

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
образования
«Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»
Институт Строительства и Архитектуры
Кафедра промышленного, гражданского строительства и экспертизы недвижимости

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ В ГЭК

Зав. кафедрой _____ Н.И. Фомин

«__» _____ 2024 г.

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
ПО НАПРАВЛЕНИЮ 08.04.01 «СТРОИТЕЛЬСТВО»**

Тема: Повышение долговечности железобетонных конструкций введением
стекловолоконных сеток в защитный слой бетона

Научный руководитель, доцент, к.т.н.	_____	А.В. Куршпель
Нормоконтролер, доцент, к.т.н.	_____	А.В. Куршпель
Студент группы СТМ-220101	_____	Т.Е. Лыскова

Екатеринбург

2024

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина»

Институт Строительства и Архитектуры
Кафедра Промышленного, гражданского строительства и экспертизы недвижимости
Направление подготовки 08.04.01 «Строительство»
Образовательная программа 08.04.01/33.01 «Промышленное и гражданское строительство»

УТВЕРЖДАЮ

Зав. кафедрой _____ Н. И. Фомин

«__» _____ 202__ г.

ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

студента Лысковой Татьяны Евгеньевны группы СТМ-220101
(фамилия, имя, отчество)

1. Тема выпускной квалификационной работы Повышение долговечности железобетонных конструкций введением стекловолоконных сеток в защитный слой бетона

Утверждена распоряжением по институту от «02» октября 2023 г. №33.00-05/4а(02)

2. Руководитель Куршпель Алексей Владимирович, доцент, к.т.н.
(Ф.И.О., должность, ученое звание, ученая степень)

3. Исходные данные к работе научные публикации по теме исследования

4. Объем демонстрационных материалов защитное слово, презентация

5. Календарный план

№ п/п	Наименование этапов выполнения работы	Срок выполнения этапов работы
1	Обзор литературы, формулирование целей и задач исследования	1 семестр
2	Планирование и проведение исследования	2 семестр
3	Обработка результатов исследования	3 семестр
	Оформление ВКРМ	4 семестр

Руководитель _____ Куршпель А.В.
(подпись) (Ф.И.О.)

Задание принял к исполнению _____ Лыскова Т.Е.
(подпись) (Ф.И.О.)

6. Выпускная квалификационная работа закончена «21» мая 2024 г., считаю возможным допустить к предварительной защите на заседании кафедры.

Руководитель _____ Куршпель А.В.
(подпись) (Ф.И.О.)

7. Допустить Лыскову Татьяну Евгеньевну к защите выпускной квалификационной работы в Государственной экзаменационной комиссии (протокол заседания кафедры №6 от «05» июня 2024 г.).

Зав. кафедрой _____ Фомин Н. И.
(подпись) (Ф.И.О.)

8. Замечания, выявленные на предварительной защите устранены

Руководитель _____ Куршпель А.В.
(подпись) (Ф.И.О.)

Реферат

Объем и структура работы. Выпускная квалификационная работа магистранта (ВКРМ) изложена на 40 страницах основного текста и состоит из введения, трех глав, заключения и библиографического списка, включающего 32 наименования. Работа содержит 4 таблицы, 18 рисунков и 23 формулы.

Ключевые слова: стекловолоконные сетки, защитный слой, трещиностойкость, долговечность, надежность, железобетонные конструкции, композитные материалы.

Целью работы является исследование влияния стекловолоконных сеток на прочность и трещиностойкость защитного слоя железобетонной конструкции.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

- изучение научной, нормативной и учебной литературы по способам повышения долговечности железобетонных конструкций;
- анализ теоретического материала о свойствах железобетона и стекловолоконных сеток;
- выполнение теоретического расчета бетонного образца без стекловолоконной сетки и с сеткой;
- выполнение численного расчета бетонного образца без стекловолоконной сетки и с сеткой в программном комплексе «ЛИРА-САПР 2016» и сравнение результатов с теоретическим расчетом.

Объектом исследования являются железобетонные конструкции.

Предметом исследования является долговечность железобетонных конструкций при использовании стекловолоконных сеток в защитном слое бетона и без них.

Содержание

Введение.....	5
Глава 1. Теоретические основы исследования.....	9
1.1. Долговечность железобетонных конструкций.....	9
1.2. Способы повышения долговечности железобетонных конструкций....	13
1.3. Стекловолоконные сетки: характеристики, свойства, область применения	19
1.4. Нормативно-техническая база в области применения композитных материалов для проектирования и усиления железобетонных конструкций..	22
1.5. Выводы по главе 1	23
Глава 2. Теоретический расчет бетонного образца	25
2.1. Расчетный образец	25
2.2. Расчет на образование трещин при непродолжительном действии нагрузки.....	27
2.3. Расчет на образование трещин при продолжительном действии нагрузки.....	28
2.4. Расчет на раскрытие трещины шириной 0,1 мм при продолжительном действии нагрузки.....	28
2.5. Выводы по главе 2.....	29
Глава 3. Численный эксперимент.....	30
3.1. Расчет в программном комплексе «ЛИРА-САПР 2016»	30
3.2. Результаты расчета	32
3.3. Выводы по главе 3	36
Заключение	37
Библиографический список	38

ВВЕДЕНИЕ

Бетон является одним из самых универсальных, экономичных и долговечных материалов, применяемых в строительстве. Но несмотря на его преимущества, бетон также имеет недостатки, связанные с его химическим составом, физико-механическими свойствами и низкой прочностью на растяжение. Ошибки при проектировании, изготовлении и эксплуатации железобетонных конструкций могут привести к появлению дефектов в них.

Возникновение дефектов в конструкции снижает её долговечность. Среди возможных дефектов стоит выделить трещины, поскольку они служат не только показателем возникновения повреждения в бетоне, но и причиной других дефектов. Бетон в зоне образования трещины перестает работать, и растягивающие усилия воспринимаются только арматурой. И хотя трещины не оказывают сильного влияния на прочность конструкции, они приводят к снижению коррозионной защиты арматуры.

В ответственных конструкциях, не допускающих образования трещин, малая прочность железобетона на растягивающие напряжения может привести к разрушительным последствиям. В таком случае крайнюю важность приобретает вопрос о способах повышения трещиностойкости железобетона.

Актуальность работы. Актуальность исследования обусловлена тем, что железобетон часто используется в качестве материала для несущего каркаса зданий и сооружений. С течением времени железобетонные конструкции подвергаются различным воздействиям, таким как атмосферные условия, химические реакции, механические нагрузки и даже биологические процессы, что приводит к потере требуемых эксплуатационных качеств.

Для усиления железобетонных конструкций применяются различные материалы, в том числе композитные материалы: углеволоконные, стеклопластиковые, базальтовые. В таком случае композиты используют в качестве внешнего армирования конструкций, когда конструкция уже подверглась повреждению и не пригодна для дальнейшей эксплуатации.

Для улучшения свойств бетона может применяться дисперсное армирование стальными или композитными волокнами (фибрами). Недостатком фибробетона является неконтролируемое расположение фибр в массе бетонной смеси при перемешивании, что не гарантирует равномерность прочностных и деформативных характеристик конструкции в стадии эксплуатации, а также высокая стоимость производства фибробетона.

Использование стекловолоконных сеток для повышения трещиностойкости железобетонных конструкций лишено этих недостатков фибробетона, но имеет малое количество исследований на данную тему, а существующие стандарты не учитывают такое применение стекловолоконных сеток.

Объектом исследования являются железобетонные конструкции.

Предметом исследования является долговечность железобетонных конструкций при использовании стекловолоконных сеток в защитном слое бетона и без них.

Целью работы является исследование влияния стекловолоконных сеток на прочность и трещиностойкость защитного слоя железобетонной конструкции.

Для достижения цели были поставлены следующие задачи:

- изучение научной, нормативной и учебной литературы по способам повышения долговечности железобетонных конструкций;
- анализ теоретического материала о свойствах железобетона и стекловолоконных сеток;
- выполнение теоретического расчета бетонного образца без стекловолоконной сетки и с сеткой;
- выполнение численного расчета бетонного образца без стекловолоконной сетки и с сеткой в программном комплексе «ЛИРА-САПР 2016» и сравнение результатов с теоретическим расчетом.

Научная новизна. В приведенной работе исследовано поведение стекловолоконных сеток при введении их в защитный слой бетона и показано их влияние на свойства бетона.

Теоретическая значимость заключается в том, что была исследована теоретическая эффективность работы стекловолоконных сеток в защитном слое бетона при различных вариантах работы конструкции, что позволяет использовать результаты исследования для экспериментальных исследований в данной области.

Практическая значимость заключается в возможности использования данного исследования для определения целесообразности применения стекловолоконных сеток в защитном слое бетона железобетонных конструкций.

Публикация. По результатам работы была написана статья «Способы повышения долговечности железобетонных конструкций», которая принята к публикации в журнале «Научный аспект», № 5. Ориентировочная дата публикации – июнь 2024 года.

Объем и структура работы. ВКРМ изложена на 40 страницах основного текста и состоит из введения, трех глав, заключения и библиографического списка, включающего 32 наименования. Работа содержит 4 таблицы, 18 рисунков и 23 формулы.

Во введении обоснована актуальность работы, определены цель, задачи, объект и предмет исследования, отражены новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе рассмотрены понятие долговечности, влияние различных дефектов на долговечность железобетонных конструкций, обобщены способы повышения долговечности конструкций, свойства и область применения сеток из стекловолокна, а также приведена нормативно-техническая документация на стекловолоконные сетки и методы их использования.

