливаемой балки и материала усиления; сечения, плоские до деформации, остаются плоскими после деформации, но поворачиваются оставаясь перпендикулярными к средней линии; толщина усиливающего фиброармированного пластика пренебрежимо мала по сравнению с высотой сечения; влияние жесткости адгезивного (клеявого) слоя на жесткость изгибаемого элемента пренебрежимо мала.

В работе С-Петербургского ГАСУ [35] представлены результаты экспериментальных исследований прочности по поперечной силе железобетонных балок, усиленных в зоне наибольшей поперечной силы полосами из однонаправленных углеродных фиброармированных сеток. Испытано 9 образцов железобетонных балок, которых три эталонные имели различное количество стальных хомутов, а по три балки были усилены вертикальными или наклонными полосами сеток шириной по 50 мм, охватывающими три стороны балки. Опытные

образцы были испытаны по схеме двухпролетной шарнирно опертой балки, нагруженной на расстоянии 300 мм от средней опоры двумя равными сосредоточенными поперечными силами. Усиление фиброармированными лентами повысило прочность по поперечной силе балок без поперечной стальной арматуры в 2,04-2,32 раза, а балок, имеющих стальную поперечную арматуру, на 9-26 % и 5-11,5 %. Предложен способ конечно-элементного моделирования для расчета численным методом на программных вычислительных комплексах, а также практический метод учета внешнего армирования поперечного сечения.

В статье НИИЖБ [36] излагается методика расчета прочности железобетонных конструкций, усиленных внешним армированием в виде лент ламината и ламеля с использованием арамидных, углеродных или стеклянных волокон, построенная на моделях СП 63.13330.2012 и с использованием рекомендаций зарубежных норм. Рассматривается как разрушение вследствие полного использования прочностных свойств элементов усиления, так и от преждевременного отслоения элементов усиления. Исключение возможности разрушения от отслоения элементов усиления рекомендуется обеспечивать ограничением расчетного сопротивления растяжению композиционных материалов.

В обзорной информации по международному опыту сейсмоусиления фиброармированными пластиками несущих конструкций зданий, выполненному холдинговой компанией «Композит» (Россия) [37], приводятся примеры выполненных исследований:

1. В Беркли (Калифорния, США) проведены сопоставительные испытания железобетонных стен без усиления, усиленных железобетонными обоймами и усиленных фиброармированными обоймами, которые показали, что неусиленные образцы разрушаются хрупко, железобетонные обоймы сместили зону пластического шарнира выше зоны усиленного участка, а бандажи из

углеродного волокна повысили прочность и жесткость стен, а также уменьшили уровень повреждения стен;

2. В Турции (Стамбульский Технический Университет) усилены композитными материалами поврежденные землетрясением стены складского помещения, фрагмент испытания которых показал высокую степень усиления;

3. В Португалии восстановлены поврежденные землетрясением железобетонные колонны, которые после усиления бандажами из углеродных волокон восстановили свою несущую способность;

4. В Японии более 200 видов конструкций усилены поверхностным наклеиванием фиброармированных пластиков;

5. В России (ФГБУ ВНИИ ГОЧС) испытали четыре фрагмента зданий и разработали «Альбом конструктивных решений по сейсмоусилению конструктивных железобетонных и каменных зданий композитными материалами FIBARM на основе углеволокна»:

– эталонный фрагмент со стенами из каменной кладки размерами 5,82x4,8x2,2 м, запроектированный для сейсмичности 5-6 баллов (не сейсмический вариант), фрагмент состоял из каменных стен, объединенных сборными многопустотными плитами перекрытий;

– такой же фрагмент со стенами из каменной кладки, усиленный композитным материалом FIBARM в соответствии с расчетом для 8-9 балльной сейсмичности;

– эталонный фрагмент железобетонного каркаса, запроектированный для сейсмичности 5-6 баллов (не сейсмический вариант), каркас фрагмента образован железобетонными колоннами, ригелями и многопустотными плитами перекрытий;

– фрагмент железобетонного каркаса, усиленный композитным материалом FIBARM в соответствии с расчетом для 8-9 балльной сейсмичности.

Опытные фрагменты зданий были испытаны на пневматической сейсмоплатформе вибромашиной, создававшей ускорения, эквивалентные 3-9,5 баллов. Обрушение эталонного не усиленного каркаса было вызвано разрушением колонн в зоне заземления в фундаментную плиту и сопровождалось взаимным смещением плит перекрытий между собой и ригелем. Фрагмент усиленного каркаса здания выдержал динамические испытания без существенных повреждений.

Значительные исследования усиленных композитными материалами железобетонных конструкций горнотехнических зданий и сооружений выполнены под руководством Бокарева С.А. [38]-[40]. Проведен комплекс исследований прочности полномасштабных моделей и натуральных конструкций железобетонных колонн и балок, усиленных полимерволокнистыми холстами и лентами ламеля с учетом температурных факторов.

Проведены натурные испытания конструкций моста через реку Тарьсма на 138 км автомобильной дороги «Новосибирск-Ленинск-Кузнецк», усиленного композиционным материалом из углеродного волокна [41], выполненные без остановки движения транспорта.

В исследованиях НИИЖБ им. А.А. Гвоздева [42]-[43] представлены результаты исследования работы сжатых железобетонных конструкций, усиленных путем наклеивания композитных материалов на бетон вдоль продольной оси элемента. Предлагается методика определения прочности бетона и величина допустимых деформаций фибропластиковой арматуры с учетом высоты сжатой зоны.

В работе [44] рассматривается прочность внецентренно сжатых железобетонных конструкций, усиленных обоймами из композитных материалов в поперечном направлении. Установлено, что с увеличением эксцентриситета приложения сжимающей силы эффект обоймы снижается. Предложена зависимость для учета прямоугольной формы сечения усиливаемой конструкции.

Рекомендована зависимость для определения расчетной прочности бетона с учетом продольного армирования композитным материалом:

$$R_{b3} = R_b + k_{ef} \cdot k_e \cdot R_f \cdot \mu_f; \quad (1.7)$$

Предельные деформации бетона определяются по формуле:

$$\varepsilon_{b3} = \varepsilon_{b2} + 2\mu_f \frac{R_{fn}}{E_b}; \quad (1.8)$$

В работе [45] приведены примеры зданий в Москве, в которых выполнено усиление железобетонных перекрытий с помощью высокопрочных фиброармированных композитов.

В работе [46] предлагается вариант теории прочности и деформативности массивных конструкций из бетона и железобетона, находящихся в сложном напряженном состоянии, с использованием аппарата математической теории пластичности идеально пластичной среды. Предложена методика определения предельной несущей способности, а также деформационная теория пластичности бетона и железобетона в области эксплуатационных режимов работы, находящихся в сложном напряженном состоянии.

В работе [47] устанавливаются связи между напряжениями и деформациями бетона при трехосном сжатии на основании экспериментальных данных. Теоретический подход к анализу этих данных позволяет выявить новые свойства коэффициентов матрицы податливости бетона как ортотропного материала. Учет образования структурных трещин по трем направлениям позволяет определить деформации бетона по трем направлениям с использованием объема элемента.

В последние годы в Казахстане (АО КазНИИСА) проводятся экспериментальные исследования работы железобетонных конструкций, усиливаемых различными типами композиционных материалов [48]-[52], в которых изучались:

– прочность и деформативность сжатых и внецентренно сжатых железобетонных конструкций, усиленных бандажами из нескольких слоев оборачивающих листов (тканей) с направлением фиброволокон перпендикулярно продольной оси усиливаемого элемента;

- работа нормальных сечений изгибаемых балочных железобетонных конструкций, усиленных наклейкой ламелей или ламината на растянутую поверхность с направлением фиброволокон вдоль усиливаемой конструкции;
- прочность по поперечной силе наклонных сечений изгибаемых железобетонных конструкций, усиленных наклейкой в приопорной зоне усиливаемой конструкции вертикальных или наклонных сеток;
- влияние динамических повторных нагрузок на работу сжатых и изгибаемых железобетонных конструкций, усиленных фиброармированными пластиками.

В диссертации использованы следующие нормативные документы по проектированию усиления строительных конструкций фиброармированными пластиками [53]-[101].

Заключения по главе 1

Приведенные сведения о методах усиления строительных конструкций показывают основные преимущества метода поверхностного усиления железобетонных конструкций фиброармированными пластиками, уменьшающие трудоемкость и сроки выполнения работ по усилению, увеличивающие возможные пределы повышения прочности и качество усиления, содействующие повышению технического уровня строительства.

Изложены особенности усиления сжатых железобетонных конструкций при различных видах напряженного состояния. Показана историческая последовательность развития методов усиления железобетонных конструкций фиброармированными пластиками и описаны примеры применения этих методов.

Выполненный анализ результатов выполненных экспериментальных исследований железобетонных конструкций, усиленных фиброармированными пластиками, свидетельствует об ограниченности таких работ и недостаточной изученности напряженного состояния при различном характере действующих нагрузок. Практически отсутствуют сведения о поведении железобетонных

конструкций, усиленных фиброармированными пластиками, при динамических нагрузках.

Данная диссертация посвящена исследованию работы сжатых железобетонных конструкций, усиленных обоймами из фиброармированных пластиков, при статических и динамических, типа сейсмических, нагрузках.

ГЛАВА 2. ПРОГРАММА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.1. Методика экспериментальных исследований

Изучение работы сжатых элементов, усиленных с помощью фиброармированных пластиков, производилось на образцах бетонных цилиндров и призм различных размеров, различающихся количеством слоев сеток усиления.

Часть образцов испытана при осевом действии квазистатического сжатия на гидравлических прессах ИПС-200 и ALPNA 3-3000S. Для этого образцы подвергались действию осевого сжатия с поэтапным увеличением величины продольной сжимающей силы со скоростью 0,3 МПа/сек., вплоть до разрушения образца. Величина этапа увеличения нагрузки не превышала $5 \div 8$ % от разрушающей нагрузки.

В процессе статического нагружения замерялись продольные и поперечные деформации опытных образцов с помощью тензодатчиков с базой 50 мм, наклеенных на все боковые грани образцов, и автоматического измерителя деформаций АИД-4М (рис. 2.1).

Влияние динамических повторных нагружений изучалось по результатам динамических испытаний опытных образцов цилиндров при положительном коэффициенте асимметрии изменения усилий ($\rho = 0,0 \div 0,1$) и частоте нагружения 1,0-1,5 герца. Динамическая нагрузка создавалась с помощью гидравлического домкрата и гидродинамической машины МВГ-1 (Рис. 2.2-2.5), создавая несколько сот циклов нагружения. Часть образцов после приложения заданного количества повторных нагружений разрушались при статическом действии сжатия, а часть образцов подвергалась повторным нагружением до разрушения образцов.



Рис. 2.1. Общий вид испытания усиленных образцов на осевое сжатие на гидравлических прессах ALPHA 3-3000S и ИПС-200



Рис. 2.2. Испытание сжатых образцов динамической нагрузкой



Рис. 2.3. Гидродинамическая машина MBG-1



Рис. 2.4. Генератор и усилитель импульсов для управления гидродинамической машиной MBG-1



Рис. 2.5. Измерительный комплекс РСМ-8 для регистрации параметров динамических испытаний образцов

2.2. Опытные образцы

Опытные образцы в каждой партии включали образцы-близнецы без усиления и с усилением однонаправленными карбоновыми фиброволокнами сетками.

Они включали следующие типы:

- образцы бетонных цилиндров различных размеров без усиления, а также усиленные обертыванием в один, два и три слоя материалом серии FibArm Tape 530/300 или MBRACE FIB CF 230/4900.530g/5.100m;
- образцы бетонных призм различных размеров без усиления, а также усиленные обертыванием в один, два и три слоя материалом серии MBRACE S&P C Sheet 240.

Изучение работы сжатых элементов производилось на двух партиях бетонных цилиндров и одной партии бетонных призм. Первая партия образцов цилиндров состояла из трех серий бетонных цилиндров следующих размеров: диаметром

100 мм и длиной 200 мм (серия К10), диаметром 150 мм и длиной 300 мм (серия К15), диаметром 200 мм и длиной 400 мм (серия К20). Эти образцы усиливались сетками FibArm Tape 530/300.

Вторая партия образцов состояла из цилиндров (серия КII) диаметром 150 мм и длиной 300 мм, которые усиливались обоями из сеток MBRACE FIB CF 230/4900.530g/5.100m в 1, 2 или 3 слоя.

Образцы бетонных призм включали две партии бетонных призм размерами 100x100x400 мм (46 образцов) и одну партию призм размерами 200x200x800 мм (21 образец).

Каждая партия образцов изготавливалась из одного замеса бетона и находилась в лабораторном помещении в течение нескольких месяцев при температуре 18⁰-20⁰ С и влажности около 60% «Рис. 2.6.». Часть бетонных образцов каждой серии была испытана без усиления, а остальные образцы каждой серии были усилены путем однослойного, двухслойного или трехслойного обертывания (обклеивания) тканевым материалом. В Таблицах 2.1-2.2 приведены данные по количеству опытных образцов цилиндров в первой и второй партии



Рис. 2.6. Вид опытных образцов бетонных цилиндров

Таблица 2.1 – Характеристики опытных образцов бетонных цилиндров серий К10, К15 И К20, усиленных FibArm Tape 530/300

Марка серии образцов	Усиление обертыванием полимерной тканью	Вид испытания	Кол. шт.
K10-0 K15-0 K20-0	Без усиления	Статическое осевое сжатие	3 3 3
K10-1 K15-1 K20-1	Однослойное усиление	Статическое осевое сжатие	3 3 3
K10-2 K15-2 K20-2	Двухслойное усиление	Статическое осевое сжатие	3 4 2
K15-д	Однослойное усиление	Динамическое осевое сжатие	6

Таблица 2.2 – Характеристики опытных образцов бетонных цилиндров серии КII, усиленных MBRACE FIB CF 230/4900.5300g/5 530/300

Марка серии образцов	Усиление обертыванием полимерной тканью	Вид испытания	Кол. шт.
КII-1 КII-2 КII-3	Один слой сетки Два слоя сетки Три слоя сетки	Статическое осевое сжатие	3 3 3
КII-д	Однослойное усиление	Динамическое осевое сжатие	3

Опытные бетонные образцы цилиндров первой партии усиливались карбоновыми однонаправленными сетками FibArm Tape 530/300 («Препрег-Современные Композиционные Материалы» Холдинговой компании «Композит», Россия), пропитанными слоем эпоксидной смолы. Сетки имели ширину 300мм, поверхностную плотность 530 г/м², расчетную толщину ленты 0,294 мм с однонаправленными углеродными фиброволокнами (нормируемые характеристики: модуль упругости волокна 240 ГПа, прочность на растяжение волокна 4,3 ГПа, прочность на растяжение углепластика 3,6 ГПа).

Опытные бетонные образцы цилиндров второй партии усиливались карбоновыми однонаправленными сетками MBRACE FIB CF 230/4900.539g/5.100 m (Химической компании «BASF The Chemical Company» Германия). Сетки имели ширину 230мм, удельный вес 530 г/м², толщину волокон 0,294 мм с однонаправленными углеродными фиброволокнами (нормируемые характеристики: модуль упругости волокна 230 ГПа, прочность на растяжение волокна 3,6 ГПа).

Для уточнения фактических физико-механических характеристик сеток проведены контрольные испытания опытных образцов сетки в виде полос шириной около 50 мм длиной около 600 мм, на разрывной машине Р-50 с поэтапным увеличением растягивающего усилия. В процессе испытания замерялись продольные удлинения сетки с помощью автоматического измерителя деформаций АИД-4М и датчиков с базой 20мм, наклеенных на продольные волокна (рис. 2.7).



Рис. 2.7. Испытание образца сеток FibArm Tare 530/300

Разрушение образцов происходило в зонах захвата сетки в зажимы разрывной машины. Удлинение волокон Fib Arm Tare 530/300 при этом составляло 0,94%, а величина напряжений – 2,39 ГПа. Диаграмма растяжения сеток носит линейно

упругий характер. Замеры длины образцов, произведенные по предварительно нанесенным меткам по длине с шагом 20 мм, после испытания показали, что в волокнах нет остаточных деформаций. Величина модуля упругости волокон находилась в пределах $E = (253-278) \text{ кН/мм}^2$, в среднем составляя 265 ГПа.

Удлинение волокон MBRACE FIB CF 230/4900.539g/5.100 при разрыве концов сетки в зажимах составляло 1,25%, а величина напряжений – 2,94 ГПа. Диаграмма растяжения сеток носит линейно упругий характер. Замеры длины образцов, произведенные по предварительно нанесенным меткам по длине с шагом 20 мм, после испытания показали, что в волокнах нет остаточных деформаций. Величина модуля упругости волокон находилась в пределах $E = (232-238) \text{ кН/мм}^2$, в среднем составляя 235 ГПа.

Разрыв образцов S&P C Sheet 240 происходило в зонах захвата сетки в зажимы разрывной машины при величине растягивающих усилий 183-245 кН. Диаграмма растяжения сеток носит линейно упругий характер. Замеры длины образцов, произведенные по предварительно нанесенным меткам по длине с шагом 20 мм, после испытания показали, что в волокнах нет остаточных деформаций. Величина модуля упругости волокон находилась в пределах $E = (236-245) \text{ кН/мм}^2$, в среднем составляя 240 ГПа. Временное сопротивление волокон составляет 3800 МПа.

Заключения по Главе 2

Экспериментальные исследования прочности сжатых железобетонных конструкций, усиленных поверхностным наклеиванием обойм из новых типов карбоновых фибропластиковых сеток, применяемых в Казахстане.

Усиление сжатых железобетонных элементов обоймами из фиброармированных пластиков, вызывает трехосное сжатие в бетоне, при котором прочность элементов может увеличиться в несколько раз.

В исследованиях реализовано две схемы разрушения сжатых бетонных образцов, усиленных обоймами их карбоновых фиброволокон:

- разрыв фиброармированных сеток усиления и хрупкое раздавливание бетона;
- разрыв стыков сопряжения сеток, связанный с недостаточностью величины перехлеста сеток, после чего происходит разрушение бетона.

ГЛАВА 3. ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ СЖАТЫХ БЕТОННЫХ ЦИЛИНДРОВ, УСИЛЕННЫХ ОБЕРТЫВАНИЕМ ПОЛИМЕРНЫМИ СЕТКАМИ

3.1. Исследование работы цилиндрических образцов при статическом нагружении

Статические испытания бетонных цилиндров и кубов производились при осевом действии квази-статического сжатия на гидравлических прессах ИПС-200 и ALPHA 3-3000S. Образцы подвергались действию осевого сжатия с поэтапным увеличением величины продольной сжимающей силы со скоростью 0,3 МПа/сек., вплоть до разрушения образца.

В таблицах 3.1 и 3.2 представлены данные по прочности на сжатие бетонных кубов первой и второй партии.

Таблица 3.1- Прочность на сжатие бетонных кубов первой партии (серий К10, К15 и К20)

№	Размеры сечения ахб , см	Разрушающее усилие, N. кН	Прочность R , МПа	Средняя прочность, R_{ср} , МПа
1	15x15	897	40,0	38,1
2	15x15,2	845	37,1	
3	15x15	836	37,2	

Таблица 3.2- Прочность на сжатие бетонных кубов второй партии (серия КII)

№	Размеры сечения ахб , см	Разрушающее усилие, N, кН	Прочность R , МПа	Средняя прочность, R_{ср} , МПа
1	15x15	714,6	31,76	31,65
2		647,1	28,76	
3		730,1	32,45	
4		756,7	33,63	

Первая партия образцов состояла из трех серий образцов (K10, K15 и K20), которые усиливались однонаправленными сетками FibArm Tape 530/300.

В таблице 3.3 представлены данные по прочности бетонных цилиндров сечением 100x200 (dxh) мм серии K10, величине усиления образцов полимерными сетками, соотношении прочности серий, предельным продольным и поперечным деформациям.

Таблица 3.3- Прочность на сжатие бетонных цилиндров серии K10 сечением 100x200 (dxh) мм

Марка образцов	Разрушающее усилие N, кН	Напряжения, σ , МПа	Средние напряжения $\sigma_{ср}$, МПа	Сравнение прочности	Деформации, 10^{-5}	
					$\epsilon_{пр}$	$\epsilon_{поп}$
K10-0-1	235	25,4	26,6	1,0	190	50
K10-0-2	210	22,9			205	32
K10-0-3	290	31,4			200	32
K10-1-1	702	75,9	79,9	3,0	500	360
K10-1-2	701	75,1			415	310
K10-1-3	797	88,7			489	430
K10-2-1	900	98,3	86,2	3,24	410	242
K10-2-2	700	77,9			260	150
K10-2-3	740	82,3			415	160
K10-3-1	1246	138,6	147,1	5,53	380	220
K10-3-2	1500	163,8			500	270
K10-3-3	1250	139,0			450	285

Анализ данных таблицы 3.3 показывает, что усиление образцов путем обертывания (обклеивания) материалом серии FibArm Tape 530/300 привело к существенному повышению прочности сжатых образцов. Так, однослойные сетки

вызвали увеличение прочности в среднем в 3 раза, двухслойные сетки привели к увеличению прочности в 3,24 раза, а трехслойные сетки – в 5,53 раза.

На рис. 3.1-3.4 представлены диаграммы продольных и поперечных деформаций от величины сжимающих напряжений для каждой серии образцов.

Разрушение образцов, усиленных карбоновыми фиброволокнами (ФАП), происходит постепенно. Сначала появляется треск, вызванный разрывом отдельных фиброволокон, с увеличением нагрузки затем треск увеличивается и происходит хрупкое раздавливание бетона в зоне разрыва сетки, сопровождающееся резким звуком. Чем больше слоев усиления, тем раньше начинается процесс разрыва волокон сеток (рис. 3.5 и 3.6.).

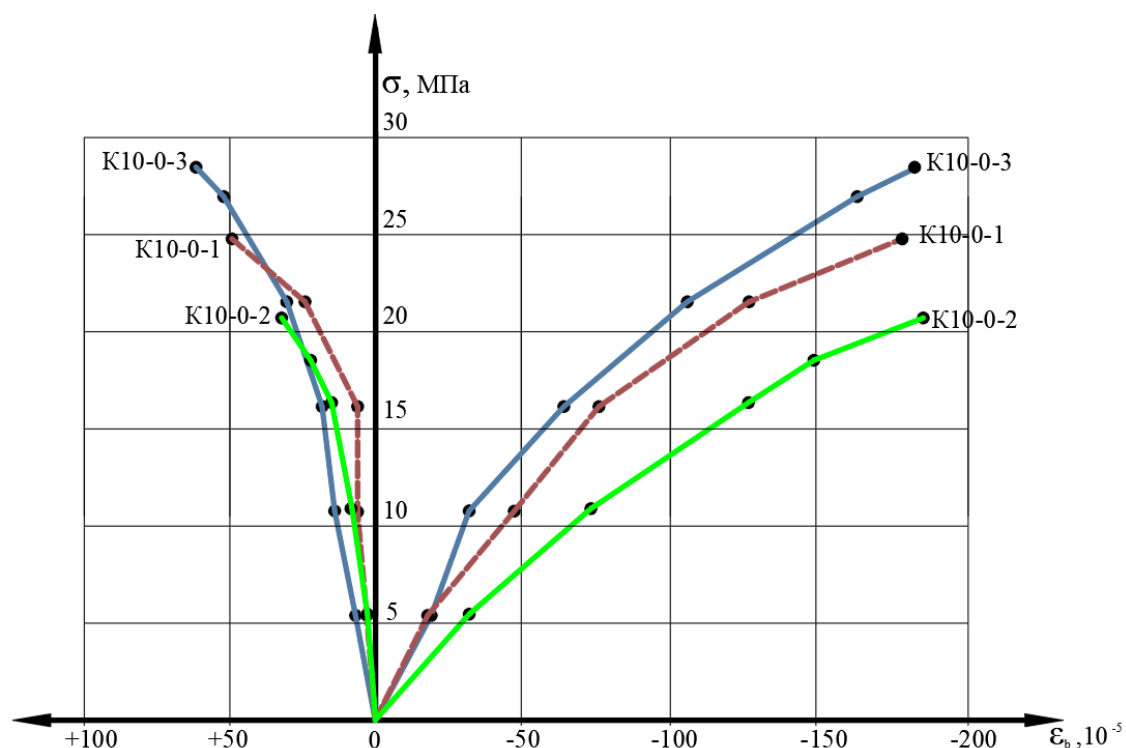


Рис. 3.1. Диаграмма продольных и поперечных деформаций образцов серии К10-0 (без усиления сетками)

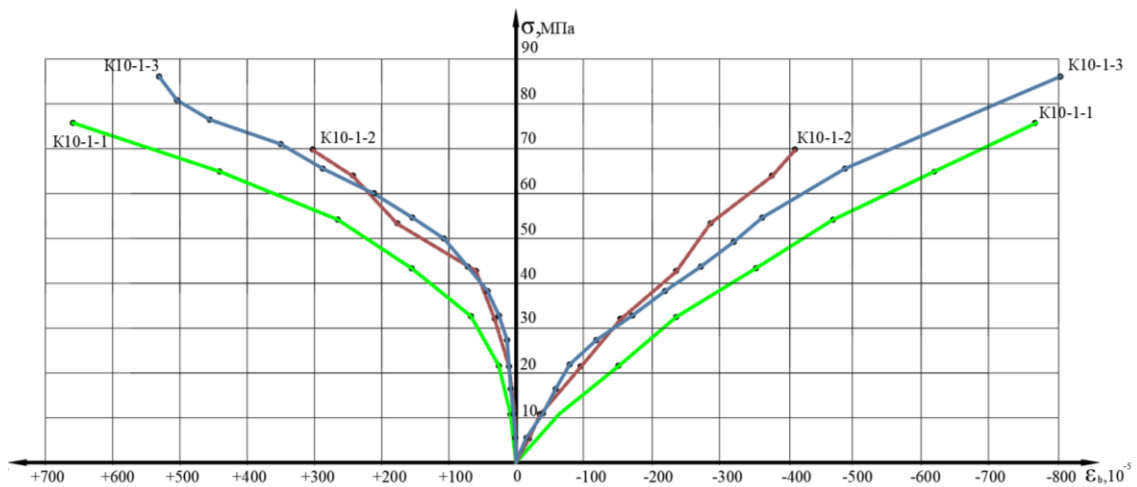


Рис. 3.2. Диаграмма продольных и поперечных деформаций образцов серии К10-1 (усилены одним слоем сетки)

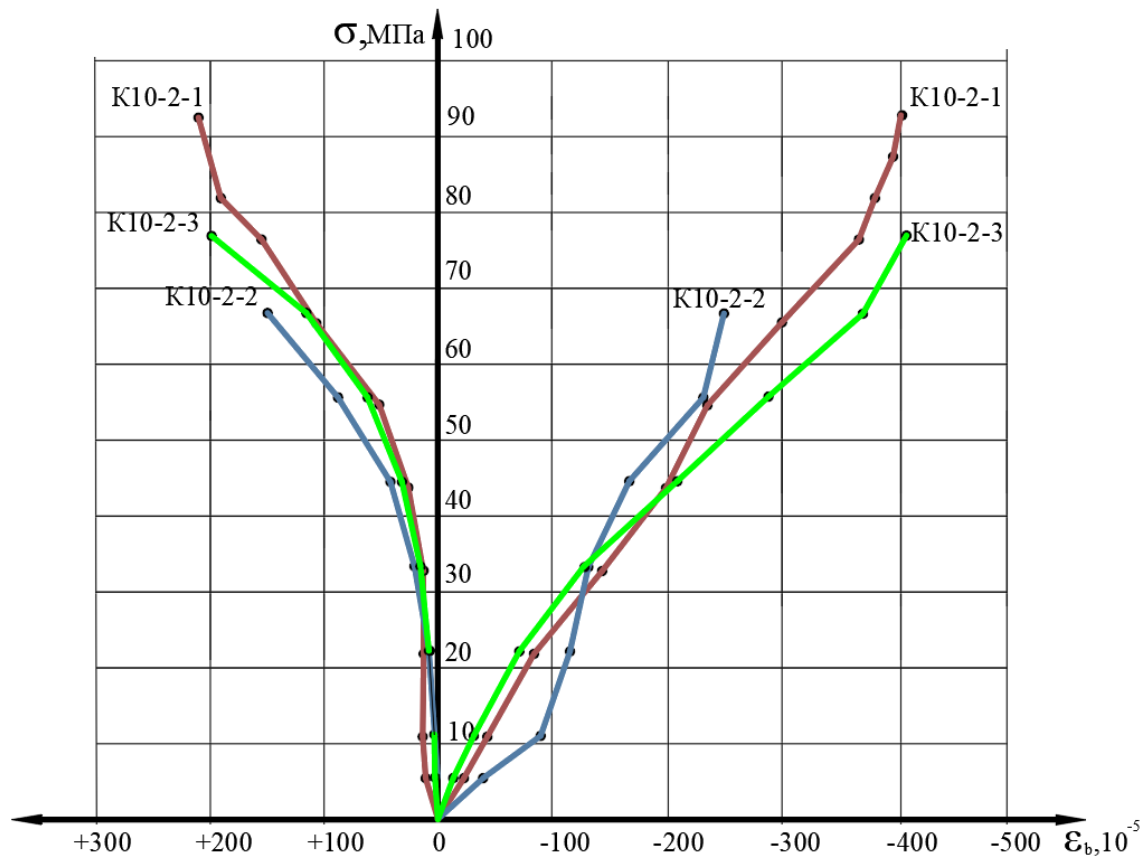


Рис. 3.3. Диаграмма продольных и поперечных деформаций образцов серии К10-2 (усилены двумя слоями сетки)

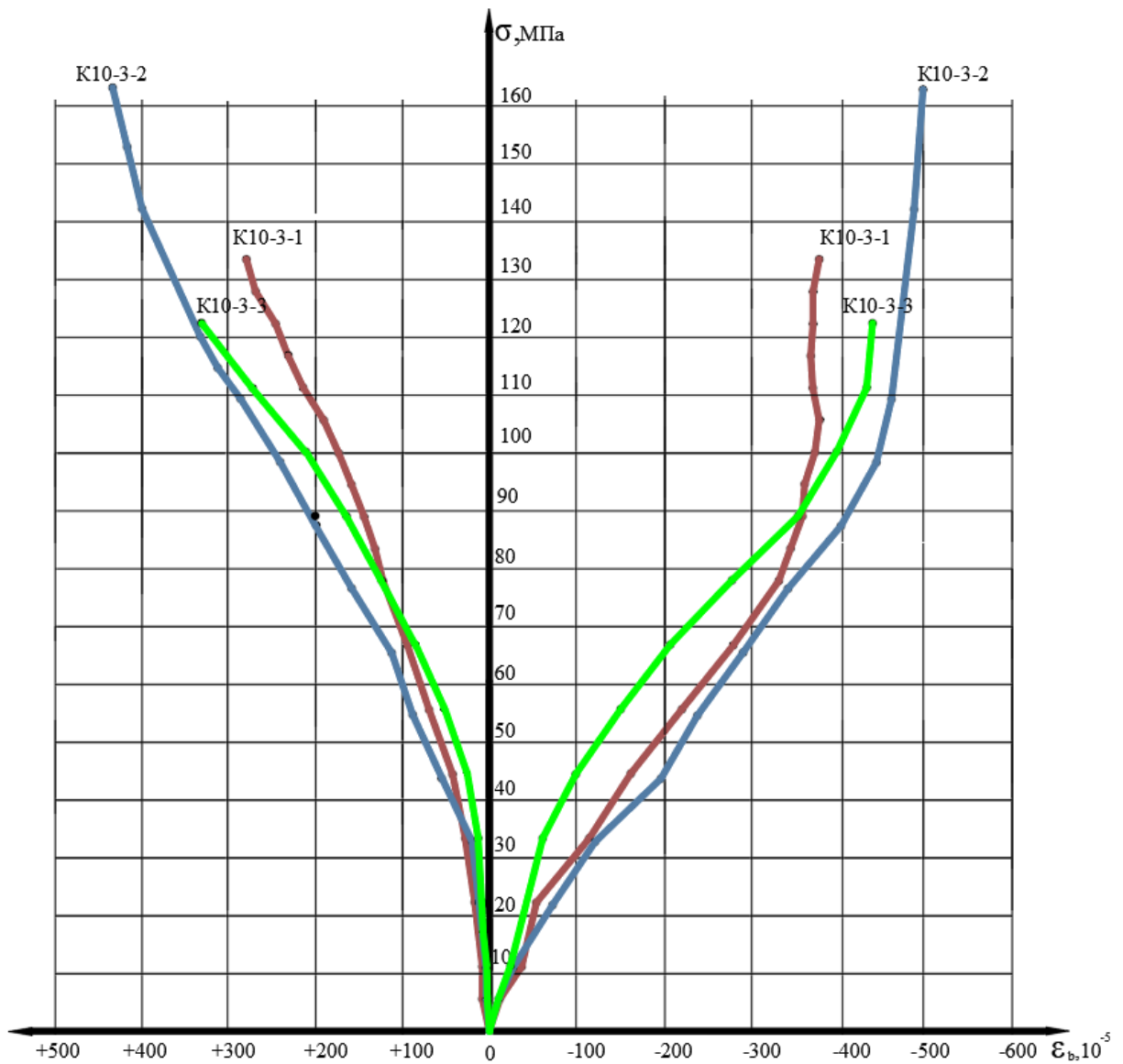


Рис. 3.4. Диаграмма продольных и поперечных деформаций образцов серии К10-3 (усилены тремя слоями сетки)

Анализ развития продольных и поперечных деформаций образцов показывает, что продольные деформации образцов с одним слоем сетки увеличились в 3,24 раза, поперечные деформации – в 13,2 раза; для образцов усиленных двумя слоями сетки, продольные деформации увеличились в 1,82 раза, поперечные деформации – в 4,6 раза; для образцов усиленных тремя слоями сетки, продольные деформации увеличились в 2,1 раза, поперечные деформации – в 15,6

раз. Для образцов, усиленных сетками, поперечные деформации по величине приближаются к продольным деформациям.

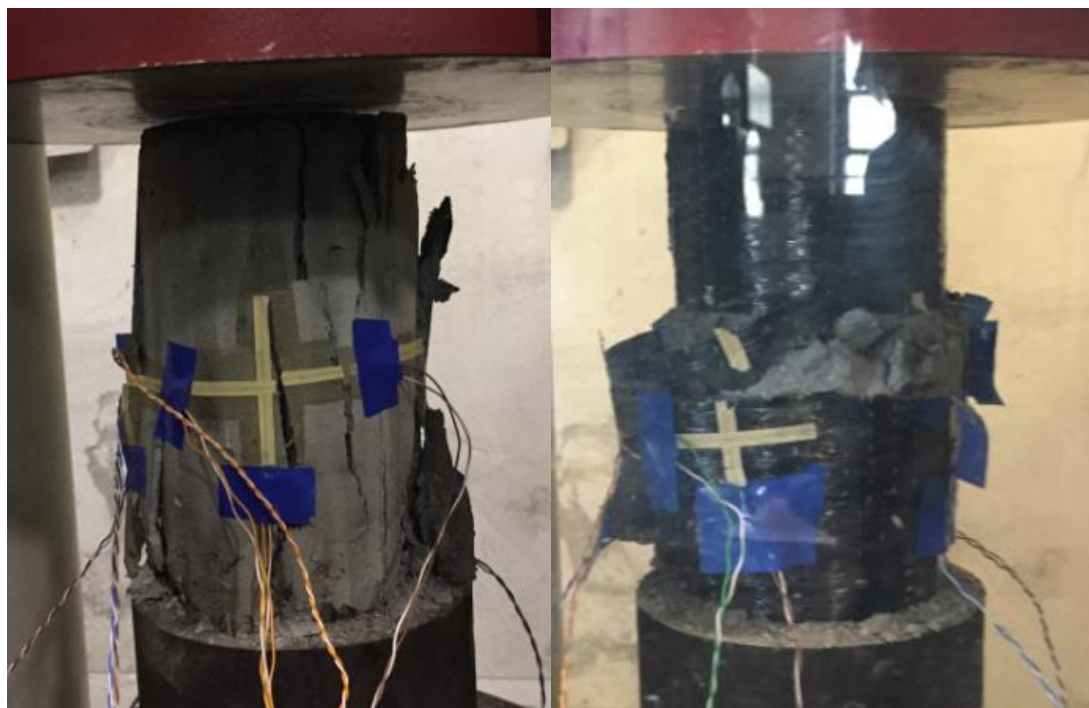


Рис. 3.5. Характер разрушения образцов серий К10-0 и К10-1



Рис. 3.6. Характер разрушения образцов серий К10-2 и К10-3

На рис. 3.7 показано соотношение прочности образцов серии К10, не имеющих усиления, усиленных 1, 2 и 3 сетками усиления.

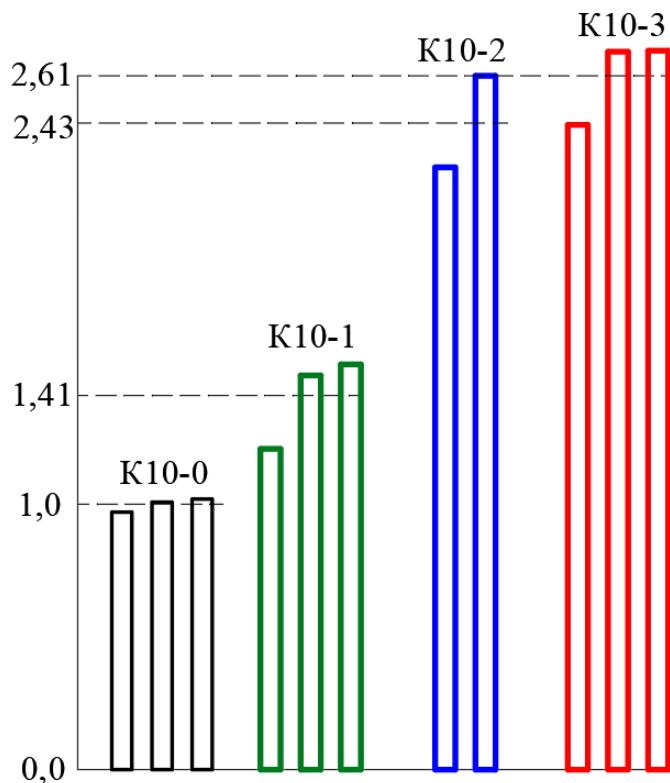


Рис. 3.7. Соотношение прочности образцов серии К10

На рис. 3.8-3.10 представлены графики зависимости сжимающих напряжений от действия продольной силы и от действия обжатия бетона обоймой из сеток ФАП, определенных по формуле:

$$\sigma_f = \frac{A_f \cdot \varepsilon_f \cdot E_f}{0,5 \cdot h} \quad (3.1)$$

где σ_f - сжимающие напряжения в бетоне от обжатия обоймой ФАП;

A_f - площадь сечения сетки шириной 1 см ($A_f = 0,235 \text{ см}^2$);

ε_f - деформации волокон ФАП;

E_f - модуль деформации ФАП ($E_f = 265 \text{ ГПа}$);

h - поперечный размер образца ($h = 10 \text{ см}$);

Анализ соотношения напряжений при объемном напряженном состоянии бетона показывает, что после превышения прочности бетона на сжатие наблюдается ускоренное увеличение сжимающих напряжений в поперечном направлении, а перед разрушением усиленных сетками ФАП образцов напряжения поперечного обжатия бетона могут превысить продольные напряжения.

На рис. 3.11-3.13 представлены графики изменения объема бетона в процессе увеличения напряжений обжатия. Изменение объема бетона определялось по формуле:

$$\Delta V = 2\varepsilon_{\text{пп}} - \varepsilon_{\text{пр}} \quad (3.2)$$

где ΔV – относительное увеличение объема бетона;

$\varepsilon_{\text{пп}}$ и $\varepsilon_{\text{пр}}$ – относительные поперечные и продольные деформации бетона.

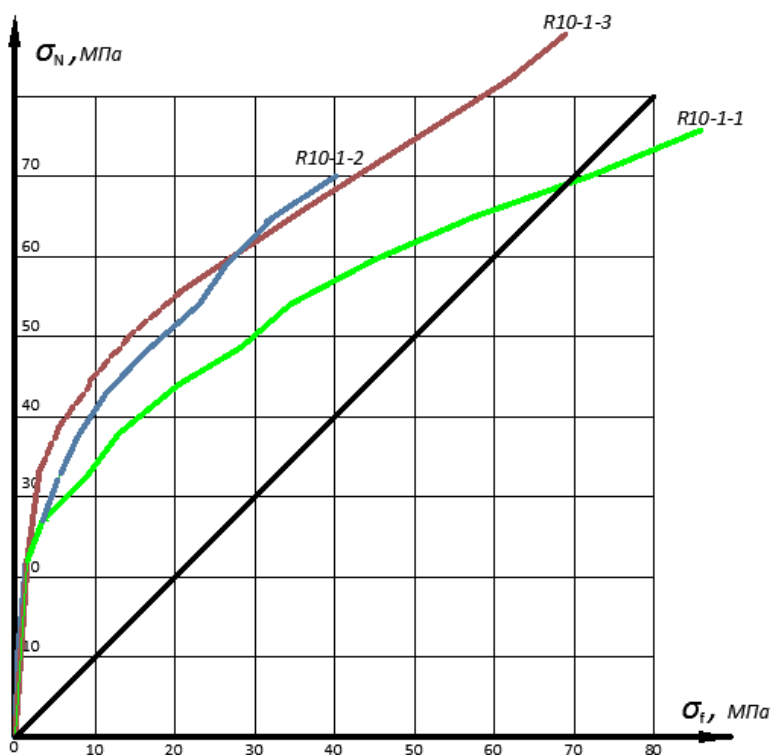


Рис. 3.8. Соотношение сжимающих напряжений от действия продольной силы и сжимающих напряжений от обжатия обоймой ФАП образцов серии К10-1 (1 слой сетки)

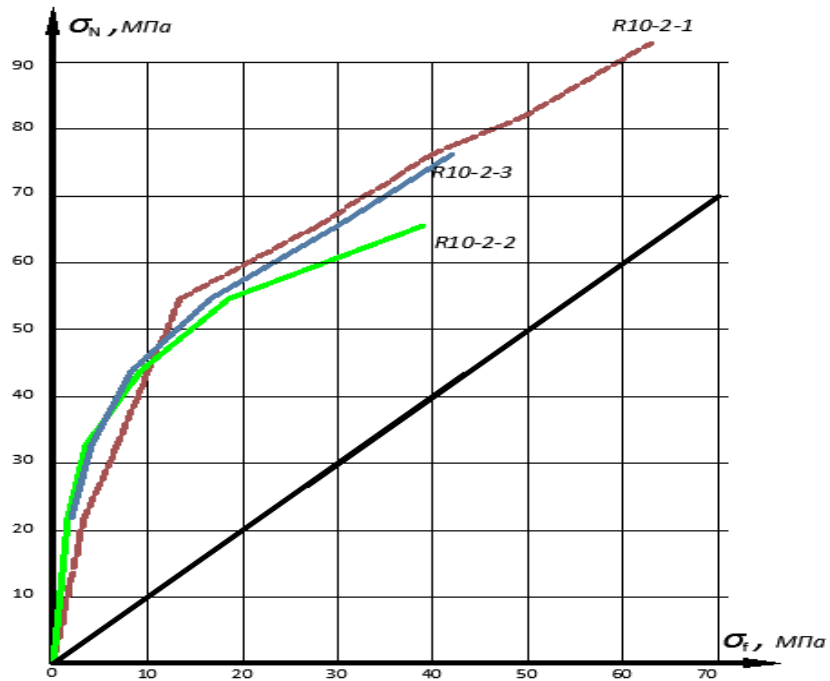


Рис. 3.9. Соотношение сжимающих напряжений от действия продольной силы и сжимающих напряжений от обжатия обоймой ФАП образцов серии К10-2 (2 слоя сетки)



Рис. 3.10. Соотношение сжимающих напряжений от действия продольной силы и от обжатия обоймой ФАП образцов серии К10-3 (3 слоя сетки)

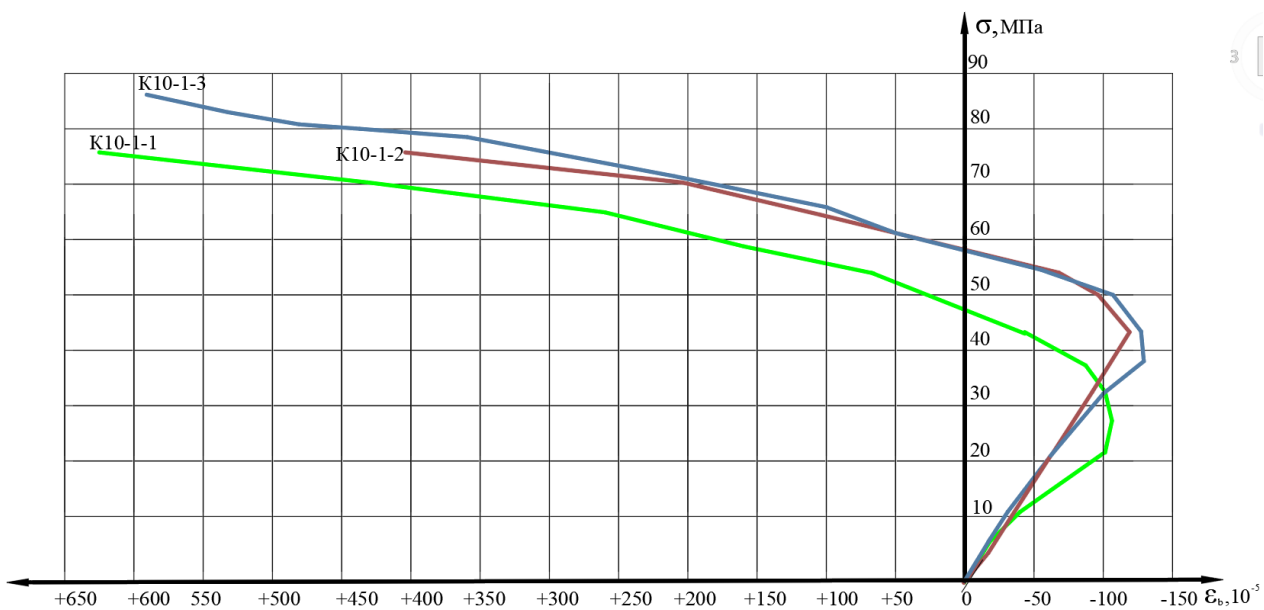


Рис. 3.11. Изменение объема бетона в процессе нагружения образцов серии К10-1 (1 слой сетки)

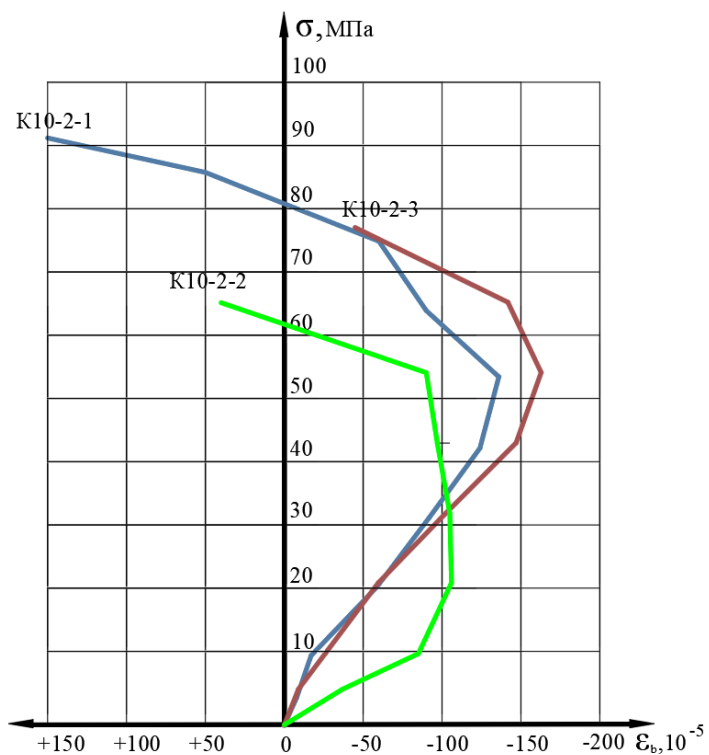


Рис. 3.12. Изменение объема бетона в процессе нагружения образцов серии К10-2 (2 слоя сетки)

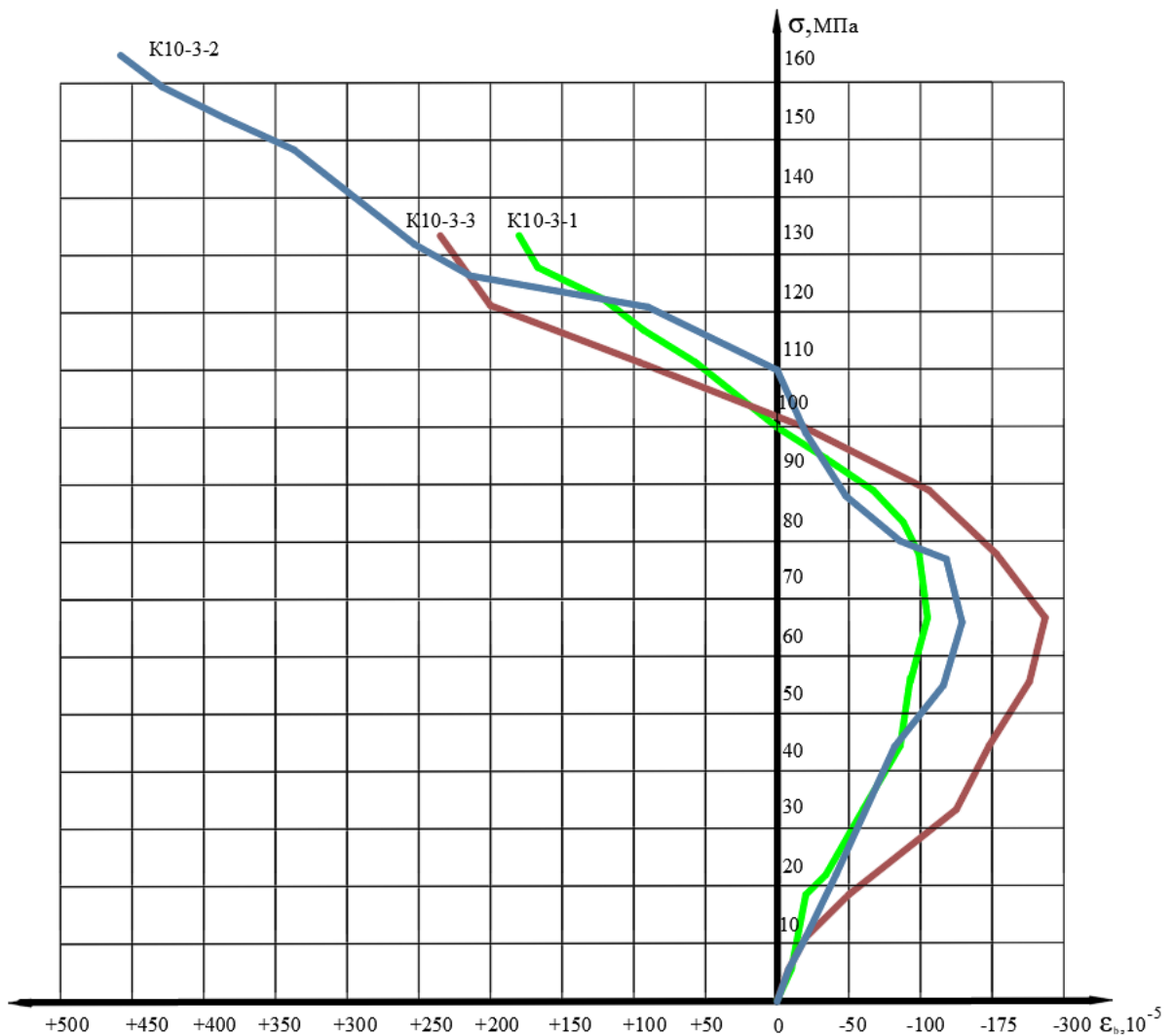


Рис. 3.13. Изменение объема бетона в процессе нагружения образцов серии К10-3 (3 слоя сетки)

Анализ рис. 3.11-3.13 показывает, что начало образования микротрещин в бетоне в образцах, усиленных сетками ФАП, начинается после превышения прочности не усиленного бетона, затем начинается ускоренное увеличение объема бетона, при величине напряжений в усиленном бетоне около 70-80% от разрушающих напряжений объем бетона близок к первоначальному объему (объему бетона до нагружения продольной силой), а перед исчерпанием прочности усиленных сетками ФАП образцов увеличение объема бетона может достигать 0,55-0,65 %.

В таблице 3.4 представлены данные по прочности бетонных цилиндров сечением 150x300 (dxh) мм, величине усиления образцов полимерными сетками, соотношении прочности серий, предельным продольным и поперечным деформациям.

Таблица 3.4- Прочность на сжатие бетонных цилиндров серии К15 сечением 150x300 (dxh) мм

Марка образцов	Разрушающее усилие N, кН	Напряжения, σ , МПа	Средние напряжения σ_{cp} , МПа	Средняя прочность	Деформации, 10^{-5}	
					$\epsilon_{пр}$	$\epsilon_{поп}$
К15-0-1	510	28,1	25,1	1,0	192	99
К15-0-2	410	22,5			135	42
К15-0-3	444	24,8			200	33
К15-1-1	1200	69,8	65,9	2,62	330	245
К15-1-2	1000	58,1			194	156
К15-1-3	1249	69,9			297	268
К15-2-1	1450	83,4	94,1	3,75	651	440
К15-2-2	1797	100,4			342	377
К15-2-3	1899	108,9			292	455
К15-2-4	1500	83,8			154	355
К15-3-1	2299	130,1	131,1	5,22	413	312
К15-3-2	2400	135,2			299	436
К15-3-3	2200	127,9			316	421

На рис. 3.14-3.17 представлены диаграммы продольных и поперечных деформаций от величины сжимающих напряжений для каждой серии образцов серии К15. Разрушение образцов, усиленных карбоновыми фиброволокнами (ФАП), происходит постепенно. Сначала появляется треск, вызванный разрывом

отдельных фиброволокон, с увеличением нагрузки затем треск увеличивается и происходит хрупкое раздавливание бетона в зоне разрыва сетки, сопровождающееся резким звуком. Чем больше слоев усиления, тем раньше начинается процесс разрыва волокон сеток (рис. 3.18, 3.19.).

Анализ данных таблицы 3.4 показывает, что усиление образцов путем обвертывания (обклеивания) материалом серии FibArm Tape 530/300 привело к существенному повышению прочности сжатых образцов. Так, однослойные сетки вызвали увеличение прочности в среднем в 2,62 раза, двухслойные сетки привели к увеличению прочности в 3,75 раза, а трехслойные сетки – в 5,22 раз.

Анализ развития продольных и поперечных деформаций образцов показывает, что продольные деформации образцов с одним слоем сетки увеличились в 2,26 раза, поперечные деформации – в 6,9 раза; для образцов усиленных двумя слоями сетки, продольные деформации увеличились в 3,53 раза, поперечные деформации – в 9,56 раза; для образцов усиленных тремя слоями сетки, продольные деформации увеличились в 2,74 раза, поперечные деформации – в 10,3 раз.

В целом, результаты влияния усиления сетками (ФАП) для образцов размерами 150x300 (dxh) мм аналогично образцам размерами 100x200 (dxh) мм.

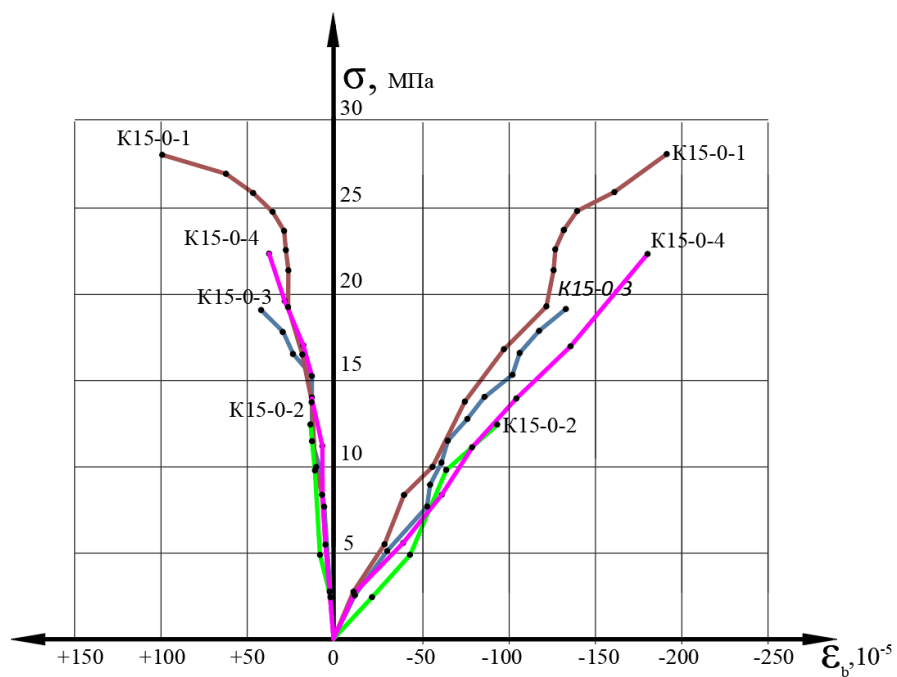


Рис. 3.14. Диаграмма продольных и поперечных деформаций образцов серии K15-0 (без усиления сетками)

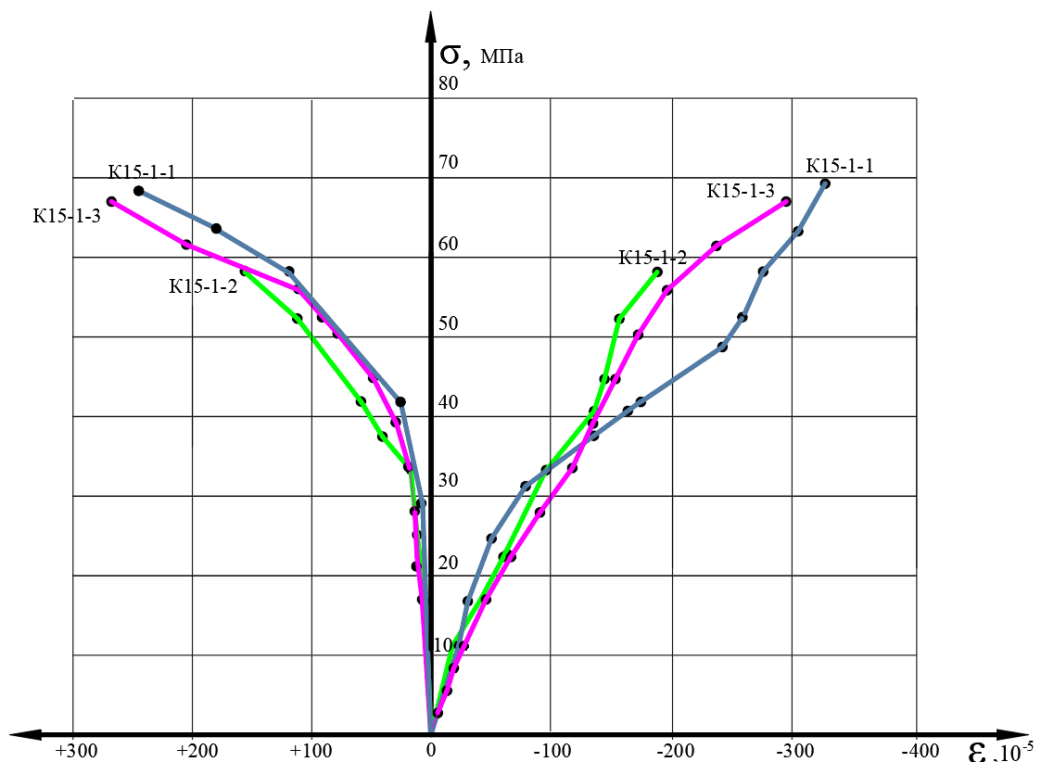


Рис. 3.15. Диаграмма продольных и поперечных деформаций образцов серии K15-1 (усилены 1 слоем сетки)

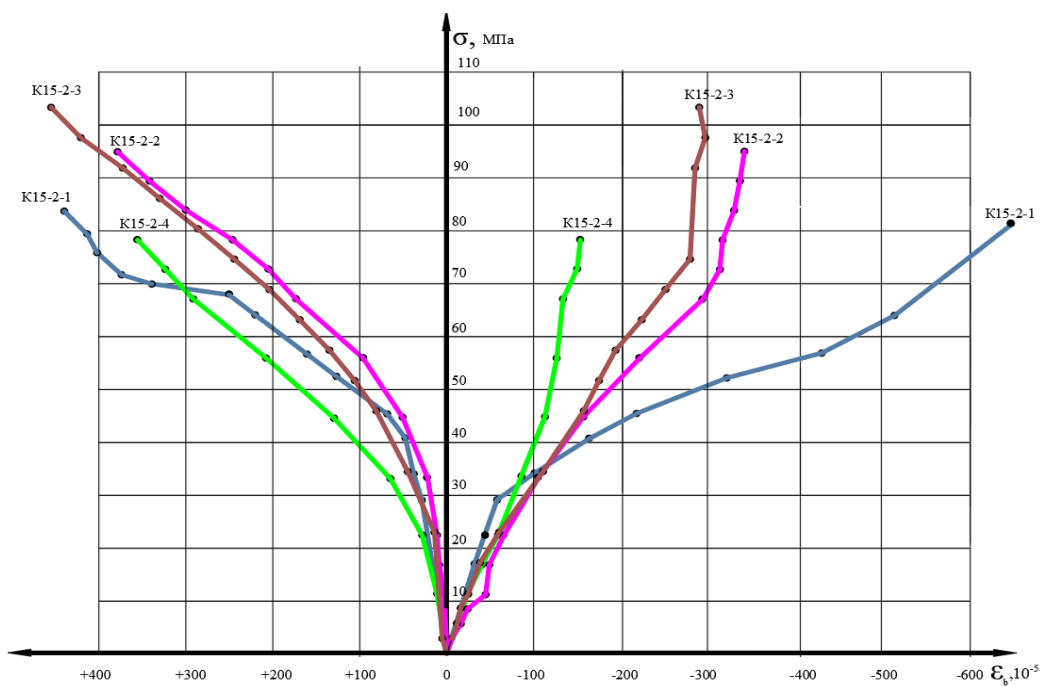


Рис. 3.16 – Диаграмма продольных и поперечных деформаций образцов серии K15-2 (усилены 2 слоями сетки)

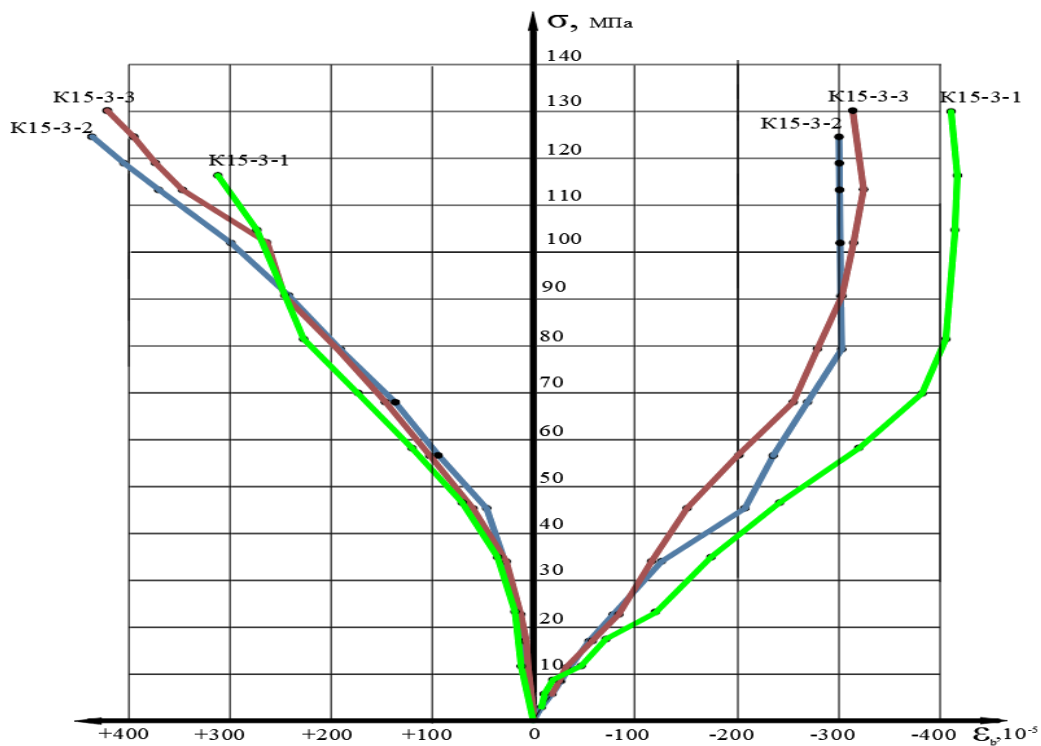


Рис. 3.17. Диаграмма продольных и поперечных деформаций образцов серии K15-3 (усилены 3 слоями сетки)

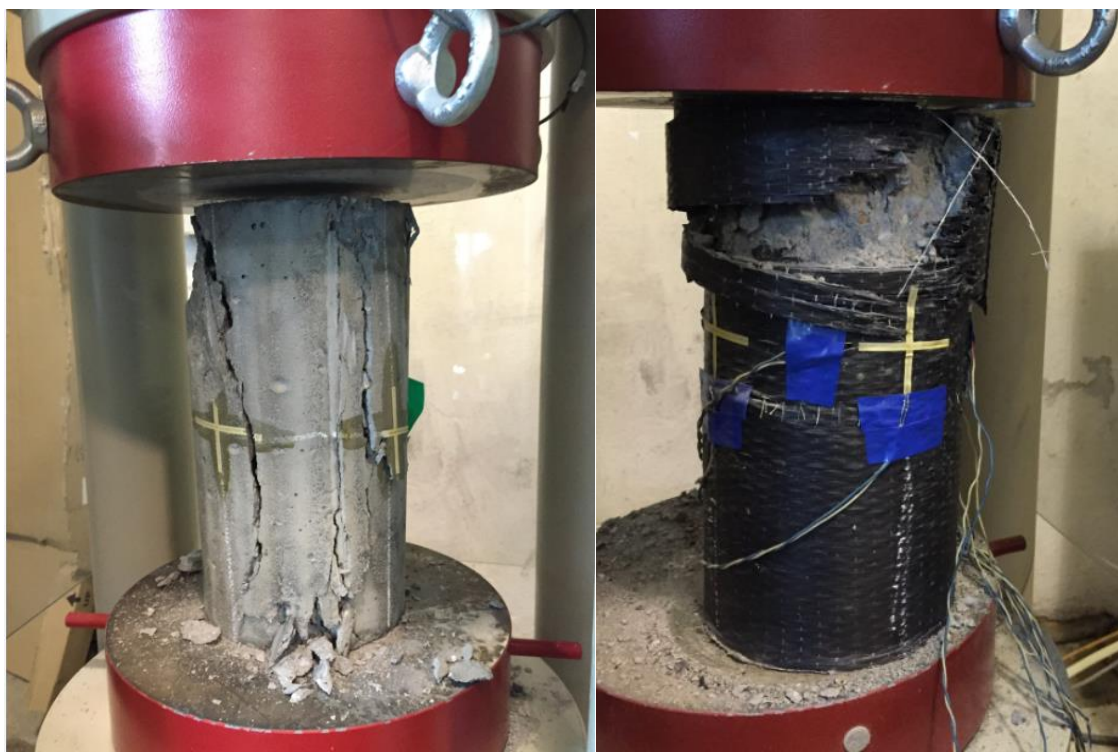


Рис. 3.18. Общий вид разрушения образцов серий K15-0 и K15-1

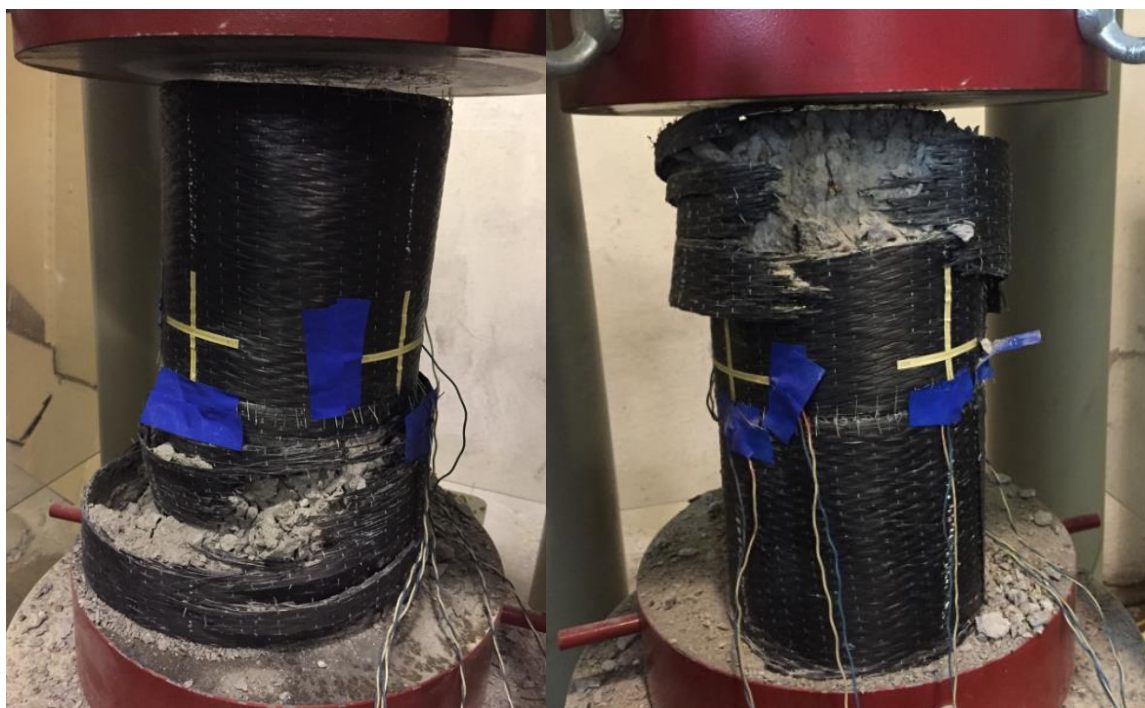


Рис. 3.19. Общий вид разрушения образцов серий K15-2 и K15-3

На рис. 3.20 показано соотношение прочности образцов серии К15, не имеющих усиления, усиленных 1, 2 и 3 сетками, а на рис. 3.21-3.23 представлены графики зависимости сжимающих напряжений от действия продольной силы и от действия обжатия бетона обоймой из сеток ФАП в образцах серии К15.

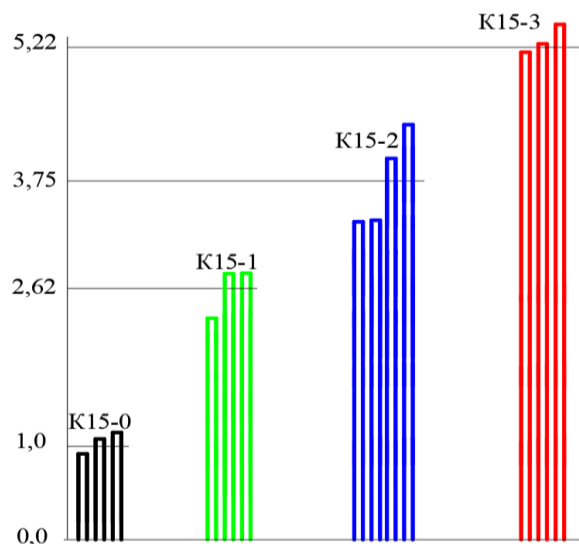


Рис. 3.20. Соотношение прочности образцов серии К15

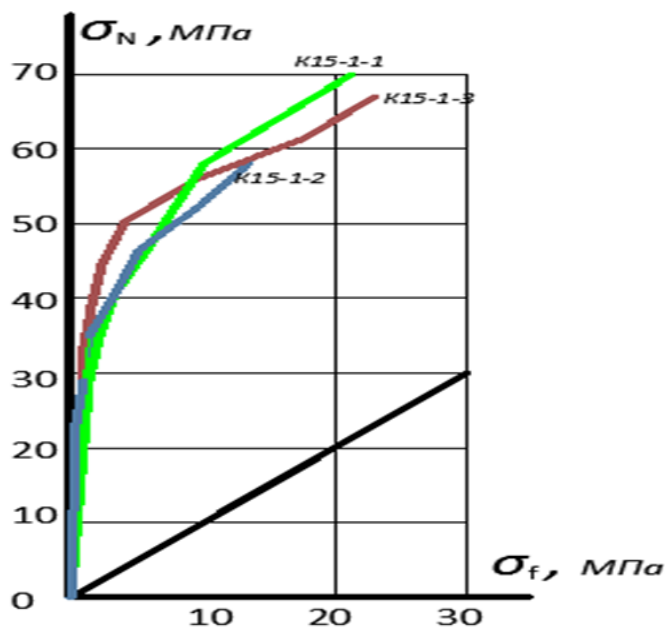


Рис. 3.20. Соотношение сжимающих напряжений σ_N и σ_f образцов серии К15-1 (1 слой сетки)

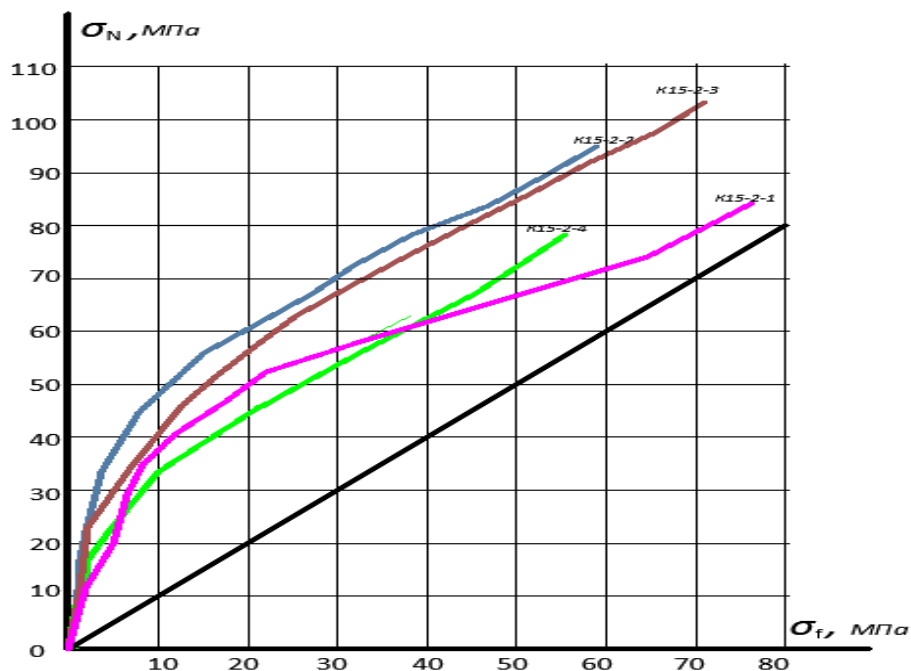


Рис. 3.22. Соотношение сжимающих напряжений от действия продольной силы и сжимающих напряжений от обжатия обоймой ФАП образцов серии К15-2 (2 слоя сетки)

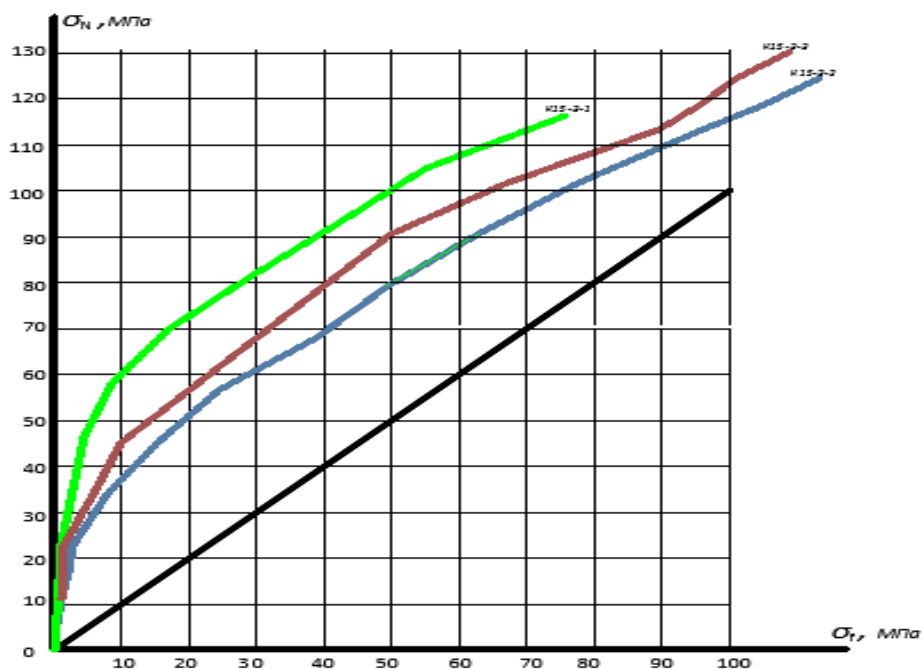


Рис. 3.23. Соотношение сжимающих напряжений от действия продольной силы и сжимающих напряжений от обжатия обоймой ФАП образцов серии К15-3 (3 слоя сетки)

На рис.3.24-3.26 представлены графики изменения объема бетона в процессе увеличения продольных напряжений сжатия.

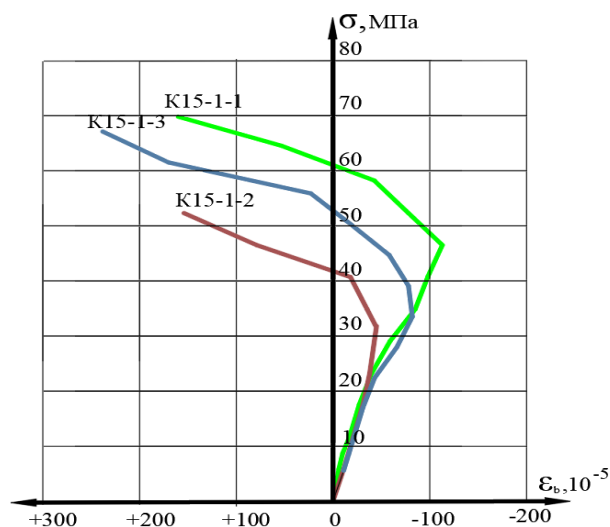


Рис. 3.24. Изменение объема бетона в процессе нагружения образцов серии К15-1 (1 слой сетки)

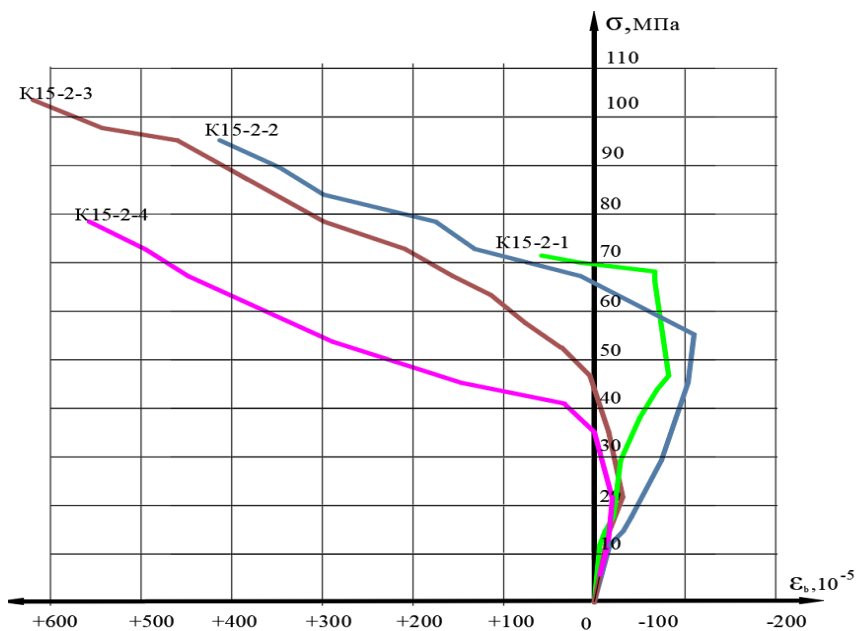


Рис. 3.25. Изменение объема бетона в процессе нагружения образцов серии К15-2 (2 слоя сетки)

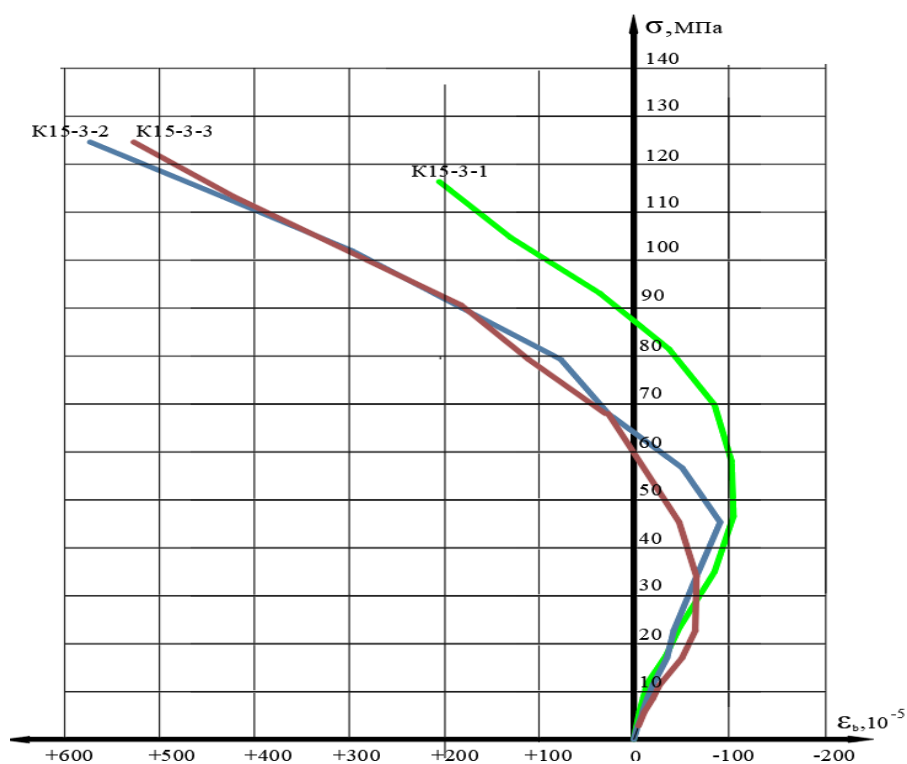


Рис. 3.26. Изменение объема бетона в процессе нагружения образцов серии К15-3 (3 слоя сетки)

Анализ рис. 3.24-3.26 показывает, что начало образования микротрещин в бетоне в образцах, усиленных сетками ФАП, начинается после превышения прочности не усиленного бетона, затем начинается ускоренное увеличение объема бетона, при величине напряжений в усиленном бетоне около 70-80% от разрушающих напряжений объем бетона близок к первоначальному объему (объему бетона до нагружения продольной силой), а перед исчерпанием прочности усиленных сетками ФАП образцов увеличение объема бетона может достигать 0,55-0,65 %.

В таблице 3.5 представлены данные по прочности бетонных цилиндров серии К20 сечением 200х400 (dхh) мм, величине усиления образцов полимерными сетками, соотношении прочности серий, предельным продольным и поперечным деформациям.

Таблица 3.5- Прочность на сжатие и деформации бетонных цилиндров серии К20 сечением 200х400 (dxh) мм

Марка образцов	Разрушающее усилие N, кН	Напряжения, σ , МПа	Средние напряжения $\sigma_{ср}$, МПа	Сравнение прочности	Деформации , 10^{-5}	
					$\epsilon_{пр}$	$\epsilon_{поп}$
К20-0-1	853,5	26,9	26,3	1,0	110	22
К20-0-2	814,2	25,6			98	23
К20-0-3	833,9	26,3			105	20
К20-1-1	1570	49,2	46,9	1,78	320	275
К20-1-2	1619	51,0			400	270
К20-1-3	1275	40,2			312	170
К20-2-1	2500	75,8	81,9	3,12	480	430
К20-2-2	2900	87,9			435	434
К20-3-1*	3001	90,9	87,6	3,35	391	284
К20-3-2*	2700	81,8			363	302
К20-3-3*	3000	90,9			489	474

- Образцы не доведены до разрушения.

Анализ данных таблицы 3.5. показывает, что усиление образцов путем обертывания (обклеивания) материалом серии FibArm Tape 530/300 привело к существенному повышению прочности сжатых образцов. Так, однослойные сетки вызвали увеличение прочности в среднем в 1,79 раза, двухслойные сетки привели к увеличению прочности в 3,12 раза, а трехслойные сетки – в 3,35 раз (образцы с трехслойным усилением сетками не доведены до разрушения в связи с недостаточной мощностью имеющегося в институте гидравлического оборудования).

На рис. 3.27-3.30 представлены диаграммы продольных и поперечных деформаций от величины сжимающих напряжений для каждой серии образцов.

Мощности имеющегося в институте испытательного оборудования было недостаточно для доведения образцов серии К20-3 до разрушения

Анализ развития продольных и поперечных деформаций образцов показывает, что продольные деформации образцов с одним слоем сетки увеличились в 3,23 раза, поперечные деформации – в 11 раз; для образцов усиленных двумя слоями сетки, продольные деформации увеличились в 4,4 раза, поперечные деформации – в 20 раз, для образцов усиленных тремя слоями сетки, продольные деформации увеличились в 4,0 раза, поперечные деформации – в 12,8 раз.