Во второй главе рассмотрена методика расчета стекловолоконных сеток в защитном слое бетона, включающая расчетные схемы и характеристики образцов, расчеты усилий в стержнях сетки и растянутом бетоне.

В третьей главе приведен расчет стекловолоконных сеток в защитном слое бетона, выполненный в программном комплексе «ЛИРА-САПР 2016» на основе плоской конечно-элементной модели. Проведено сравнение полученных

результатов с теоретическими значениями и с усилиями в растянутом бетоне без использования стекловолоконных сеток.

В заключении сформированы выводы и предложения по теме исследования.

ГЛАВА 1. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

1.1. Долговечность железобетонных конструкций

Повышение долговечности железобетонных конструкций всегда является важной задачей для инженеров и строителей. Железобетон часто используется в качестве материала для несущего каркаса зданий и сооружений. С течением времени железобетонные конструкции подвергаются различным воздействиям, таким как атмосферные условия, химические реакции, механические нагрузки и даже биологические процессы, что приводит к потере требуемых эксплуатационных качеств железобетонной конструкции [1].

Железобетон – это композитный строительный материал, состоящий из работающих совместно стальной арматуры и бетона. Бетон хорошо работает на сжатие, но имеет малое сопротивление растяжению, поэтому для восприятия растягивающих усилий в конструкции устанавливают арматуру [2]. Совместная работа арматуры с бетоном обеспечивается значительными силами сцепления, возникающими между бетоном и арматурой. Защитный слой бетона обеспечивает сохранность арматуры, ограждая ее от воздействия коррозии и высоких температур в случае возгорания.

Для поиска методов и способов повышения долговечности железобетонных конструкций необходимо дать определение понятию «долговечность». По СП 63.13330.2018 «Бетонные и железобетонные конструкции» [3] железобетонные конструкции удовлетворяют требованиям долговечности, если в течение длительного времени конструкция выполняет требования по безопасности и эксплуатационной пригодности с учетом влияния различных расчетных воздействий.

В «Методическое пособие по назначению срока службы бетонных и железобетонных конструкций» [4] под долговечностью понимается способность конструкции сохранять минимально необходимые эксплуатационные качества в течение заданного периода времени под воздействием деградации. Следует подчеркнуть, что долговечность напрямую связана с работоспособностью и

деградацией конструкции и материалов, из которых она состоит. Работоспособность конструкции связана с её прочностными, деформационными, физическими характеристиками. Деградацией же называют процесс снижения характеристик работоспособности во времени.

Таким образом, долговечность является способностью конструкции сохранять минимальные эксплуатационные качества и выполнять требования по безопасности в течение заданного промежутка времени под влиянием расчетных воздействий.

Возникновение дефектов в конструкции также снижает её долговечность. В соответствии с ГОСТ 15467–79 «Управление качеством продукции» [5], дефектом является любое отступление от проекта или невыполнение требований норм. Наиболее распространенные причины возникновения дефектов [6]:

- непроектное выполнение конструкций и узлов сопряжения;
- нарушение технологии производства работ;
- применение конструкций, изделий и материалов или материалов с непроектными характеристиками или дефектами;
- нарушение правил эксплуатации;
- ошибки в проектах.

Бетон состоит из крупного и мелкого заполнителя (щебень и песок), соединенных между собой цементным вяжущим. Структура бетона – конгломератная, представляет собой цементный камень с включениями заполнителя. Цементный камень и заполнитель содержат воздушные и капиллярные поры, заполненные химически несвязанной водой и воздухом.

Внешняя нагрузка создает в бетоне сложное напряженное состояние [7], [8]: по плоскостям соединения частицах, обладающих большим модулем упругости, возникают усилия, стремящиеся разрушить их связь, а в ослабленных порах местах происходит концентрация напряжений, поэтому микротрещины в первую очередь образуются на границах между заполнителем и цементным камнем, затем в цементном камне (рис. 1). Под действием нагрузки

микротрещины соединяются в макротрещины, раскрытие которых сопровождается мнимым увеличением объема бетона.

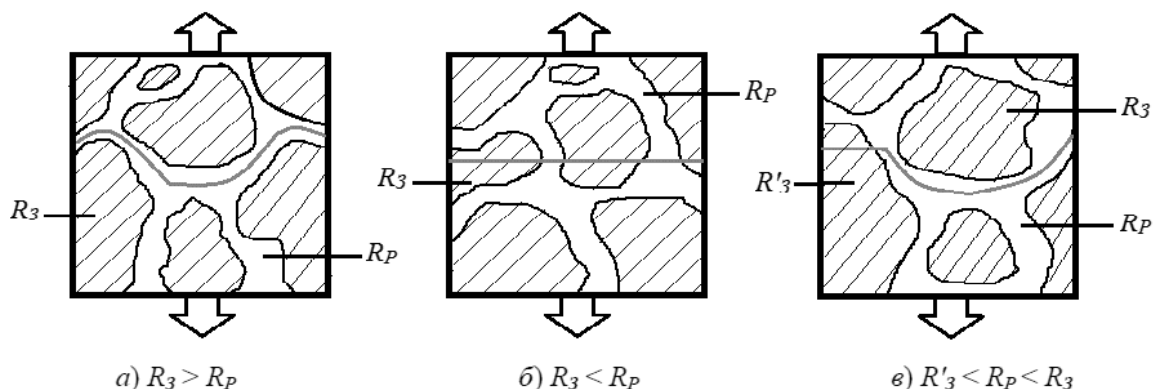


Рис. 1. Характер разрушения бетона: а) – по цементному раствору без разрушения заполнителя; б) – с разрывом зерен заполнителя; в) – смешанное

В местах образования трещин защитный слой бетона перестает выполнять свою функцию, и незащищенные участки арматуры подвергаются коррозии, что уменьшает долговечность конструкции (рис. 2). Среди разновидностей деформаций можно выделить:

- возникающие от температурных воздействий;
- от усадки или расширения бетонной смеси и бетона;
- от кратковременных и длительных механических нагрузок, вызываемые ползучестью бетона.

Усадка характеризует процесс уменьшения объема бетона при твердении на воздухе или в условиях низкой влажности. Усадка подразделяется на типы:

1. Влажностная – перераспределение или испарение воды из цементного камня.
2. Контракционная – общий объем образующегося цементного камня оказывается меньшим, чем объем исходных компонентов, вступающих в химическую реакцию.
3. Карбонизационная – развивается с поверхности бетона в глубину при карбонизации гидроксида кальция.

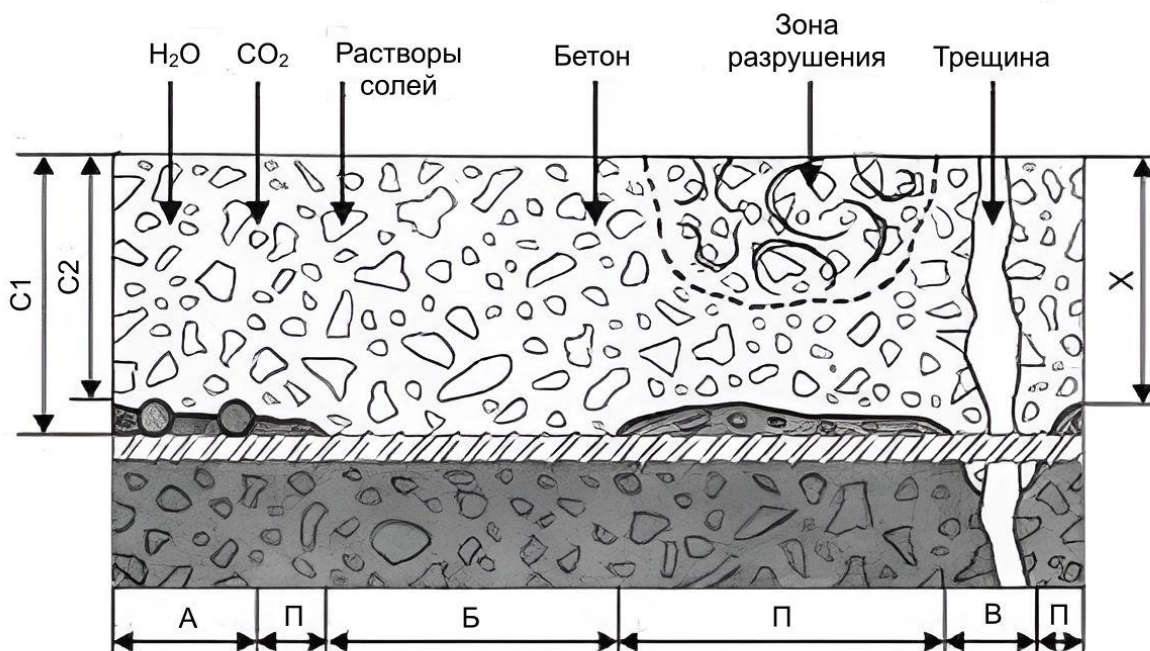


Рис. 2. Схема возникновения агрессивных факторов в защитном слое бетона, приводящих к образованию трещин: C1, C2 – защитный слой бетона, X – глубина карбонизации; П – участок поверхности без коррозии арматуры; А-В – участки с коррозией арматуры (открытый эфир)

Значительное изменение объема конструкции из-за усадки происходит в течение первого года её эксплуатации, что приводит к появлению большого числа микротрещин на поверхности защитного слоя бетона (рис. 3).

Ползучесть – это способность бетона, при которой с течением времени деформации возрастают без увеличения внешней нагрузки, что также способствует образованию и раскрытию трещин в защитном слое бетона.