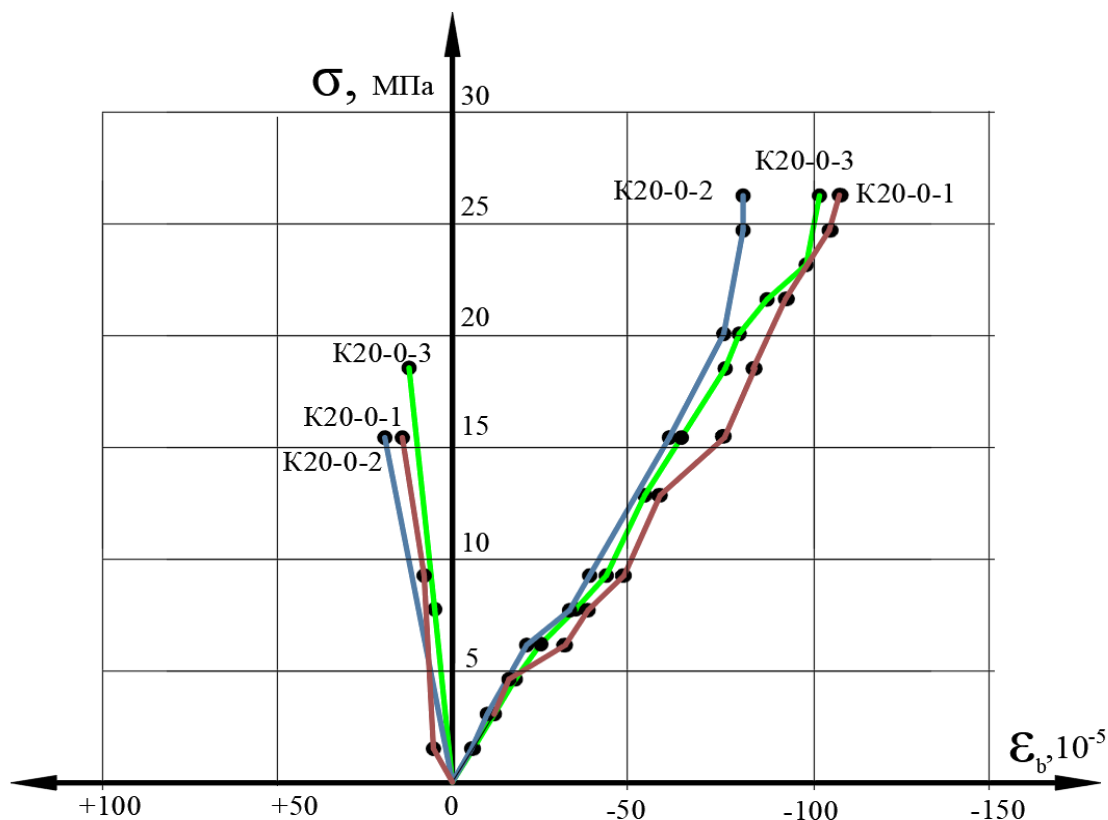


Рис. 3.27. Диаграмма продольных и поперечных деформаций образцов серии К20-0 (без усиления сетками)

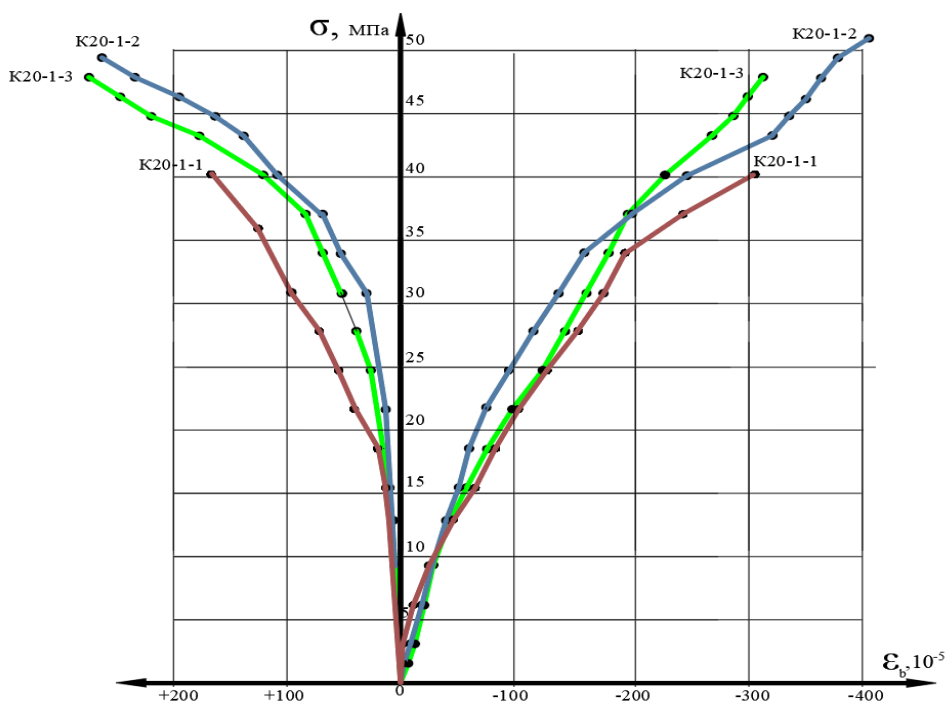


Рис. 3.28. Диаграмма продольных и поперечных деформаций образцов серии К20-1 (усилены одним слоем сетки)

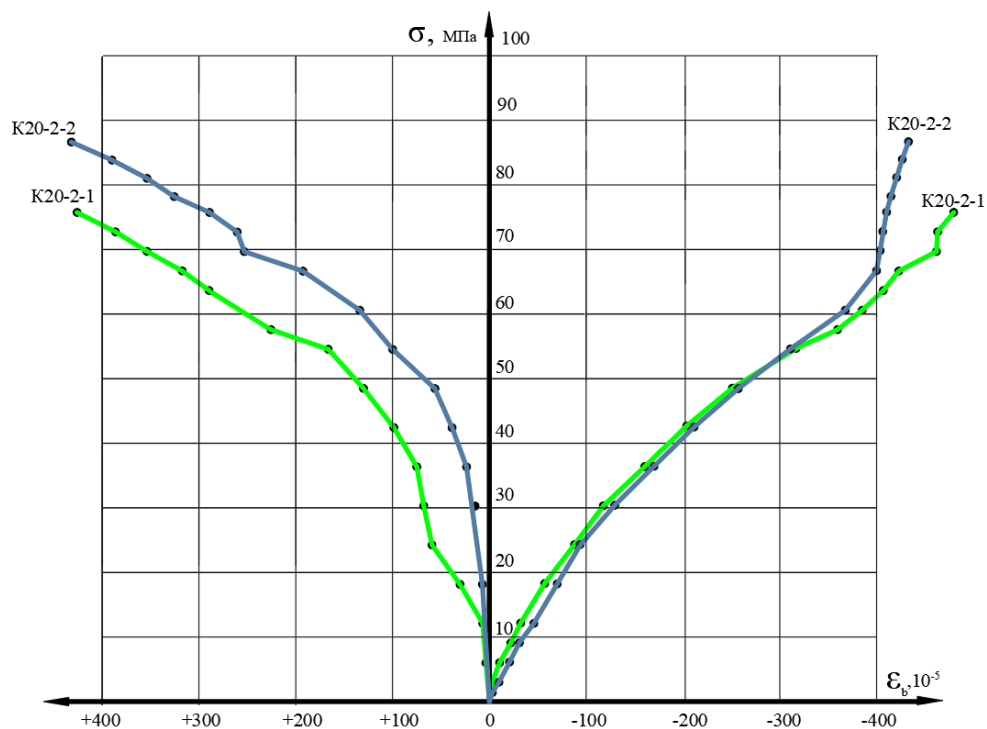


Рис. 3.29. Диаграмма продольных и поперечных деформаций образцов серии К20-2 (усилены двумя слоями сетки)

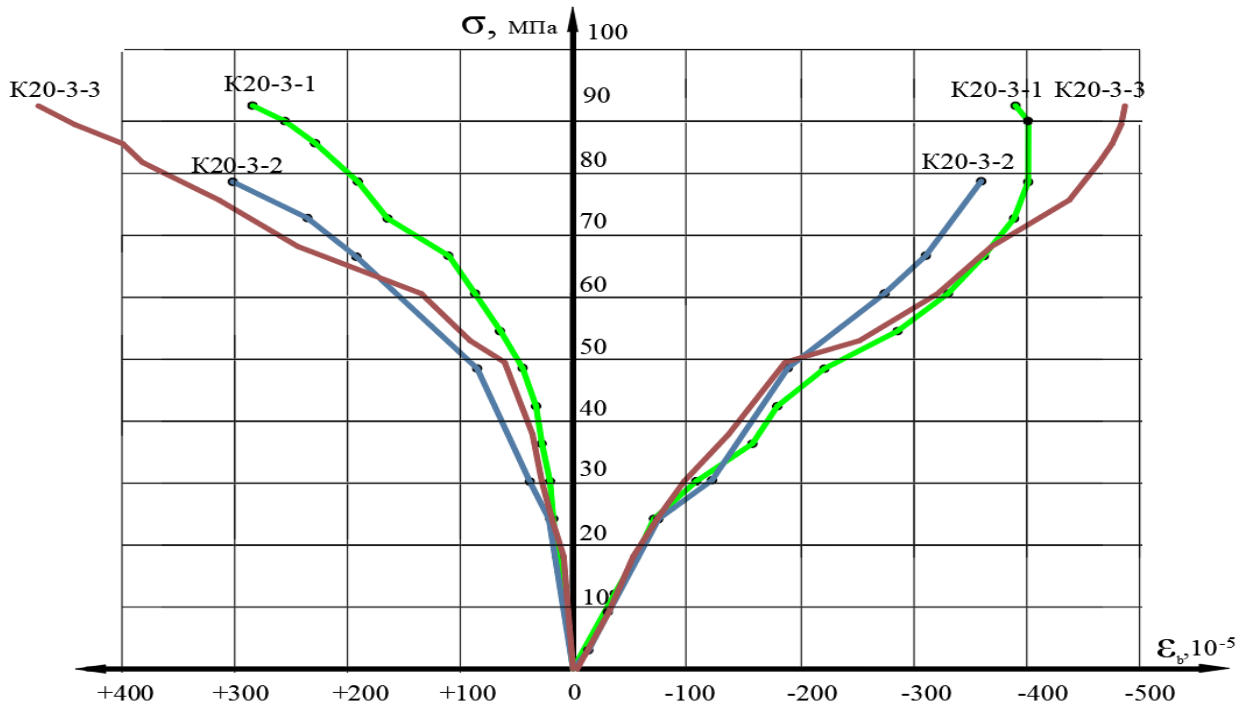


Рис. 3.30. Диаграмма продольных и поперечных деформаций

образцов серии К20-3 (усилены тремя слоями сетки, не доведены до разрушения)

В целом, результаты влияния усиления сетками (ФАП) для образцов размерами 200x400 (bхh) мм гораздо меньше, чем для образцов размерами 100x200 и 150x300 (bхh) мм.

На рис. 3.31 дано сопоставление прочности образцов серии К20, а на рис. 3.32 и 3.33 представлены графики зависимости сжимающих напряжений от действия продольной силы и от действия обжатия бетона обоймой из сеток ФАП в образцах серии К20.

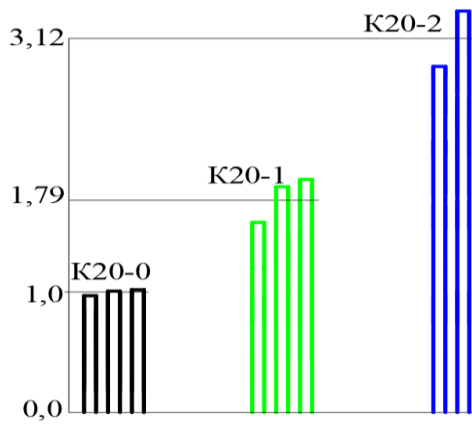


Рис. 3.31. Соотношение прочности образцов серии К20

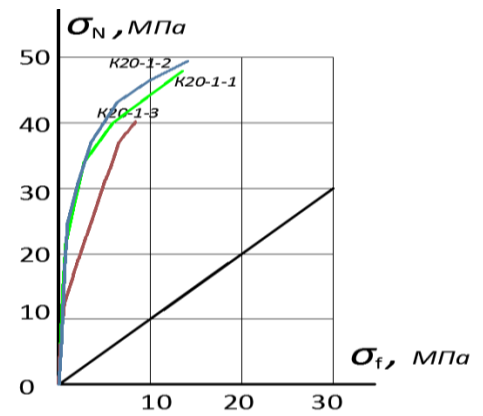


Рис. 3.32. Соотношение сжимающих напряжений σ_N и σ_f образцов серии К20-1 (1 слой сетки)

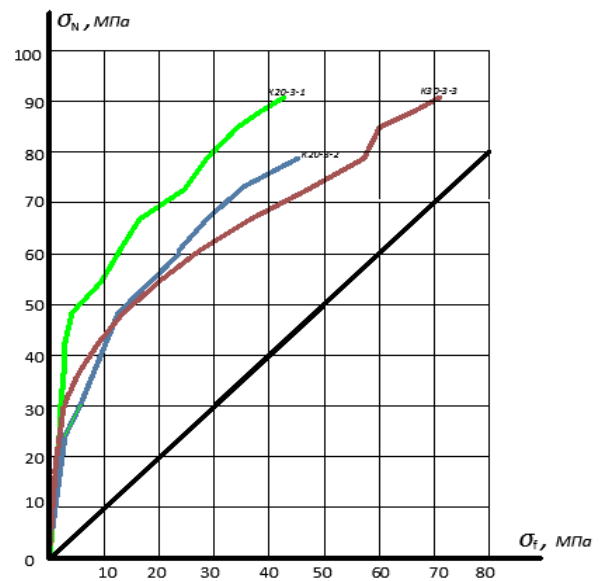
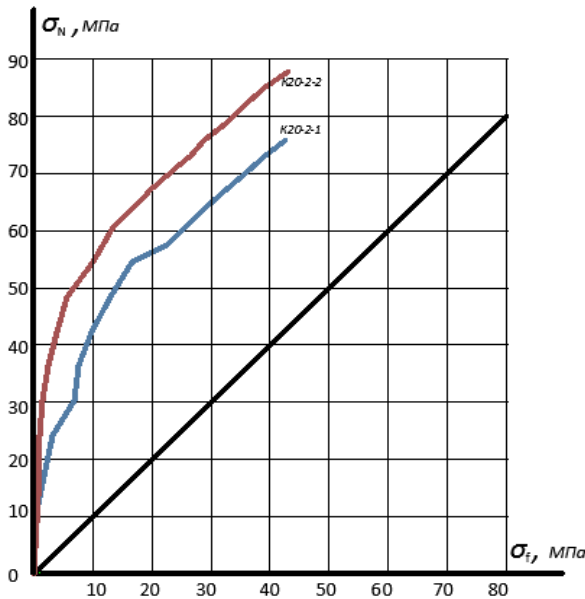


Рис. 3.33. Соотношение сжимающих напряжений от действия продольной силы и сжимающих напряжений от обжатия облоймой ФАП образцов серии К20-2 и К20-3 (2 и 3 слоя сетки)

На рис. 3.34 и 3.35 представлены графики изменения объема бетона в процессе увеличения продольных напряжений сжатия. На рис. 3.36 - 3.38 приведены сопоставительные данные по величине повышения прочности, продольным и поперечным деформациям для всех серий образцов.

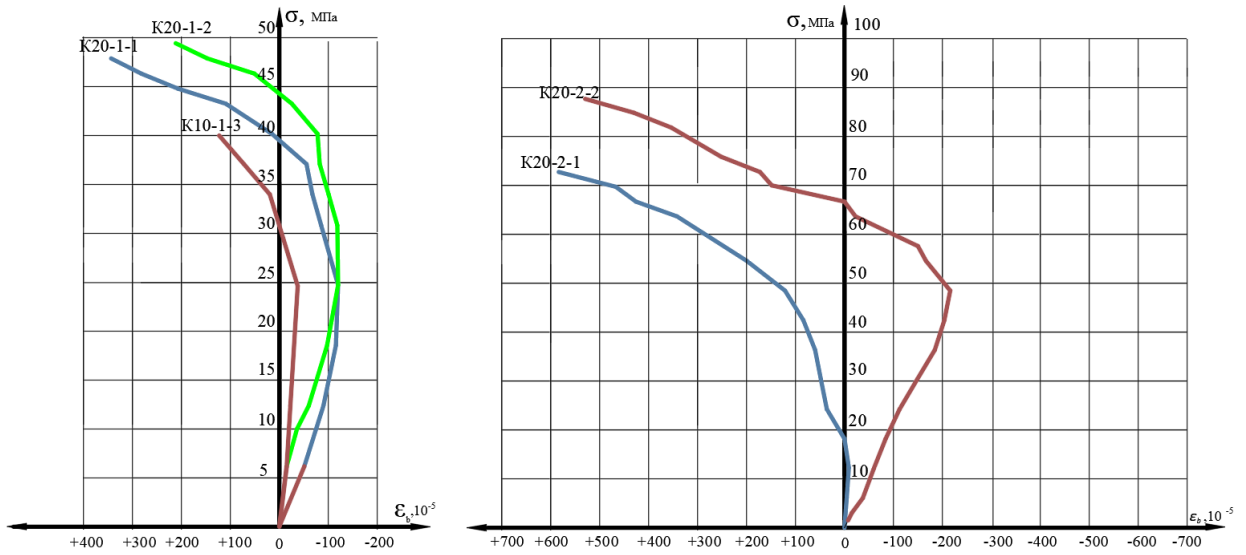


Рис. 3.34. Изменение объема бетона в процессе нагружения образцов серии К20-1 (1 слой сетки) и К20-2 (два слоя сетки)

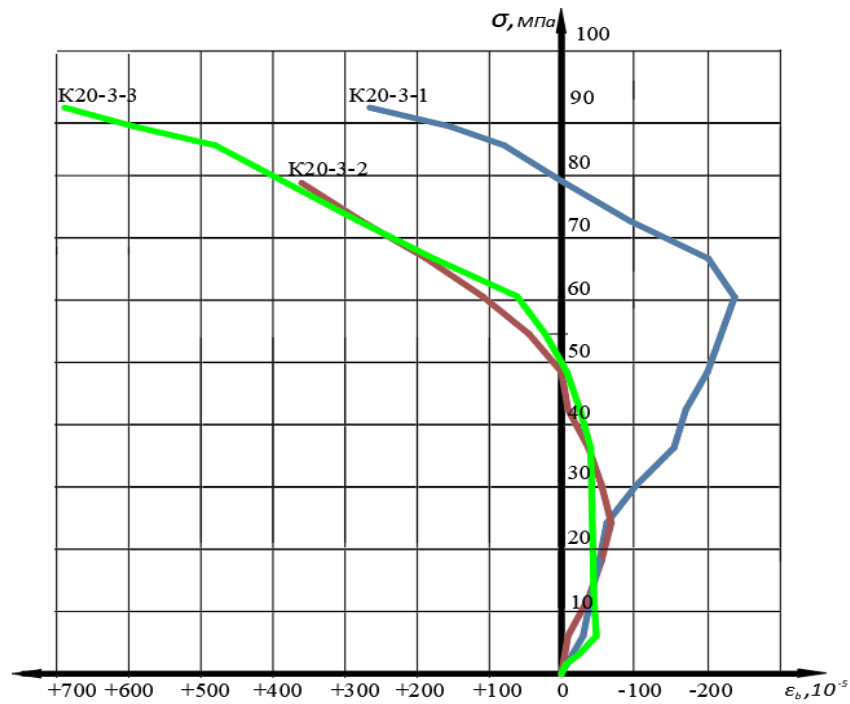


Рис. 3.35. Изменение объема бетона в процессе нагружения образцов серии К20-3 (3 слоя сетки)

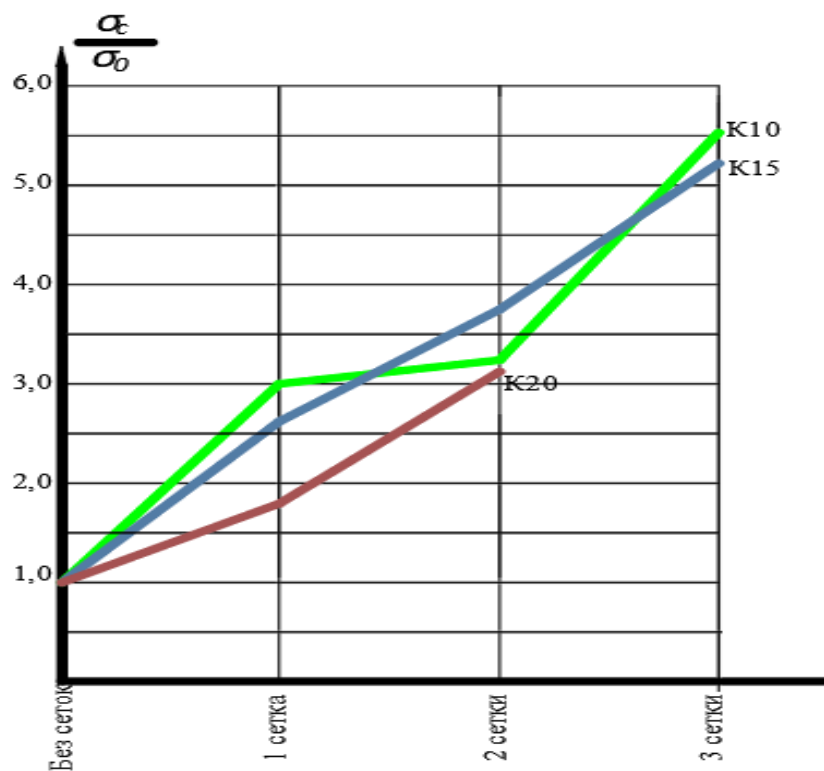


Рис. 3.36. Соотношение прочности образцов 1-ой партии

Анализ рис. 3.34 и 3.35 показывает, что начало образования микротрещин в бетоне в образцах, усиленных сетками ФАП, начинается после превышения прочности не усиленного бетона, затем начинается ускоренное увеличение объема бетона, при величине напряжений в усиленном бетоне около 70-80% от разрушающих напряжений объем бетона близок к первоначальному объему (объему бетона до нагружения продольной силой), а перед исчерпанием прочности усиленных сетками ФАП образцов увеличение объема бетона может достигать 0,55-0,58 %.

На рис. 3.36-3.38 приведены сопоставительные данные по величине повышения прочности, продольным и поперечным деформациям для всех серий образцов.

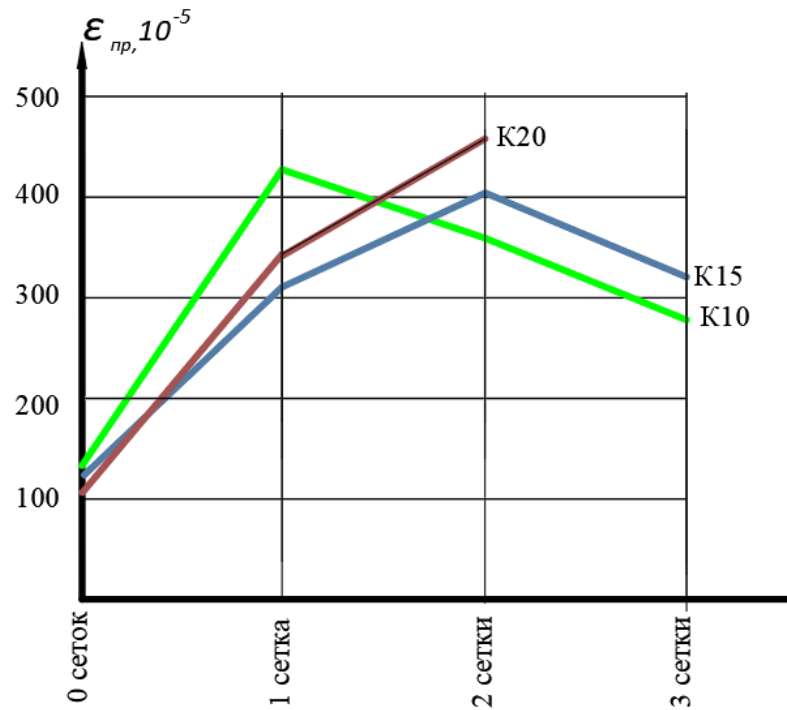


Рис. 3.37. Сопоставление наибольших продольных деформаций первой партии образцов

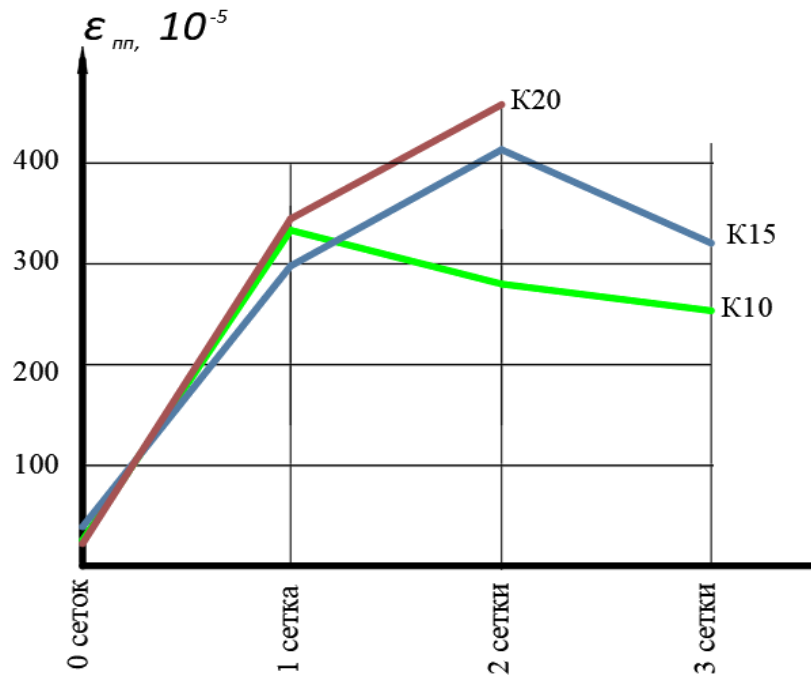


Рис. 3.38. Сопоставление наибольших поперечных деформаций первой партии образцов

Статические испытания бетонных цилиндров серии КИ, имеющих сечение 150x300 мм (dxh) и усиленных обоймами из сеток MBRACE FIB CF 230/4900.530g/5.100m, также проводилось на гидравлическом прессе ALPHA 3-3000S. Перед испытанием на сжатие торцевые поверхности опытных образцов обмазывались литолом с добавлением песка, который уменьшал трение опорных поверхностей опытного образца по металлическим опорным поверхностям гидравлического пресса.

В таблице 3.6 представлены данные по прочности бетонных цилиндров серии КИ, величине усиления образцов полимерными сетками, соотношении прочности, предельным продольным и поперечным деформациям, а на рис. 3.39-3.42 приведены фотографии испытанных на сжатие бетонных цилиндров серии КИ.

Таблица 3.6 - Прочность деформации бетонных цилиндров КИ

Марка образцов	Разруш. усилие N_u . кН	Напряжения, σ , МПа	Средние напряжения σ_u , МПа	Сравнение прочности	Деформации 10^{-5}	
					$\epsilon_{пр}$	$\epsilon_{поп}$
КИ -0-1с	347	19,9	22,43	1,0	205	45
КИ-0-2с	500	27,93			181	93
КИ-0-3с	344	19,47			206	73
КИ-1-1с	1050	59,43	61,3	2,73	247	438
КИ-1-2с	1050	59,43			408	464
КИ-1-3с	1200	62,26			418	671
КИ-1-4с	1147	64,06			444	646
КИ-2-1с	1553	87,9			494	649

КП-2-2с	1450	86,62	74,94	3,34	359	472
КП-2-3с	1900	109			466	497
КП-2-4с	1700	96,22			418	611
КП-3-1с	1997	121	122,8	5,47	377	533
КП-3-2	2160	122,3			360	502
КП-3-3	2150	125			378	550



Рисунок 3.39. Общий вид разрушенных образцов серии КП-0



Рис. 3.40. Общий вид разрушенных образцов серии КII-1



Рис. 3.41. Общий вид разрушенных образцов серии КII-2

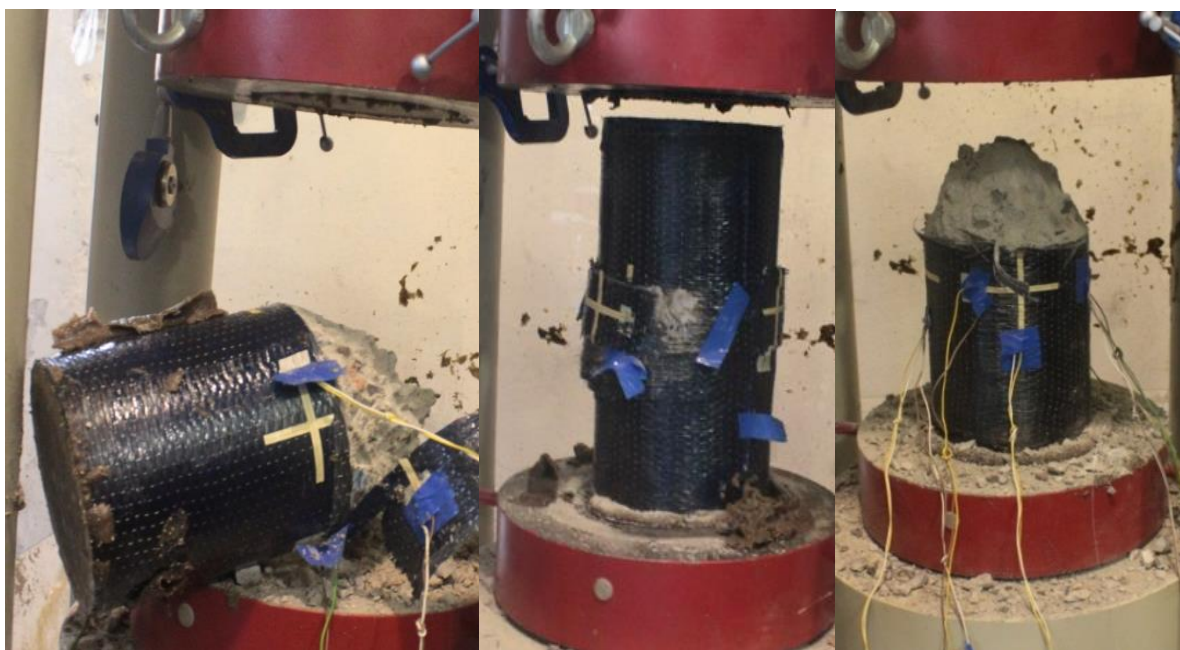


Рис. 3.42. Общий вид разрушенных образцов серии КП-3

Анализ данных таблицы 3.6 показывает, что усиление образцов путем обертывания (обклеивания) материалом серии MBRACE FIB CF 230/4900.530g/5.100m привело к существенному повышению прочности сжатых образцов. Так, однослойные сетки вызвали увеличение прочности в среднем в 1,73 раза, двухслойные сетки привели к увеличению прочности в 3,34 раза, а трехслойные сетки – в 5,47раза. При этом продольные деформации бетона достигали 3-4 %, а поперечные деформации достигали 3-4 %.

На рис. 3.43-3.46 представлены диаграммы зависимости продольных и поперечных деформаций от величины сжимающих напряжений для каждой серии образцов.

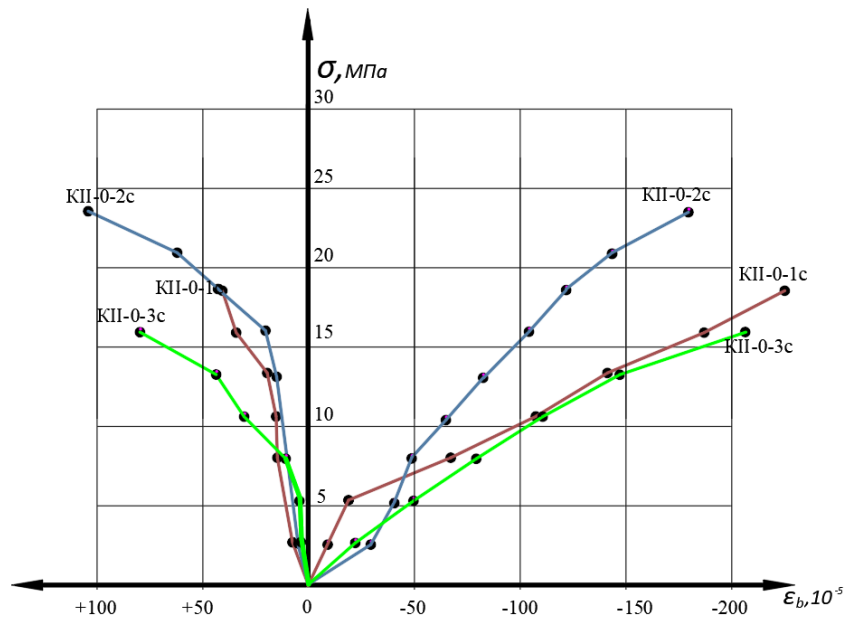


Рис. 3.43 – Диаграмма продольных и поперечных деформаций образцов серии КП-0с

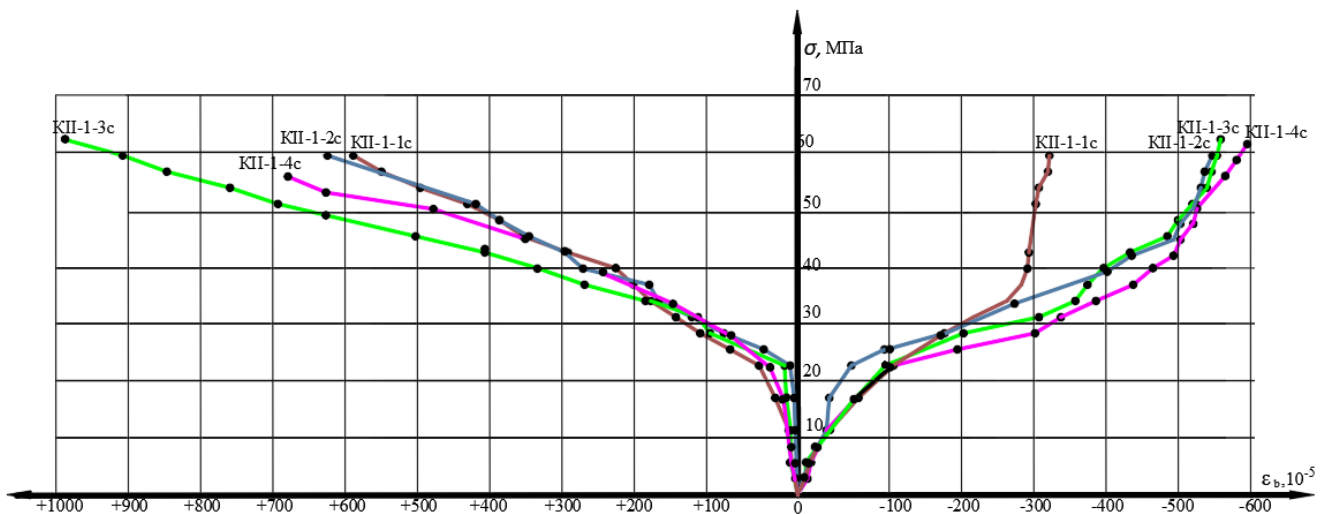


Рис. 3.44 – Диаграмма продольных и поперечных деформаций образцов серии КП-1с

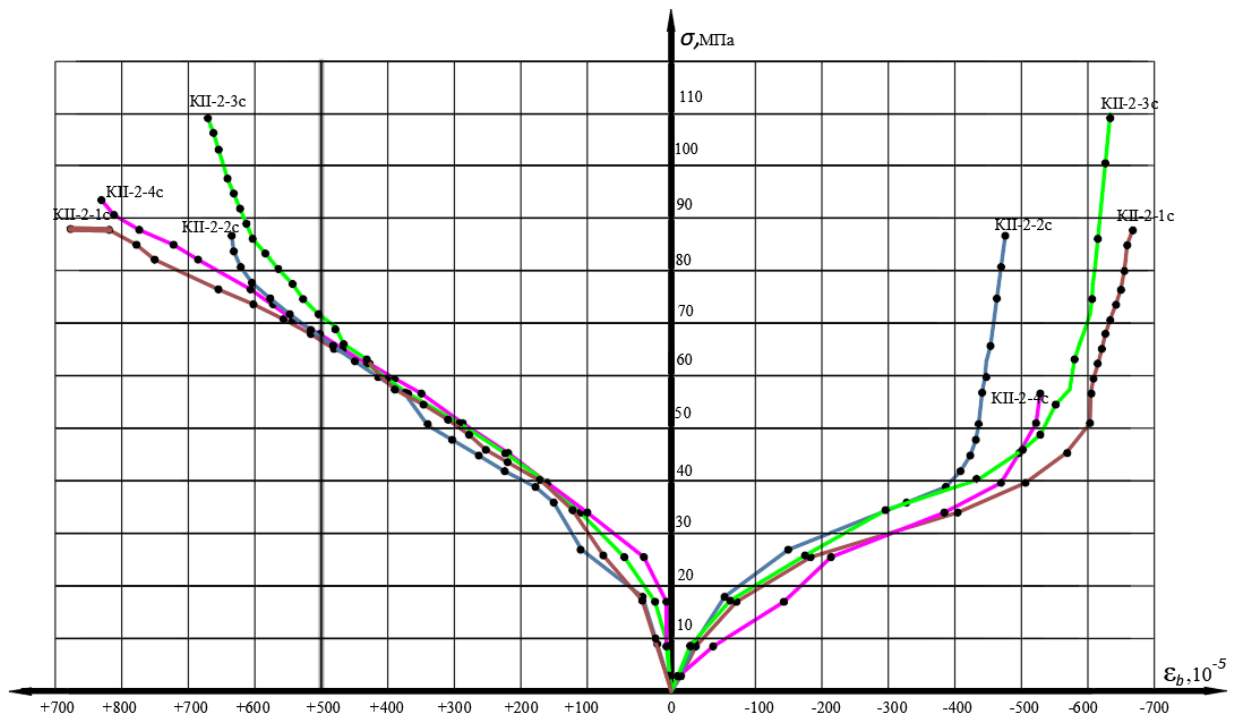


Рис. 3.45 – Диаграмма продольных и поперечных деформаций образцов серии КП-2с

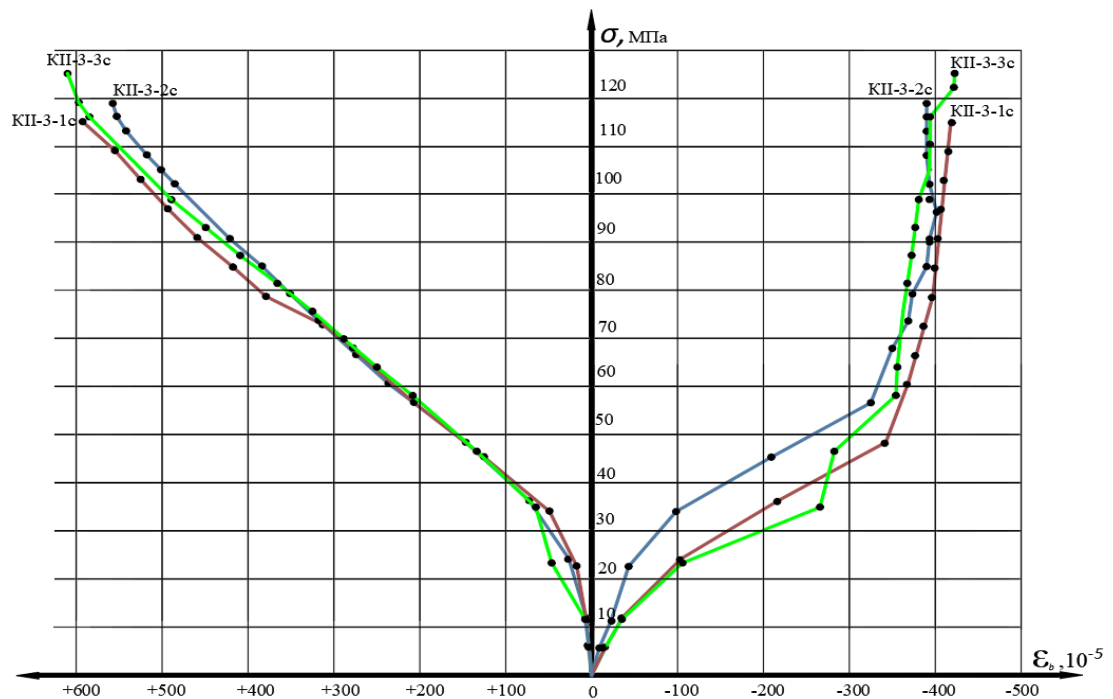


Рис. 3.46 – Диаграмма продольных и поперечных деформаций образцов серии КП-3с

На рис. 3.47-3.49 представлены графики зависимости сжимающих напряжений от действия продольной силы и от действия обжатия бетона обоймой из сеток ФАП в образцах серии КИ.

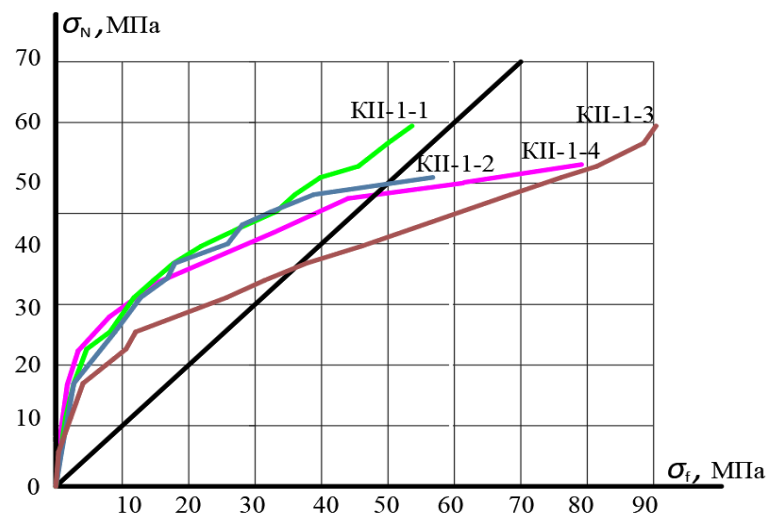


Рис. 3.47. Соотношение сжимающих напряжений от действия продольной силы и сжимающих напряжений от обжатия обоймой ФАП образцов серии КИ-1с

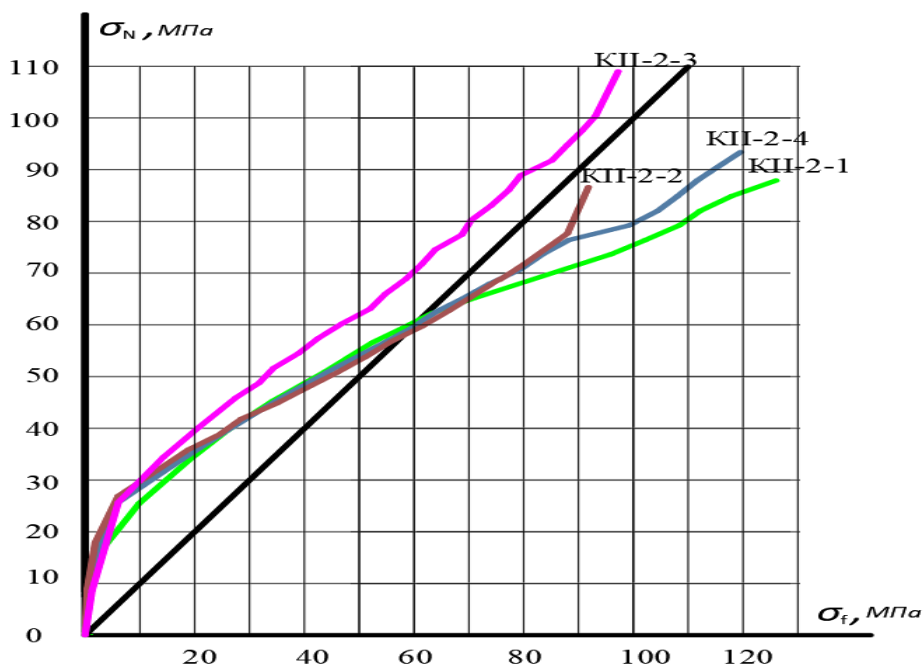


Рис. 3.48. Соотношение сжимающих напряжений от действия продольной силы и сжимающих напряжений от обжатия обоймой ФАП образцов серии КИ-2с

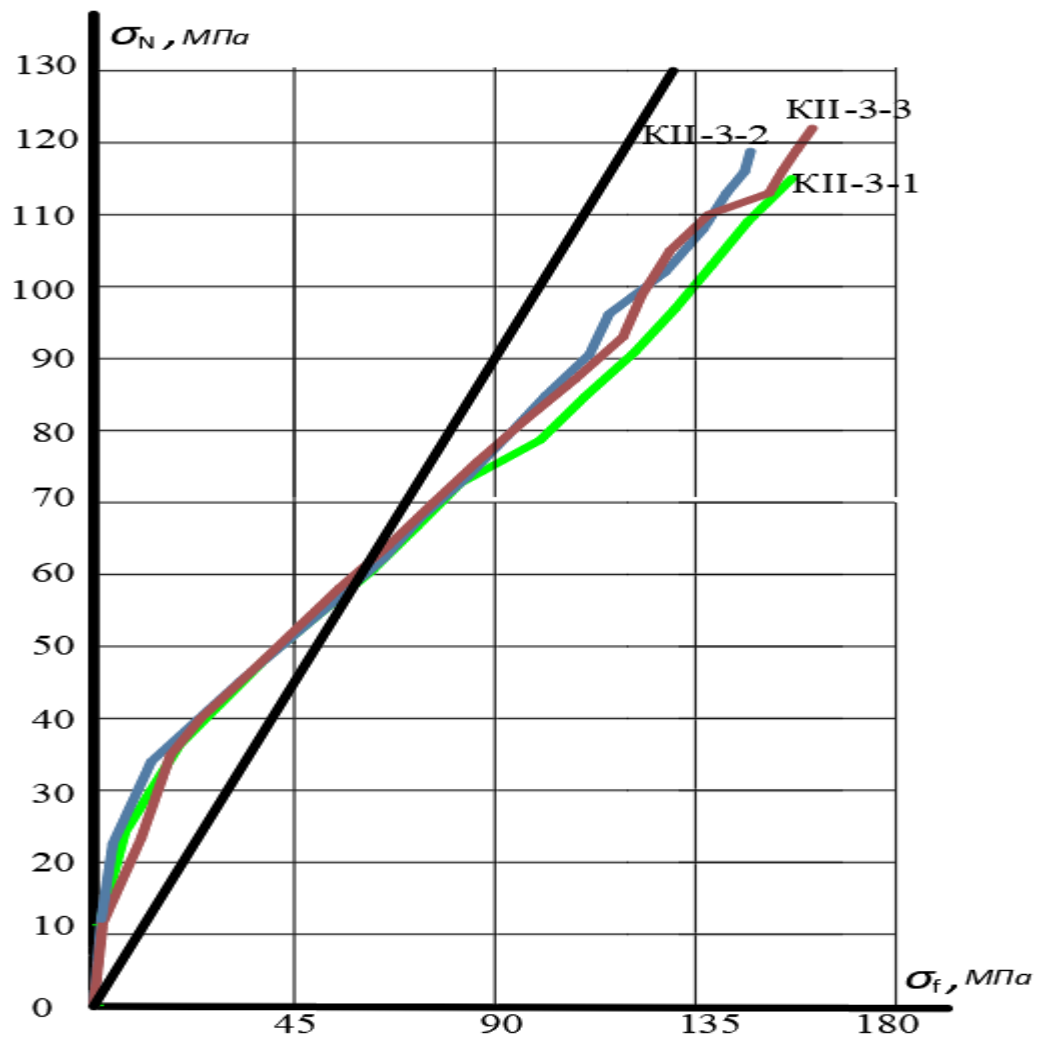


Рис. 3.49. Соотношение сжимающих напряжений от действия продольной силы и сжимающих напряжений от обжатия обоймой ФАП образцов серии КИ-3с (3 слоя сетки)

На рис. 3.50-3.51 приведены сопоставительные данные по величине повышения прочности, продольным и поперечным деформациям для образцов с различным количеством сеток усиления.

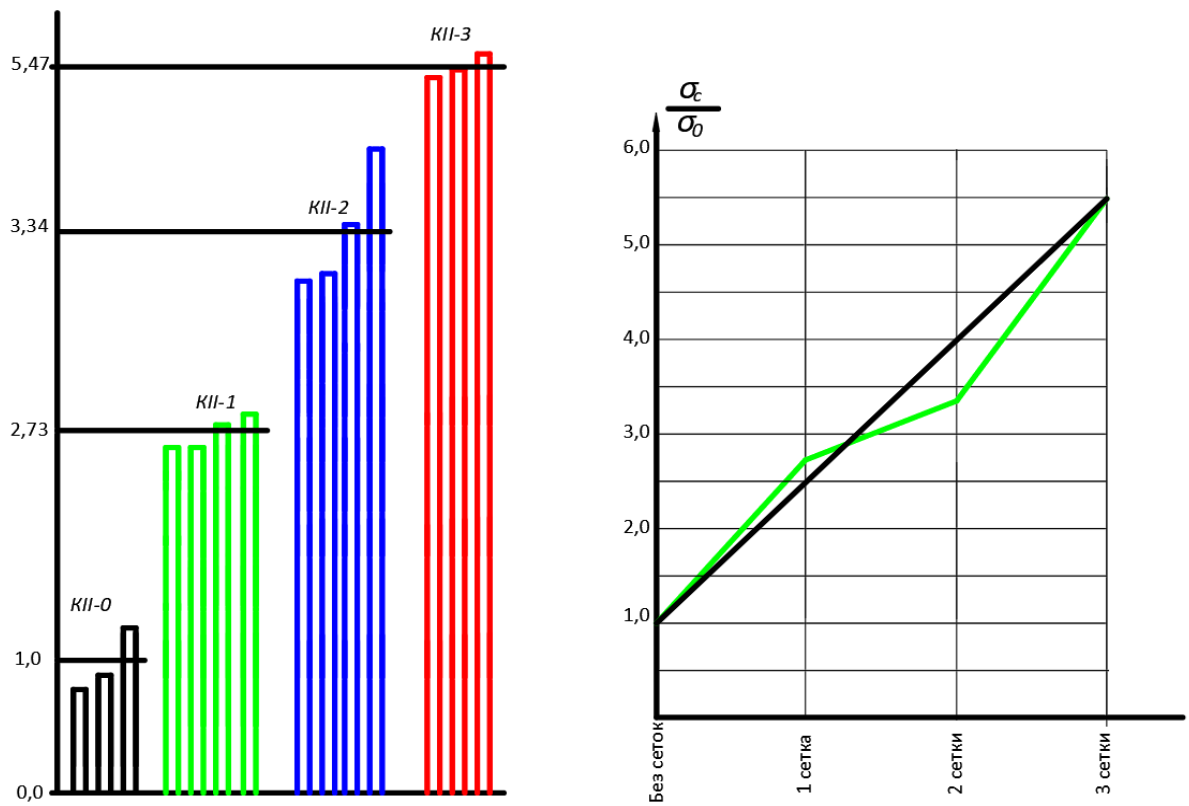


Рис. 3.50. Сопоставление прочности образцов серии КИ-с с различным количеством сеток усиления

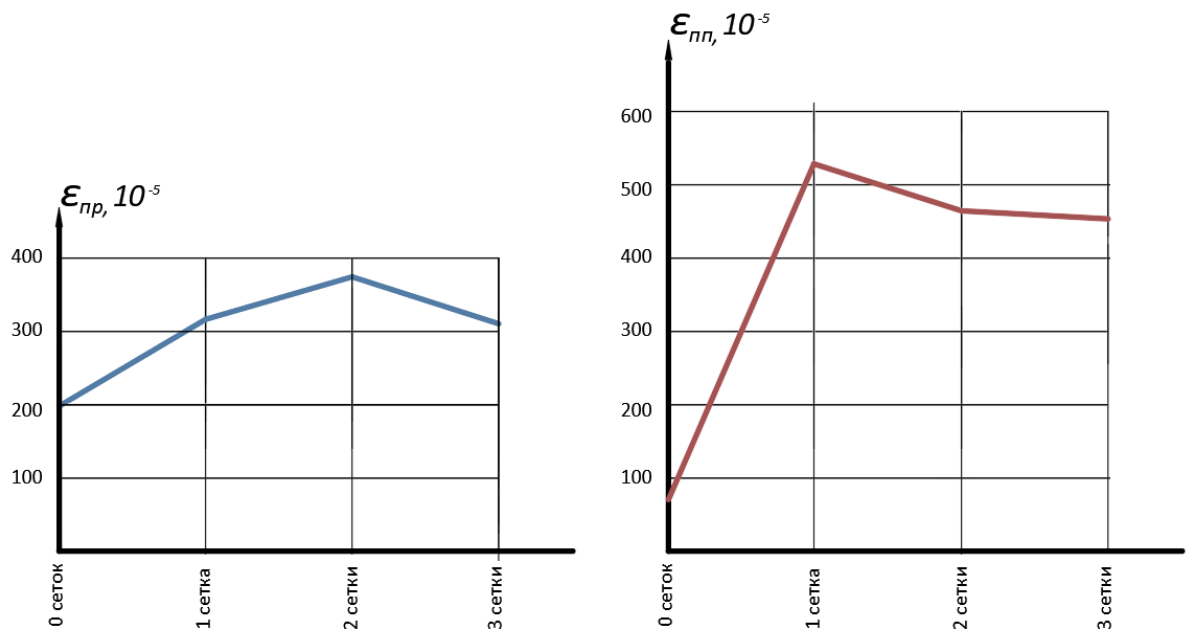


Рис. 3.51. Сопоставление продольных и поперечных деформаций образцов серии КИ-с различным количеством сеток усиления

Анализ развития продольных и поперечных деформаций образцов показывает, что продольные деформации образцов с одним слоем сетки увеличились в 1,6 раза, поперечные деформации – в 7,54 раз; для образцов усиленных двумя слоями сетки, продольные деформации увеличились в 1,9 раз, поперечные деформации – в 6,63 раза; для образцов усиленных тремя слоями сетки, продольные деформации увеличились в 1,58 раза, поперечные деформации – в 6,47 раз.

Для серий образцов, усиленных сетками MBRACE FIB CF 230/4900.530g/5.100m и испытанных с использованием смазки опорных поверхностей, поперечные деформации по величине приближаются и даже превосходят по величине продольные деформации, что свидетельствует о том, что поперечные обжимающие напряжения в образцах, усиленных сетками, могут превысить по величине продольные сжимающие напряжения. На диаграммах деформирования это проявляется в замедлении роста и даже прекращении увеличения продольных деформаций при превышении продольных сжимающих усилий 40-50% несущей способности образца.

На рис. 3.52-3.54 представлены графики изменения объема бетона в процессе увеличения продольных напряжений сжатия, анализ которых показывает, что начало образования микротрещин в бетоне в образцах, усиленных сетками ФАП, начинается после превышения прочности не усиленного бетона, затем начинается ускоренное увеличение объема бетона, при величине напряжений в усиленном бетоне около 70-80% от разрушающих напряжений объем бетона близок к первоначальному объему (объему бетона до нагружения продольной силой), а перед исчерпанием прочности усиленных сетками ФАП образцов увеличение объема бетона может достигать 0,8-1,1 %.

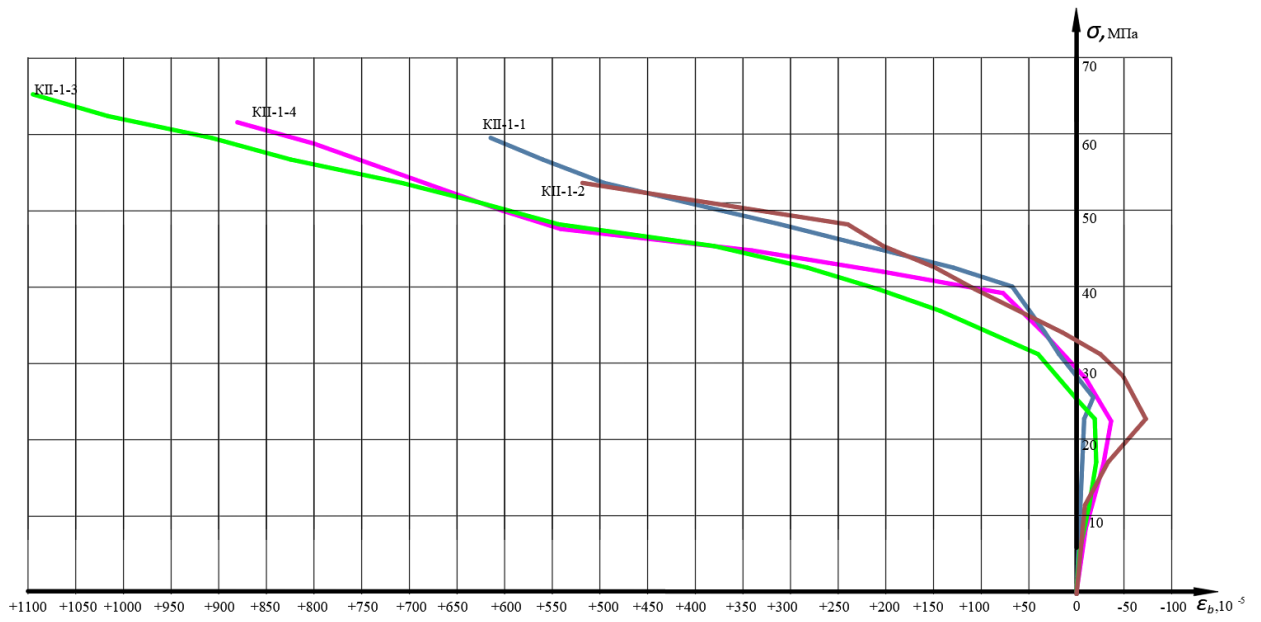


Рис. 3.52. Изменение объема бетона в процессе нагружения образцов серии КП-1с (1 слой сетки)

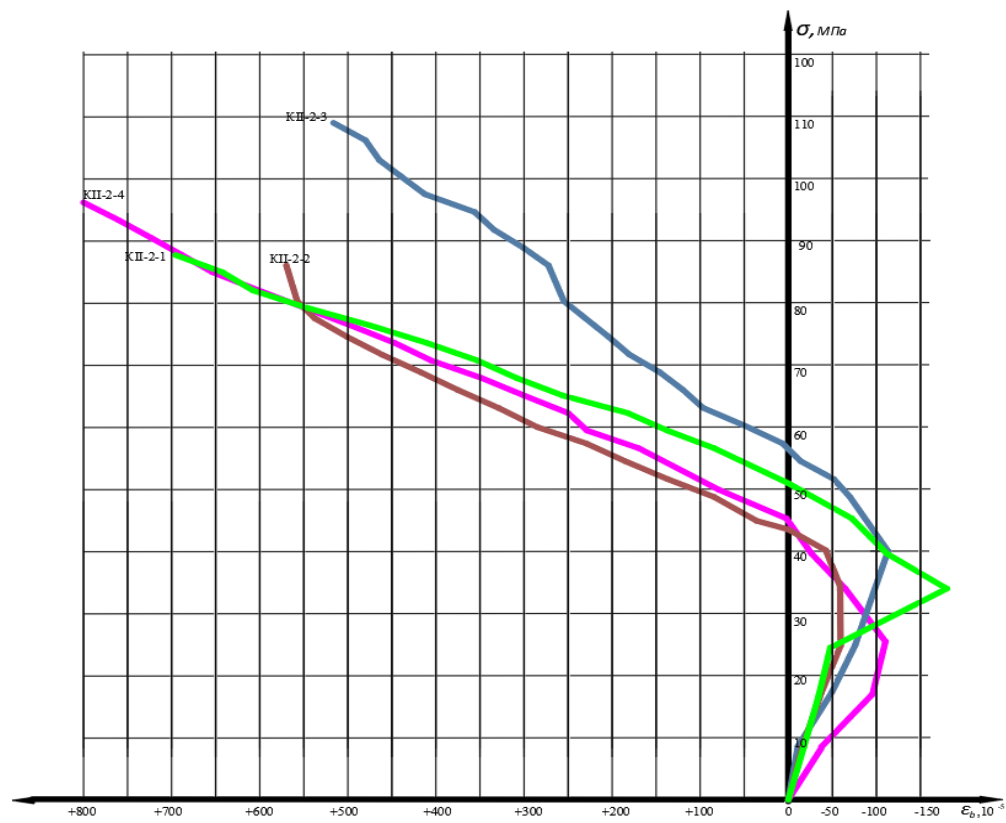


Рис. 3.53 – Изменение объема бетона в процессе нагружения образцов серии КП-2с

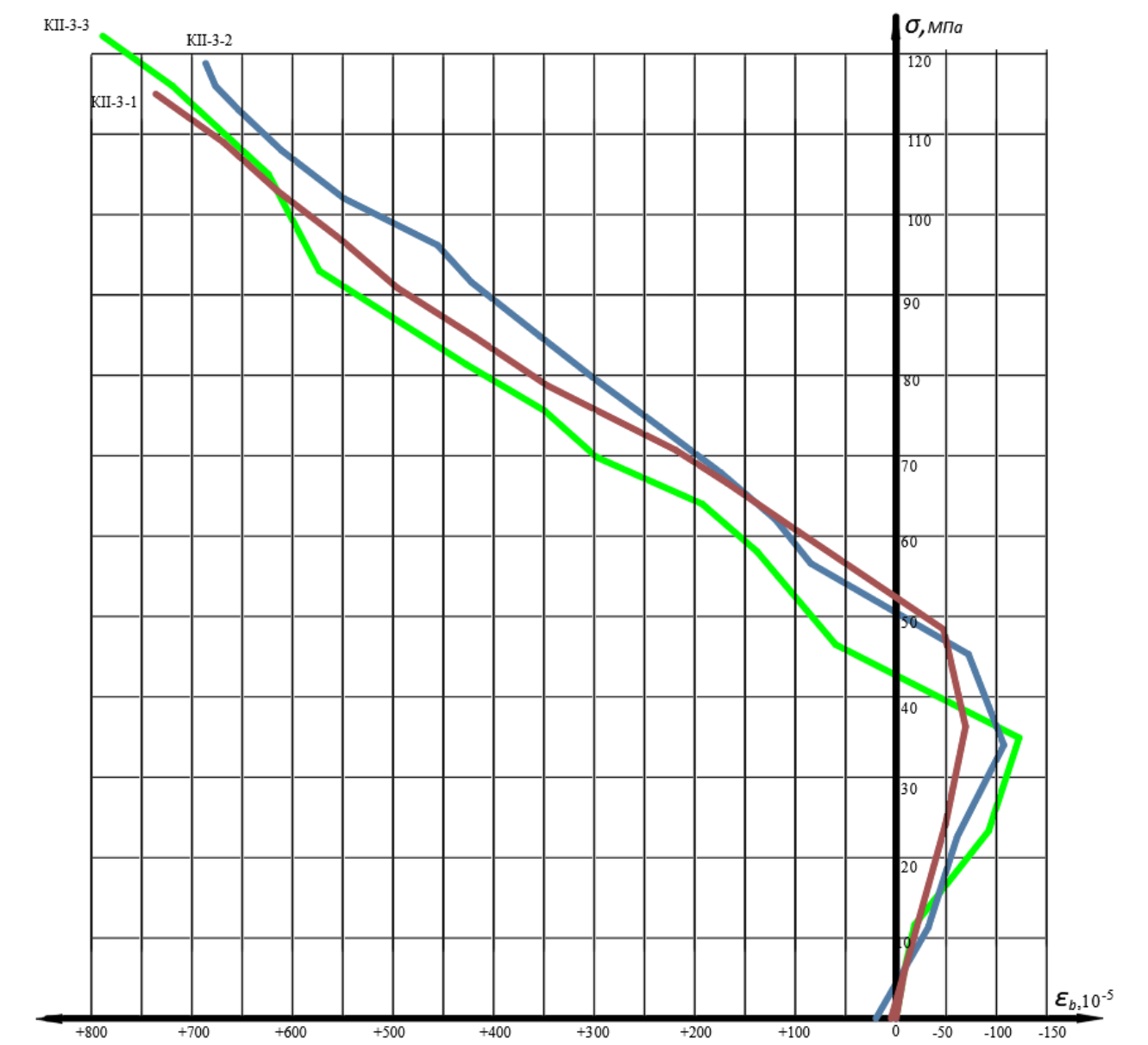


Рис. 3.54. Изменение объема бетона в процессе нагружения образцов серии КП-3с

3.1.1. Расчетно-теоретический анализ статической прочности сжатых бетонных цилиндров

Результаты выполненных экспериментальных исследований сжатых бетонных цилиндров, усиленных обоями из фибропластиковых сеток, свидетельствуют о том, что величина повышения прочности зависит от физико-механических характеристик материалов усиления, а также относительного насыщения сечений фибропластиковыми волокнами.

В процессе увеличения сжимающей силы происходит уменьшение объема бетона. Снижение скорости уменьшения объема бетона соответствует началу образования микротрещин в бетоне, усиленном обоймой, который наблюдается после превышения сжимающими напряжениями от действующей продольной силы начальной прочности бетона (прочности бетона без усиления). Затем происходит ускоренное увеличение объема бетона и при напряжениях, соответствующих около 70% от разрушающей нагрузки, объем бетона соответствует начальному объему бетона до приложения сжимающих напряжений. Перед разрушением усиленного обоймой бетона объем бетона увеличивается до 0,8-1,1%.

При нагружении сжатых бетонных элементов, усиленных фиброармированными обоймами, реализуется две схемы разрушения:

1. Происходит разрыв фиброармированных сеток усиления, который вызывает хрупкое разрушение бетона;
2. Происходит разрыв стыков сопряжения сеток, связанный с недостаточностью величины перехлеста сеток, после чего происходит разрушение бетона.

Первая форма разрушения опытных образцов является основной формой разрушения сжатых бетонных элементов, усиленных обоймами из фиброармированных пластиков.

Вторая форма разрушения исключается при достаточном перехлесте мест стыковки внахлест сеток усиления.

Обработка экспериментальных данных о величине деформаций в волокнах фиброармированных сеток усиления позволила определить напряжения обжатия бетона обоймой по следующей формуле:

$$\sigma_{bf} = \frac{2 \cdot t_f \cdot R_f}{r} .; \quad (3.3)$$

где σ_{bf} - напряжения сжатия, создаваемые обоймой;

t_f - площадь сечения волокон сетки на 1 см высоты;

R_f - напряжения растяжения в волокнах сетки

r - радиус круглого сечения образца.

Напряжения в волокнах сетки определяются по формуле:

$$R_f = \varepsilon_f \cdot E_f ; \quad (3.4)$$

Прочность бетона в цилиндрическом образце, усиленном облойкой и фибропластиковой сетки определяется по формуле:

$$R_{bf} = R_b^1 \left[2,25 \sqrt{1 - \frac{\sigma_f}{R_b^1}} - 1,25 - 2 \frac{\sigma_f}{R_b^1} \right]; \quad (3.5)$$

$$R_b^1 = 1,5 \cdot R_b ; \quad (3.6)$$

На рис. 3.55-3.60 представлено графики расчетной прочности опытных образцов первой партии в зависимости от величины продольных сжимающих напряжений в бетоне.

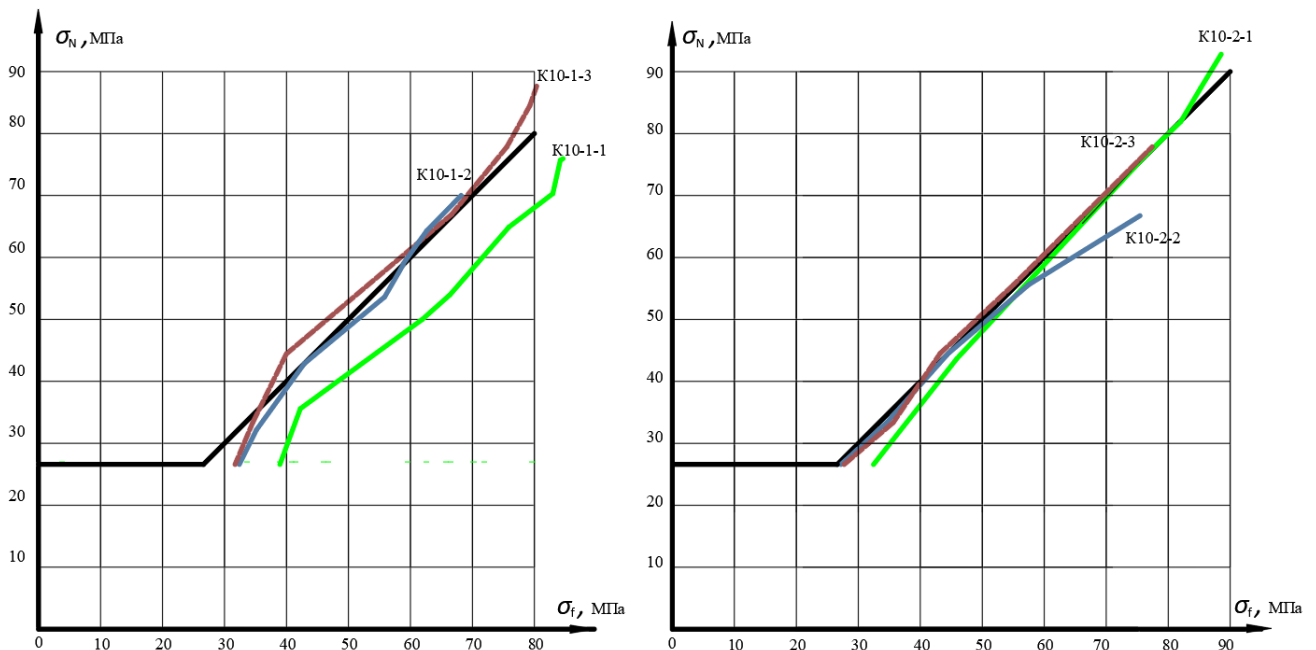


Рис. 3.55 – Расчетная прочность образцов серии K10-1с и K10-2с

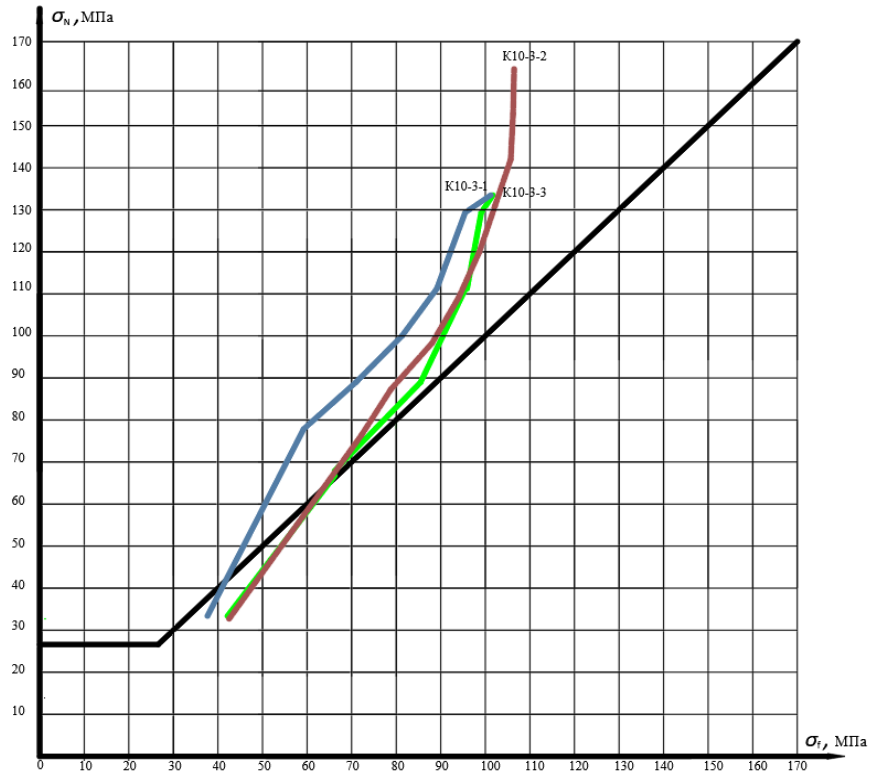


Рис. 3.56 – Расчетная прочность образцов серии K10-3с

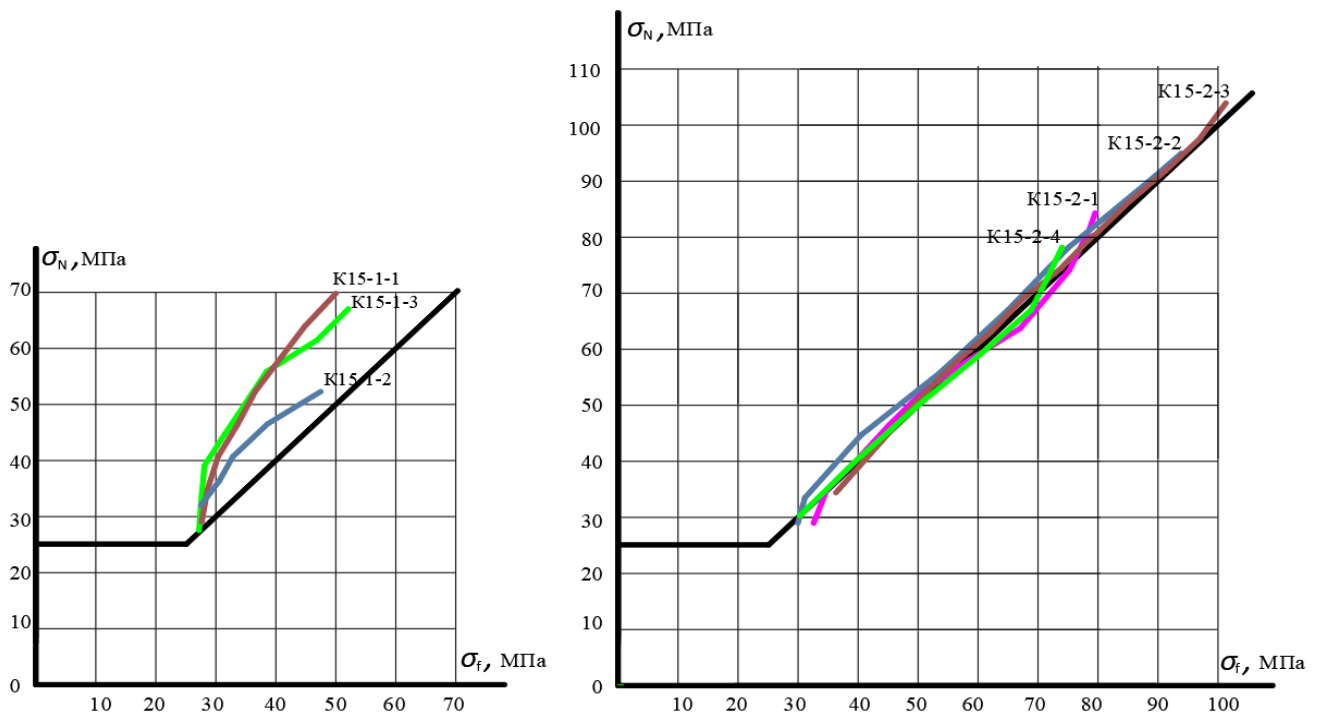


Рис. 3.57 – Расчетная прочность образцов серии K15-1с и K15-2с

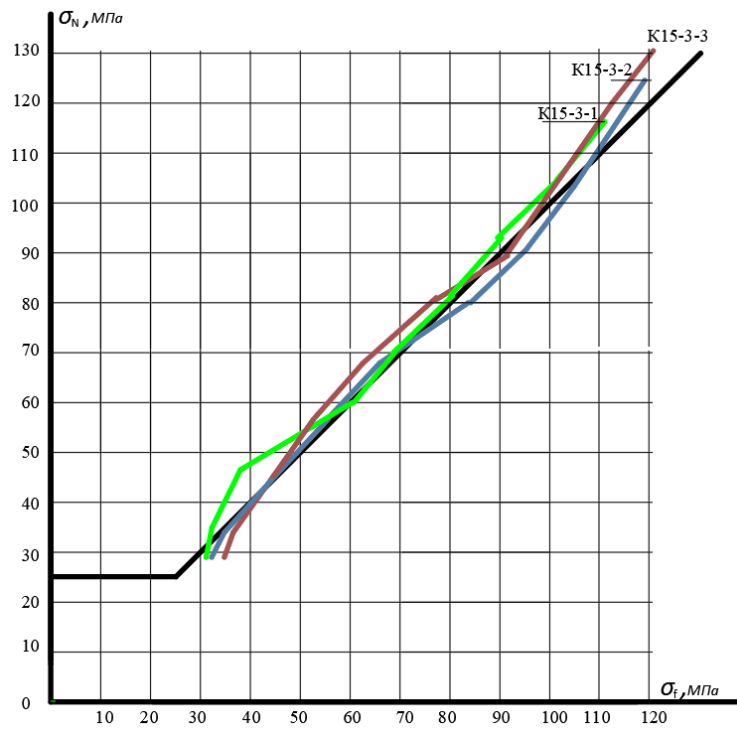


Рис. 3.58 – Расчетная прочность образцов серии K15-3с

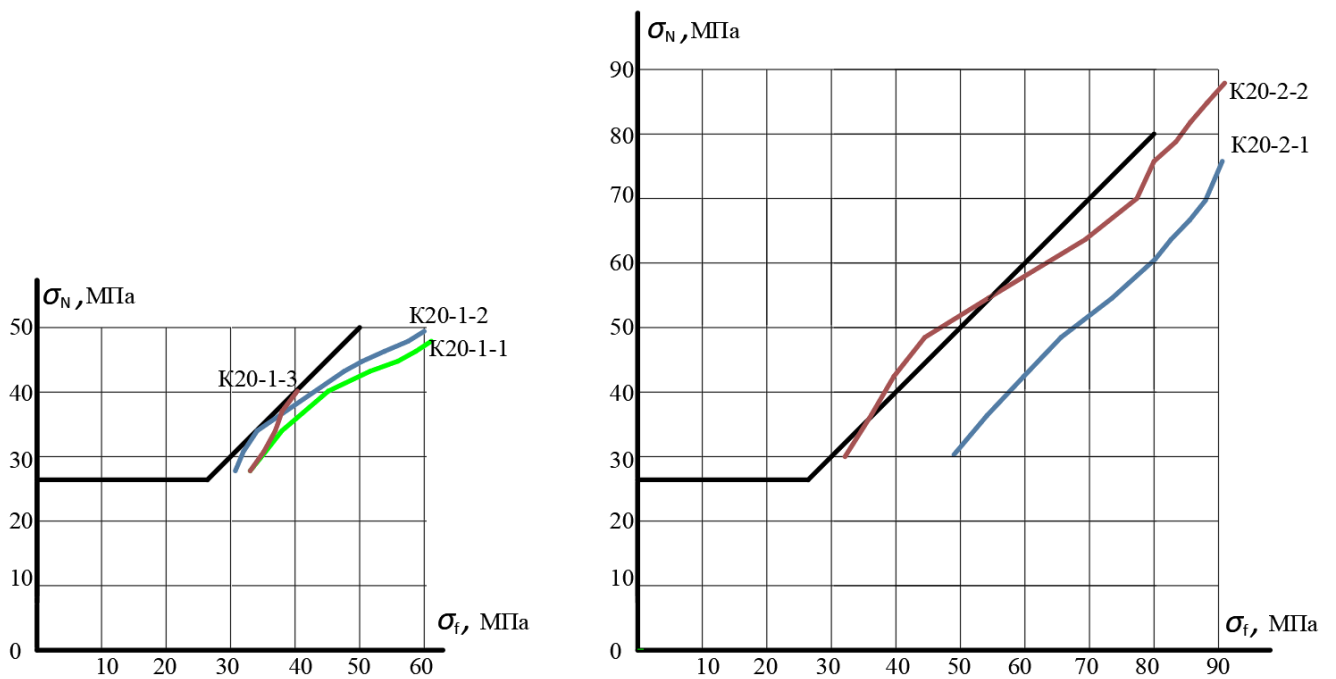


Рис. 3.59 – Расчетная прочность образцов серии K20-1с и K20-2с

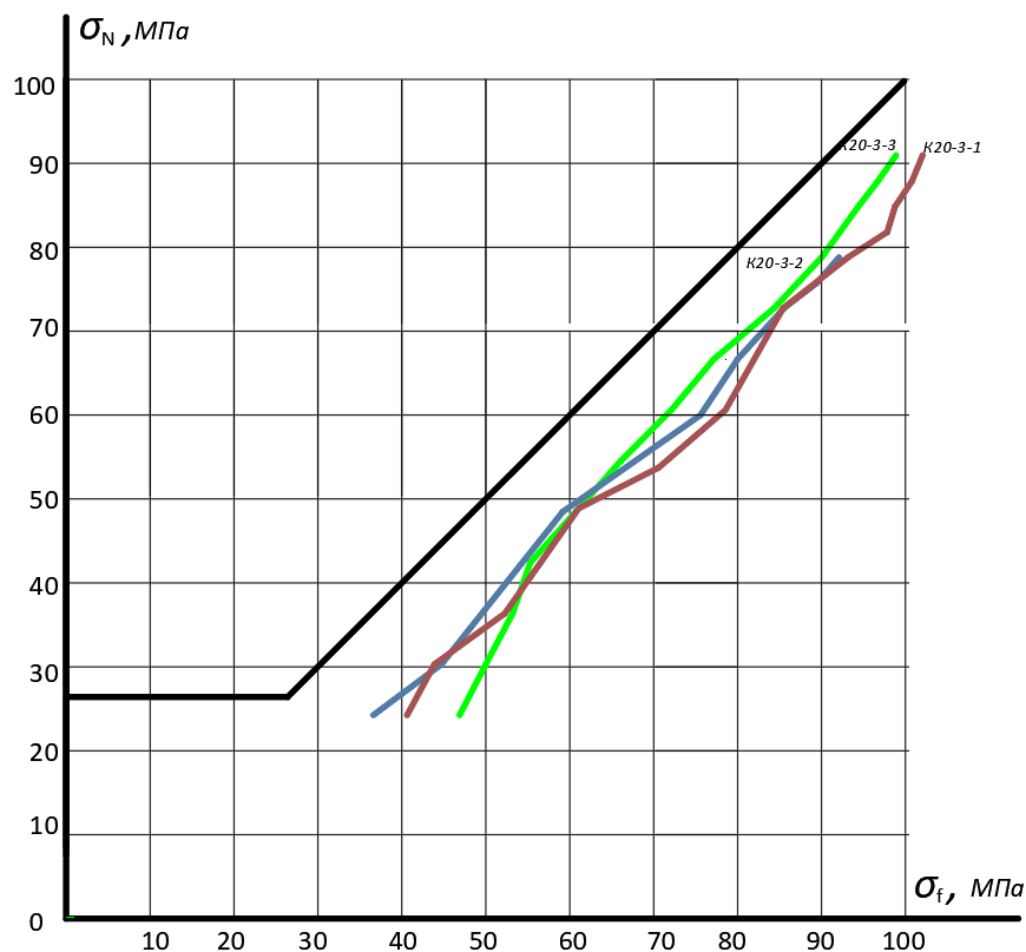


Рис. 3.60 – Расчетная прочность образцов серии K20-3с

Анализ данных рис. 3.55-3.60 показывает, что расчетная прочность образцов с одним и двумя слоями сетки удовлетворительно совпадает с теоретической прочностью.

Однако в образцах с тремя слоями сеток усиления расчетная прочность при величине внешней нагрузки, превышающей 70% несущей способности существенно меньше теоретической прочности.

В таблицах 3.7-3.9 представлены данные по опытной и расчетной разрушающей нагрузке образцов первой партии образцов.

Анализ данных таблиц 3.7-3.10 свидетельствует об удовлетворительном совпадении расчетной и опытной прочности бетонных цилиндров, усиленных обоймами из фиброармированных пластиков.

Таблица 3.7- Сравнение опытной и расчетной прочности образцов серии К10с

Марка	R_b МПа	t_f мм	E_f МПа	ρ_f	$\sigma_{оп}$ кН	σ_p кН	$\sigma_{оп}/\sigma_p$
К10-1с	26,6	0,245	245000	0,033	75,94	84,91	0,90
					69,67	68,22	1,02
					87,65	80,4	1,09
К10-2с				0,065	92,8	88,54	1,05
					66,74	75,45	0,88
					77,86	77,42	1,01
К10-3с				0,098	133,48	138,57	0,96
					163,5	153,91	1,06
					133,48	145,24	0,92

Таблица 3.8- Сравнение опытной и расчетной прочности образцов серии К15с

Марка	R_b МПа	t_f мм	E_f МПа	ρ_f	$\sigma_{оп}$ кН	σ_p кН	$\sigma_{оп}/\sigma_p$
К15-1с	25,1	0,245	245000	0,033	69,8	50,0	1,39
					52,3	47,48	1,10
					67,04	51,7	1,29
К15-2с				0,065	83,4	79,52	1,05
					100,4	94,8	1,06
					108,9	101,3	1,08
				83,8	74,0	1,15	
К15-3с				0,098	116,28	111,10	1,05
					124,52	123,0	1,01
	130,18	121,4	1,07				

Таблица 3.9-Сравнение опытной и расчетной прочности образцов серии К20-с

Марка	R_b МПа	t_f мм	E_f МПа	ρ_f	$\sigma_{оп}$ кН	σ_p кН	$\sigma_{оп}/\sigma_p$
К20-1с	26,4	0,245	245000	0,01225	47,88	61,1	0,78
					49,42	60,12	0,82
					40,16	40,48	0,99
К20-2с	26,4	0,245	245000	0,0245	75,76	90,58	0,84
					87,88	90,94	0,97
К20-3с	26,4	0,245	245000	0,03675	90,94	98,87	0,92
					90,9	102,07	0,89
					78,79	92,08	0,86

На рис. 3.61 и 3.62 представлено графики расчетной прочности опытных образцов второй партии в зависимости от величины продольных сжимающих напряжений в бетоне, в таблице 3.10 представлены данные по опытной и расчетной разрушающей нагрузке образцов второй партии образцов.