За предельные деформации бетона при действии растягивающей нагрузки понимают относительные средние удлинения в момент разрушения центрально растянутых образцов, испытанных кратковременным нагружением по действующим нормативным документам. Предельная растяжимость бетона при непродолжительном действии нагрузки составляет 0,15 мм/м или $\varepsilon_{bt} = 0,00015$. Продолжительное действие постоянной нагрузки приводит к значительному повышению деформаций в железобетонной конструкции. Значения модуля деформаций бетона определяют по формуле:

$$E_{b,\tau} = \frac{E_b}{1 + \varphi_{b,cr}}, \quad (1)$$

где $\varphi_{b,cr}$ коэффициент ползучести, принимают согласно требований [3].

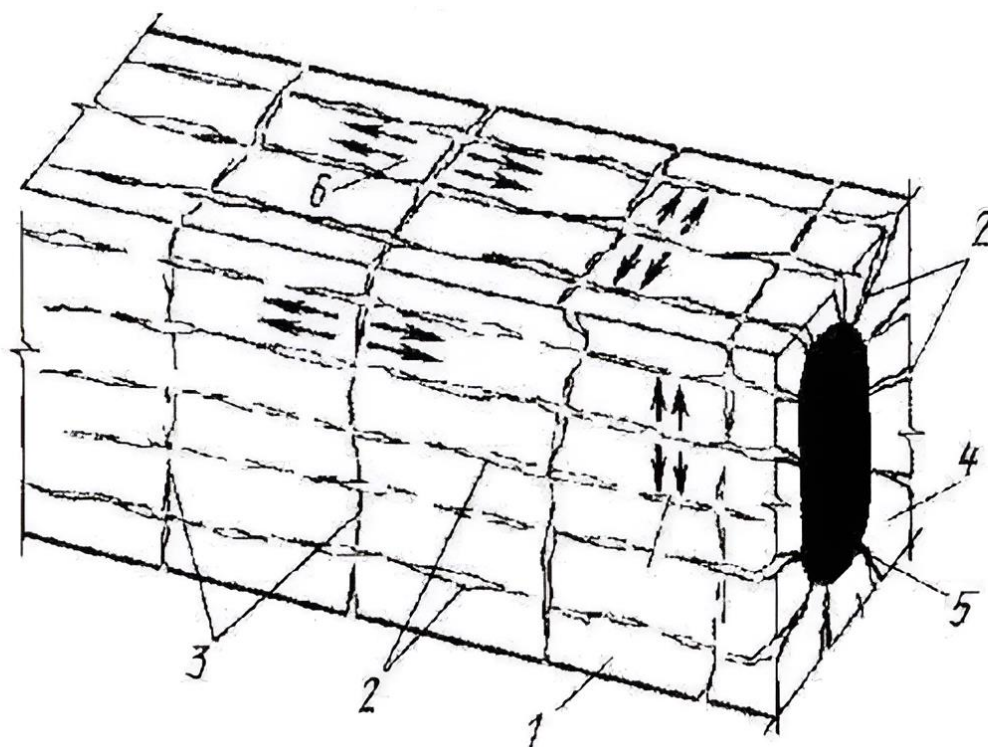


Рис. 3. Схема образования трещин на поверхности образца от усадки бетона: 1 – фрагмент бетонной балки; 2, 3 – продольные и поперечные усадочные трещины; 4 – наружный (высохший) слой; 5 – внутренний слой; 6 – растягивающие напряжения

1.2. Способы повышения долговечности железобетонных конструкций

Рассмотрим способы увеличения долговечности железобетонных конструкций и борьбы с дефектами. В первую очередь, для конструкций, уже подвергшихся деформациям, как способ можно выделить проведение ремонтно-восстановительных работ [9], [10]. Среди вариантов ремонтно-восстановительных работ для борьбы с образованием и раскрытием трещин применяют [11], [12]:

- нагнетание цементных или полимерных составов под принудительным давлением;
- нагнетание цементных или полимерных состав под действием гравитации или капиллярного впитывания;

- грунтовка и шпаклевка усиливаемой поверхности;
- наклеивание лент из композитных материалов.

Данные методы достаточно затратны, трудоемки, и нередко не дают ожидаемых результатов в стадии эксплуатации [13].

Более надежным способом является усиление конструкции [14]. Методы усиления конструкции зависят от зоны конструкции, которую необходимо усилить, и её вероятной схемы разрушения, но можно выделить общие принципы (рис. 4):

- наращивание усиливаемой зоны;
- установка обойм и рубашек;
- приварка или приклеивание дополнительной арматуры;
- изменение расчетной схемы.

В качестве материалов для усиления применяют как железобетон и сталь, так и неметаллические композитные материалы.

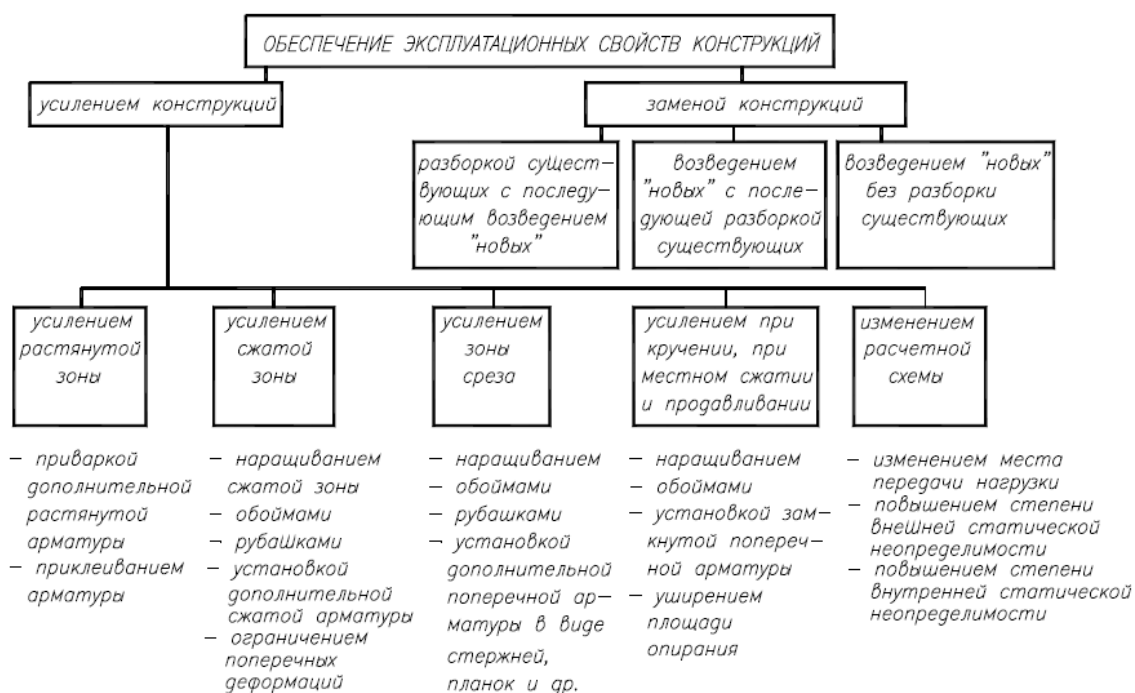


Рис. 4. Классификация методов усиления железобетонных конструкций

Наращивание представляет собой способ усиления конструкции, при котором рабочее сечение увеличивают с одной или двух сторон (рис. 5).

Применяется для усиления сжатой зоны плитных и балочных конструкций, крайних и угловых колонн зданий, усиления зоны среза, а также при кручении, местном сжатии и продавливании.

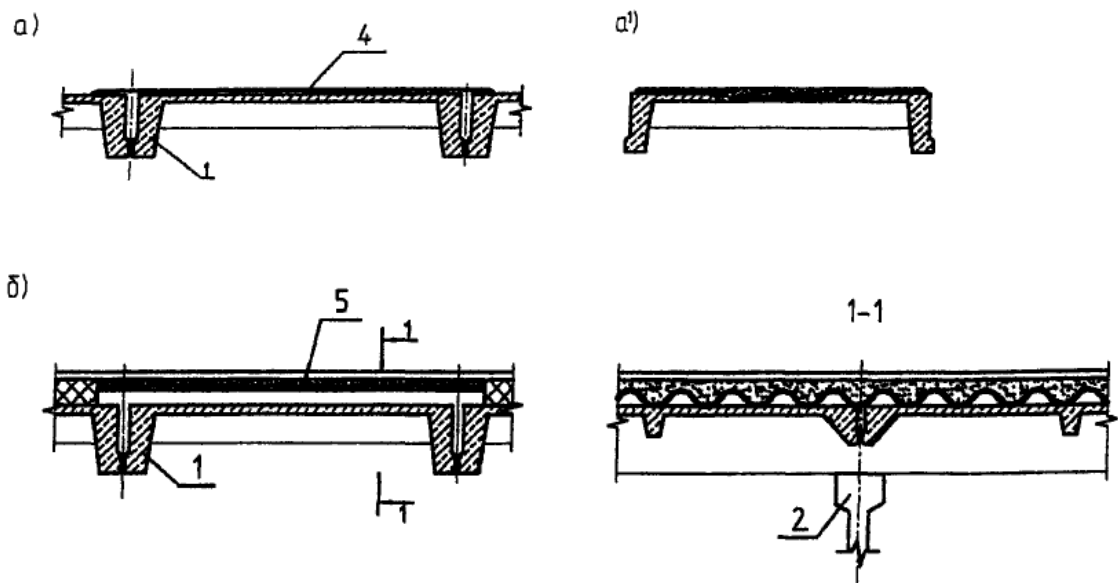


Рис. 5. Усиление железобетонной ребристой плиты покрытия наращиванием

Рубашка изготавливается по трем сторонам усиливаемого элемента, если невозможно обеспечить охват его поперечного сечения с четырёх сторон. Обоймы, в свою очередь, огибают поперечное сечение элемента со всех сторон и являются предпочтительным решением для конструкций, где сжимающие силы прикладываются с небольшим эксцентриситетом. (рис. 6).