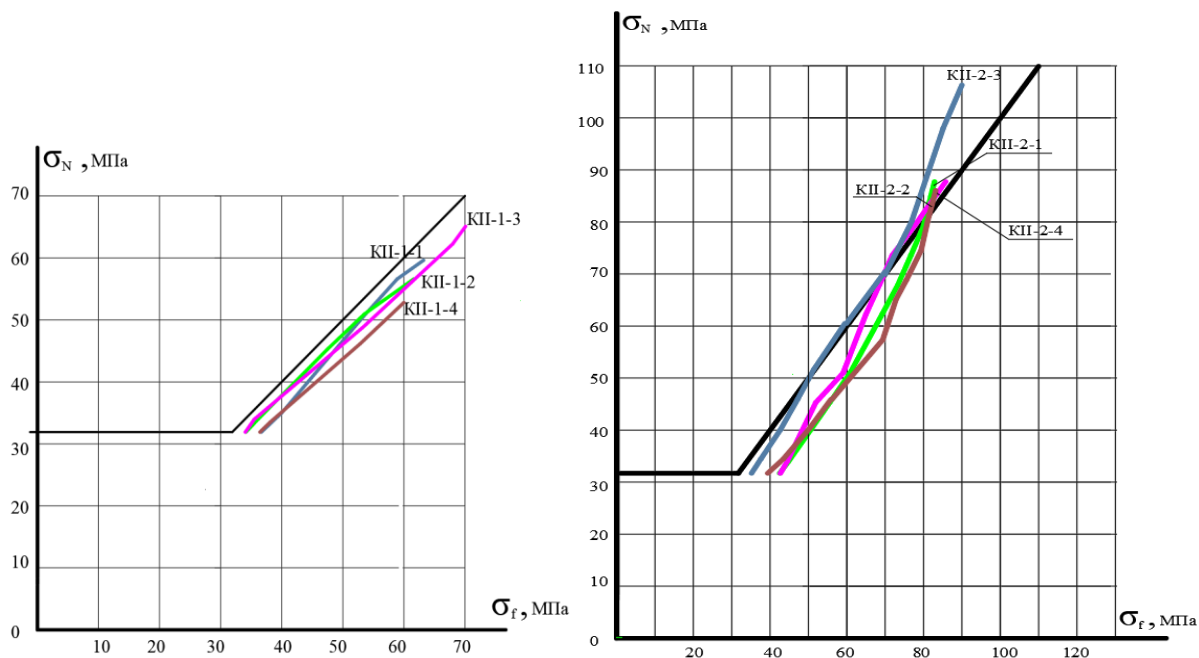


Рис. 3.61. Расчетная прочность образцов II партии КП-1 и КП-2

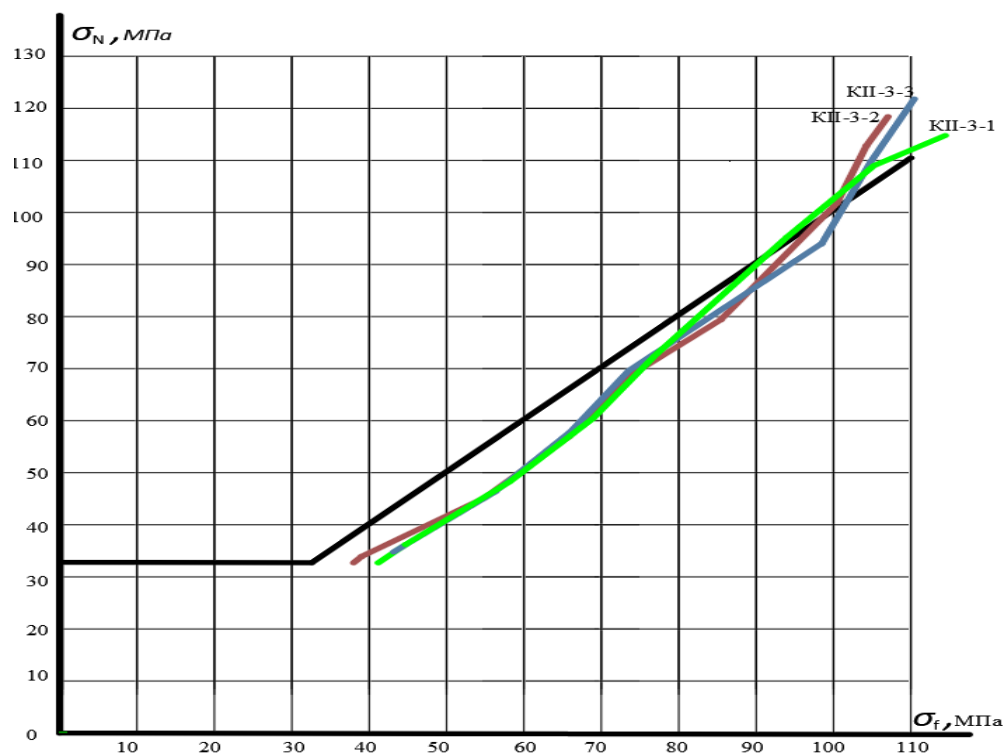


Рис. 3.62. Расчетная прочность образцов II партии

Таблица 3.10-Сравнение опытной и расчетной прочности образцов серии КИс

Марка	R_b МПа	t_f мм	E_f МПа	ρ_f	$\sigma_{оп}$ кН	σ_p кН	$\sigma_{оп}/\sigma_p$								
КИ-1с	31,65	0,293	230000	0,078	59,43	60,34	0,99								
					59,00	61,61	0,96								
					65,09	70,1	0,93								
КИ-2с					31,65	0,293	230000	0,156	87,9	84,11	1,04				
									86,62	80,59	1,07				
									106,2	94,19	1,13				
90,56									88,7	1,02					
КИ-3с									31,65	0,293	230000	0,039	115,0	118,8	0,97
													118,8	108,0	1,10
	122,0	110,76	1,10												

3.2. Динамические испытания бетонных цилиндров на сжатие

Влияние динамических повторных усилий изучалось на образцах бетонных цилиндров стандартных размеров при осевом сжатии, создаваемом с помощью гидравлической машины МВГ-1 при положительном коэффициенте асимметрии изменения усилий ($\rho = 0,0 \div 0,10$), частоте нагружения 1,0-1,5 герца и величине сжимающих напряжений, обеспечивающем нагружение опытных образцов за 100÷300 циклов.

Опытные образцы устанавливались на гидравлический домкрат мощностью 200 тс через динамометр стаканного типа с продольными и поперечными датчиками. При включении электродвигателей гидронасосы всасывали рабочую жидкость из маслобака и под давлением, и с требуемой производительностью подавали жидкость в напорную магистраль. Очищенная в фильтре жидкость (масло МГЕ46в) поступала в делитель потока и разветвлялась на основной поток и поток управления (рис. 3.62.).



Рис. 3.63. Динамические испытания образцов К15-1-1д и КИ-1д

При включении электронного усилителя электромагнит перемещает коромысло, перекрывая при этом сопла усилителя, что приводило к повышению давления в торцовых камерах золотника и его циклическому перемещению в крайние положения. Основной поток масла при этом перераспределялся между рабочими полостями домкрата, а орган управления включал электрогидравлический усилитель и делитель потока. При помощи регулятора и дросселя гидродинамической установки последняя настраивалась на необходимый предел давления. Генератором импульсов задавалась требуемая частота функционирования органа управления. Открывается клапан подачи давления в гидродомкрат и производится динамическое нагружение опытного образца.

В процессе динамических испытаний замерялись продольные и поперечные деформации бетона, а также величина сжимающего усилия. Регистрация динамических параметров производилась непрерывно с помощью специального регистрационного комплекса РСМ-8 на компьютере с шагом цифровки 0,008 сек.

Уровень максимальных сжимающих напряжений в процессе циклических нагружений постепенно менялся. При запуске пульсатора требовалось несколько циклов нагружения с постепенно увеличивающейся амплитудой усилий, затем величина усилий с помощью дросселя доводилась до требуемой величины, а при выключении пульсатора также был этап постепенного снижения амплитуды усилий. Поэтому для приведения фактического режима нагружения к эквивалентному с постоянными усилиями использовались следующие зависимости, учитывающие влияние нестационарных повторных нагружений на остаточную прочность бетона [52]:

$$\lg m_{k-i} = \frac{R_b - \sigma_i}{R_b - \sigma_k} \lg n_k, \quad (3.7)$$

$$n_i^{\text{экв}} = n_i + m_{k-i}, \quad (3.8)$$

где n_{k-i} – количество нагружений с максимумом напряжений σ_i , эквивалентное действию n_k нагружений с максимумом напряжений σ_k ;

$n_i^{экр}$ – приведенное к уровню напряжений σ_i количество повторных нагружений, эквивалентное действию n_k циклов нагружений с максимумом напряжений σ_k плюс n_i повторных нагружений с максимумом напряжений σ_i .

На рис. 3.64 представлен график изменения продольной сжимающей силы в процессе динамических испытаний образца без усиления К15-0-1д.

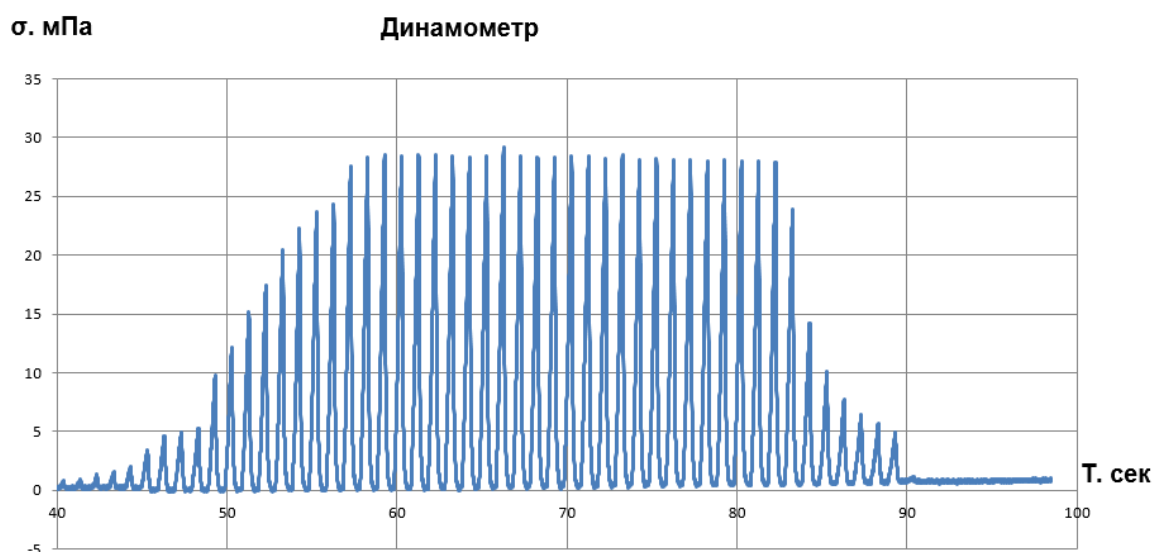


Рис. 3.64 – Изменение продольной силы в процессе динамических испытаний образца К15-0-1д

Этот образец выдержал 28 циклов нагружения с коэффициентом асимметрии усилий $\rho=0$, частотой нагружения 1 герц и максимальными усилиями $N=49,5$ кН ($\sigma_{\max} = 28$ МПа).

Используя известные зависимости [38] прочности бетона от количества немногочисленных нагружений ($\sigma_b^n = R_b[1 - a \lg n]$), можно предположить, что динамическая прочность бетона при этой скорости нагружения составляет около 30 МПа (коэффициент упрочнения $K=1,2$).

В Таблице 3.11 представлены основные параметры динамических испытаний бетонных цилиндров, усиленных одним слоем однонаправленных сеток MBRACE FIB CF 230/4900.530g/5.100m.

На рис. 3.65 и 3.66 представлены диаграммы продольных и поперечных деформаций бетона, наибольшая величина продольных деформаций составляла 1,77‰, а поперечных деформаций – 0,57‰.

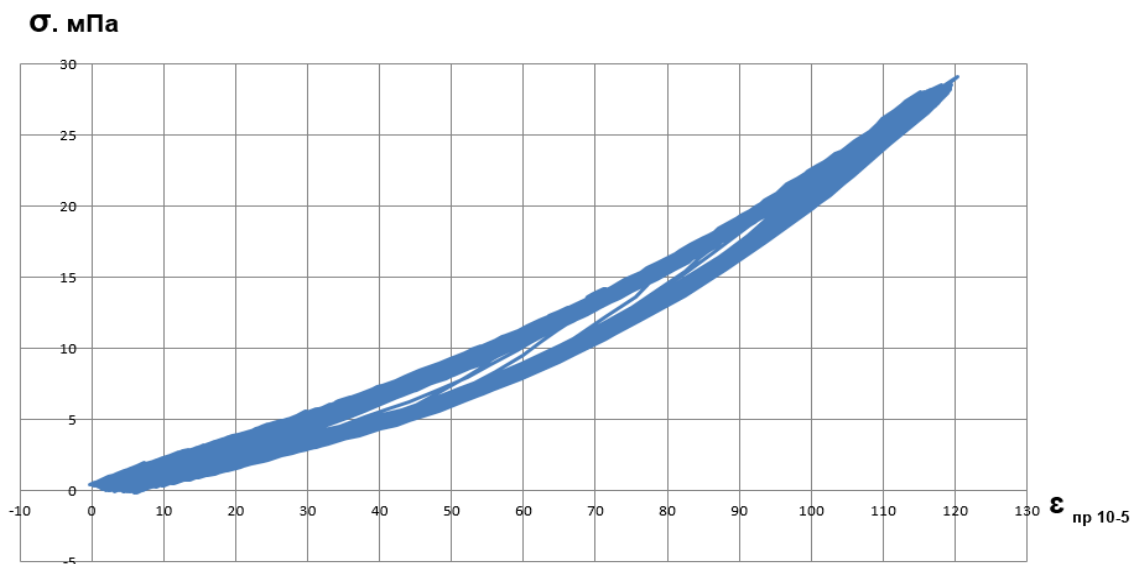


Рис. 3.65. Диаграмма продольных деформаций образца K15-0-1д в процессе динамических испытаний

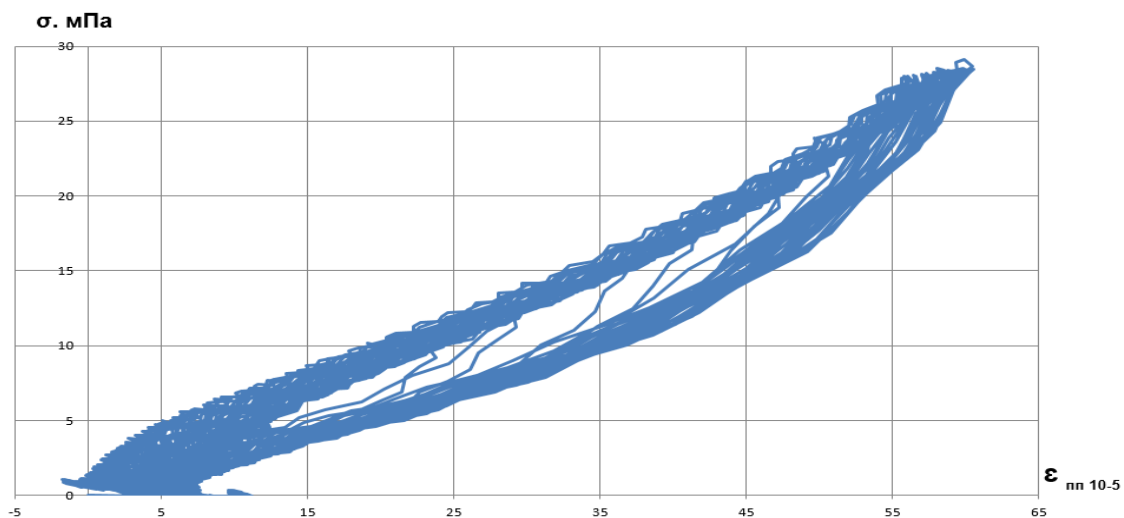


Рис. 3.66. Диаграмма поперечных деформаций бетона образца K15-0-1д в процессе динамических испытаний

На рис. 3.67 представлен график изменения продольной сжимающей силы в процессе динамических испытаний образца без усиления К15-1-1д

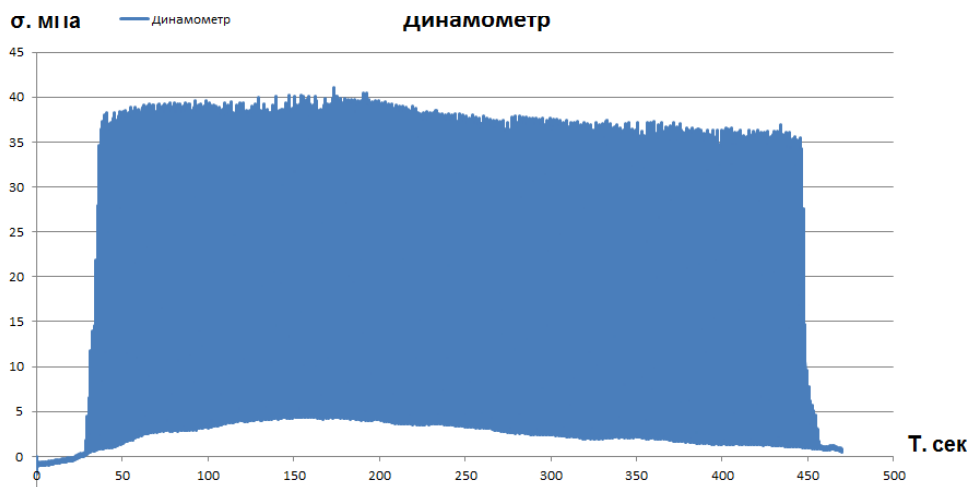


Рис. 3.67. Изменение продольной силы в процессе динамических испытаний образца К15-1-1д

К этому образцу было приложена 415 циклов нагружений с максимальными усилиями $N=70,7$ кН ($\sigma_{\max} = 40$ МПа). На рис. 3.68-3.69 представлены диаграммы продольных и поперечных деформаций бетона, наибольшая величина продольных деформаций составляла 1,77‰, а наибольшие поперечные деформации увеличились с 0,4‰ до 0,5‰.

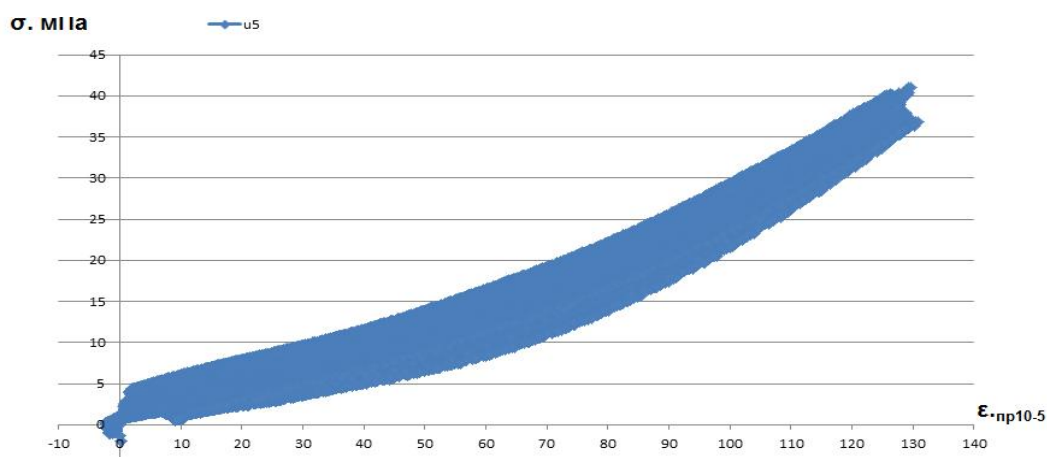


Рис. 3.68. Диаграмма продольных деформаций образца К15-1-1д в процессе динамических испытаний

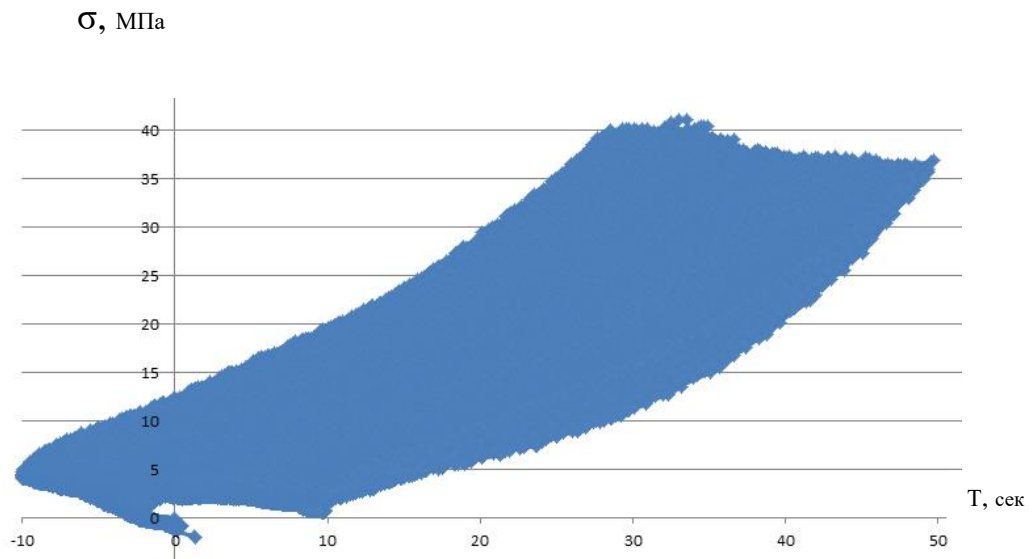


Рис. 3.69. Диаграмма поперечных деформаций образца К15-1-1д в процессе динамических испытаний

Таблица 3.11 – Результаты динамических испытаний образцов серии К15-1д

Марка образца	Продольная сила N, кН	Наибольшие напряжения σ_{\max} , МПа	Количество циклов, n	Деформации	
				$\epsilon_{\text{пр}}$ 10^{-5}	$\epsilon_{\text{пр}}$ 10^{-5}
К15-1-1д	70,7	40	415	177	40-50
К15-1-2д	64,5	36,5	410	125	39-42
К15-1-3д	60,8	34,4	320	105	21-33
К15-1-4д	61,4	34,8	325	74-98	44-68
К15-1-5д	59,5	33,7	89	127-137	64-87
К15-1-6д	57,7	32,7	260	125-146	60-87

Для оценки величины снижения прочности образцов после приложения динамических нагрузок, образцы были подвергнуты статическим испытаниям. Испытания образцов проводились с помощью гидравлического пресса АЛНРА 3-3000 S с поэтапным увеличением продольной сжимающей силы и замером продольных и поперечных деформаций.

В таблице 3.12 представлены основные результаты статических испытаний образцов, подвергавшихся динамическим воздействиям.

Таблица 3.12 – Результаты статических испытаний образцов серии К15-1д, предварительно подвергнутых повторным динамическим воздействиям

Марка образца	Разрушающая нагрузка, N, кН	Напряжения, σ , МПа	Деформации,		Остаточная прочность, σ/σ_0
			$\epsilon_{пр}$ 10^{-5}	$\epsilon_{пр}$ 10^{-5}	
К15-1-1д	1250	70,75	322	527	0,89
К15-1-2д	1200	67,92	220	418	0,85
К15-1-3д	1300	73,58	354	405	0,92
К15-1-4д	1200	67,92	232	284	0,85
К15-1-5д	1100	62,26	166	453	0,78
К15-1-6д	1400	79.24	285	531	0,99

На рис. 3.70 и 3.71 представлены диаграммы продольных и поперечных деформаций при статических испытаниях этих образцов.

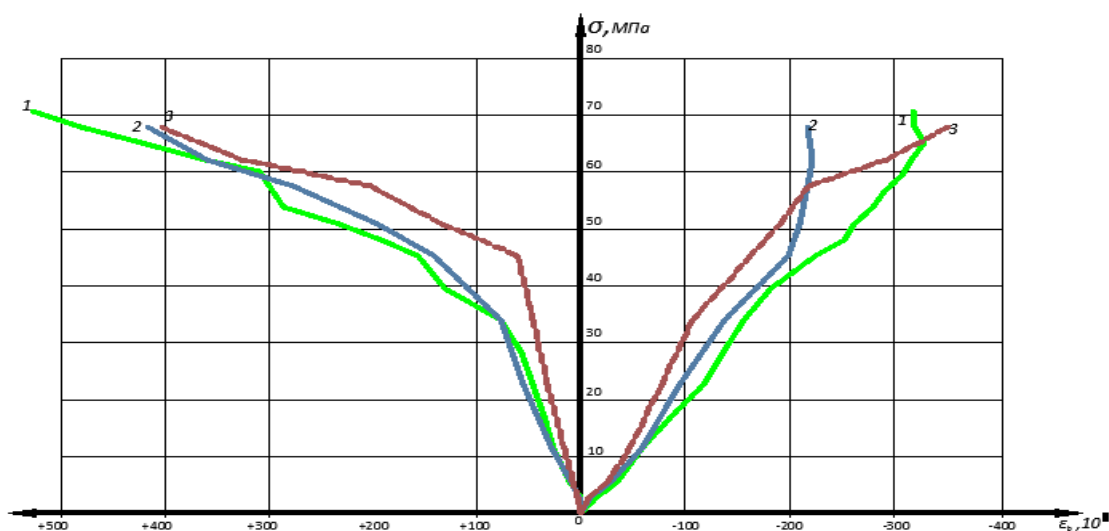


Рис. 3.70 – Диаграмма продольных и поперечных деформаций образцов К15-1-1д, К15-1-2д, К15-1-3д после динамических испытаний

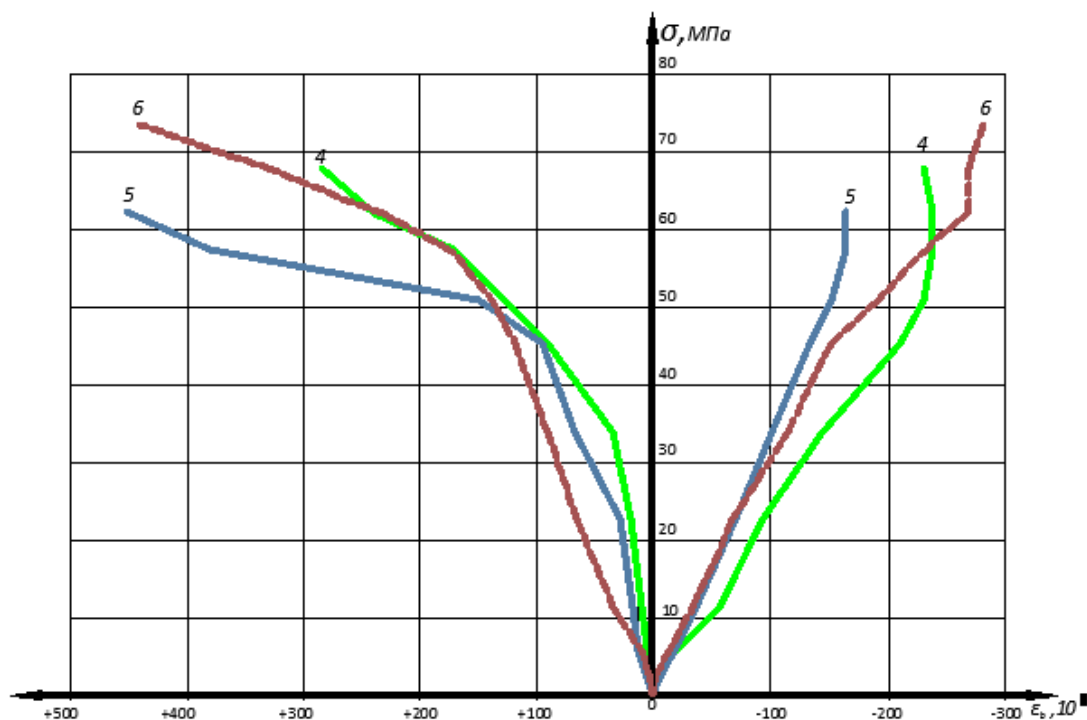


Рис. 3.71. Диаграмма продольных и поперечных деформаций образцов К15-1-4д, К15-1-5д, К15-1-6д после динамических испытаний

Опытные образцы серии КII, усиленные одним слоем сеток MBRACE FIB CF 230/4900.530g/5.100m, также подверглись динамическим испытаниям, в процессе которых создавались повторных нагружения, различавшиеся по амплитуде напряжений и количеству циклов нагружения.

В таблице 3.13 представлены основные параметры динамических испытаний бетонных цилиндров, усиленных одним слоем однонаправленных сеток MBRACE FIB CF 230/4900.530g/5.100m.

Таблица 3.13 – Динамические характеристики испытания образцов серии КII-1д

Марка образца	Амплитуда напряжений σ_n , МПа	σ_n/σ_u	Количество циклов нагружения, n	Продольные деформации $\epsilon_{пр}$, 10^{-5}	Поперечные деформации $\epsilon_{поп}$, 10^{-5}

КП-1-1д	20,5	0,33	94	184	61
КП-1-2д	20	0,33	92	168	58
КП-1-3д	26,5	0,43	140	173	-
КП-1-4д	38	0,62	259	296	61
КП-1-5д	37,5	0,61	298	216	54
КП-1-6д	35	0,57	175	243	168
КП-1-7д	38	0,43	180	259	210
КП-1-8д	37	0,60	240	304	184
КП-1-9д	37,4	0,61	309	298	213
КП-1-10д	39	0,64	240	267	206
КП-1-11д	43	0,70	86	360	216

На рис. 3.72 представлен график изменения продольной сжимающей силы в процессе динамических испытаний образца КП-1-1д. К этому образцу было приложена 94 цикла нагружений с амплитудой максимальных напряжений $\sigma_{\max} = 20,5$ МПа. Наибольшие продольные деформации бетона составили 3,6‰, наибольшие поперечные деформации 2,16‰.

На рис. 3.73-3.74 представлены диаграммы напряжений, продольных и поперечных деформаций образцов серии КП-1д. Диаграмма продольных деформаций на первых циклах повторных нагружений носит выпуклый характер, затем диаграмма приобретает линейный характер и постепенно превращается в вогнутую зависимость.

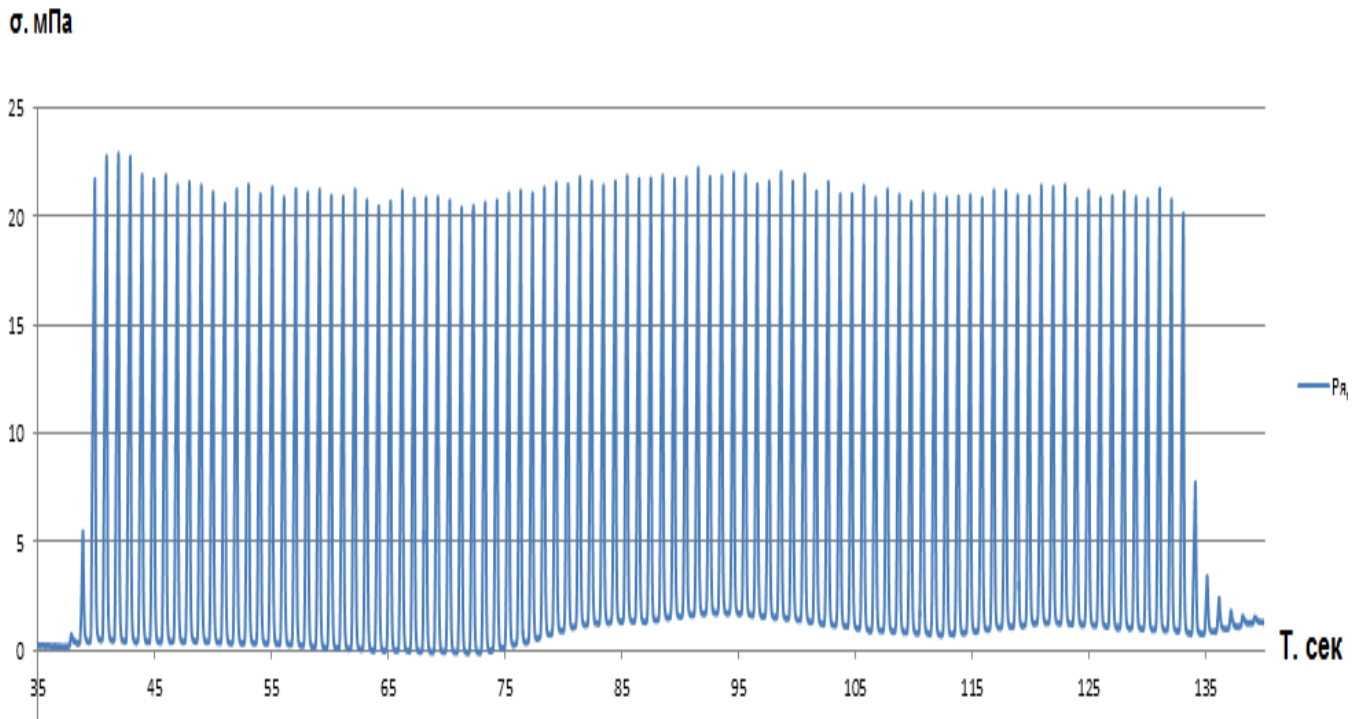


Рис. 3.72. Динамическая нагрузка на образец КП-1-1д

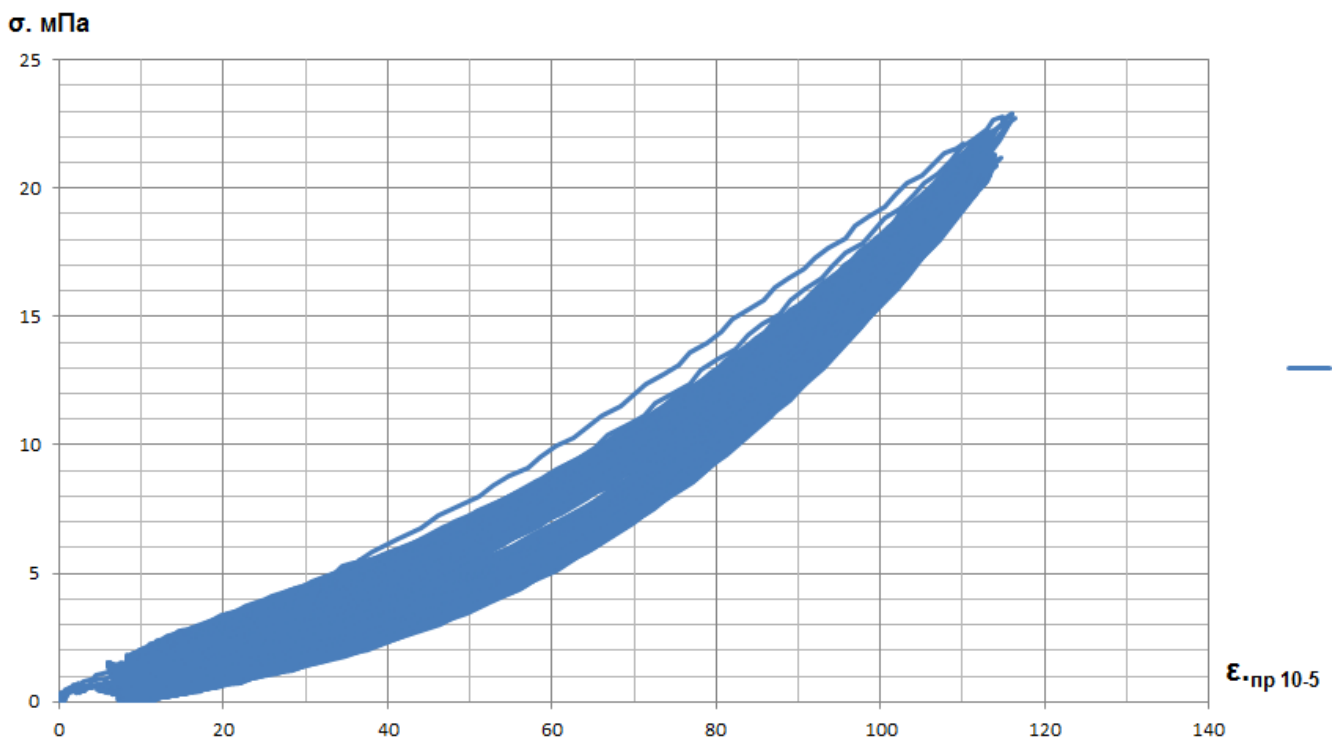


Рис. 3.73. Диаграмма продольных деформаций образца КП-1-1д

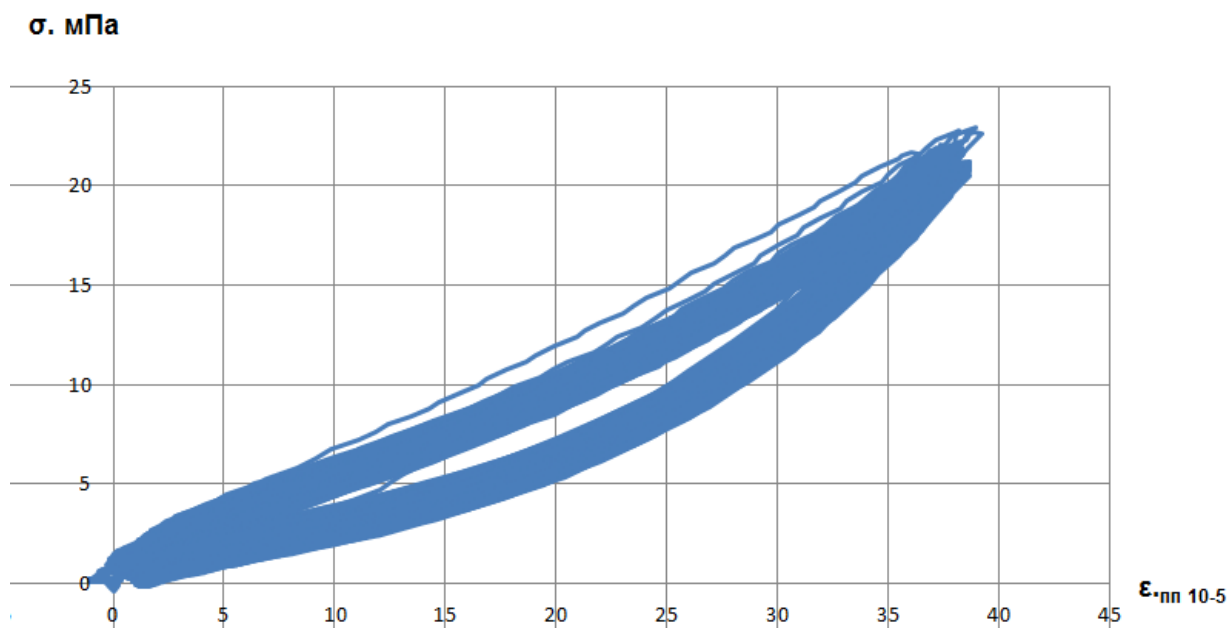


Рис. 3.74. Диаграмма поперечных деформаций образца КИ-1-1д

Для оценки влияния динамических повторных нагрузок, после динамических испытаний образцы были подвергнуты статическим испытаниям. Испытания образцов проводились с помощью гидравлического пресса АЛНРА 3-3000 S с поэтапным увеличением продольной сжимающей силы и замером продольных и поперечных деформаций.

Повторные динамические воздействия на образцы серии КИ-1д привели к снижению деформативности образцов, а также уменьшению прочности. Прочность образцов после динамических воздействий уменьшилась на 7-17%. В процессе повторных нагружений продольные деформации возросли на 8-15%, а поперечные деформаций - до 20%.

В таблице 3.14 представлены основные результаты статических испытаний образцов, предварительно подвергавшихся повторным динамическим воздействиям, а на «рис. 3.68.» представлены диаграммы статических испытаний образцов, подвергнувшихся этапу динамических повторных нагружений.

Таблица 3.14 – Результаты статических испытаний образцов серии КИ-1, предварительно подвергнутых динамическим воздействиям

№ пп	Марка образца	Разрушающие напряжения, σ , МПа	Деформации,		Остаточная прочность, σ/σ_0
			$\varepsilon_{пр} 10^{-5}$	$\varepsilon_{пол} 10^{-5}$	
1	КИ-1-1д	70,3	436	482	
2	КИ-1-2д	74,08	-	-	
3	КИ-1-3д	58,9	175	-	0,96
4	КИ-1-4д	68,18	363	294	
5	КИ-1-5д	58,93	218	364	0,96
6	КИ-1-6д	71,76	240	434	
7	КИ-1-7д	63,7	351	437	0,83
8	КИ-1-8д	71,7	348	483	
9	КИ-1-9д	53,63	180	205	0,87
10	КИ-1-10д	57,36	238	212	0,93
11	КИ-1-11д	65,78	254	-	

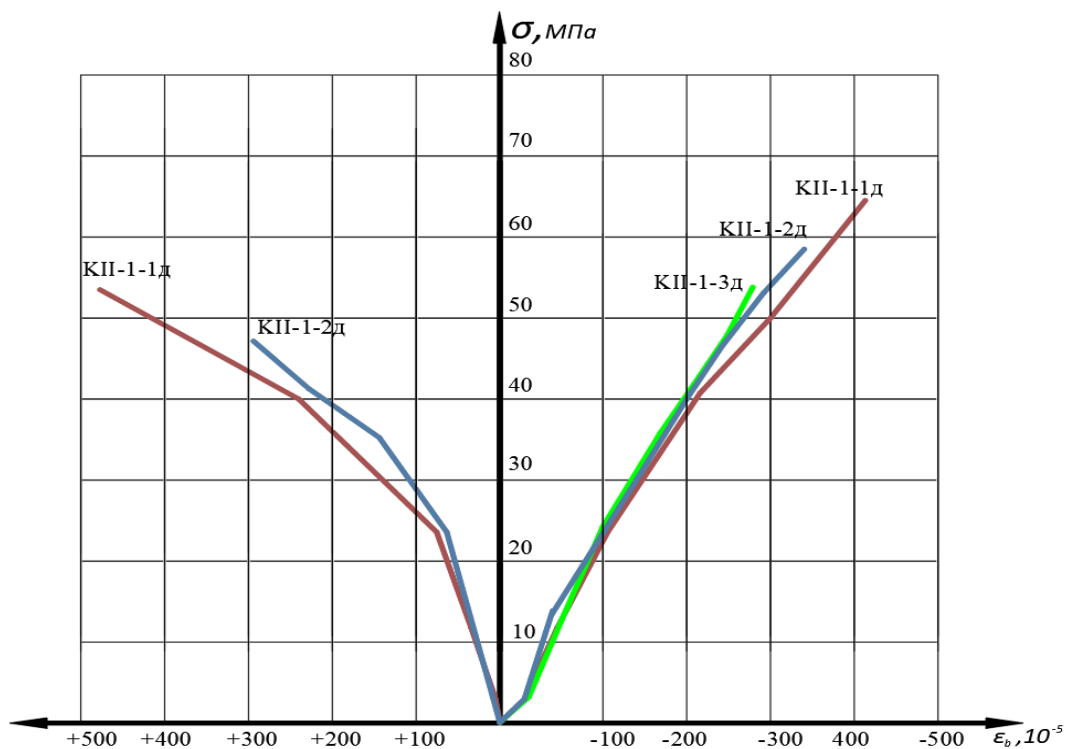


Рис. 3.68. Диаграмма продольных и поперечных деформаций образцов КИ-1-1д, КИ-1-2д, КИ-1-3д после динамических испытаний.

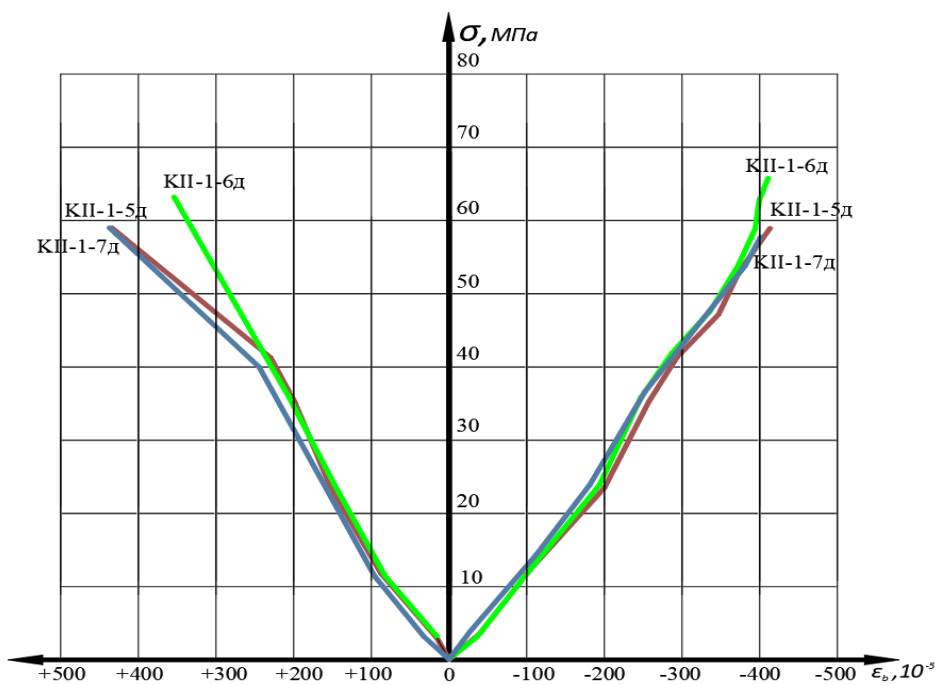


Рис. 3.68. Диаграмма продольных и поперечных деформаций образцов КИ-1-5д, КИ-1-6д, КИ-1-7д после динамических испытаний.