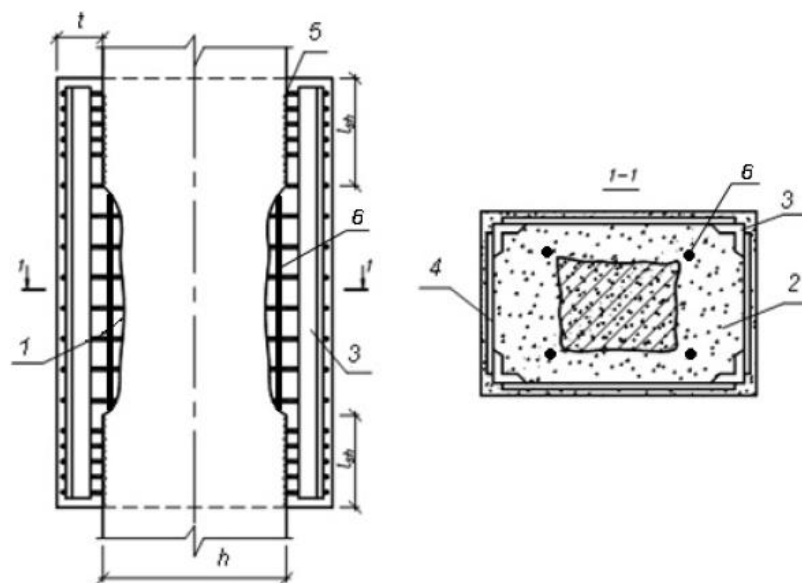


Рис. 6. Усиление участка колонны местной железобетонной обоймой

Усиление конструкций с изменением расчетной схемы производится изменением места передачи нагрузок на конструкцию; повышением степени внешней статической неопределимости путем устройства дополнительных жестких и упругих опор, постановкой дополнительных связей при обеспечении неразрезности и пространственной работы конструкций; повышением степени внутренней статической неопределимости путем устройства затяжек, распорок, шпренгелей, шарнирно-стержневых цепей. Изменение расчетной схемы приводит к перераспределению напряжений и разгрузке усиливаемой конструкции.

Приварка дополнительной арматуры к существующей арматуре усиливаемой конструкции производится: нахлесточным соединением с отбивкой защитного слоя по длине дополнительной арматуры; с помощью коротышей диаметром, превышающим толщину защитного слоя; с помощью скоб. После приварки в проектном положении дополнительная арматура обетонируется.

Для обеспечения совместной работы усиливаемой конструкции и дополнительной арматуры используют специальные полимерные растворы для приклеивания. Листовую и профильную арматуру размещают непосредственно на поверхности, в то время как стержневую арматуру устанавливают в заранее подготовленные пазы или в слой полимерного раствора. Перед началом усиления поверхность конструкции подготавливают: выравнивают и очищают от жира и пыли, затем приклеивают сетки или волоконные пластины (рис. 7), применяя для этого эпоксидные полимерные матрицы [15].



Рис. 7. Усиление конструкции моста приклеиванием ламината из углеродного волокна

В «Интернет-журнал НАУКОВЕДЕНИЕ» в статьях [16], [17] были рассмотрены достоинства и недостатки существующих способов усиления железобетонных конструкций и сравнение их с методом усиления с использованием композитных материалов. Также в статьях приведены физико-механические свойства композитов и технология внешнего армирования композитными холстами и ламинатами (табл. 1). В выводах демонстрируются результаты эксперимента по изучению работы изгибаемых железобетонных балок, усиленных композитными материалами.

Основные преимущества использования композитных материалов для усиления железобетонных конструкций включают [18]:

- высокие показатели прочности и деформативности;
- низкий вес композитных материалов;
- качество адгезии клеевых составов;
- простота технологического процесса;
- перспектива использования для усиления конструкций сложных форм.

Таблица 1

**Физико-механические свойства волокон, используемых при изготовлении
композитных материалов**

Тип фибры	Прочность на растяжение, МПа	Модуль упругости, ГПа	Деформация удлинения, %	Плотность, т/м ³
Углерод высокопрочный на полиакрилонитриловом связующем	4300-4900	230-240	1,9-2,1	1,8
Углерод высокомодульный на полиакрилонитриловом связующем	2740-5500	290-330	0,7-1,9	1,78-1,81
Углерод высокомодульный на эпоксидном связующем	2600-4020	540-640	0,4-0,8	1,44
Арамид	3200-3600	124-130	2,4	1,44
Стекло	2400-3500	70-85	3,5-4,7	2,6

Помимо внешнего усиления уже деформированных конструкций, композитные материалы можно использовать в качестве рабочей [19] или дополнительной арматуры [20] на стадии проектирования. Композитная арматура имеет высокую коррозионную стойкость к агрессивным средам, что положительно сказывается на долговечности железобетонной конструкции.

Для улучшения деформационных свойств бетона применяют дисперсное армирование с помощью фибр – коротких нитей из стали или композитных материалов, распределяемых по всему объему конструкции. Среди преимуществ фибробетона можно выделить повышенную износостойкость, трещиностойкость и ударопрочность конструкций из этого материала [21]. Недостатком фибробетона является неконтролируемое расположение фибр в массе бетонной смеси при перемешивании, что не гарантирует равномерность прочностных и деформативных характеристик конструкции в стадии эксплуатации, а также высокая стоимость производства фибробетона [22].

1.3. Стекловолоконные сетки: характеристики, свойства, область применения

В настоящее время для повышения трещиностойкости штукатурных фасадных покрытий на цементно-известковом вяжущем толщиной 10...20 мм широко применяют стекловолоконные сетки. Армирование фасадных покрытий зданий и сооружений сетками из стеклянных волокон позволяет предотвратить появление трещин на поверхности штукатурного слоя от механических повреждений и агрессивных факторов окружающей среды, что обеспечивает длительный срок эксплуатации оштукатуренных объектов без проведения ремонтов [23].

Имеющийся положительный опыт использования стекловолоконных сеток в штукатурных покрытиях для повышения их трещиностойкости предполагается использовать для повышения надежности и долговечности железобетонных конструкций путем установки сеток из стекловолокна в защитный слой бетона, наиболее подверженный различным агрессивным воздействиям в стадии эксплуатации конструкций в условиях воздействия агрессивной среды [24].

Рассмотрим свойства стекловолокна. В выпуске журнала «Экология и строительство» за 2015 год была опубликована статья [25], в которой были рассмотрены разновидности композитной арматуры, её преимущества и недостатки по сравнению с металлической арматурой, история применения и перспективы использования в строительстве.

Стеклопластиковая арматура обладает высокой прочностью, малым весом, морозостойкостью, низкой теплопроводностью и стойкостью к кислой среде, но имеет существенные недостатки: низкий модуль упругости, значительное снижение прочности при нагреве, хрупкий характер разрушения. Также стекловолокно в щелочной среде разрушается. Для защиты стекловолокна от влияния щелочной среды цемента применяют покрытие из смол или изменяют состав стекловолокна.

В результате анализа свойств композитной арматуры автор делает заключение, что целесообразно и эффективно применять композитную арматуру

в химически агрессивных средах, где стальная арматура не обладает достаточной коррозионной стойкостью и диэлектрической сопротивляемостью.

Физические и механические характеристики композитов определяются различными факторами, включая вид и количество используемых волокон, их расположение и распределение по толщине композитной ленты, а также пропорцией между волокнами и матрицей полимера, который служит связующим веществом в композите [10]. Композитные материалы не имеют пластической зоны деформаций.

Стекловолоконные сетки представляют собой тканое полотно из стекловолокон, в котором слои параллельных нитей скреплены тканым способом с перевивкой в двух взаимно перпендикулярных направлениях, и обработанное полимерными составами (рис. 8).

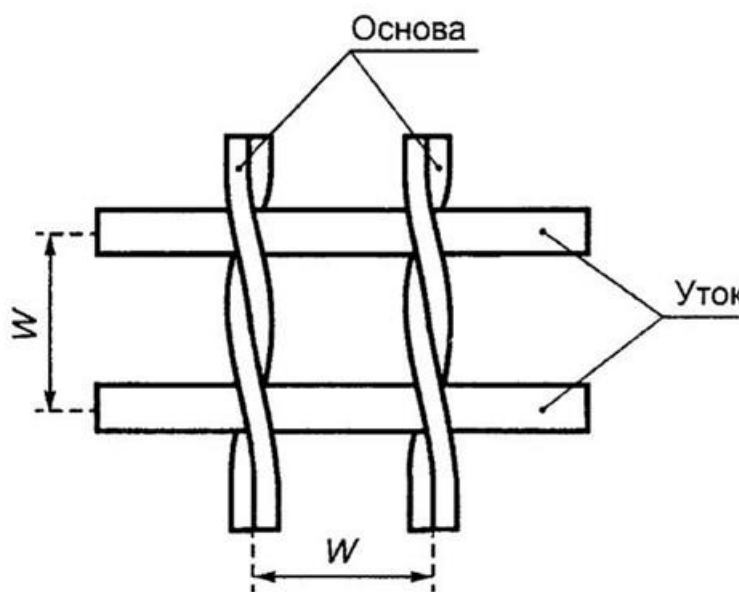


Рис. 8. Схема устройства стекловолоконных сеток: ячейка стекловолоконной сетки с перевивочным плетением, шаг волокон в сетках, w от 3 до 5 мм

В журнале «Civil Engineering Design» за 2023 год [27] описываются технология производства «двумерной текстильной арматуры» и применения её для создания железобетонных конструкций сложной геометрической формы. Волокна из щелочестойкого стекловолокна или углерода переплетают на специальных текстильных машинах в сетки (рис. 9). Для дополнительной прочности сетки пропитывают смолами или полимерными составами.