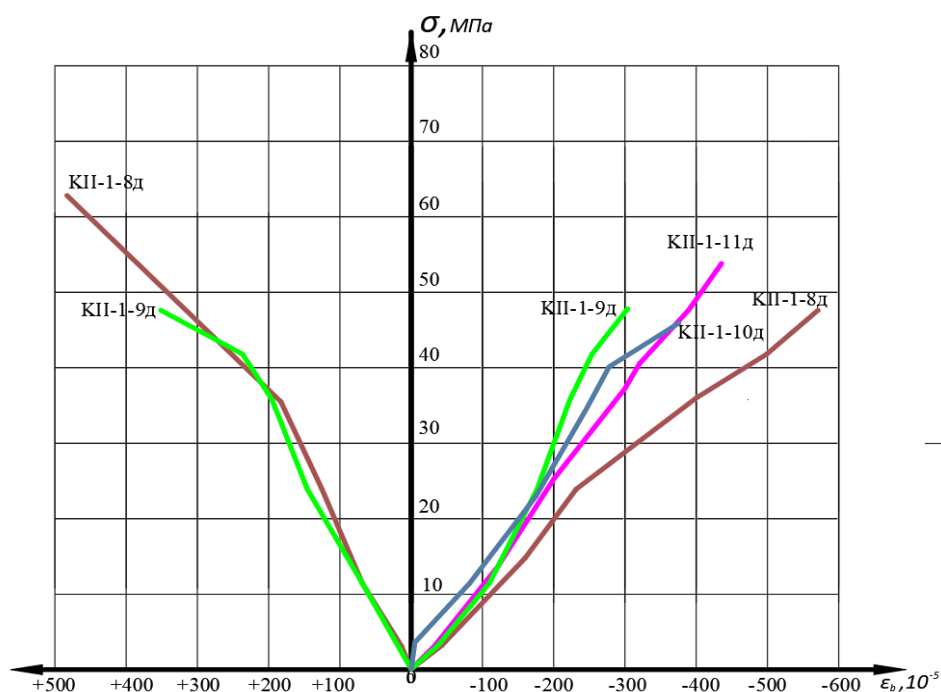


Рис. 3.68. Диаграмма продольных и поперечных деформаций образцов КII-1-5д, КII-1-6д, КII-1-7д после динамических испытаний.

Заключения по Главе 3

Результаты испытаний цилиндров, усиленных карбоновыми фиброволокнами (ФАП) при осевом сжатии, привело к повышению прочности в 2,0-5,5 раза

Предельные деформации бетона, усиленного обоями из ФАП, увеличились до 0,4-0,5 %, а поперечные деформации бетона и деформации удлинения волокон ФАП достигают значений 0,45-0,55%.

Динамические испытания опытных образцов, усиленных обоями ФАП, при действии немногочисленных повторных нагружений с частотой нагружения один герц и коэффициенте асимметрии изменения усилий около нуля, позволили получить эмпирическую зависимость прочности от количества повторных нагружений. Динамическая прочность бетона превышала статическую прочность почти на 25%.

ГЛАВА 4. ИССЛЕДОВАНИЯ РАБОТЫ СЖАТЫХ БЕТОННЫХ ПРИЗМ

4.1. Исследования сжатых призм при статическом нагружении

Изучение работы сжатых элементов, усиленных обоймами из карбонатных сеток S&P C Sheet 240, производилось на бетонных призмах стандартных размеров 100x100x400 мм и 200x200x800 мм, различавшихся количеством слоев сеток усиления. Часть образцов испытана при осевом действии квазистатического сжатия на гидравлическом прессе ИПС-250. Образцы центрировались по физической оси при величине сжимающих напряжений, не превышающих 30% от призмной прочности бетона. Затем образцы подвергались действию осевого сжатия с поэтапным увеличением величины продольной сжимающей силы со скоростью 0,3 МПа/сек., вплоть до разрушения образца. Величина этапа увеличения нагрузки не превышала 5÷8 % от разрушающей нагрузки. В процессе нагружения замерялись продольные и поперечные деформации опытных образцов с помощью тензодатчиков с базой 50 мм, наклеенных на все боковые грани образцов, и автоматического измерителя деформаций АИД-4М (рис. 4.1, 4.2.).



Рис. 4.1. Общий вид испытания бетонной призмы на осевое сжатие на гидравлическом прессе ИПС-250

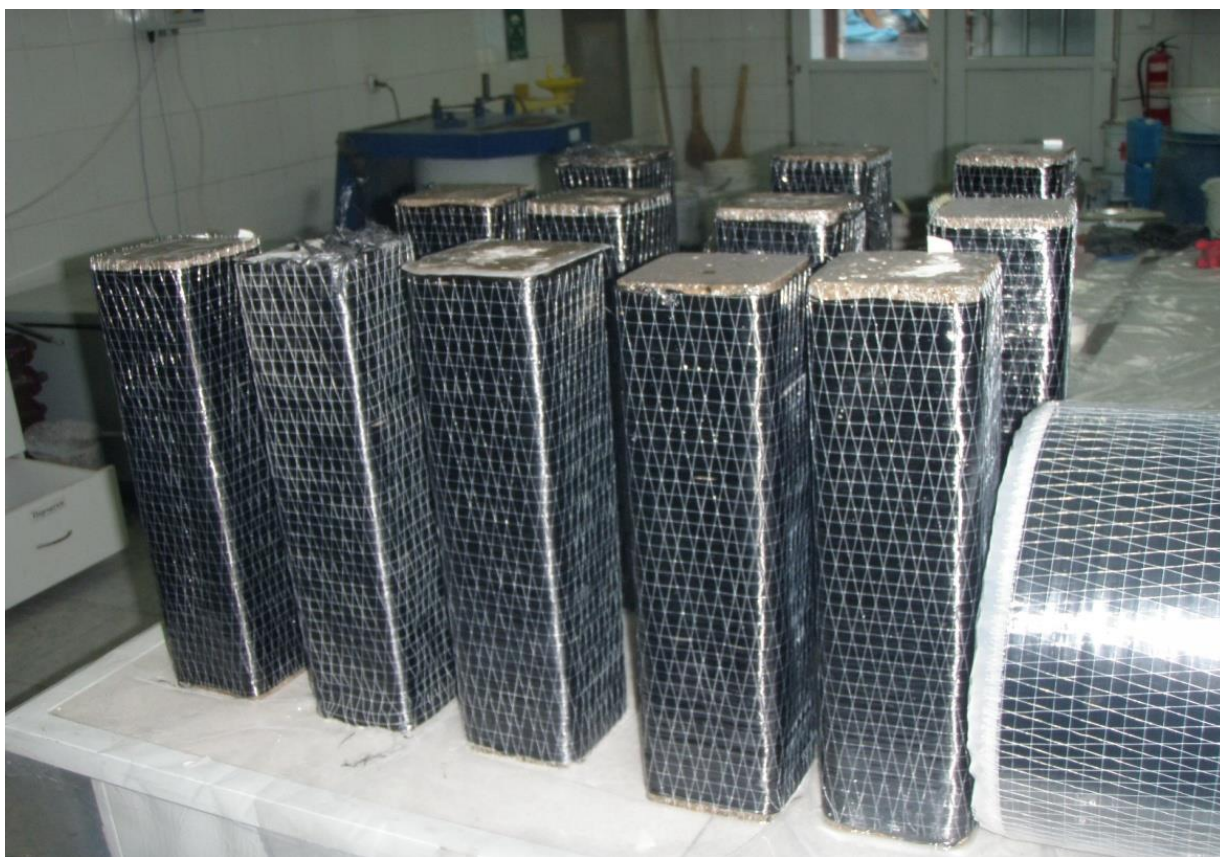


Рис. 4.2. опытные образцы усиленных бетонных призм

Для усиления бетонных элементов использовались карбоновые однонаправленные листы S&P C Sheet 240, имеющие следующие характеристики: $t_f = 0,117$ мм; $E = 240\,000$ МПа; прочность волокон 3800 МПа.

Диаграмма растяжения сетки имеет линейный вид, т.е. волокна растягивались упруго. Замеры длины образцов, произведенные по предварительно нанесенным насечкам по длине с шагом 20 мм, подтвердили, что в волокнах после испытаний нет остаточных деформаций.

Статические испытания бетонных призм производились при осевом действии квазистатического сжатия на гидравлическом прессе ИПС-250. Образцы центрировались по физической оси при величине сжимающих напряжений, не превышающих 30% от призмной прочности бетона, а затем образцы подвергались действию осевого сжатия с поэтапным увеличением величины

продольной сжимающей, силы со скоростью 0,3 МПа/сек., вплоть до разрушения образца.

В таблицах 4.1 - 4.3 представлены данные по призменной прочности бетона, величине усиления образцов сетками, предельным продольным и поперечным деформациям бетона, начальному модулю упругости и величине коэффициента Пуассона для призм первой и второй партий бетона, соответственно. Разрушение образцов, усиленных карбоновыми фиброволокнами (ФАП), происходит постепенно. Сначала появляется треск, вызванный разрывом отдельных фиброволокон, с увеличением нагрузки затем треск увеличивается и происходит хрупкое раздавливание бетона в зоне разрыва сетки, сопровождающееся резким звуком. Чем больше слоев усиления, тем раньше начинается процесс разрыва волокон сеток (рис. 4.3.).

Таблица 4.1 - Статическая прочность бетона 1 партии образцов призм размерами 100x100x400 мм

№ образцов	Усиление образцов	Призменная прочность R_b , МПа	Средняя прочность R_b , МПа	Соотношение прочности образцов	Предельные деформации		$E_b \cdot 10^3$ МПа	ν
					$\epsilon_{пр}$, 10^{-5}	$\epsilon_{пп}$, 10^{-5}		
1	Без усиления	39,6	38,7	1,00	-158,4	+37	31,5	0,14
2		42,4			-165,2	+49,5	28,5	0,15
3		36,7			-159,3	+32,3	24	0,18
4		36,0			-154,8	+32	22,6	0,173
5	Один слой усиления	52,0	51,7	1,34	-365,9	+226,1	28,8	0,19
6		51,0			-510	+401,4	26,8	0,171
7		52,0			-300	+236,8	28,0	0,16
8	Два слоя усиления сетками	63,2	70,0	1,81	-276,8	+545	32,6	0,20
9		70,0			-342,5	+374	33,3	0,20
10		76,7			-341,8	+451	31,6	0,24
11	Три слоя усиления сетками	72,4	75,6	1,95	-305,8	+344,3	33,7	0,20
12		77,2			-330	+524	34,8	0,20
13		77,2			-258,6	+275	27,2	0,21

Анализ данных таблицы 4.1 показывает, что усиление образцов путем обертывания (оклеивания) материалом серии S&P C Sheet 240 привело к существенному повышению прочности бетона, имеющего возраст около 15 лет. Так, однослойные сетки увеличили прочность бетона в среднем на 34%, двухслойные привели – на 81,5, а трехслойные сетки – на 95%. В тоже время, эффект усиления существенно зависит от качества наклейки сетки, чем плотнее они прилегают к бетону, тем выше их эффективность.

В таблице 4.2 приведены данные по испытанию образцов из бетона в возрасте нескольких месяцев.



Рисунок 4.3. Характер разрушения призм: не усиленной, усиленной одной и тремя слоями сеток

Таблица 4.2 - Статическая прочность бетона 2 партии образцов призм размерами 100x100x400 мм

№ образцов	Усиление образцов	Призменная прочность R_b , МПа	Средняя прочность R_b , МПа	Соотношение прочности усиленных образцов	Предельные деформации		$E_b \cdot 10^3$ МПа	ν
					$\epsilon_{pr} \cdot 10^{-5}$	$\epsilon_{sp} \cdot 10^{-5}$		
1		26,4			130	45	27,0	0,19
2	Без	29,1	33,6	1,00	150	40	20,4	0,17

3	усиления	41,2			110	23	19,6	0,22
4	Один	42,4			232	62	23,5	0,14
5	слой	47,2	44,8	1,38	170	49	26,1	0,13
6	усиления	37,3			100	31	24,4	0,14
7	Два слоя	78,4			360	450	26	0,17
8	усиления	80,5	75,8	2,35	420	270	29	0,15
9	сетками	68,7			330	450	23	0,14
10	Три слоя	66,6			280	450	28,3	0,13
11	усиления	72,6	74,5	2,30	320	270	31,8	0,12
12	сетками	84,4			360	300	30,2	0,13

Анализ данных таблицы 4.2. показывает, что усиление путем обвертывания (обклеивания) материалом серии S&P C Sheet 240 бетонных образцов из бетона в возрасте нескольких месяцев привело к большему повышению прочности бетона, чем бетона в возрасте 15 лет. Так, однослойные сетки увеличили прочность бетона на 38%, а двухслойные и трехслойные сетки - на 130-135%. Это связано с тем, что с возрастом бетона уменьшаются его предельные деформации, поэтому снижается и величина повышения прочности бетона в обойме. В тоже время, эффект усиления существенно зависит от качества наклейки сетки, чем плотнее они прилегают к бетону, тем выше их эффективность.

Для оценки масштабного фактора проведены испытания 12 бетонных призм размерами 200x200x800 мм. По три призмы испытаны без усиления, а также с однослойным, двухслойным и трехслойным усилением сетками S&P C Sheet 240. Возраст бетона во время испытания образцов составлял около двух месяцев. В таблице 4.3. приведены основные результаты испытаний призм размерами 200x200x800 мм, а на «рис. 4.4.» представлены данные по продольным и поперечным деформациям серий образцов, не имеющих усиления, а также усиленных одним, двумя и тремя слоями сеток S&P C Sheet 240.

Таблица 4.3 - Статическая прочность бетона 2 партии образцов призм размерами 200x200x800 мм

№ образцов	Усиление образцов	Призменная прочность R_b , МПа	Средняя прочность R_b , МПа	Соотношение прочности усиленных образцов	Предельные деформации		$E_b \cdot 10^3$ МПа	ν
					$\epsilon_{тр}$, 10^{-5}	$\epsilon_{сп}$, 10^{-5}		
1	Без усиления	33,1	33,1	1,00	200	35	28,3	0,15
2		33,1			170	45	37,1	0,14
3		33,1			150	42	30,3	0,12
4	Один слой сеток усиления	33,1	33,2	1,01	70	30	34,3	0,24
5		34,4			160	55	34,3	0,15
6		31,8			160	55	34,0	0,24
7	Два слоя сеток усиления	39,3	39,3	1,19	300	240	31	0,13
8		39,3			280	105	30,4	0,18
9		39,3			265	80	30,2	0,12
10	Три слоя сеток усиления	41,7	44,6	1,35	300	240	33	0,18
11		49,1			275	110	34,3	0,20
12		42,9			360	300	41,9	0,23

Анализ данных таблицы 4.3. показывает, что усиление образцов путем обвертывания (оклеивания) материалом серии S&P C Sheet 240 привело к повышению прочности бетона в призмах размерами 200x200x800 мм, но существенно меньшему, чем в призмах размерами 100x100x400 мм (см. табл.4.2.). Так, однослойные сетки практически не увеличили прочность образцов, а двухслойные и трехслойные сетки привели к увеличению прочности на 19% и 35%, соответственно. Это свидетельствует о существенном влиянии размеров поперечного сечения элементов на эффективность усиления наружными сетками.

Оклеивание бетона карбоновыми фиброволокнами (ФАП) привело к увеличению предельных деформаций бетона в призмах размерами 200x200x800 мм, но существенно меньшему, чем в призмах размерами 100x100x400 мм. Усиление образцов одним слоем сетки мало отразилось на предельной сжимаемости бетона. В образцах, усиленных двумя и тремя слоями сеток,

продольные деформации бетона увеличились на 62%, а поперечные деформации увеличились в 3,5 раза по сравнению с не усиленными образцами.

Обоймы из карбоновых фиброволокон (ФАП) привели к увеличению предельных деформаций бетона. Усиление образцов одним слоем сетки привело к увеличению предельной сжимаемости бетона первой партии – 81%, а второй партии - на 28,7% и увеличению поперечных деформаций, соответственно в 7 раз и на 43%. В образцах, усиленных двумя слоями сеток, продольные деформации бетона увеличились, соответственно, в 2 и 2,85 раза, а поперечные деформации увеличились, соответственно, в 12,1 и 10,8 раз. В образцах, усиленных тремя слоями сеток, продольные деформации бетона увеличились, соответственно, в 1,81 и 2,85 раза, а поперечные деформации увеличились, соответственно, в 7,64 и 10,8 раз.

На рис. 4.4 ÷ 4.7 представлены графики средних продольных и поперечных деформаций бетона 1 и 2 партии образцов призм размерами 100x100x400 мм.

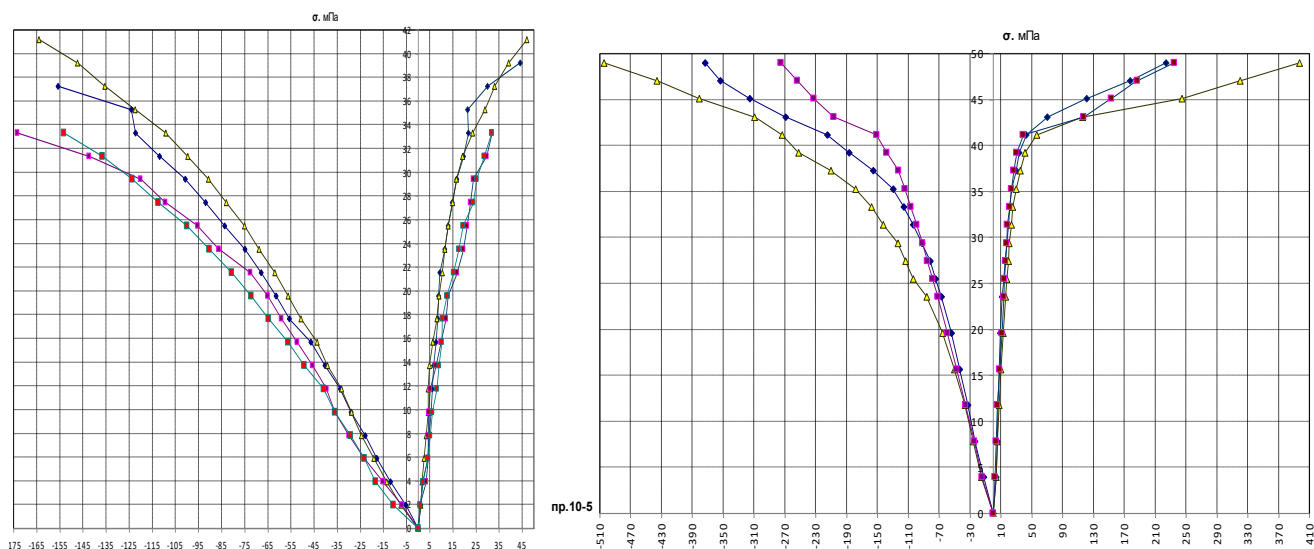


Рис. 4.4. Усредненные продольные и поперечные деформации бетонных призм 1 партии без усиления и усиленных одним слоем сетки

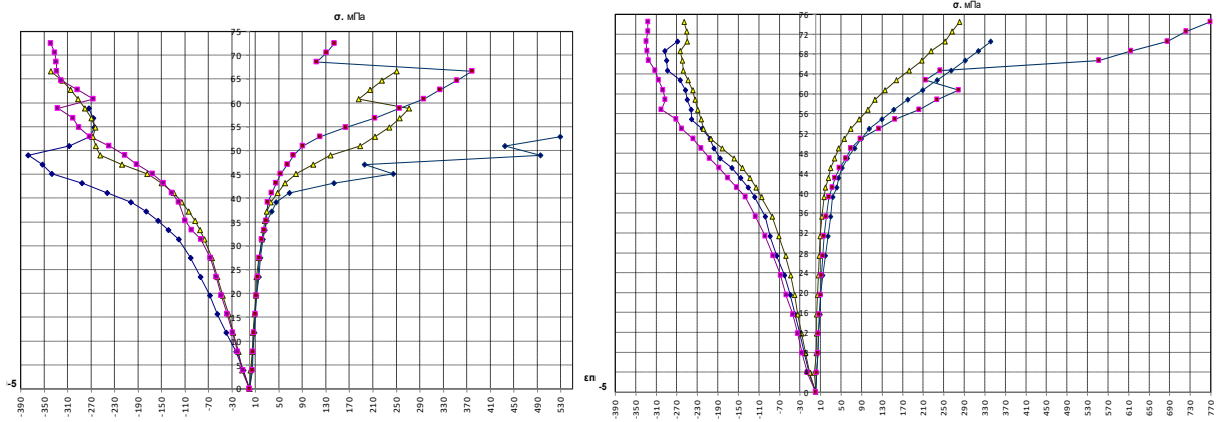


Рис. 4.5. Усредненные продольные и поперечные деформации бетонных призм 1 партии с двумя и тремя слоями сеток усиления

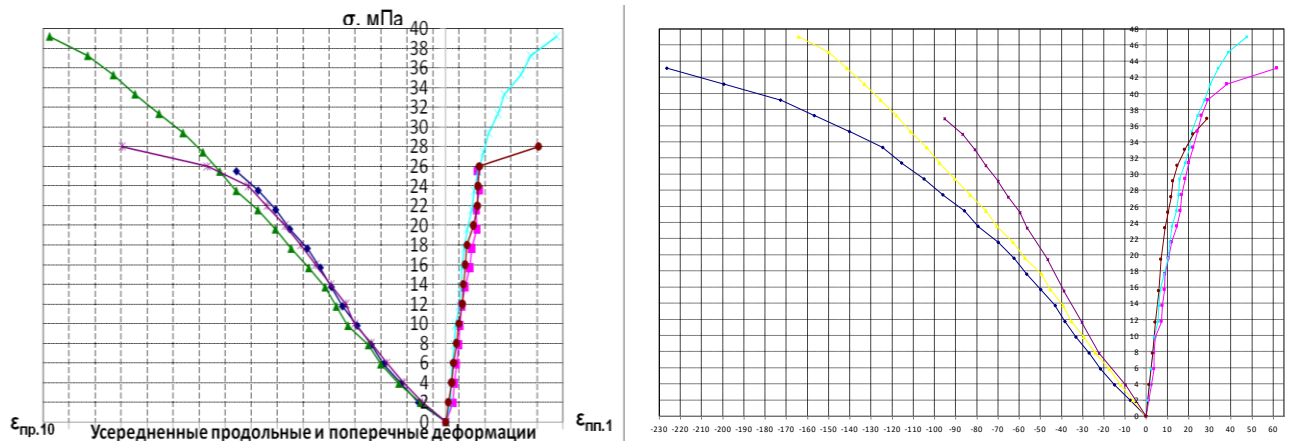


Рис. 4.6. Усредненные продольные и поперечные деформации бетонных призм 2 партии без усиления и усиленных одним слоем сетки

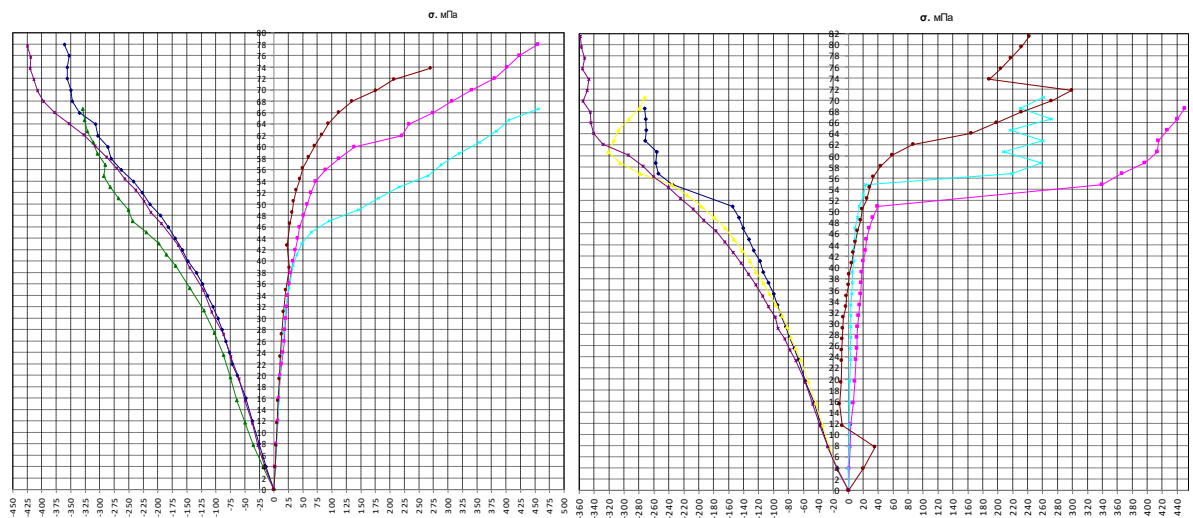


Рис. 4.7. Усредненные продольные и поперечные деформации бетонных призм 2 партии с усилением двумя и тремя сетками

На рис. 4.8. Представлены графики изменения объема бетона в образцах 1и 2 партий 2 партий

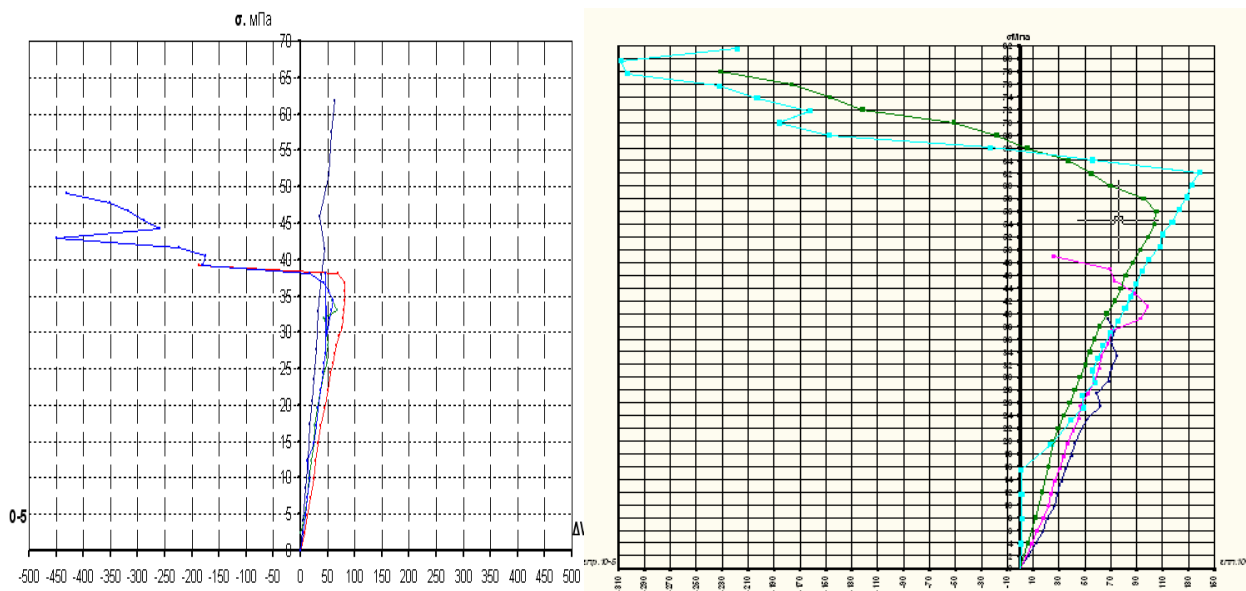


Рис. 4.8. Изменение объема бетона призм 1и 2 партии с различным усилением

Для бетонных образцов без усиления характерно практически линейной уменьшение объема бетона до величины $-73 \cdot 10^{-5}$ относительных единиц при достижении сжимающих напряжений около 75% от призмной прочности.

Затем наступает период прекращения сокращения объема бетона, а с дальнейшим увеличением напряжений начинается процесс незначительного увеличения объема бетона (до величины $-60 \cdot 10^{-5}$ относительных единиц).

Для образцов с усилением одним слоем сетки до напряжений, составляющих около 90% от разрушающих, происходит процесс постоянного уменьшения бетона до значений $-93 \cdot 10^{-5}$ относительных единиц. Затем наблюдается процесс резкого увеличения объема, который перед разрушением достигает величины $-25 \cdot 10^{-5}$ относительных единиц.

Для образцов с усилением двумя слоями сетки до напряжений, составляющих около 70% от разрушающих, происходит процесс постоянного уменьшения бетона до значений $-98 \cdot 10^{-5}$ относительных единиц. Затем

наблюдается процесс резкого увеличения объема, который перед разрушением достигает величины $+250 \cdot 10^{-5}$ относительных единиц, т.е. наблюдается увеличение объема бетона.

Подобная картина изменения объема бетона наблюдается и в образцах с трехслойным обертыванием сетками S&P C Sheet 240. Однако, в этих образцах наблюдаются скачки объема бетона, которые свидетельствуют о начале разрыва участков сеток (не качественное выполнение усиления, что отразилось и на низкой прочности этих образцов).

На рис. 4.9 приведены данные по влиянию количества сеток на величину прочности бетона 1 и 2 партий, которые свидетельствуют о влиянии возраста бетона на эффект его усиления сетками. Чем старше возраст бетона, тем он менее чувствителен к наличию сеток усиления. При этом величина упрочнения практически линейно зависит от количества слоев сеток с фиброволокнами (ФАП).

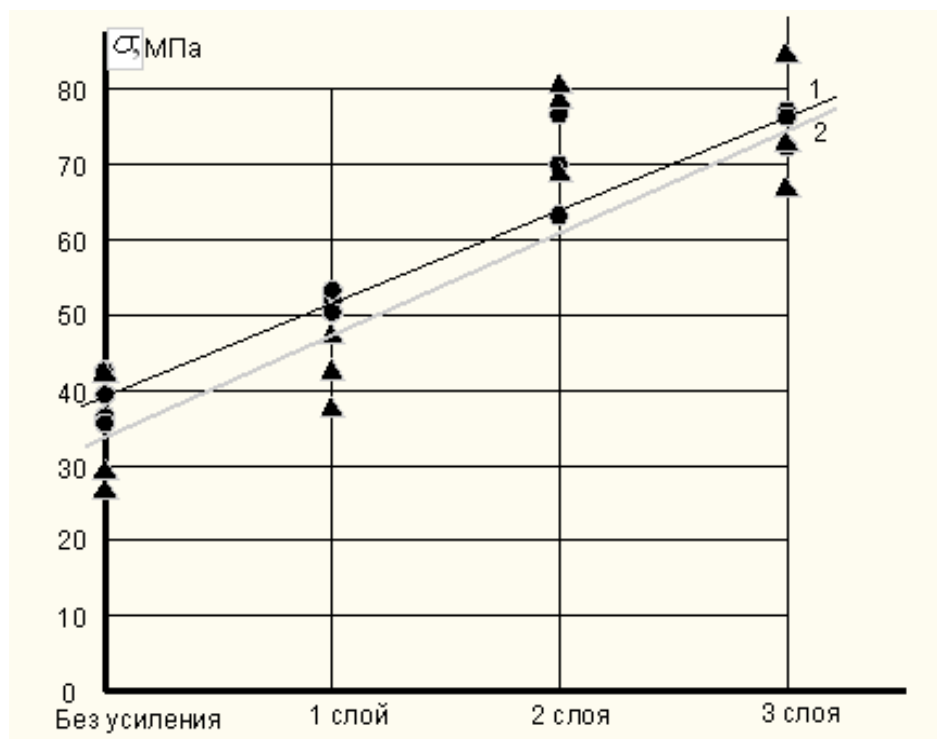


Рис. 4.9. Прочность призм размерами 100x100x400 мм из бетона 1 и 2 партии (без усиления, усиленных 1, 2 и 3 сетками)

На рис. 4.10 приведены данные по влиянию сеток на величину прочности бетона в призмах разного размера (200x200x800 мм и 100x100x400 мм). Они свидетельствуют о том, что эффект усиления при обклеивании замкнутыми сетками бетона с увеличением возраста бетона уменьшается, что связано с уменьшением предельной деформативности бетона с увеличением его возраста. При этом коэффициент насыщения сечения фиброармированными пластиками имеет решающее значение на величину повышения прочности. Если для образцов малых размеров эффект усиления сетками может 2-2,3 раз (на графике цифрой 1 обозначена усредненная зависимость прочности призм размерами 100x100x400 мм), то в образцах сечением 200x200x800 мм величина усиления не превышает 35%.

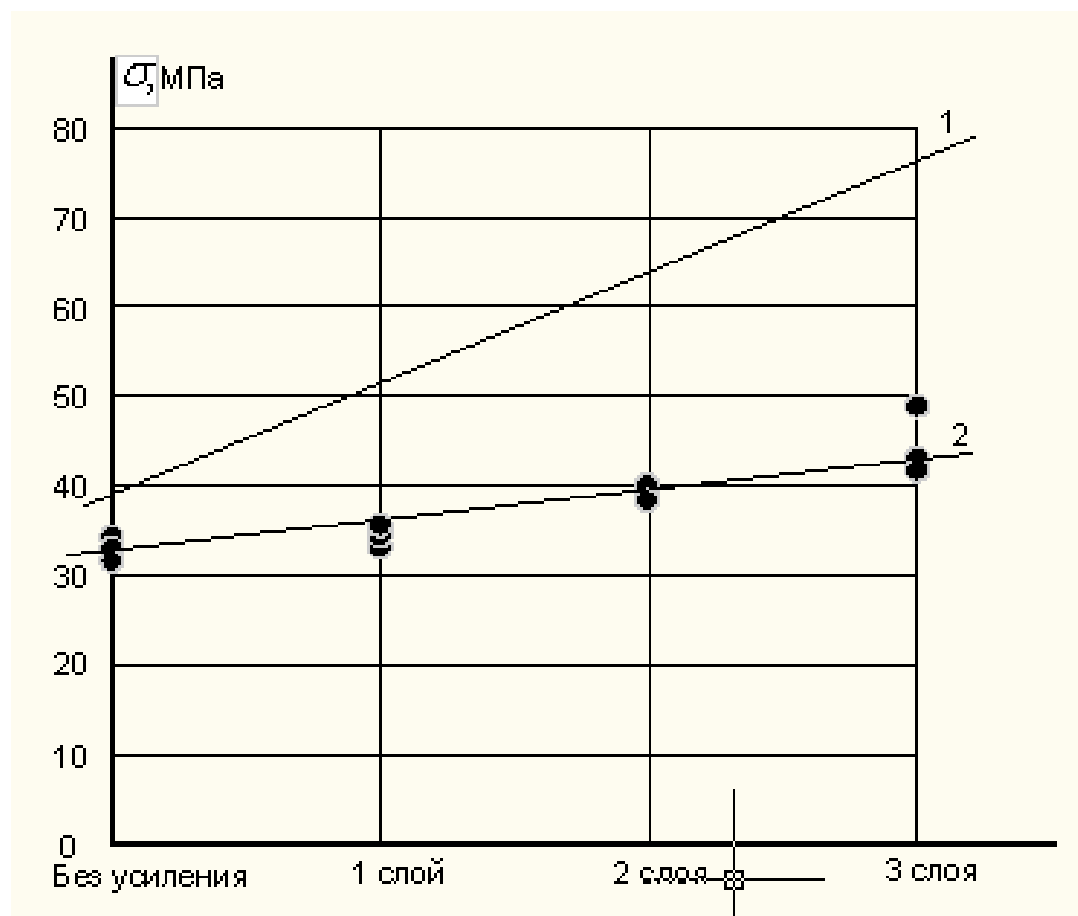


Рис. 4.10. Прочность призм размерами 100x100x400 мм (1) и 200x200x800 мм (2) (без усиления, усиленных 1, 2 и 3 сетками)

4.1.1. Расчетно-теоретический анализ прочности сжатых бетонных призм

Результаты выполненных экспериментальных исследований сжатых бетонных призм, усиленных обоями из фибропластиковых сеток, свидетельствуют о том, что величина повышения прочности зависит от физико-механических характеристик материалов усиления, а также относительного насыщения сечений фибропластиковыми волокнами.

В процессе увеличения сжимающей силы происходит уменьшение объема бетона. Снижение скорости уменьшения объема бетона соответствует началу образования микротрещин в бетоне, усиленном обоймой, который наблюдается после превышения сжимающими напряжениями от действующей продольной силы начальной прочности бетона (прочности бетона без усиления). Затем происходит ускоренное увеличение объема бетона и при напряжениях, соответствующих 60-70% от разрушающей нагрузки, объем бетона соответствует начальному объему бетона до приложения сжимающих напряжений. Перед разрушением усиленного обоймой бетона объем бетона увеличивается до 0,7-0,9%.

При нагружении сжатых бетонных элементов, усиленных фиброармированными обоями, реализуется две схемы разрушения:

1. Происходит разрыв фиброармированных сеток усиления, который вызывает хрупкое разрушение бетона;
2. Происходит разрыв стыков сопряжения сеток, связанный с недостаточностью величины перехлеста сеток, или отслоение сетки от бетонной поверхности, после чего происходит разрушение бетона.

Первая форма разрушения опытных образцов является основной формой разрушения сжатых бетонных элементов, усиленных обоями из фиброармированных пластиков.

Вторая форма разрушения исключается при достаточном перехлесте мест стыковки внахлест сеток усиления или повышение качества наклейки материала усиления.

Обработка экспериментальных данных о величине деформаций в волокнах фиброармированных сеток усиления позволила определить напряжения обжатия бетона обоймой по следующей формуле:

$$\sigma_{bf} = \frac{2.t_f.R_f}{r}; \quad (4.1)$$

где σ_{bf} - напряжения сжатия, создаваемые обоймой;

t_f - площадь сечения волокон сетки на 1 см высоты;

R_f - напряжения растяжения в волокнах сетки

r - радиус круглого сечения образца.

Напряжения в волокнах сетки определяются по формуле:

$$R_f = \varepsilon_f.E_f; \quad (4.2)$$

Прочность бетона в цилиндрическом образце, усиленном обоймой и фибропластиковой сетки определяется по формуле:

$$R_{bf} = .R_b[2,254 \sqrt{1 + 2,121 \frac{R_l}{R_b}} - 1,254 - 0,534 \frac{R_l}{R_b}]; \quad (4.3)$$

где $R_l = K_1.R_f; \quad (4.4)$

$$K_1 = 2t_f \cdot \frac{b+h}{bh}; \quad (4.5)$$

$$\rho_f = \frac{2n.t_f.(b+h)}{b.h}; \quad (4.6)$$

В таблицах 4.4-4.6 представлено сравнение опытной и расчетной прочности образцов всех серий.

Таблица 4.4 - Сравнение опытной и расчетной прочности призм первой партии размерами 100x100x400 мм

Марка	R _b МПа	t _f мм	E _f МПа	K ₁	σ _{оп} кН	σ _р кН	σ _{оп} / σ _р
П10-1-1с	38,7	0,117	240000	0,00468	52,0	50,93	1,02
					51,0	54,3	0,94
					52,0	51,2	1,02
П10-1-2с				0,00936	63,2	78,08	0,81
					70,0	72,31	0,97
					76,7	74,95	1,02
П10-1-3с				0,01404	72,4	77,14	0,94
					77,2	85,6	0,90
					77,2	73,64	1,05

Таблица 4.5- Сравнение опытной и расчетной прочности образцов призм второй партии размерами 100x100x400 мм

Марка	R _b МПа	t _f мм	E _f МПа	K ₁	σ _{оп} кН	σ _р кН	σ _{оп} / σ _р
П10-2-1с	33,6	0,117	240000	0,00468	42,4	41,6	1,02
					47,2	41,3	1,14
					37,3	40,5	0,92
П10-2-2с				0,00936	78,4	63,23	1,24
					80,5	65,19	1,23
					68,7	62,24	1,10
П10-2-3с				0,01404	66,6	87,7	0,76
					72,6	73,1	0,99
					84,4	75,86	1,11

Таблица 4.6-Сравнение опытной и расчетной прочности образцов призм второй партии размерами 200x200x800

Марка	R_b МПа	t_f мм	E_f МПа	K_1	$\sigma_{оп}$ кН	σ_p кН	$\sigma_{оп}/\sigma_p$
П20-1с	33,1	0,117	240000	0,00234	33,1	33,8	0,98
					34,4	34,74	0,99
					31,08	34,74	0,90
П20-2с				0,00448	39,3	39,0	1,01
					39,3	38,62	1,02
					39,3	38,37	1,02
П20-3с				0,00702	41,7	41,63	1,0
					49,1	41,0	1,20
					42,9	43,14	0,99

Анализ данных таблиц 4.4-4.6 свидетельствует об удовлетворительном совпадении расчетной и опытной прочности бетонных призм, усиленных обоймами из фиброармированных пластиков.

4.2. Исследование работы призм с различным усилением сетками при внецентренном сжатии

Для оценки влияния наружного оклеивания сетками на прочность внецентренно сжатых элементов проведены испытания образцов призм второй партии размерами 100x100x400 мм при внецентренном приложении продольной сжимающей силы. Продольная сила прикладывалась на границе ядра сечения ($h/6$), что обеспечивало эпюру сжимающих напряжений в сечении, близкую к треугольной. Продольная сила прикладывалась через ножевые опоры, обеспечивающие неизменность точки приложения продольной силы (рис.4.11.).



Рисунок 4.11. Разрушение усиленного сетками образца при внецентренном сжатии

В таблице 4.7 представлены основные результаты испытания образцов призм при внецентренном сжатии, включающие наличие усиления сетками, разрушающая нагрузка, наибольшие продольные и поперечные деформации на наиболее сжатой грани, а также сравнение прочности с образцами-близнецами, испытанными при осевом сжатии.

Анализ данных таблицы 4.7 показывает, что усиление сетками привело к повышению прочности внецентренно сжатых элементов, причем коэффициент упрочнения близок к коэффициенту упрочнения образцов-близнецов, испытанных при осевом сжатии (см. таб. 4.1). При этом, внецентренное приложение нагрузки привело к снижению прочности образцов в среднем на 30%.

Если сравнивать деформации наиболее сжатой грани образцов при внецентренном сжатии с деформациями образцов-близнецов при осевом сжатии, то для не усиленных образцов первые больше последних почти на 50%, а для

усиленных образцов это различие уменьшается и при трехслойном усилении сетками образцов различие в величине наибольших деформаций практически исчезает.

Таблица 4.7- Результаты испытаний внецентренно-сжатых призм 1 партии

№ образцов	Усиление образцов	Разрушающая нагрузка N, кН	Средняя прочность $N_{ср}$, кН	Соотношение прочности усиленных образцов	Предельные деформации		Сравнение с прочностью при осевом сжатии
					$\epsilon_{гр}, 10^{-5}$	$\epsilon_{пш}, 10^{-5}$	
1	Без усиления	27,4	26,8	1,00	200	35	0,81
2		29,4			170	45	
3		23,5			150	42	
4	Один слой сетки	23,5	33,2	1,24	70	30	0,74
5		38,7			160	55	
6		37,3			160	55	
7	Два слоя усиления сетками	45,1	47,7	1,78	300	240	0,63
8		47,1			280	105	
9		51			265	80	
10	Три слоя сетки	60,8	71,3	2,7	300	240	0,96
11		82,4			275	110	
12		70,6			360	300	

На рис. 4.12÷4.16 представлены графики продольных и поперечных деформаций наиболее сжатой грани при внецентренном сжатии образцов без усиления, а также усиленных одним, двумя и тремя слоями сеток S&P C Sheet 240.

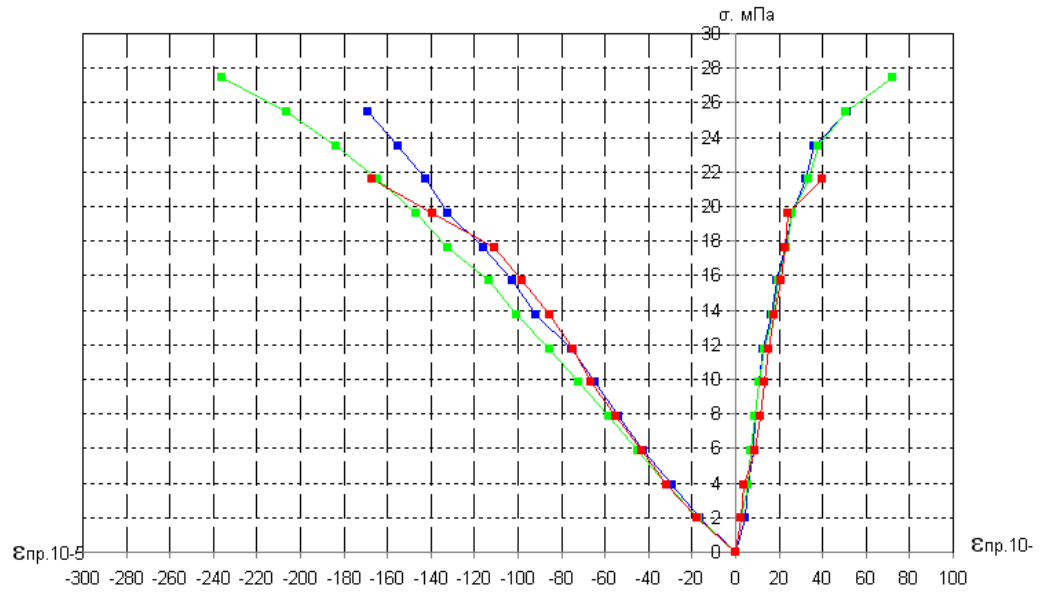


Рис. 4.12. Продольные и поперечные деформации бетона при внецентренном сжатии не усиленных образцов

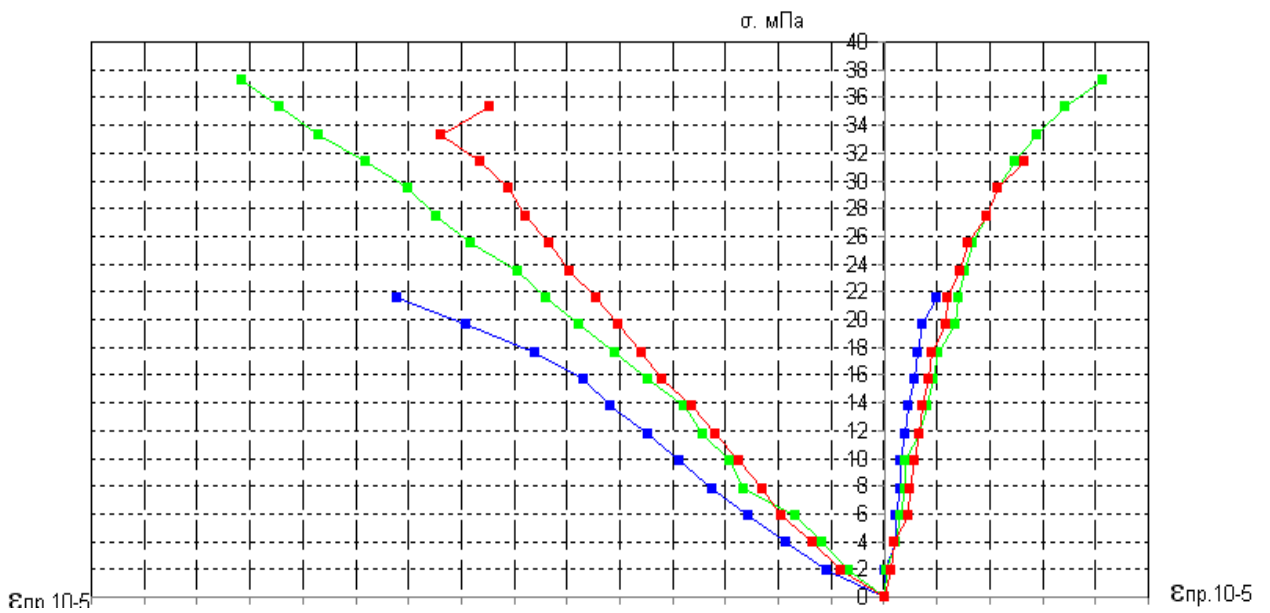


Рис. 4.13. Продольные и поперечные деформации бетона при внецентренном сжатии образцов, усиленных одним слоем сетки

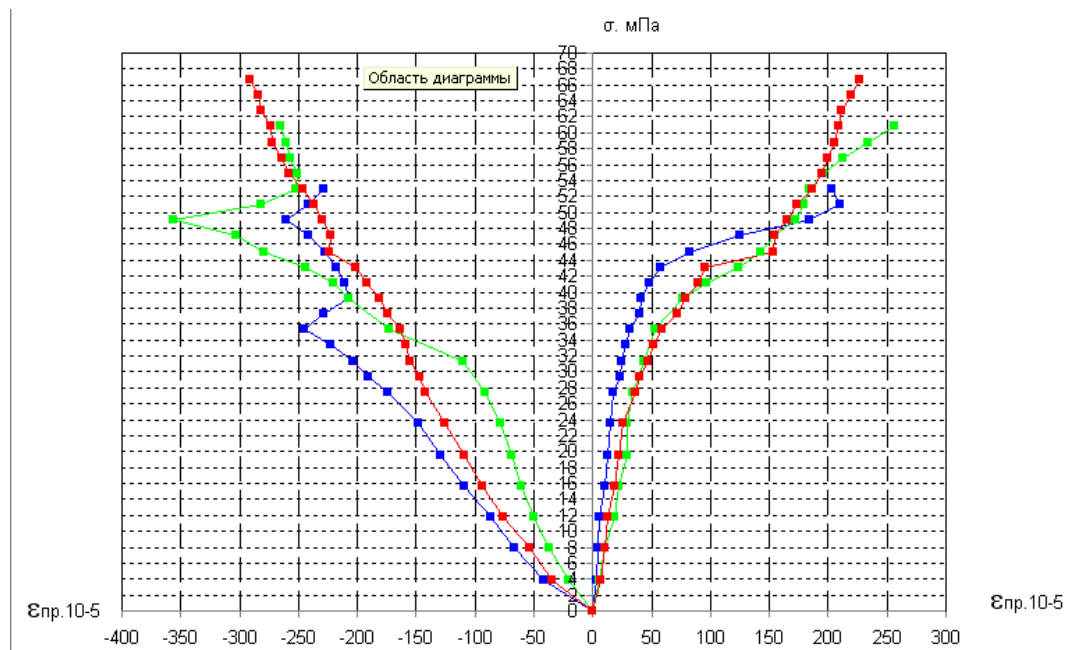


Рис. 4.14. Продольные и поперечные деформации бетона при внецентренном сжатии образцов, усиленных двумя слоями сетки

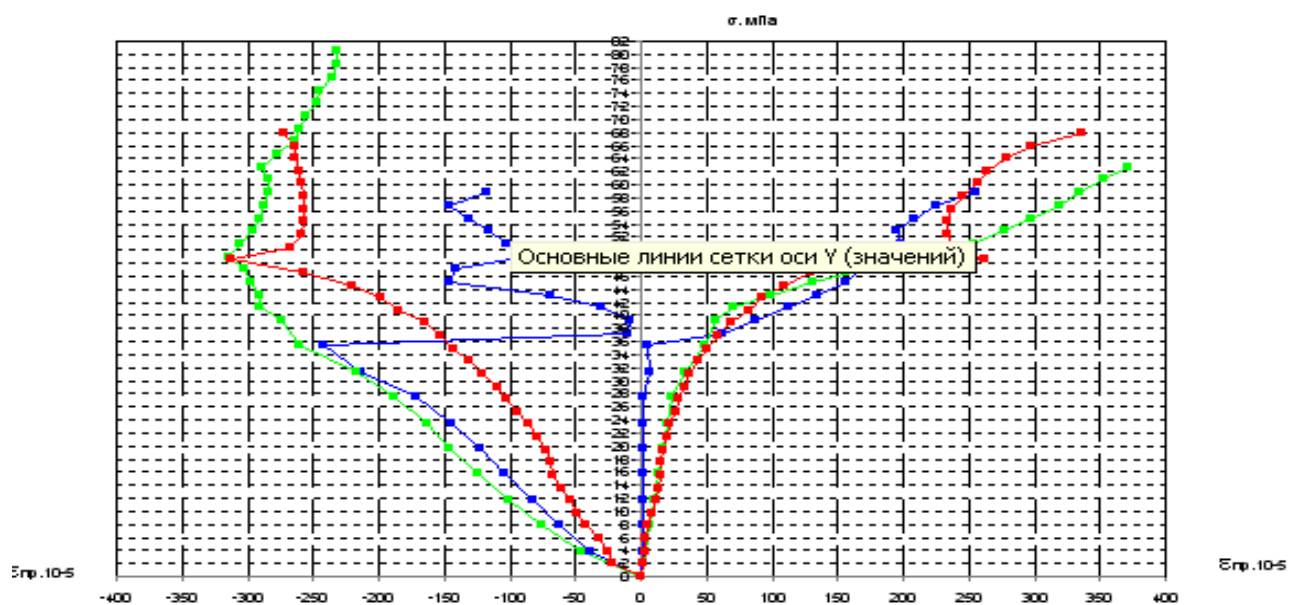


Рис. 4.15. Продольные и поперечные деформации бетона при нецентренном сжатии образцов, усиленных тремя слоями сетки

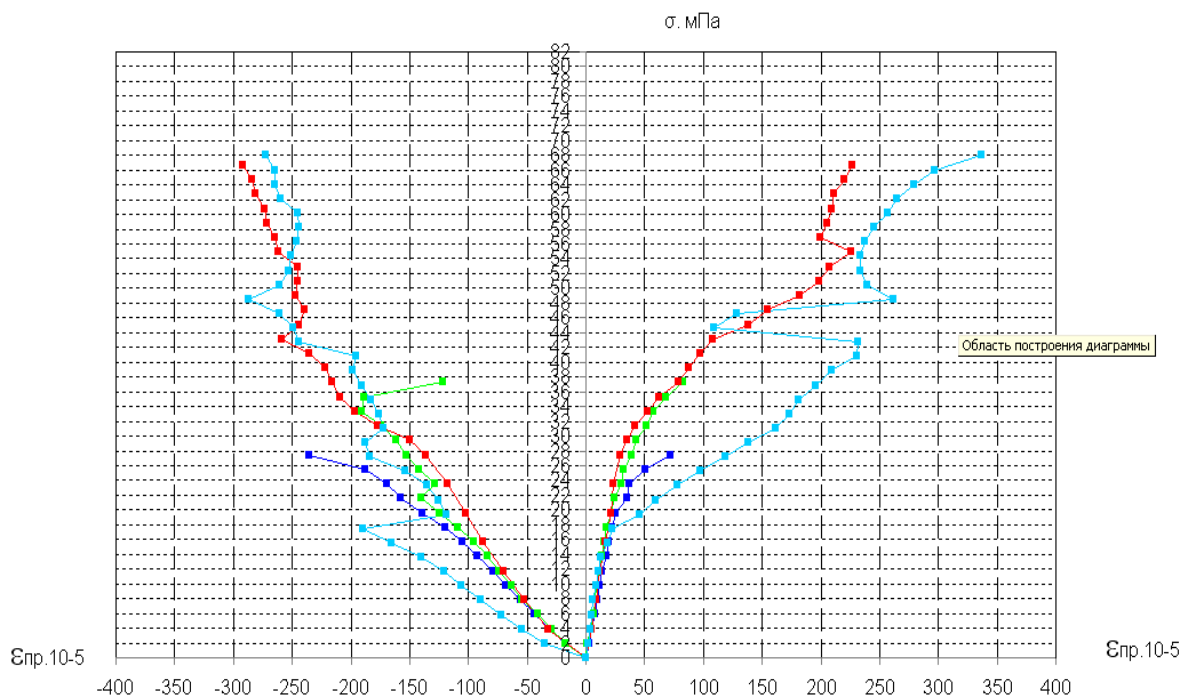


Рис. 4.16. Сводная диаграмма продольных и поперечных деформации бетона при внецентренном сжатии образцов не усиленных, усиленных одним, двумя и тремя слоями сетки

Таким образом, прочность внецентренно сжатых призм при приложении продольной силы на грани ядра сечения образцов без усиления составляет около 70% от прочности образцов-близнецов при осевом сжатии. Это говорит о том, эпюра сжимающих напряжений по высоте сечения отличается от треугольной, приближаясь к параболической. По величине повышения прочности образцов при усилении одним, двумя и тремя слоями сеток с фиброволокнами (ФАП) и предельным продольным и поперечным деформациям наиболее сжатой грани внецентренно-сжатые бетонные образцы мало отличаются от центрально сжатых.

4.3. Исследования работы бетонных призм, усиленных фиброармированными сетками при динамических нагрузках

Влияние динамические повторных нагружений на физико-механические свойства образцов, усиленных фиброармированными сетками, изучалось на бетонных призмах стандартных размерах 100x100x400 мм при осевом сжатии, создаваемом с помощью гидродинамической машины МВГ-1 после центрирования образцов по физической оси «рис. 4.17.». Динамические испытания проводились при положительном коэффициенте асимметрии изменения усилий ($\rho = 0,0 \div 0,10$), частоте нагружения 1,0 герц и при величине сжимающих напряжений, обеспечивающем разрушение опытных образцов за 1 ÷ 300 циклов нагружения. В процессе динамических испытаний замерялись продольные и поперечные деформации бетона, а также величина сжимающего усилия. Регистрация динамических параметров производилась непрерывно с помощью специального регистрационного комплекса ПРИС-1000 на компьютере с шагом цифровки 0,006 сек (рис. 4.18.).



Рис. 4.17 - Динамические испытания бетонных призм на осевое сжатие



Рис. 4.18 - Измерительный комплекс РСМ-8 для регистрации динамических параметров при испытаниях бетонных призм на сжатие

Динамические испытания бетонных призм производились в следующей последовательности. Призма устанавливалась на гидравлический домкрат мощностью 200 тс через динамометр стаканного типа с продольными и поперечными датчиками. Опытный образец центрировался по физической оси пробной сжимающей нагрузкой не превышающей 30% от разрушающей до обеспечения равномерного сжатия призмы при замерах продольных деформаций боковых граней с помощью тензодатчиков и измерителя деформаций «АИД 4М» (различие в деформациях противоположных граней не превышало 10%). Затем производилось динамическое повторное нагружение призмы циклической сжимающей нагрузкой, создаваемой гидравлическим домкратом и гидродинамической машиной (МВГ-1).

На рис. 4.19-4.22 приведены графики изменения нагрузки, диаграммы продольных и поперечных деформаций бетона в процессе динамических повторных нагружений призм, не имеющих усиления, Пд-0-1 и Пд-0-6.

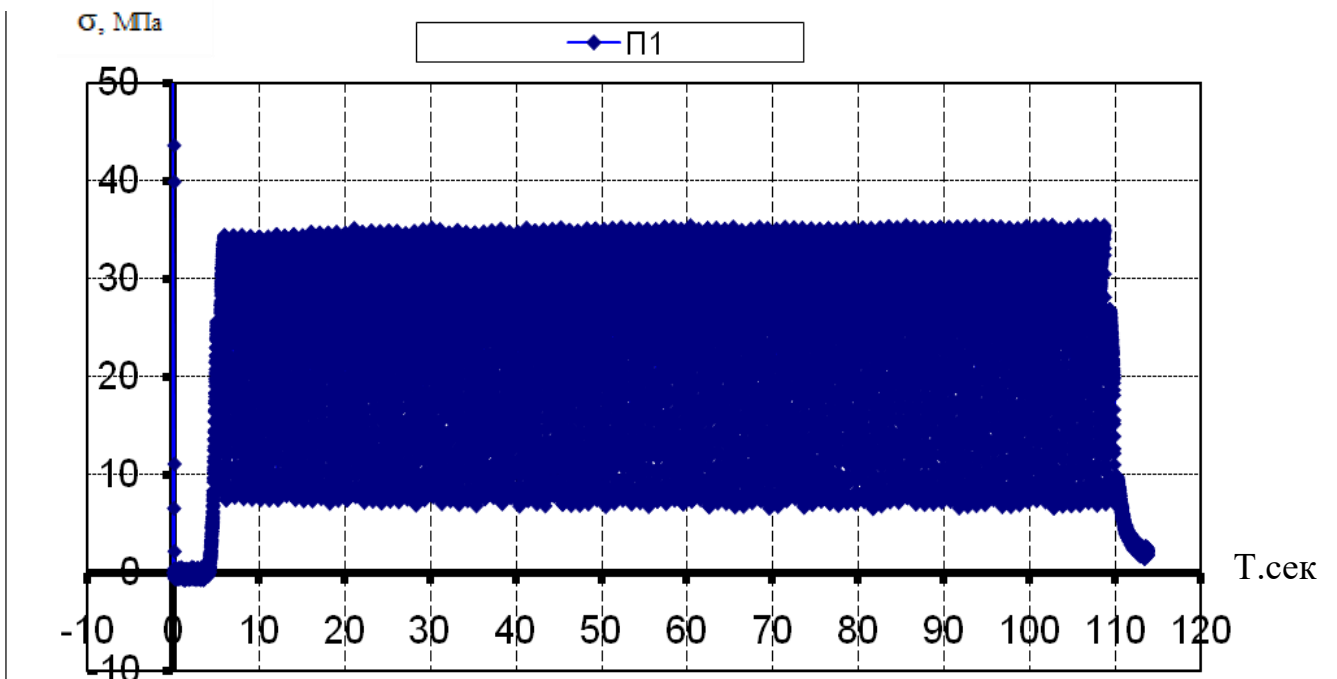


Рис. 4.19. Изменение продольной силы в процессе динамических испытаний призмы Пд-0-1

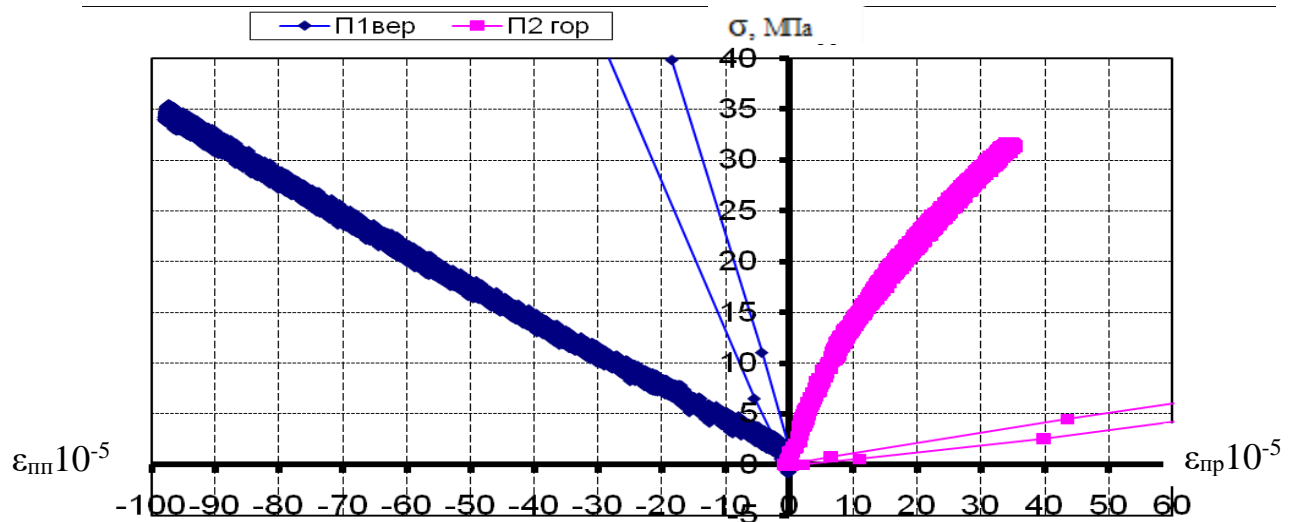


Рис. 4.20. Диаграмма продольных и поперечных деформаций бетона в процессе динамических испытаний призмы Пд-0-6

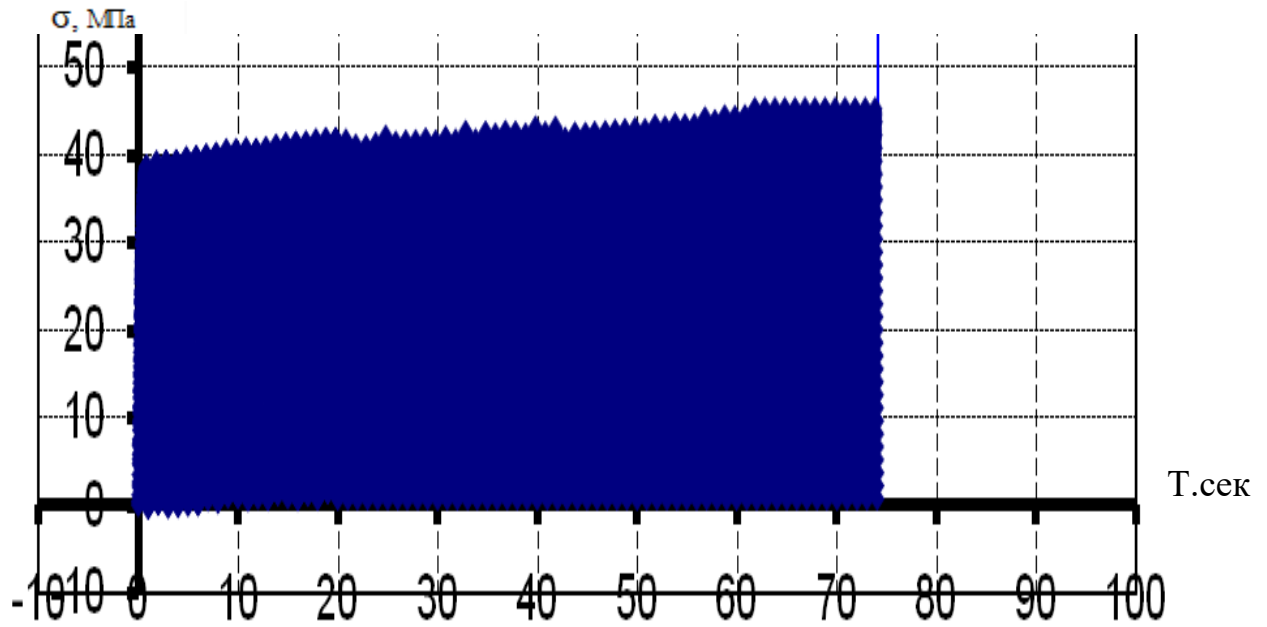


Рис. 4.21. Изменение продольной силы в процессе динамических испытаний призмы Пд-0-6

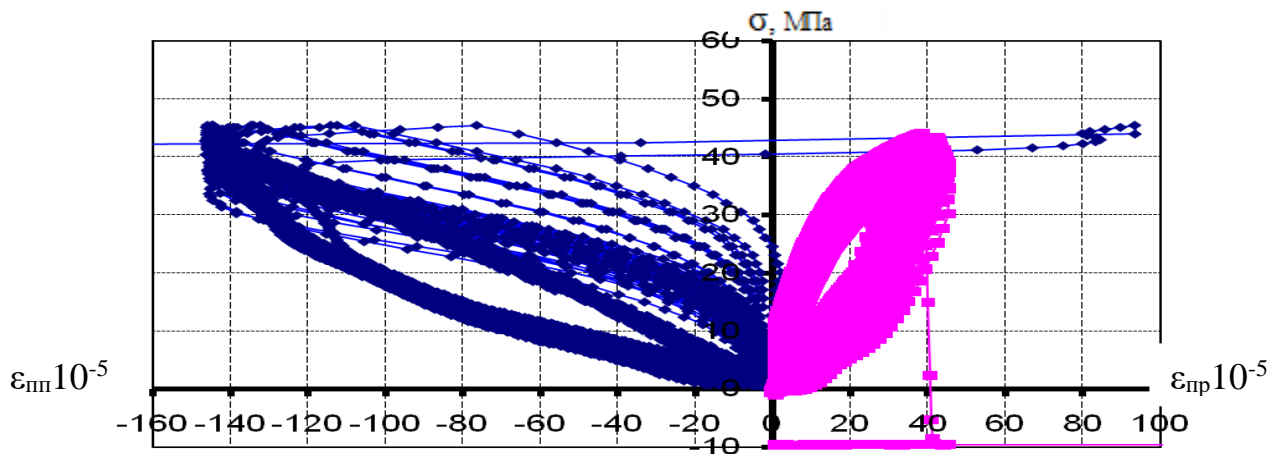


Рис. 4.22. Диаграмма продольных и поперечных деформаций бетона в процессе динамических испытаний призмы Пд-0-6

В таблице 4.7 приведены основные данные (номер образца; дата испытания; наибольшие сжимающие напряжения; количество повторных динамических нагружений; наибольшие продольные и поперечные деформации бетона, коэффициент асимметрии изменения напряжений) по динамическим испытаниям бетонных призм без усиления.

Таблица 4.5 - Результаты динамических испытаний бетонных призм размерами 100x100x400 мм без усиления

№ образца	σ^{\max} , МПа	n циклов	$\varepsilon_{пр}$ 10^{-5}	$\varepsilon_{пп}$ 10^{-5}	$\rho = \sigma^{\max}/\sigma^{\min}$
Пд-0-1	31,61	102	97	34	0,1
Пд-0-2	51,8	6	153	54	0,1
Пд-0-3	39,8	112	158	56	0,1
Пд-0-4	40,8	3	175	42	0,1
Пд-0-5	48,4	99	162	36	0,0
Пд-0-6	50,2	72	146	57	0,1

На рис. 4.23 приведены данные по зависимости уровня максимальных напряжений и количеству повторных нагружений опытных образцов призм 1 партии без усиления, приводящих к разрушению образца. Используя метод наименьших квадратов, получена следующая эмпирическая полулогарифмическая зависимость величины максимальных напряжений и количества нагружений:

$$\sigma_b^n = 1,256 R_b (1 - 0,1 \lg n) = 1,256 R_b - 0,126 R_b \lg n \quad (4.7)$$

которая показывает, что коэффициент динамического упрочнения бетона при принятом режиме нагружения составил 1,256, т.е. прочность бетона на сжатие при динамическом нагружении превышает прочность этого бетона при статическом нагружении на 25.6%.

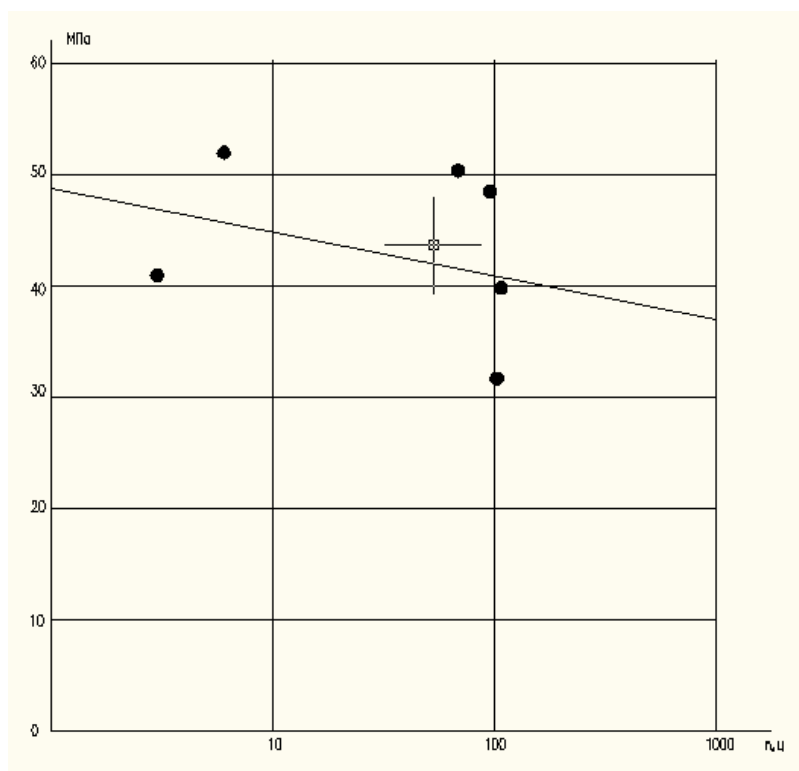


Рис. 4.23. Зависимость количества повторных нагружений от величины максимальных сжимающих напряжений образцов без усиления.

Характеризуя процесс накопления повреждений в бетоне в процессе повторных нагружений, можно выделить два случая. При числе повторных нагружений, превышающих 100 циклов, после первых циклов нагружения диаграмма деформирования бетона мало меняется на протяжении значительного количества следующих нагружений, пока их не останется не более нескольких десятков до разрушения бетона. Затем наблюдается ускоряющееся нарастание неупругих деформаций, вплоть до исчерпания прочности бетона. При величине максимальных сжимающих напряжений более 90% от прочности бетона, которые приводят к разрушению бетона за несколько циклов, с каждым следующим циклом нагружение происходит ускоряющееся нарастание неупругих деформаций бетона. Величина продольных деформаций бетона в процессе повторных нагружений составляла $146 \div 175 \cdot 10^{-5}$ относительных единиц, а величина остаточных деформаций бетона достигала значений $100 \cdot 10^{-5}$ относительных

единиц. Наибольшая величина поперечных деформаций бетона составляла $33 \div 56 \cdot 10^{-5}$ относительных единиц.

На рис. 4.24-4.29 приведены графики изменения нагрузки, диаграммы продольных и поперечных деформаций бетона в процессе динамических повторных нагружений отдельных призм, а в таблицах 4.6-4.8 приведены основные данные по динамическим испытаниям бетонных призм, усиленных одним, двумя и тремя слоями сеток.

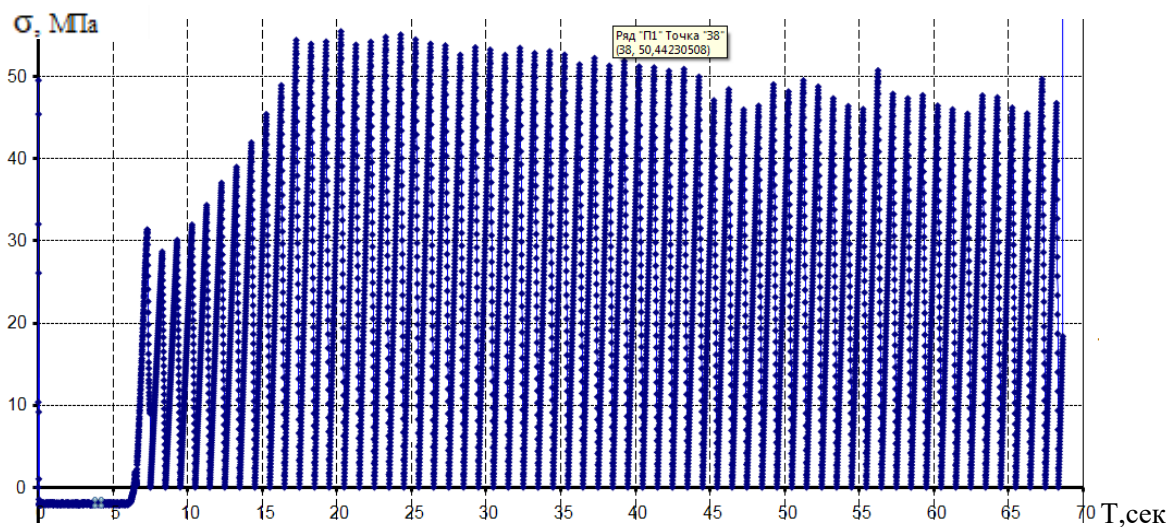


Рис. 4.24. Изменение продольной силы в процессе динамических испытаний призмы Пд1-1-2, усиленной одним слоем сетки

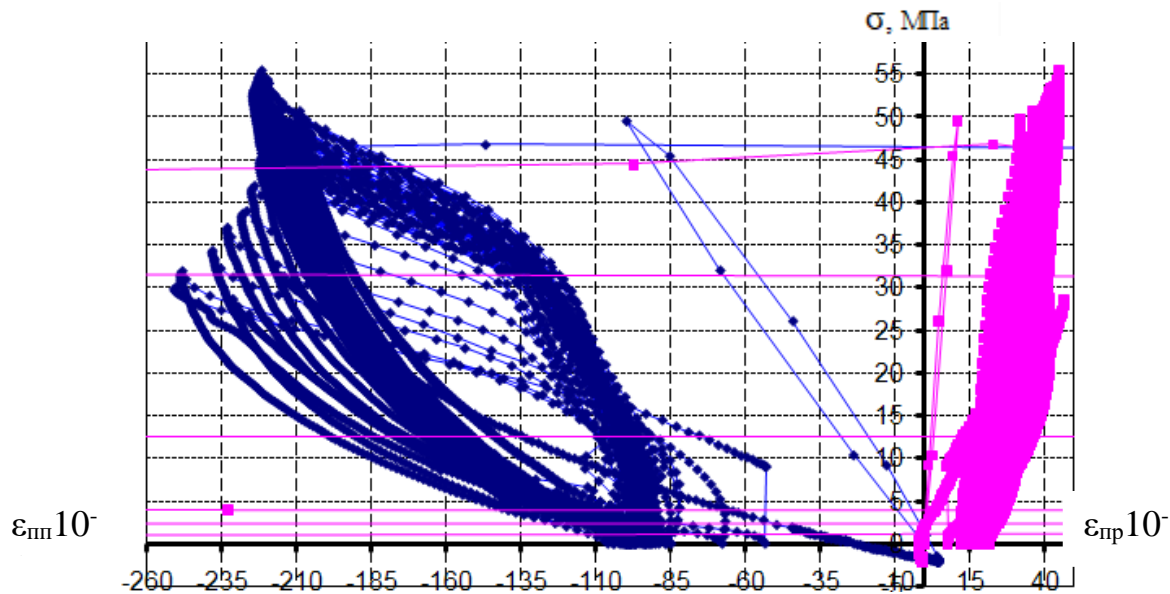


Рис. 4.25. Диаграмма продольных и поперечных деформаций бетона в процессе динамических испытаний призмы Пд1-1-2

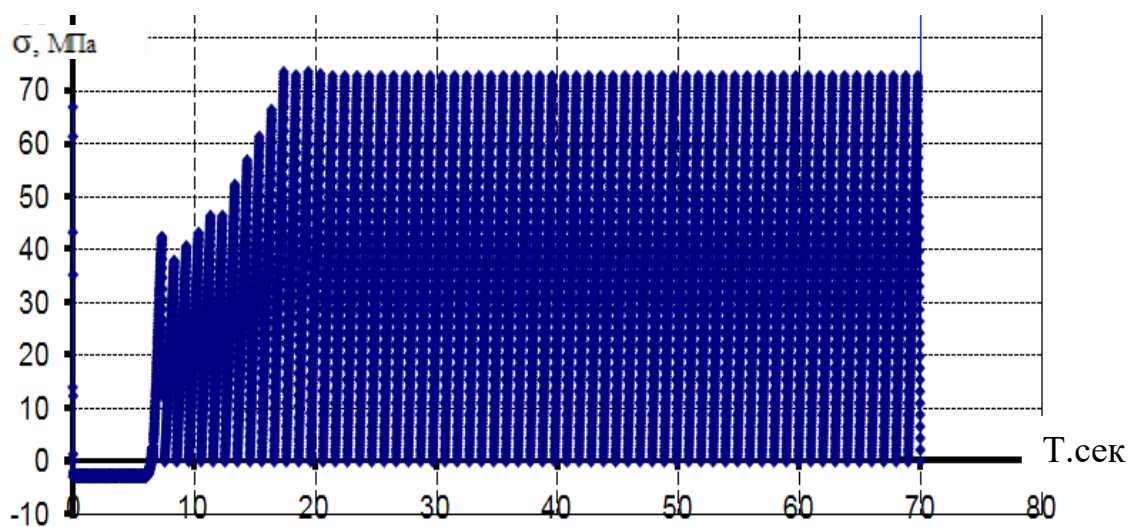


Рис. 4.26. Изменение продольной силы в процессе динамических испытаний призмы Пд1-2-1, усиленной двумя слоями сетки

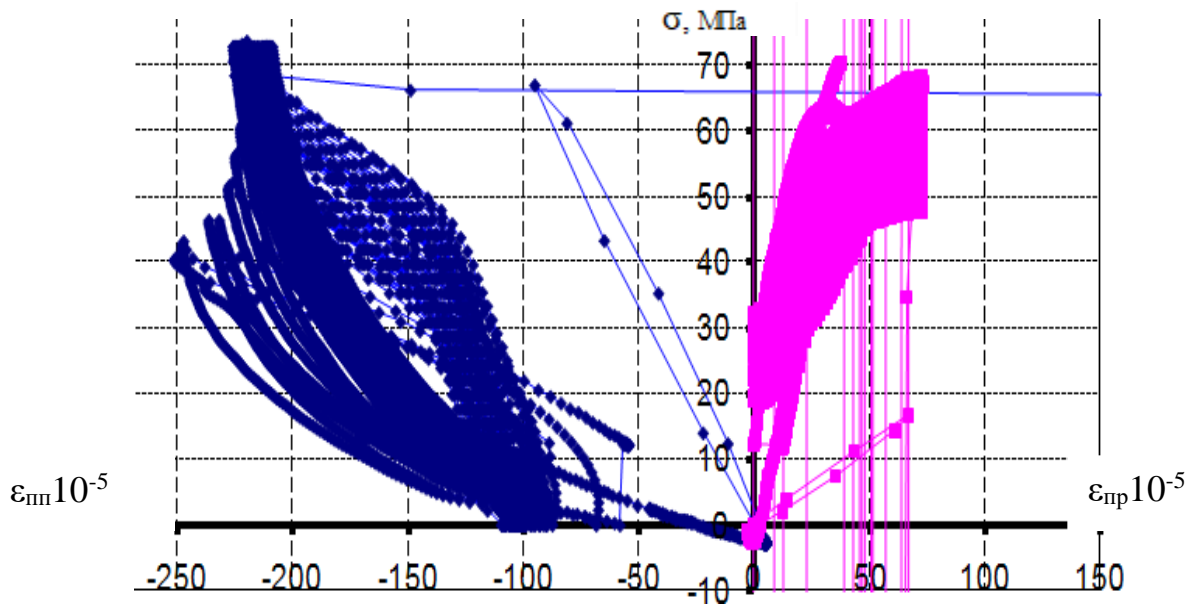


Рис. 4.27. Диаграмма продольных и поперечных деформаций бетона в процессе динамических испытаний призмы Пд1-2-1

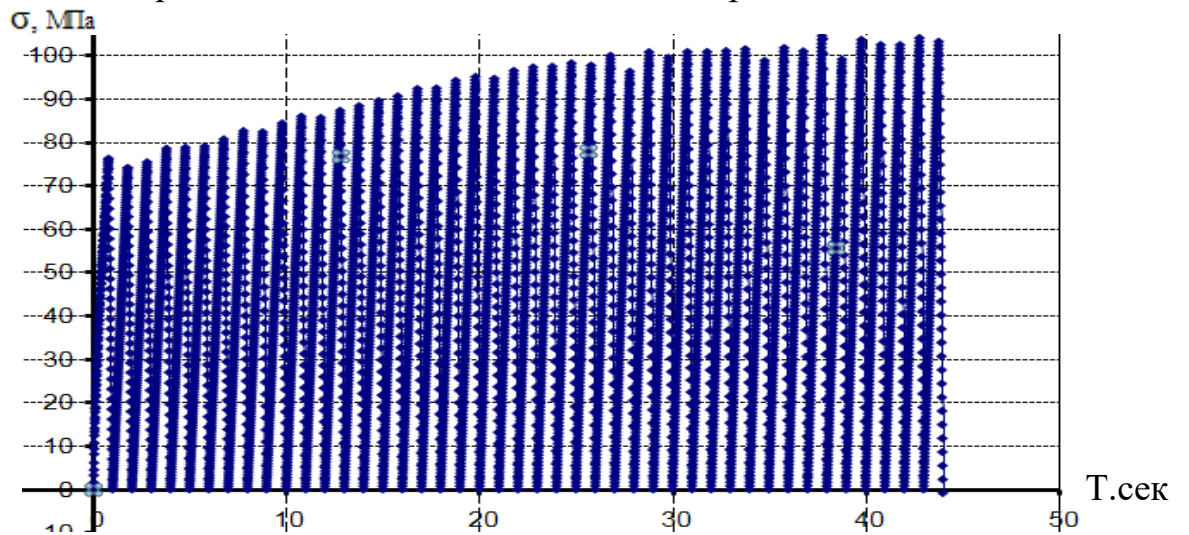


Рис. 4.29. Изменение продольной силы в процессе динамических испытаний призмы Пд1-3-2, усиленной тремя слоями сетки

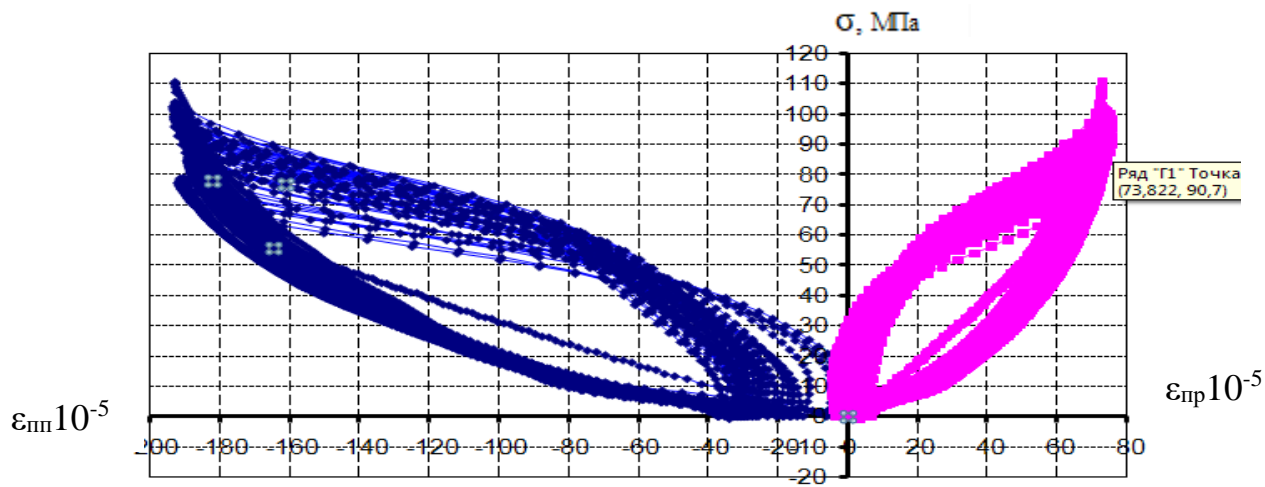


Рис. 4.29. Диаграмма продольных и поперечных деформаций бетона в процессе динамических испытаний призмы Пд1-3-2

Таблица 4.6 - Результаты динамических испытаний бетонных призм размерами 100x100x400 мм, усиленных одним слоем сеток

№ образца	σ^{\max} , МПа	n циклов	$\epsilon_{\text{пр}}$ 10^{-5}	$\epsilon_{\text{пп}}$ 10^{-5}	$\rho = \sigma^{\max} / \sigma^{\min}$
Пд1-1-1	50,4	25	215	48	0,1
Пд1-1-2	57.1	61	245	45	0,1
Пд1-1-3	72.3	65	152	85	0,1

Сравнивая результаты динамических испытаний бетонных призм, усиленных одним слоем сеток, с результатами испытаний не усиленных призм, можно сказать, что усиление привело к повышению прочности образцов в среднем на 43%, увеличению предельных продольных деформаций бетона на 37% и увеличению поперечных деформаций на 27%.

Таблица 4.7 Результаты динамических испытаний бетонных призм размерами 100x100x400 мм, усиленных двумя слоями сеток

№ образца	Дата испытания	σ^{\max} , МПа	n циклов	$\varepsilon_{пр}$ 10 ⁻⁵	$\varepsilon_{пп}$ 10 ⁻⁵	$\rho = \sigma^{\max}/\sigma^{\min}$
Пд1-2-1	28.06.10	74,9	61	248	67	0,1
Пд-1-2	29.06.10	50	10	245	45	0,1
Пд-1-3	30.06.10	65	10	200	72	0,1

Сравнивая результаты динамических испытаний бетонных призм, усиленных двумя слоями сеток, с результатами испытаний не усиленных призм, можно сказать, что усиление привело к повышению прочности образцов в среднем на 55%, увеличению предельных продольных деформаций бетона на 38% и увеличению поперечных деформаций на 54%; при этом если сравнивать с результатами испытаний образцов, усиленных одним слоем сеток, то прочность увеличилась на 8%, продольные деформации практически не изменились, а поперечные деформации увеличились на 22%.