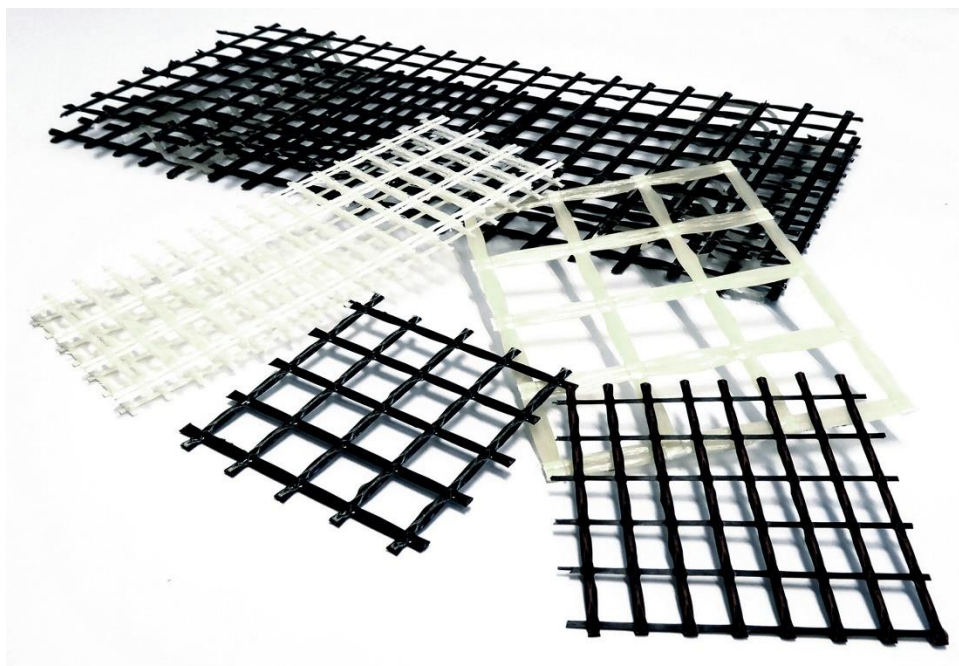


Рис. 9. Сетки из углеродных и стеклянных волокон

Используя технику оригами и текстильную арматуру, можно создавать железобетонные оболочки сложной геометрической формы. Грани складчатой конструкции соединяются с помощью гибкой текстильной арматуры, затем конструкция устанавливается и закрепляется в нужной форме, края затираются цементным раствором.

Свойства стекловолоконных сеток зависят от свойств и особенностей структуры волокон и полимеров, из которых они изготовлены, а также от их физико-химического взаимодействия и из поведения в процессе восприятия внешних нагрузок [28]. Свойства сеток в большей степени зависят от стекловолокна, полимеры же выполняют роль связующего, склеивая волокна в сетке и обеспечивая их совместную работу. Также полимерный слой ограждает стекловолокно от воды и агрессивной химической среды и обеспечивает поверхностную защиту от внешних повреждений.

Наиболее доступным является алюмоборосиликатное стеклянное волокно, однако оно не обладает высокой химической стойкостью. В процессе производства арматуры из указанного волокна применяется связующее вещество, обладающее усиленной стойкостью к химическим воздействиям окружающей среды.

Сравнение свойств стеклянных волокон приведено в табл. 2.

Таблица 2

Сравнительные характеристики волокон

Волокна		Д, мкм	ПЛ, г/см ³	T _{пл} , °С	МУ, ГПа	ПР, ГПа
Стеклоанное	Типы А и С	0,5...30	2,5...2,6	700...900	50...70	1,5...2,0
Стеклоанное	Типы Е и S	3...30	2,6...2,8	900...1000	70...90	2,0...5,0
Базальтовое	-	10...18	2,7...2,9	100...1200	70...90	1,8...1,9
Борное	В	100...150	2,4...2,6	2100...2500	380...430	2,5...4
Кварцевое	SiO ₂	3...10	2,2...2,25	1600...1700	70...75	3...6
Алюминий-оксидное*	Al ₂ O ₃	15...25	2,9...3,9	2000...2100	350...380	1,4...2,4
Цирконий-оксидное	ZrO ₂	4...6	3,8...5,5	2650...2700	350...430	1,4...2,1
Кремний-карбидное	SiC	100...150	3,1...3,2	2700...2800	400...480	1...3,5
Боро-карбидное	B ₄ C	10...12	2,3...2,5	2400...2500	300...350	1,3...1,7

Примечание: Д – диаметр; T_{пл} – температура плавления; МУ – модуль упругости; ПР – прочность; * волокна, применяемые для теплоизоляции, имеют более низкие показатели

Сетки из стекловолокна имеют высокую прочность на растяжение в сравнении с другими армирующими материалами и по сравнению с растягиваемым бетоном. Поэтому установка стекловолоконных сеток в защитный слой толщиной 10...30 мм может оказать сдерживающее влияние на расширение бетона при растяжении, препятствуя образованию и раскрытию трещин.

1.4. Нормативно-техническая база в области применения композитных материалов для проектирования и усиления железобетонных конструкций

Проанализируем существующие нормы применения композитных материалов для усиления и армирования железобетонных конструкций. В СП 164.1325800.2014 «Усиление железобетонных конструкций композитными материалами» [29] устанавливаются общие правила проектирования усиления железобетонных конструкций композитными материалами, но рассматривается лишь внешнее армирование из композитных материалов.

Также указаны требования к материалам, их расчетные характеристики, обозначен порядок расчета по первой и второй группе предельных состояний и алгоритм выполнения работ по усилению железобетонных конструкций внешним армированием из композитных материалов.

В 295.1325800.2017 «Конструкции бетонные, армированные полимерной композитной арматурой» [30] распространяется на проектирование бетонных конструкций, армированных композитной арматурой. Приводятся расчетные характеристики материалов и порядок расчета конструкций без предварительного напряжения по предельным состояниям первой и второй группы, а также расчет конструкций с предварительным напряжением композитной арматуры.

Согласно СП 31-111-2004 «Применение стеклянных сеток при строительстве зданий» [23], использование стекловолоконных сеток в строительстве разрешено для следующих целей:

- армирование штукатурных и шпаклевочных слоев в рамках систем утепления наружных стен зданий;
- армирования штукатурных и шпаклевочных слоев наружных и внутренних поверхностей конструкций зданий;
- предотвращение появления трещин на отштукатуренных и отшпаклеванных поверхностях;
- восстановление поверхностей с трещинами в штукатурке или шпаклевке.

Использование стекловолоконных сеток для армирования защитного слоя железобетонной конструкции в данном документе не учитывается. В ГОСТ Р 55225–2017. «Сетки из стекловолокна фасадные армирующие щелочестойкие» [31] приводятся технические требования к фасадным сеткам.

1.5. Выводы по главе 1

Проанализировав современную научную литературу, можно сделать вывод, что долговечность железобетонных конструкций зависит от многих

факторов: свойства исходных материалов, воздействие внешней среды, качества проектирования, производства работ, эксплуатации конструкции.

Допускаемые ошибки приводят к появлению дефектов и снижению долговечности материалов, конструкций и изделий. Для устранения дефектов проводят ремонтные и восстановительные работы и проектируют усиления конструкции.

Композитная арматура чаще всего применяется в качестве внешнего усиления железобетонных конструкций. При этом в качестве усиления в большей степени используют углепластиковые холсты, так как у них отсутствуют недостатки стекловолокна: низкий модуль упругости и большая плотность.

К преимуществам стеклопластиковой арматуры можно отнести прочность, малый вес, морозостойкостью, низкая теплопроводность, высокую коррозионную стойкость и диэлектрическая сопротивляемость, что делает целесообразным применение стекловолокна в химически агрессивных средах.

В современной литературе не рассматриваются методы введения стекловолоконных сеток в защитный слой бетона и их влияние на прочность и долговечность железобетонной конструкции, что доказывает актуальность темы исследования.

Защитный слой бетона в железобетонных конструкциях испытывает значительные внутренние и внешние воздействия, которые приводят к образованию трещин. Образование трещин в защитном слое бетона негативно влияет на его надежность и долговечность, поэтому необходимо повышать трещиностойкость железобетонных конструкций.

Стекловолоконные сетки обладают высокой коррозионной стойкостью, адгезией к бетону и способны предотвращать развитие трещин при длительном действии нагрузки. К основным недостаткам стекловолоконных сеток относится низкий модуль упругости в сравнении со сталью. При этом стекловолоконные сетки обладают высокой прочностью на растяжение и могут оказать сдерживающее влияние на развитие трещин в защитном слое бетона.

ГЛАВА 2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ БЕТОННОГО ОБРАЗЦА

2.1. Расчетный образец

Усилия в растянутом бетоне и в стержнях стекловолоконной сетки, расположенной в защитном слое бетона рассчитаны теоретически на опытном образце. Расчетный образец из бетона класса В25 размером в плане 10x5 мм и высотой 15 мм армирован в центре фрагментом стекловолоконной сетки SD GLASS длиной 5 и высотой 15 мм, состоящей из трех поперечных и двух продольных стержней (рис. 10).

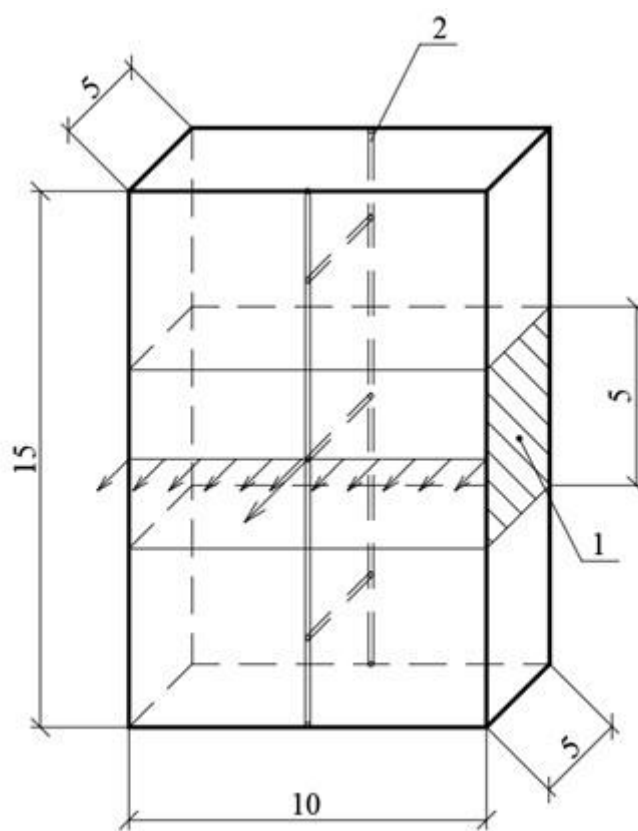


Рис. 10. Расчетный образец защитного слоя бетона со стекловолоконной сеткой: 1 – расчетный фрагмент образца для определения усилий в бетоне и сетке; 2 – расчетный фрагмент стекловолоконной сетки

Предполагается, что продольные и поперечные стержни сетки имеют жесткое соединение в узлах пересечений как между собой, так и с окружающим бетоном. К выделенному бетонному фрагменту, армированному одним стержнем стекловолоконной сетки, сетки приложено растягивающее усилие, вызванное расширением бетона при образовании и раскрытии трещин (рис. 11).

Усилие от растянутого бетона передается на стержни стекловолоконной сетки, которая, имея высокие прочностные характеристики по сравнению с бетоном, препятствует расширению бетона, повышая его трещиностойкость.

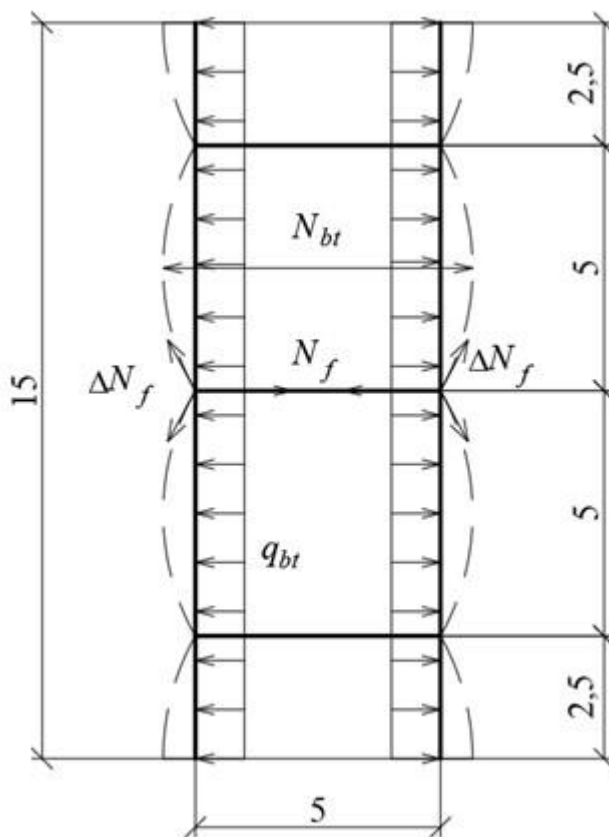


Рис. 11. Схема действия усилий в растянутом бетоне и стекловолоконной сетке: q_{bt} – распределенное усилие от растянутого бетона; N_{bt} – усилие в выделенном фрагменте; N_f и ΔN_f – усилия в растянутом стержне стекловолоконной сетки

Расчетные характеристики материалов:

1. Бетон в защитном слое класса В25:

– нормативное сопротивление бетона при растяжении $R_{bt,n} = 1,55$ МПа;

– модуль упругости $E_b = 30 \cdot 10^3$ МПа;

– ширина защитного слоя бетона 10 мм;

– размер расчетного сечения бетона 5x10 мм в зоне расположения одного растянутого стержня сетки;

– площадь рабочего сечения растянутого бетона:

$$A_{bt} = 0,005 \cdot 0,01 = 0,00005 \text{ м}^2. \quad (2)$$

2. Стекловолоконная сетка тип SD GLASS:

- плотность $\gamma = 165 \text{ г/м}^2$;
- нормативное сопротивление при растяжении $R_{f,n} = 1800 \text{ МПа}$;
- модуль упругости $E_f = 60000 \text{ МПа}$;
- диаметр волокон $d_f = 0,35 \text{ мм}$;
- площадь поперечного сечения волокон:

$$A_f \sim 0,785 \cdot d^2 = 0,785 \cdot 0,00035^2 = 0,0000001 \text{ м}^2. \quad (3)$$

2.2. Расчет на образование трещин при непродолжительном действии нагрузки

Растягивающее усилие, воспринимаемое бетоном в момент образования трещин при непродолжительном приложении нагрузки с нормативным сопротивлением $R_{bt,ser}$ составляет:

$$N_{bt} = R_{bt,n} \cdot A_{bt} = 1,55 \cdot 10^3 \cdot 0,00005 = 0,08 \text{ кН}. \quad (4)$$

Относительная деформация бетона при предельных растягивающих напряжениях при непродолжительном действии нагрузки по СП 63.133330.2018 п.п. 6.1.14 равна $\varepsilon_{bt0} = 0,0001$. Следовательно, модуль упругости бетона при предельных растягивающих напряжениях:

$$E_{b1} = \frac{R_{bt,n}}{\varepsilon_{bt0}} = \frac{1,55}{0,0001} = 15,5 \cdot 10^3 \text{ МПа} \quad (5)$$

$$\sigma_f = E_f \cdot \varepsilon_{bt0} = 60 \cdot 10^3 \cdot 0,0001 = 6 \text{ МПа} = 6000 \text{ кН/м}^2. \quad (6)$$

Усилие, воспринимаемое одним стержнем сетки при площади поперечного сечения нити 0,35 мм, $A_f = 0,0000001 \text{ м}^2$:

$$N_f = \sigma_f \cdot A_f = 6000 \cdot 0,0000001 = 0,0006 \text{ кН}. \quad (7)$$

Усилие, воспринимаемое комплексным сечением (растянутый бетон + один стержень сетки):

$$N_k = N_{bt} + N_f = 0,08 + 0,0006 = 0,08 \text{ кН}. \quad (8)$$

В процентном соотношении:

$$\frac{0,0006 \cdot 100}{0,08} = 0,75 \%. \quad (9)$$

2.3. Расчет на образование трещин при продолжительном действии нагрузки

Относительная деформация бетона при растягивающих напряжениях, равных предельным, при продолжительном действии нагрузки по СП 63.133330.2018 табл. 6.10 равна $\varepsilon_{bt0} = 0,00024$ (относительная влажность воздуха $\varphi = 40\text{--}75\%$). Следовательно, модуль упругости бетона при предельных растягивающих напряжениях:

$$E_{bt} = \frac{R_{bt,n}}{\varepsilon_{bt0}} = \frac{1,55}{0,00024} = 6,46 \cdot 10^3 \text{ МПа.} \quad (10)$$

Усилие, воспринимаемое растянутым бетоном при площади поперечного сечения 5×10 мм, $A_{bt} = 0,00005 \text{ м}^2$:

$$N_{bt} = R_{bt,n} \cdot A_{bt} = 1,55 \cdot 10^3 \cdot 0,00005 = 0,0775 \text{ кН.} \quad (11)$$

Напряжение в продольных стержнях стекловолоконной сетки:

$$\sigma_f = E_f \cdot \varepsilon_{bt0} = 60 \cdot 10^3 \cdot 0,00024 = 14,4 \text{ МПа} = 14400 \text{ кН/м}^2. \quad (12)$$

Усилие, воспринимаемое одним стержнем сетки при площади поперечного сечения нити, равной $0,35$ мм $A_f = 0,0000001 \text{ м}^2$:

$$N_f = \sigma_f \cdot A_f = 14400 \cdot 0,0000001 = 0,00144 \text{ кН.} \quad (13)$$

Усилие, воспринимаемое комплексным сечением при растяжении:

$$N_k = N_{bt} + N_f = 0,08 + 0,00144 = 0,0814 \text{ кН.} \quad (14)$$

В процентном соотношении:

$$\frac{0,0014 \cdot 100}{0,08} = 1,75 \%. \quad (15)$$

2.4. Расчет на раскрытие трещины шириной $0,1$ мм при продолжительном действии нагрузки

Ширина раскрытия трещины $a_{cr} = 0,1$ мм $< 0,3$ мм по нормам [30], [32].