Таблица 4.8 Результаты динамических испытаний бетонных призм размерами 100x100x400 мм, усиленных тремя слоями сеток

№ образца	Дата испытания	σ^{\max} , МПа	n циклов	$\varepsilon_{пр}$ 10 ⁻⁵	$\varepsilon_{пп}$ 10 ⁻⁵	$\rho = \sigma^{\max}/\sigma^{\min}$
Пд1-3-1	28.06.10	86	440	270	101	0,1
Пд-3-2	29.06.10	108	43	192	74	0,1

Сопоставление результатов динамических испытаний бетонных призм, усиленных тремя слоями сеток, с результатами испытаний не усиленных призм, можно сказать, что усиление привело к повышению прочности образцов в среднем на 133 %, увеличению предельных продольных деформаций бетона на 55 % и увеличению поперечных деформаций на 126 %; при этом если сравнивать с

результатами испытаний образцов, усиленных одним слоем сеток, то прочность увеличилась на 63%, продольные деформации увеличились на 18 %, а поперечные деформации увеличились на 78 %.при этом если сравнивать с результатами испытаний образцов, усиленных двумя слоями сеток, то прочность увеличилась на 51, продольные деформации увеличились на 7 %, а поперечные деформации увеличились на 46%.

Заключения по Главе 4

Результаты испытаний цилиндров, усиленных карбоновыми фиброволокнами (ФАП) при осевом сжатии, привело к повышению прочности в 1,8-2,3 раза

С увеличением возраста бетона эффективность усиления сжатых элементов обоймами из ФАП снижается. Повышение прочности на сжатие опытных образцов из бетона в возрасте бетона 2-3 месяца превышало на 20-30% повышение прочности аналогичных образцов из бетона в возрасте 15 лет.

Предельные деформации бетона, усиленного обоймами из ФАП, увеличились до 0,4-0,5 %, а поперечные деформации бетона и деформации удлинения волокон ФАП достигают значений 0,45-0,55%.

Прочность внецентренно сжатых железобетонных образцов, усиленных обоймами из ФАП, при приложении продольной сжимающей силы на границе ядра сечения, составляла около 70% от прочности аналогичных образцов, испытанных при центральном сжатии. При этом эпюра сжимающих напряжений носит параболический характер, а продольные и поперечные деформации бетона на сжатой грани перед разрушением близки к предельным деформациям образцов, испытанных при осевом сжатии.

Динамические испытания опытных образцов, усиленных обоймами ФАП, при действии немногочисленных повторных нагружений с частотой нагружения один герц и коэффициенте асимметрии изменения усилий около нуля, позволили

получить эмпирическую зависимость прочности от количества повторных нагружений. Динамическая прочность бетона превышала статическую прочность почти на 25%.

Общие выводы

1. Выполнены экспериментальные исследования прочности сжатых железобетонных конструкций, усиленных поверхностным наклеиванием обойм из новых типов карбоновых фибропластиковых сеток, применяемых в Казахстане.

2. Усиление сжатых железобетонных элементов обоймами из фиброармированных пластиков, вызывает трехосное сжатие в бетоне, при котором прочность элементов может увеличиться в несколько раз.

3. В исследованиях реализовано две схемы разрушения сжатых бетонных образцов, усиленных обоймами их карбоновых фиброволокон:

- разрыв фиброармированных сеток усиления и хрупкое раздавливание бетона;
- разрыв стыков сопряжения сеток, связанный с недостаточностью величины перехлеста сеток, после чего происходит разрушение бетона.

4. Образование микротрещин в сжатых бетонных элементах, усиленных обоймами ФАП, наблюдается после достижения в бетоне сжимающих напряжений, соответствующих начальной прочности бетона до нагружения. С дальнейшим ростом продольной сжимающей силы происходит ускоряющееся увеличение объема бетона и перед разрушением увеличение объема бетона достигает 0,8-1,1%.

5. Разрушение бетонных образцов, усиленных карбоновыми фиброволокнами (ФАП), при осевом сжатии происходит постепенно. Сначала появляется треск, вызванный разрывом отдельных фиброволокон, с увеличением нагрузки треск увеличивается и затем происходит хрупкое раздавливание бетона в зоне разрыва сетки, сопровождающееся резким звуком. Чем больше слоев сеток усиления, тем относительный уровень напряжений в бетоне, при которых начинается процесс разрыва волокон сеток, уменьшается.

6. Наклеивание обойм из однонаправленных вертикальных сеток привело к повышению прочности сжатых элементов круглого сечения в 2,0-5,5 раза, а квадратного сечения - в 1,8-2,3 раза.

7. С увеличением возраста бетона эффективность усиления сжатых элементов обоймами из ФАП снижается. Повышение прочности на сжатие опытных образцов из бетона в возрасте бетона 2-3 месяца превышало на 20-30% повышение прочности аналогичных образцов из бетона в возрасте 15 лет.

8. Предельные деформации бетона, усиленного обоймами из ФАП, увеличились до 0,4-0,5 %, а поперечные деформации бетона и деформации удлинения волокон ФАП достигают значений 0,45-0,55%.

9. Прочность внецентренно сжатых железобетонных образцов, усиленных обоймами из ФАП, при приложении продольной сжимающей силы на границе ядра сечения, составляла около 70% от прочности аналогичных образцов, испытанных при центральном сжатии. При этом эпюра сжимающих напряжений носит параболический характер, а продольные и поперечные деформации бетона на сжатой грани перед разрушением близки к предельным деформациям образцов, испытанных при осевом сжатии.

10. Характер накопления повреждений в бетоне, усиленном обоймами ФАП, при динамическом действии повторных нагрузок зависит от амплитуды сжимающих напряжений. При величине динамической нагрузки, вызывающей разрушение за количество повторных нагружений превышающих 100 циклов, после первых циклов нагружения диаграмма деформирования бетона мало меняется на протяжении значительного количества следующих нагружений. За несколько десятков до разрушения бетона наблюдается ускоряющееся нарастание неупругих деформаций, вплоть до исчерпания прочности бетона. При величине максимальных сжимающих напряжений в бетоне, превышающих 90% от прочности бетона, разрушение бетона происходит после нескольких циклов нагружения, при этом с каждым следующим циклом нагружения происходит

ускоряющееся нарастание неупругих деформаций бетона, заканчивающееся разрушением бетона.

11. Динамические испытания опытных образцов, усиленных обоймами ФАП, при действии немногочисленных повторных нагружений с частотой нагружения один герц и коэффициенте асимметрии изменения усилий около нуля, позволили получить эмпирическую зависимость прочности от количества повторных нагружений. Динамическая прочность бетона превышала статическую прочность почти на 25%.

12. Предельная величина продольных и поперечных деформаций бетона, усиленного обоймами ФАП, в процессе повторных динамических нагружений была меньше предельной деформативности при статическом нагружении на 15-25%, а величина остаточных деформаций бетона достигала значений 0,1%.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **EN 1992-1-1:2004 Design of concrete structures: General rules and rules for buildings** [Текст].- Введ. 2004. Technical Committee CEN/TC250. Брюссель, 2004.
Richart, F.E. A study of the failure of concrete under combined compressive stresses. Engineering Experimental Station [Текст]. / F.E. Richart, F. Brandtzaeg, R.L. Brown.// Bulletin №185. - 1928. University of Illinois.
2. **Katsumata, H.** A Study of Strengthening with Carbon Fibre for Earthquake-Resistant Capacity of Existing Reinforced Concrete Columns [Текст]./ H. Katsumata, Y. Kobatake, A. Takeda.// A Proceedings of the Ninth World Conference on Earthquake Engineering. - Tokio-Kyoto, Japan, 1988, V-VII, pp.517-522.
3. **Mander, J.B.** Theoretical stress-strain model for confined concrete.[Текст]. / J.B. Mander, M.J.N. Priestly, R. Park R. //ASCE Journal of Structural Engineering. - Vol.114.No 8. 1988. - pp.1804-1826.
4. **Xiao, Y.** Seismic Retrofit of RC Circular Columns using Prefabricated Composite Jacketing [Текст]. / Y. Xiao, R. Ma //Journal of Structural Engineering.- FSCE.1997.V5.No10. - pp.1357-1364.
5. **Samaan, M.** Model of Concrete Confined by Fiber Composites [Текст]. / M. Samaan , A. Mirmiran, K. Sahawy // Journal of structural Engineering.- ASCE. V.124. No. 9. 1998.- pp.1025-1031.
6. **Saafi, M.** Behavior of Concrete Confined with Fiber-Reinforced Polymer Tubes[Текст]. / M. Saafi, H.A. Toutanji, Z. Li.// ACI Material Journal -V.96, No. 4 1999, - pp. 500-509.
7. **Miyauchi, K.** Strengthening Effects of concrete Columns with Carbon Fiber Sheet [Текст]./ S. Inouse, T. Kuroda, A. Kobayashi.// Transactions of the Japan Concrete Institute - V.21, 1999.- pp. 143-159.
8. **Matsuda, T.** Effect on Carbon Fibre Reinforcement as a Strengthening Measure for Reinforced Bridge Piers [Текст]. /T. Matsuda, T. Sato, H. Fujiwara, N. Higashida. //

Proceedings of the of 1st US-Japan Workshop on Seismic Retrofit of Bridges. - Public Works Institute. Ministry of Konstruction. Tsukuba. Japan.1990.-pp.356-374.

9. **Fukuyama, H.** FRP Composites in Japan. Concrete International, 1999, vol. 21, № 10, pp. 29-32.

10. **Fukuyama, H.** Tumialan J.G., Matsuzaki T. Outline of the Japanese Guidelines for Seismic Retrofitting of RC Buildings Using FRP Materials. Non-metallic Reinforcement for Concrete Structures - FRPRCS-5, Cambridge, UK, July 16-18, 2001, p. 10.

11. **Teng, J.G.** FRP Strengthened RC Structures [Текст]. / J.G.Teng, J.F. Chen, S.T. Smith, I. Lam.- 2002.John Wiley&Sons, Ltd. -245 p.

12. **Matthys, S.** Axial Load Behavior of Large-Scale Columns Confined With Fiber-Reinforced Pjlimer Composites [Текст]. / K. Miyauchi, S. Inouse, T. Kuroda, A.Kobayashi. // A.ACF Structural Journal/March-April 2005 - pp. 258-267.

13. **Banthia, N.** Fiber Reinforced Polymers in Concrete Construction and Advanced Repair Technologies. Department of Civil Engineering University of British Columbia, 2001. p. 37.

14. **Emmons, P. H.** Vaysburd A. M., Thomas J. Strengthening Concrete Structures, Part I, Concrete International, 1998, vol. 20, № 3, pp. 53-58.

15. **E mmons P. H.** Vaysburd A. M., Thomas J. Strengthening Concrete Structures, Part II, Concrete International, 1998, vol. 20, № 4, pp. 56-60.

16. **Guide to Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures** [Текст].- Введ.. Concrete International, 2005, vol. 27, № 1, p. 13.25. Kelley P. L., Brainerd M. L., Vatovec M. Design Philosophy for Structural Strengthening with FRP. Concrete International, 2000, vol. 22, № 2, pp. 77-82.

17. **Externally Bonded FRP Systems for Strengthening. Concrete International, 2002**, vol. 24, № 9, p. 39.

18. **Taerwe L. R.**, Matthys S. FRP for Concrete Construction: Activities in Europe. Concrete International, 1999, vol. 21, № 10, pp. 33-36.
19. **Alexander J.G.S.**, Cheng J.J.R. Field application and studies of using C FRP sheets to strengthen concrete bridges giders.- In: EI-Badry, V. Advanced composite materials in bridges and structures/ Cfnfdien Sociaty for Civil Engineering, Montreal, 1996.p. 405-472.
20. **Priestly M.J.N.**, Seible F., Calvi G.M. Seismic Design and Retfortit of Bridjes. New York. USA. 1996. H.35-48.
21. **EN 1992-1-1:2004 Design of concrete structures: General rules and rules for buildings** [Текст].- Введ. 2004. Technical Committee CENT/TC250. Брюссель, 2004.
22. **Шилин, А.А.** Внешнее армирование железобетонных конструкций [Текст]./ А.А. Шилин, В.А. Пшеничный, Д.В. Картузов – М. Стройиздат. - 2004.-139 с.
23. **Borowicz, D. T.** Rapid Strengthening of Concrete Beams with Powder-Actuated Fastening Systems and Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composite Materials. University of Wisconsin - Madison, 2002, p. 128.
24. **Retrofitting of Concrete Structures by Externally Bonded FRPs with Emphasis on Seismic Applications** [Текст]./ Techical Report. Fib Bulletin - No. 35. April 2006. - 224 p.
25. **Хаютин, Ю.Г.** Применение углепластиков для усиления строительных конструкций [Текст].// Ю.Г. Хаютин, В.Л. Чернявский, Е.З., Аксельрод.// «Бетон и железобетон» №6 . 2002, С.17-20.
26. **Чернявский, В.Л.** Усиление железобетонных конструкций композитными материалами [Текст]./ В.Л. Чернявский, Е.З. Аксельрод.// «Жилищное строительство» - №3. 2003. - С. 15-16.
27. **Шилин, А.А.** Внешнее армирование железобетонных конструкций [Текст]./ А.А. Шилин, В.А. Пшеничный, Д.В. Картузов. – М. Стройиздат, 2007.-184 с.
28. **Костенко, А.Н.** Использование углеволокна для усиления железобетонной колонны и кирпичного столба [Текст]./ А.Н. Костенко, А.И. Бедов.// «Юбилейная

- 10 международная научно-практическая конференция молодых ученых, аспирантов и докторантов.» М. МГСУ, 2007, (25-26 апреля).- с. 88-92.
29. **Грановский, А.И.** Сейсмостойкость стен, усиленных композитными материалами [Текст]./ С-Петербург. 2011.
30. **Гапонов, В.В.** Усиление изгибаемых железобетонных конструкций подземных сооружений композиционными материалами [Текст]./ Интернет-журнал. 2011. garponov@triadaholding.ru.
31. **Litvinov Artem. Applying Carbon Fiber in Building** [Текст]. /Saimaa University Sciences; Faculty of Technology; Double Degree Programme in Civil and Construction Engineering. -Bachtlor,s Tesis. 2010.
32. **Морозова, Т.С.** Внешнее армирование железобетонных колонн композиционным материалом на основе углеволокна [Текст]. / Т.С. Морозова, В.Д. Кузнецов // Инженерно-строительный журнал. №3, 2010. - С35-38.
33. **Грановский, В.В.,** Усиление железобетонных колонн каркасных зданий в сейсмоопасных районах с использованием элементов внешнего армирования из углеволокна [Текст]./ В.В. Грановский, А.Н. Костенко, А.Л. Мочалов.// «Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружения» М. №2. 2007. С.36-38.
34. **Овчинников, И.И.** Усиление металлических конструкций фиброармированными пластиками. Часть 2. Применение метода предельных состояний к расчету растягиваемых и изгибаемых конструкций [Текст]./ И.И. Овчинников, И.Г. Овчинников, Г.В. Чесноков, Д.А. Татиев, К.В. Покулаев. //Интернет-журнал «Науковедение», вып.3. май-июнь 2014. -23 стр.
35. **Юшин, А.В.** Экспериментальные исследования двухпролетных железобетонных балок, усиленных композитными материалами по наклонному сечению [Текст]./ «Вестник гражданских инженеров». СПб: СПбГАСУ, 2014. №5(46) - С 77-84.

36. **Мухамедиев, Т.А.**, Расчет по прочности железобетонных конструкций, усиленных композиционными материалами [Текст]./ Т.Ф. Мухамедиев, Д.В. Кузеванов, С.И.Иванов // *Azerbaijani Insaat ve Mimarliq*. №4, 2015.- С.11-26.
37. **Humphreys, M.F.** The Use of Polymer Composites in Construction [Текст]./ Интернет-журнал. Queensland University of Technology. M.humphreys@qut.edu.au.
38. **Бокарев, С.Ф.** Усиление пролетных строений с использованием композитных материалов [Текст]. /С.Ф. Бокарев, Д.Н. Смердов, А.Н. Устинов // «Путь и путевое хозяйство». 2008. №6. - С.30-31.
39. **Бокарев, С.Ф.** Экспериментальные исследования изгибаемых железобетонных элементов, усиленных композитными материалами [Текст]./ С.Ф. Бокарев, Д.Н. Смердов// «Известия вузов» Строительство. 2010. №2. - С.112-124.
40. **Бокарев, С.Ф.** Экспериментальные исследования при пониженных температурах железобетонных образцов, усиленных полимерными композиционными материалами [Текст]. /С.Ф. Бокарев, А.Н. Костенко, Д.Н. Смердов, Д.Н. Неровных// Интернет-журнал «Науковедение». 2013. №3. - С 1-9.
41. **Бокарев, С.А.** Кобелев К.В. Усиление опор железнодорожных мостов полимерными композитными материалами. *Russian journal of transport engineering*. 2016, V.3 No 2 - 13 p.
42. **Мухамедиев, Т.А.** Правила проектирования усиления железобетонных конструкций композитными материалами [Текст]./ Т.А. Мухамелиев// Бетон и железобетон.- М. Изд. Ладыя, 2013 -№3-С.13-16.
43. **Мухамедиев, Т.А.** Расчет прочности нормальных сечений железобетонных конструкций, усиленных композитными материалами [Текст]./ Т.А. Мухамелиев, Д.В. Кузеванов// Бетон и железобетон.- М. Изд. Ладыя, 2013 - №5 - С.15-18.
44. **Мухамедиев Т.А.** Расчет внецентренно сжатых железобетонных конструкций, усиленных обоями из композитных материалов [Текст]./ Т.А. Мухамелиев, Д.В. Кузеванов// Бетон и железобетон.- М. Изд. Ладыя, 2014 -№2 - С.22-24.

45. **Давидюк, А.Н.** Применение высокопрочных композитов для усиления железобетонных конструкций [Текст]./ А.Н. Давидюк, Н.А. Спивак // Бетон и железобетон.- М. Изд. Ладыя, 2016 -№2 - С.13-16.
46. **Карпенко, Н.И.** К построению общей ортотропной модели деформирования бетона. [Текст]./Н.Т. Карпенко // Строительная механика и расчет сооружений.- М. Стройиздат, 1987 -№2 - С.31-36.
47. **Гениев, Г.А.** Теория пластичности бетона и железобетона [Текст]./ Г.А. Гениев, В.Н.Киссюк, Г.А.Тюпин.- М. Стройиздат, 1974, С 316.
48. **Беспаев, А.А.** Прочность сжатых бетонных элементов, усиленных фиброармированными сетками [Текст]./ А.А. Беспаев, У.С. Куралов, У.Б. Алтигенов// «Сейсмостойкое строительство, Безопасность сооружений»//Научно-технический журнал. М., 2014, №2. С. 36-38.
49. **Беспаев А.А.** Исследование работы изгибаемых железобетонных конструкций, усиленных фиброармированными пластиками, при динамических нагрузках [Текст]./ А.А. Беспаев, У.Б. Алтигенов// «Сейсмостойкое строительство, Безопасность сооружений»//Научно-технический журнал. М., 2015, №3. - С. 43-45.
50. **Беспаев, А.А.** Прочность изгибаемых железобетонных конструкций, усиленных пластиками FibArm Lamel и FibArm Tare [Текст]./ А.А. Беспаев, У.Б. Алтигенов [Текст]// «Исследования сейсмостойкости сооружений и конструкций», Труды КазНИИСА, Алматы, 2016, вып. 24(34) - 105-116 с.
51. **Беспаев А.А.** Прочность и деформации сжатых железобетонных конструкций, усиленных пластиками FibArm Tare [Текст]./ А.А. Беспаев, У.С.Куралов //«Исследования сейсмостойкости сооружений и конструкций».- Труды КазНИИСА, Алматы. 2016, вып. 24(34) - с.117-130.
52. **Беспаев А.А.** Сейсмостойкость стержневых железобетонных конструкций [Текст]./ А.А.Беспаев - Алматы, 1999. - 184 с.

53. **Nabil, F. Grace.** Durabilidy Evaluation of Carbon Fiber-Reinforced Polymer Strengthened Concrete Beams: Experimental Study and Design. [Текст]./F. Grace Nabil, S.B. Singh //ACI Structural Journal, January-February, 2005 - P.40-53.
54. **Питер Онкен,** Программа проектирования по обжатию бетонных колонн С-листами компании S&P и использованию состава S&P Resicem® для пропитки бетона [Текст]./ Onken Питер, Дёрк Матсдорф, Вибке вон Берк // Гамбург, Германия, 2005.
55. **Альбом конструктивных решений по сейсмоусилению конструктивных железобетонных и каменных зданий композитными материалами FIBARM на основе углеволокна** [Текст]./ ФГБУ ВНИИ ГОЧС. М. 2012.
56. **Руководство по усилению железобетонных конструкций композитными материалами** [Текст]./ ООО «Интераква» Nabil F. Grace, S.B. Singh // НИИЖБ, М., 2006.
57. **Guide for Design and Conctruction of Extermally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures** [Текст]./ ACI 440.2R-02. American Concrete Institute.
58. **Design Guide Line S&P FRB Systems** [Текст]. - P.69.
59. **FRP Repair Materials and Methods. Concrete International**[Текст]./2005, vol. 27. №16 - P.39.
60. **Руководство по усилению железобетонных конструкций композитными материалами** [Текст]./ ООО «Интераква» □ М. 2006. □ 50 с.
61. **ГОСТ 10180-90. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам** [Текст].- Введ. 1990-01-07. –М. Стройиздат. 1990 - 24 с.
62. **СНиП РК 5.03-34-2005 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения** [Текст].- Введ. 2006-01-06. –Астана. 2016. - 20 с.
63. **СНиП 2.01.07-85* Нагрузки и воздействия** [Текст].- Введ. 1991-01-07. –М. Стройиздат. 1991 - 34 с.

64. **СНиП 2.03.01-84*** **Бетонные и железобетонные конструкции** [Текст].- Введ. 1985-01-07. –М. Стройиздат. 1989 - 77 с.
65. **СНиП РК 2.03-30-2006** **Строительство в сейсмических районах** [Текст].- Введ. 1990-01-07. –Алматы. 2006 - 80 с.
66. **ГОСТ 8829-94** **Изделия строительные железобетонные и бетонные заводского изготовления. Методы испытания нагружением. Правила оценки прочности, жесткости и трещиностойкости** [Текст].- Введ. 1994-01-07 –М. ИПК Изд.-во стандартов. 1994 - 24 с.
67. **ГОСТ 25.601-80. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытания плоских образцов на растяжение при нормальной, повышенной и пониженной температурах** [Текст]./-Введ. 01,01,1981. М. Стойиздат. 1980. 32 с.
68. **FRP Repair Materials and Methods.** [Текст].- Введ. Concrete International, 2005, vol. 27, № 1, p. 66.
69. **Guide to Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers (FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures** [Текст].- Введ.. Concrete International, 2005, vol. 27, № 1, p. 13.
70. **Strengthening Concrete Structures** [Текст].- Введ. Concrete International, 2005, vol. 27, № 1, p. 13.
71. **Externally bonded FRP reinforcement for RC structures** [Текст] /Bulletin No. 14, FIB 2001.Technical Rep., Lausanne, Switzerland, p.22-26.
72. **СП 164.1325800.2014. Усиление железобетонных конструкций композитными материалами. Правила проектирования.** [Текст] – Введ. 01.09.2014. Москва.2015.С.28.
73. **СНиП 52-01-2003. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения.** Москва 2004.
74. **Externally bonded FRP reinforcement for RC structures. Technical report on the Design and use of externally bonded fibre reinforced polymer reinforcement**

(FRP) for reinforced concrete structures. The International Federation for Structural Concrete. CEB-FIP, July, 2001.

75. **Сабиров Р. Х.** Технология ремонта и усиления ступителеев калийной промышленности. [Текст]./ Сабиров Р. Х. Чернявский В.Л., Юдина Л. И. // Химическая промышленность, 2002, № 2. стр. 1-5.

76. **Хаютин Ю.Г.** Ремонт и усиление железобетонных конструкций в зданиях из монолитного железобетона. [Текст]./ Хаютин Ю.Г., Чернявский В.Л., Аксельрод Е.З.// "Проектирование и строительство монолитных многоэтажных жилых и общественных зданий, мостов и тоннелей" Сборник докладов. 2004 г., стр. 195 - 199.

77. **Клевцов В.А.** "Расчет прочности нормальных сечений изгибаемых элементов, усиленных внешней арматурой из полимерных композиционных материалов"[Текст]./ Клевцов В.А. Фаткуллин Н.В. // Научно-техническая конференция молодых ученых и аспирантов ЦНИИС, 2006.

78. **Чернявский В. Л.** Современные материалы и технологии ремонта и усиления конструкций мостов. Материалы Всероссийской научно-практической конференции [Текст]./ Чернявский В. Л.// Современные технические решения по повышению надежности автомобильных дорог и искусственных сооружений" Краснодар, 2001. стр. 199-201.

79. **Banthia N.** Fiber Reinforced Polymers in Concrete Construction and Advanced Repair Technologies. [Текст]./ Banthia N.// Department of Civil Engineering University of British Columbia, p. 37.

80. **Barakal S. A.** Evaluation of the Performance of Concrete Structures Strengthened with FRP Composites. [Текст]./ Barakal S. A., Binienda W. K., Tysl S. R. //15th ASCE Engineering Mechanics Conference, June 2-5, 2002, Columbia University, New York, p. 9.

81. **Borowicz D. T.** Rapid Strengthening of Concrete Beams with Powder-Actuated Fastening Systems and Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composite Materials. [Текст]./

Borowicz D. T. // University of Wisconsin - Madison, 2002, p. 128.

82. **Burgoyne C. J.** Advanced Composites in Civil Engineering in Europe. [Текст]./
Burgoyne C. J. //Structural Engineering International 4/99 p. 7.

83. **Cardolin A.** Carbon Fibre Reinforced Polymers for Strengthening of Structural Elements. [Текст]./ Cardolin A. // Division of Structural Engineering, Department of Civil and Mining Engineering, Lulea University of Technology, Sweden. 2003, p. 194.

84. **Crawford J. E.** Composite retrofits to Increase the Blast Resistance of Reinforced Concrete Buildings. [Текст]./ Crawford J. E., Malvar L. J., Morrill K. B.// Presented at the Tenth International Symposium on Interaction of the Effects of Munitions with Structures, May 2001, p. 25.

85. **Ebead U.** Verification for FRP Externally Reinforced Concrete Slabs. [Текст]./
Ebead U., Marzouk H. // Department of Civil Engineering, University of Sherbrooke, Department of Civil Engineering, Memorial University of Newfoundland, p. 8.

86. **Emmons P. H.** Strengthening Concrete Structures. [Текст]./ Emmons P. H., Vaysburd A. M., Thomas J.// Part I, Concrete International, 1998, vol. 20, № 3, pp. 53-58.

87. **Emmons P. H.** Strengthening Concrete Structures. [Текст]./ Emmons P. H. Vaysburd A. M., Thomas J. // Part II, Concrete International, 1998, vol. 20, № 4, pp. 56-60.

88. **Kelley P. L.** Design Philosophy for Structural Strengthening with FRP. [Текст]./
Kelley P. L. Brainerd M. L. Vatovec M.// Concrete International, 2000, vol. 22, № 2, pp. 77-82.

89. **Scott F.** Concrete Rehabilitation Project with Fiber-Reinforced Composite System Strengthening. [Текст]./ Scott F. Arnold, Duane J. Gee, P.E. Edward R. Fyfe.// Concrete Repair Bulletin, 1999, may-jun., pp. 6-9.

90. **СП РК 1.04-110-2017** «Обследование, оценка технического состояния и сейсмоусиление зданий и сооружений», Астана, 2017 г.

91. **СНиП РК 2.03-30-2006** «Строительство в сейсмических районах», Астана,

2006 г.

92. **СП РК 2.03-30-2017** «Строительство в сейсмических зонах», Астана, 2017 г.
93. **ГОСТ 22690-2015**. Бетоны. Определение прочности механическими методами неразрушающего контроля. Москва, 1988 г.
94. **ГОСТ 28570-90**. Бетоны. Методы определения прочности по образцам, отобраным из конструкций. Астана, 2004 г.
95. **Межгосударственный стандарт ГОСТ 18105-2010. Бетоны**. Правила контроля прочности (EN 206-1:2000, NEQ). Москва, Стандартинформ, 2013 г.
96. **СНиП 2.03.01-84*** «Бетонные и железобетонные конструкции», Москва, 1989 г.
97. Пособие по усилению несущих конструкций зданий и сооружений, реконструируемых предприятий, расположенных во II и III зонах г. Алматы (к РСН 10-83). Алматы, 1986 г.
98. Пособие по обследованию и оценке сейсмостойкости зданий, существующей застройки, Алма-Ата, 1986 г.
99. Рекомендации по усилению железобетонных конструкций фиброармированными пластиками. КазНИИСА, Алматы. 2013 г.
100. Руководство по ремонту бетонных и железобетонных конструкций зданий и сооружений с использованием материалов ТОО «БАСФ Центральная Азия» и учетом требованиями европейских норм. Алматы, 2013.
101. **Островский И.С.** Окисляемость углеродного материала на синтетическом связующем [Текст]./ Островский И.С. Чередник Е.М. // В сб. "Конструкционные углеграфитовые материалы", М., "Металлургия".-1977.- №12.- с.170-174.
- Park K.Yo.** Modelling of gas-carbon reaction in pore diffusion control regime [Текст]./ Park K.Yo. Kim Ch. Park W.H. //Korean J. Chem. Eng. -1988.- Vol.5, N1.-P.35-40.

Статьи соискателя

1. **Беспаяев, А.А.** Арматураның бетонмен ұстасуы [Текст]/ А.А. Беспаяев, С.Ш. Джарылкасынов, У.С. Куралов // «Новые материалы и изделия», Вестник КазАТК, Алматы, 2010, вып. №5 (66), с.113-117.
2. **Беспаяев, А.А.** Усиление железобетонных конструкций полимерными материалами [Текст]/ А.А.Беспаяев, У.С. Куралов, У.Б.Алтигенов// Вестник национальной инженерной академии РК – Алматы-2011. –№2. –115–118 с.
3. **Беспаяев, А.А.** Прочность сжатых бетонных элементов, усиленных фиброармированными сетками [Текст]/ А.А. Беспаяев, У.С. Куралов // Строительство в сейсмических районах: сб. матер. IV научно-технической конференции 16-19 октября 2012 г. Алматы: РГП «КазНИИССА», 2012. С. 34 – 38.
4. **Беспаяев, А.А.** Прочность сжатых бетонных элементов, усиленных фиброармированными сетками [Текст] / А.А. Беспаяев, У.С. Куралов, У.Б. Алтигенов // «Сейсмостойкое строительство, Безопасность сооружений»//Научно-технический журнал. Москва., 2014, №2. С. 36-38.
5. **Беспаяев, А.А.** Исследование работы изгибаемых железобетонных конструкций, усиление фиброармированными пластиками при динамических воздействиях [Текст] / А.А.Беспаяев, У.С. Куралов, У.Б. Алтигенов // «Сейсмостойкое строительство, Безопасность сооружений»//Научно-технический журнал. Москва., 2015, №3. С. 43-45.
6. **Беспаяев, А.А.** Исследование прочности железобетонных конструкций, усиленных фиброармированными пластиками, при динамических нагрузках [Текст] / А.А.Беспаяев, У.С. Куралов, У.Б. Алтигенов // Прочность конструкций, сейсмодинамика зданий и сооружений: сб. научн. тр. - журнал Проблемы механики – Тошкент – 2016 - №3- С.25-28.
7. **Беспаяев, А.А.** Усиление сжатых железобетонных конструкций пластиками Fibarm TARE 530) карбоновых фиброволокон» [Текст]/ А.А.Беспаяев, У.С. Куралов // «II международная конференция молодых ученых «Современные

задачи геофизики, инженерной сейсмологии и сейсмостойкого строительства»//Институт геофизики и инженерной сейсмологии им. А. Назарова НАН РА. Армения г. Ереван, 2015, с.75-78.

8. **Куралов, У.С.** Усиление сжатых железобетонных конструкций пластиками Fibarm TARE» [Текст]/ У.С. Куралов //, «Международной научно-практической конференции Наука, техническое регулирование и инжиниринг в строительстве: состояние, перспективы», Караганда, 2016, удк 69.013.514.001.89 (ББК 38.1), с.145-147.

9. **Беспаяев, А.А.** Поверхностное усиление железобетонных конструкций фиброармированными пластиками «Исследования сейсмостойкости сооружений и конструкций» [Текст]/ А.А.Беспаяев, У.С. Куралов, У.Б.Алтигенов // Труды КазНИИСА, Алматы, 2015, вып. 23(33), с.115-128

10. **Беспаяев, А.А.** Прочность и деформации сжатых железобетонных конструкций, усиленных пластиками FibArm Tare [Текст]/ А.А. Беспаяев, У.С. Куралов // «Исследования сейсмостойкости сооружений и конструкций», Труды КазНИИСА, Алматы, 2016, вып. 24(34), с.117-130.

11. **Беспаяев, А.А., Куралов У.С.** Усиление сжатых железобетонных элементов фиброармированными карбоновыми волокнами (fibarm tare 530/300) [Текст]/ А.А. Беспаяев, У.С. Куралов // «Международная научно-практическая конференция Новые строительные тренды в 21 веке», АО «КазНИИСА», Алматы, 2017, УДК 69. (063) с.38-40.

12. **Беспаяев, А.А.** Усиление и восстановление изгибаемых железобетонных конструкций предварительно напряженными фиброармированными пластиками [Текст] / А.А.Беспаяев, У.С. Куралов, У.Б. Алтигенов //Наука и инновационные технологии: Научный и информационный журнал-Махprint-Бишкек- 2018- №3–154-157 с.

13. **Беспаяев, А.А.** Усиление наклонных сечений железобетонных конструкций карбоновыми углепластиками S&P C Sheet 249 [Текст] / А.А.Беспаяев,

Е.М. Шокбаров, У.Б. Алтигенов, У.С.Куралов // Наука и инновационные технологии: Научный и информационный журнал-Махprint-Бишкек–2018–№3–209-212 с.

14. **Беспаев, А.А.** Усиление сжатых железобетонных конструкций пластиками FIBARM TAPE [Текст] / А.А.Беспаев, У.Б. Алтигенов, У.С. Куралов // Наука и инновационные технологии: Научный и информационный журнал-Махprint-Бишкек- 2018- №3–212-218 с.

15. **Беспаев, А.А.** Способ предварительного напряжения фиброармированных пластиков при поверхностном усилении для восстановления эксплуатационной пригодности железобетонных конструкций [Текст] / А.А.Беспаев, У.Б. Алтигенов, У.С.Куралов // «Вестник» Международной ассоциации экспертов по сейсмостойкому строительству-Бишкек - 2018- №1/2018(2) – 41-45 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1- РЕКОМЕНДАЦИИ ПО УСИЛЕНИЮ СЖАТЫХ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ФИБРОАРМИРОВАННЫМИ ПЛАСТИКАМИ

П1.1. Общие данные

1.1 Настоящие Рекомендации распространяются на проектирование поверхностного усиления сжатых железобетонных конструкций с помощью обойм или бандажей из фиброармированных пластиков (ФАП) для обычных и сейсмических районов.

1.2 Настоящие Рекомендации разработаны в развитие. СНиП 2.03.01-84* «Бетонные и железобетонные конструкции» и СП РК 2.03.30-2017 «Строительство в сейсмических зонах».

1.3 При расчете конструкций на прочность и устойчивость на сейсмические воздействия, помимо коэффициентов условий работы, принимаемых в соответствии с другими нормами, следует вводить дополнительные коэффициенты условий работы γ_{bt} и γ_{bs} , определяемые по таблицам 1.1 и 1.2.

Таблица 1.1 – Значения дополнительного коэффициента условий работы бетона γ_{bt}

Вид бетона	Значения коэффициента условий работы бетона γ_{bt} при классе бетона по прочности на сжатие		
	B15	B30	B45
Тяжелый	1,0	0,95	0,9
Легкий	1,0	0,9	-
Ячеистый	0,9	-	-

Таблица 1.2 – Значения дополнительного коэффициента условий арматуры γ_{st}

Класс арматуры	Значения коэффициента условий работы арматуры γ_{st}		
	при растяжении		при сжатии
	R_s	R_{sw}	R_{sc}
А-240, Вр-500	1,2	0,9	1,0
А-300	1,15		
А-400	1,1		
А-500	1,05		
ФАП	1,0		

Примечание. При расчете сварных соединений арматуры значения γ_{st} следует умножать на коэффициент, принимаемый для дуговой и контактной сварки - 0,9, для ванной сварки – 0,8.

П1.2. Основные расчетные положения

2.1 Железобетонные конструкции, усиленные ФАП, должны удовлетворять требованиям расчета по несущей способности (предельные состояния первой группы) и по пригодности к нормальной эксплуатации (предельные состояния второй группы). Расчет конструкций, усиленных ФАП, по первой группе предельных состояний выполняется на основе условий равновесия усилий в предельном состоянии и производится во всех случаях. Расчет по второй группе предельных состояний производится только в тех случаях, когда расчетная нагрузка после усиления увеличивается.

2.2 Расчет конструкций, усиленных ФАП по первой группе предельных состояний выполняется на основе условий равновесия усилий в предельном состоянии.

2.3 В предельном состоянии по несущей способности сжатых колонн, усиленных оборачиванием композитом ФАП, поперечное расширение бетона воспринимается оболочкой (бандажом) из ФАП.

2.4 Усиливаемые конструкции должны быть запроектированы так, чтобы они:

- с назначенным уровнем безопасности воспринимали все воздействия в процессе реконструкции и эксплуатации, обладая соответствующей долговечностью;
- с гарантированной надежностью удовлетворяли предъявляемым к ним требованиям по нормальной эксплуатации.

2.5 Подбор площади сечения элементов ФАП производится итерационным методом, задавая начальную ее величину, а затем корректируя последнюю по результатам расчетов по прочности.

2.6 Нормативные характеристики ФАП (нормативная прочность на растяжение R_f , модуль упругости E_f , предельные деформации при растяжении ε_{uf}) определяются путем испытания образцов в соответствии с ГОСТ 25.601-80 с обеспеченностью 0,95.

2.7 Расчетные характеристики ФАП определяются по нормативным характеристикам ФАП с учетом коэффициента надежности по арматуре γ_f и коэффициента условий работы арматуры γ_{fi} , учитывающего влияние окружающей среды.

Расчетное сопротивление на растяжение ФАП определять по формуле:

$$R_f = \frac{R_{fn} \cdot \gamma_{fi}}{\gamma_f} \quad (2.1)$$

Расчетная деформация растяжения ФАП определять по формуле:

$$\varepsilon_f = \frac{\varepsilon_{uf} \cdot \gamma_{fi}}{\gamma_f} \quad (2.2)$$

Расчетное значение модуля упругости ФАП определять по формуле:

$$E_f = \frac{R_{fn}}{\varepsilon_{df}} \quad (2.3)$$

Коэффициенты надежности γ_f для ФАП принимать равными:

- при расчете по предельным состояниям первой группы – $\gamma_f = 1,2$;
- при расчете предельных состояний по второй группы – $\gamma_f = 1,0$.

Коэффициенты условий работы γ_f для ФАП принимать по Таблице 3.

2.8 При проектировании усиления конструкций следует учитывать требуемый уровень огнестойкости конструкции. Для повышения уровня огнестойкости конструкции, усиленной ФАП, необходимо применять дополнительные средства защиты.

Таблица 3 - Коэффициенты условий работы арматуры γ_{fl}

Окружающая среда	Материал	Ламели, ламинат	Ткани
1	2	3	4
Внутренние помещения	углерод	0,95	0,9
	стекло	0,75	0,7
	арамид	0,85	0,8
Конструкции на открытом воздухе	углерод	0,85	0,8
	стекло	0,65	0,6
	арамид	0,75	0,7
Агрессивная среда	углерод	0,85	0,8
	стекло	0,5	0,5
	арамид	0,7	0,6

2.9. Использование системы ФАП не останавливает начавшиеся процессы коррозии арматурной стали в бетоне. Для предотвращения развития коррозии арматуры необходимо обработать бетонную поверхность мигрирующим ингибитором коррозии арматурной стали, а при отделении защитного слоя следует оголить арматуру, обработать ее грунтом-преобразователем ржавчины и

затем восстановить защитный слой полимерцементными ремонтными составами, обеспечивающими высокую адгезию к «старому» бетону.

2.10. Усиление наклеиванием ФАП в продольном направлении (ФАП в данном случае работает только на растяжение).

Требуемую площадь продольной ФАП следует определять учитывая недостающую площадь продольной арматуры $A_{s,def}$, по формуле:

$$A_f = \frac{R_f E_f}{R_s E_s} A_{s,def} \quad (2.4)$$

μ_s – коэффициент армирования сечения, определяется как отношение площади сечения продольной стальной арматуры к площади поперечного сечения элемента:

$A_{s,def}$ – требуемая дополнительная площадь сечения продольной стальной арматуры в сечении;

h_0 – рабочая высота сечения, $h_0 = h - a$;

2.11 Прочность сжатых железобетонных элементов, имеющих спиральную стальную арматуру и усиленных обоймой ФАП, определять по формуле:

$$N = 0,85[0,85\psi_f R_{bf} (A - A_s) + R_s^1 A_s] \quad (2.5)$$

Коэффициент запаса прочности $\psi_a = 0,95$;

2.12 Прочность бетона в обойме круглого бетонного элемента определять по формуле:

$$R_{bf} = R_b^1 [2,25 \sqrt{(1 + 7,9 \cdot \frac{\sigma_f}{R_b^1})} - 2 \frac{\sigma_f}{R_b^1} - 1,25] \quad (2.6)$$

Максимальные расчетные напряжения в обойме определять по формуле:

$$\sigma_f = \frac{\rho_f \cdot \varepsilon_{fe} \cdot E_f}{2} \quad (2.7)$$

$$R_b^1 = 1,5 \cdot R_b \quad (2.8)$$

Расчетная деформация в обойме определять из выражения:

$$\varepsilon_{fe} = 0,004 \leq 0,75 \cdot \varepsilon_{fu} = 0,75 \cdot \frac{R_{fu}}{E_f} \quad (2.9)$$

Коэффициент армирования ФАП для круглого сечения определять по формуле:

$$\rho_a = \frac{2 \cdot n \cdot t_f}{r} \quad (2.10)$$

где n- количество слоев фиброармированной обоймы;

t_f – толщина слоя фиброармированной оболочки;

r – радиус сечения железобетонного элемента.

2.13 Прочность бетона железобетонных элементов прямоугольного сечения, усиленных обоймой ФАП, определять по формуле:

$$R_{b.fh} = R_b \cdot [2,254 \sqrt{(1 + 2,121 \frac{R_l}{R_b})} - 0,5343 \frac{R_l}{R_b} - 1,254] \quad (2.11)$$

$$R_l = K_1 \cdot R_f ; \quad (2.12)$$

Коэффициент армирования ФАП для прямоугольного сечения определять по формуле:

$$\rho_f = \frac{2 \cdot n \cdot t_f \cdot (b + h)}{b + h} \quad (2.13)$$

Максимальные расчетные напряжения в обойме для прямоугольного определять по формуле:

$$\sigma_f = \frac{k_a \cdot \rho_f \cdot \varepsilon_{fe} \cdot E_f}{2} \quad (2.14)$$

Коэффициент эффективности усиления для прямоугольных сечений определять по формуле:

$$\rho_f = \frac{2 \cdot n \cdot t_f \cdot (b + h)}{b + h} \quad (2.15)$$