Относительная деформация стержня сетки на длине $l = 5$ мм:

$$\varepsilon_f = \frac{a_{cr}}{l} = \frac{0,1}{5} = 0,02. \quad (16)$$

Напряжение в продольных стержнях стекловолоконной сетки между закреплениями в узлах при растяжении бетона:

$$\sigma_f = E_f \cdot \varepsilon_f = 60 \cdot 10^3 \cdot 0,02 = 1200 \text{ МПа} = 1200000 \text{ кН/м}^2. \quad (17)$$

Усилие, воспринимаемое растянутым стержнем стекловолоконной сетки:

$$N_f = \sigma_f \cdot A_f = 1200000 \cdot 0,0000001 = 0,12 \text{ кН}. \quad (18)$$

Усилие, воспринимаемое комплексным сечением при растяжении:

$$N_k = N_{bt} + N_f = 0,08 + 0,12 = 0,2 \text{ кН}. \quad (19)$$

В процентном соотношении:

$$\frac{0,012 \cdot 100}{0,08} = 150 \%. \quad (20)$$

2.5. Выводы по главе 2

1. Положительное влияние стекловолоконных сеток на образование трещин в растянутом бетоне при непродолжительном действии нагрузки составляет менее 1%.

2. Положительное влияние стекловолоконных сеток на образование трещин в растянутом бетоне при продолжительном действии нагрузки возрастает до 1,75 %.

3. Влияние стекловолоконных сеток на раскрытие трещин в растянутом бетоне при продолжительном действии нагрузки возрастает до 150%.

ГЛАВА 3. ЧИСЛЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

3.1. Расчет в программном комплексе «ЛИРА-САПР 2016»

Численный эксперимент проводился в программном комплексе «ЛИРА-САПР 2016». В качестве модели рассматривается бетонный образец, имитирующий работу защитного слоя железобетонной изгибаемой балки (см. рис. 10, 11). Были изучены 3 варианта модели бетона класса В25, армированного стекловолоконной сеткой SD GLASS, соответственно п.п. 2.2–2.4, а также проведено сравнение с работой бетона без сетки.

Расчетная схема представляет собой полосу бетона шириной $b = 5$ мм, высотой $h = 15$ мм и толщиной $t_{bt} = 10$ мм (рис. 12–13). Бетон задан пластиной, разбитой на прямоугольные конечные элементы с шагом 0,5 мм. Поскольку образец является частью защитного слоя железобетонной балки, верхний и нижний края пластины жестко защемлены, моделируя заделку в бетон.

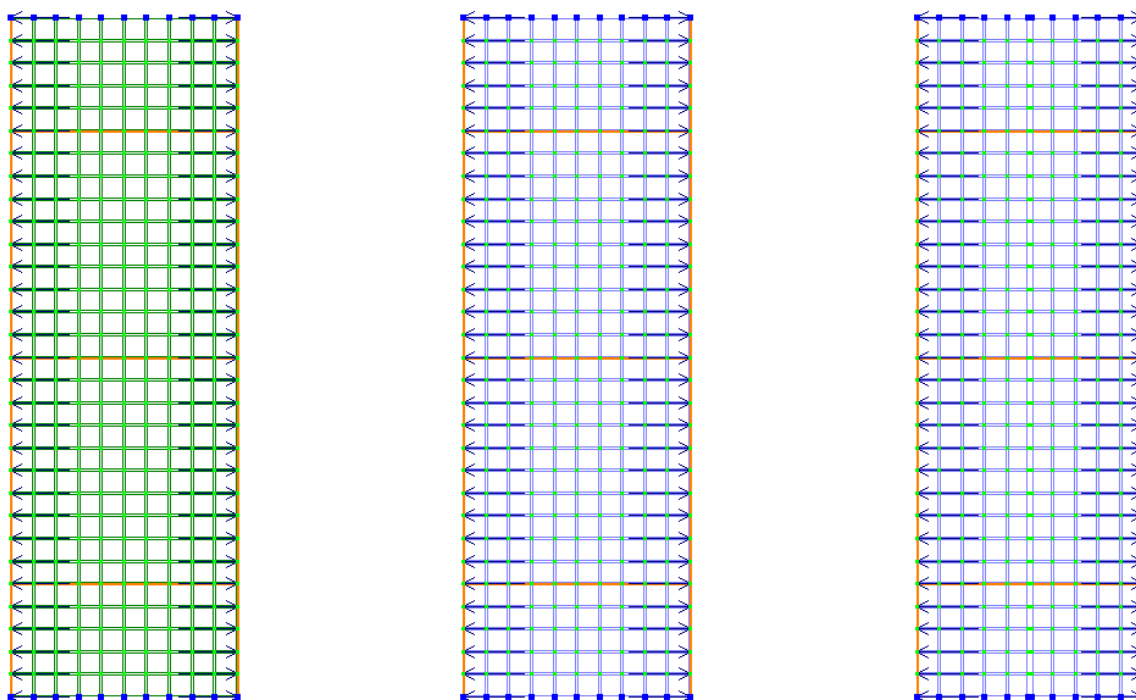


Рис. 12. Расчетные схемы бетонных образцов с сеткой (модели №1–3): оранжевым цветом обозначены нити стекловолоконной сетки; зеленым – бетон с модулем упругости $E = 15500$ МПа; голубым – бетон с модулем упругости $E = 6460$ МПа

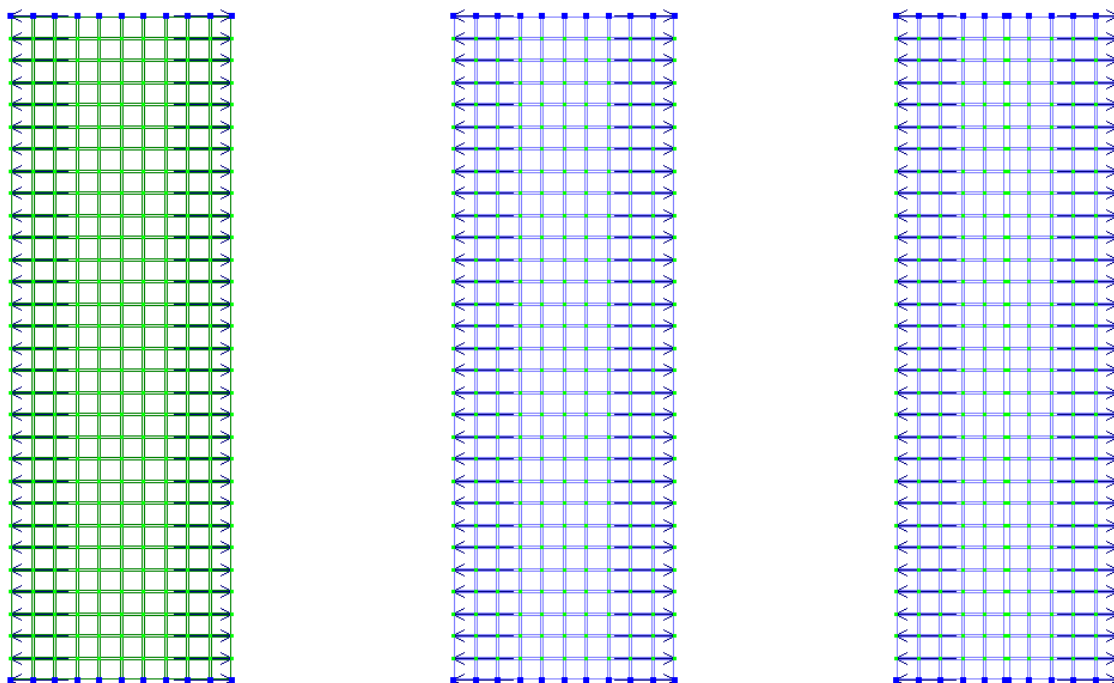


Рис. 13. Расчетные схемы бетонных образцов без сетки (модели №4–6): зеленым цветом обозначен бетон с модулем упругости $E = 15500$ МПа; голубым – бетон с модулем упругости $E = 6460$ МПа

Нити сетки выполнены в виде двух продольных и трех поперечных стержней с шагом 5 мм. Жесткость стекловолоконной сетки задана кольцом с наружным диаметром $D = 0,35$ мм и внутренним диаметром $d = 0$ мм для создания сплошного круглого сечения нитей. Узлы сетки имеют жесткое соединение в местах пересечения стержней.

Модели №1, №2, №3 отличаются жесткостью бетонных пластин: при непродолжительном действии нагрузки модуль упругости бетона принят $E = 15500$ МПа, при продолжительном действии нагрузки $E = 6460$ МПа.

Для имитации трещины в бетоне в модель №3 добавлен разрыв в пластине шириной $a_{cr} = 0,1$ мм.

Равномерно распределенная растягивающая нагрузка от расширения бетона приложена к крайним свободным узлам пластины и составляет:

$$q_1 = \frac{N_{bt1}}{n} = \frac{0,078}{10} = 0,0078 \text{ кН}; \quad (21)$$

$$q_2 = \frac{N_{bt2}}{n} = \frac{0,08}{10} = 0,008 \text{ кН}, \quad (22)$$

где N_{bt1} и N_{bt2} – усилия, воспринимаемые растянутым бетоном в п.п. 2.2 и 2.3 соответственно;

n – количество конечных элементов, принятое между узлами сетки.

3.2. Результаты расчета

Результаты расчета приведены в табл. 3 и табл. 4 и на рис. 14–16.

Загружение 1
Мозаика N
Единицы измерения - кН

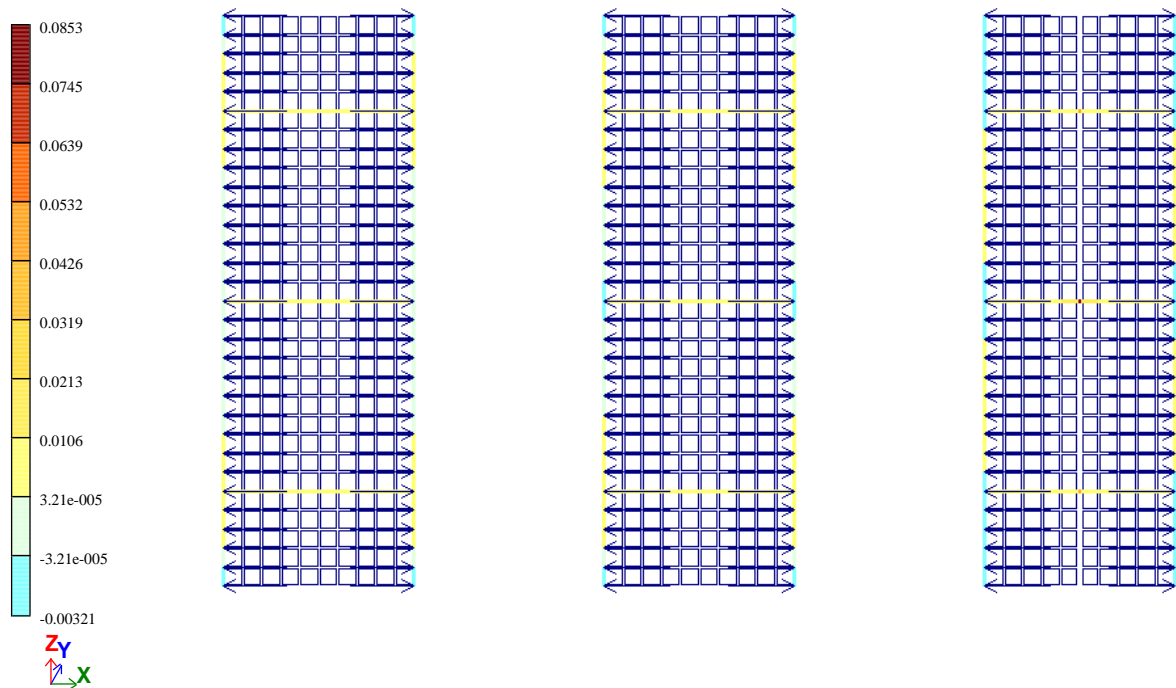


Рис. 14. Мозаика усилий N в стержнях сетки

Таблица 3

Усилия в стержнях стекловолоконной сетки

№ модели	Наименование	Усилие в стержне сетки $N_f \cdot 10^{-3}$ кН	Усилие в стержне сетки $\Delta N_f \cdot 10^{-3}$ кН
1	Образование трещин при непродолжительном действии нагрузки	0,56	-0,021
2	Образование трещин при продолжительном действии нагрузки	1,36	-0,076
3	Раскрытие трещины шириной 0,1 мм при продолжительном действии нагрузки	85,20	1,009

Загружение 1
Мозаика перемещений по X(G)
Единицы измерения - мм

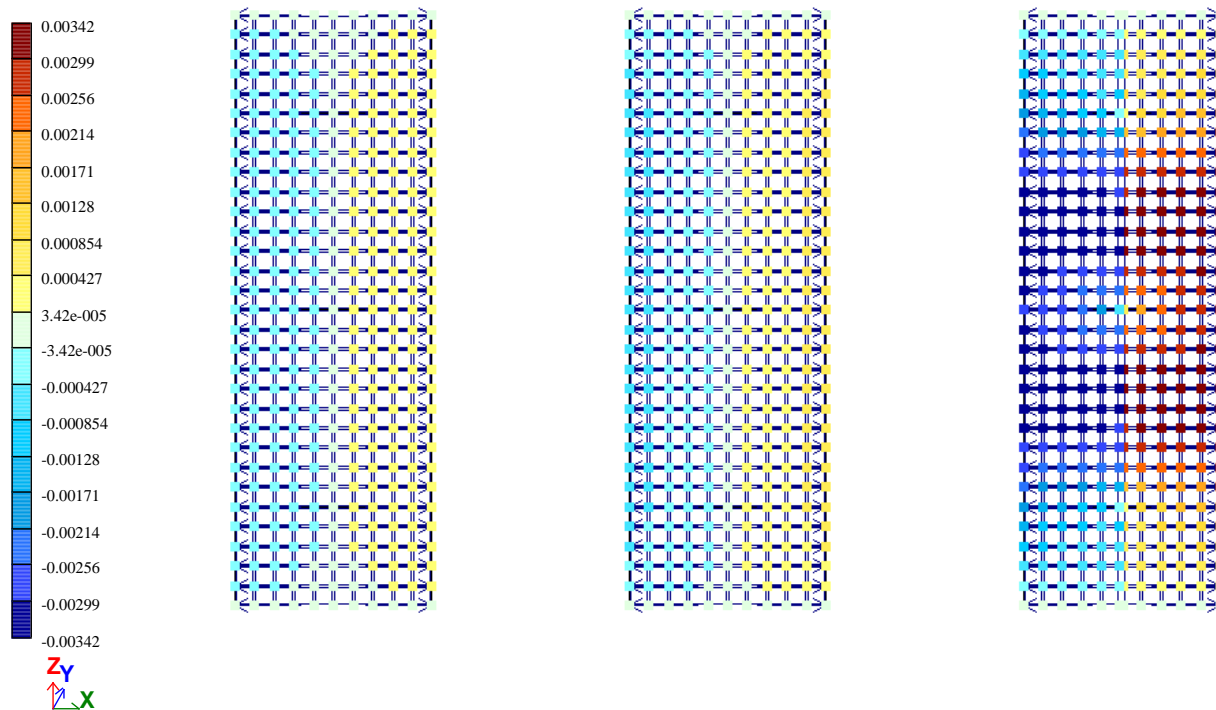


Рис. 15. Мозаика перемещений по X (модели №1-3)

Загружение 1
Мозаика перемещений по X(G)
Единицы измерения - мм

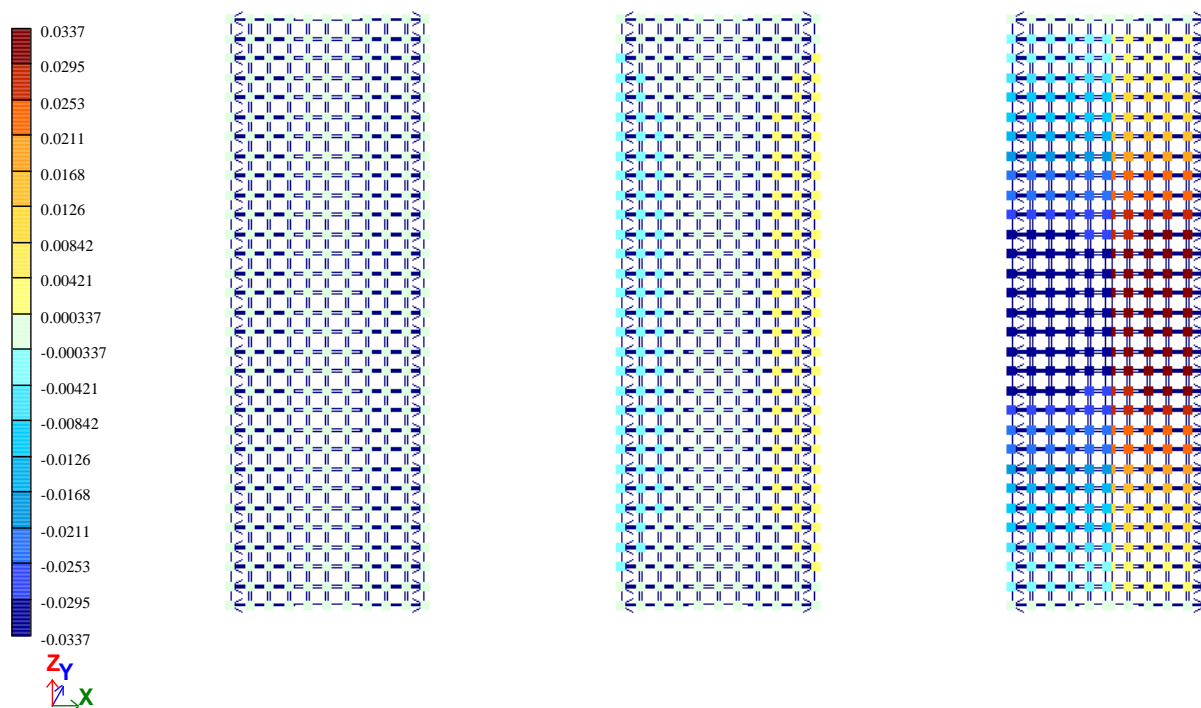


Рис. 16. Мозаика перемещений по X (модели №4-6)

Результаты расчета в программе «ЛИРА-САПР 2016»

№ модели	Наименование	Нагрузка, кН · 10 ⁻³	Модуль упругости бетона, · 10 ⁻³ МПа	Теоретическое значение усилия в стержне сетки, · 10 ⁻³ кН	Фактическое значение усилия в стержне сетки, · 10 ⁻³ кН	Относительные перемещения узлов сетки Δ_f (бетона Δ_{bi}), · 10 ⁻³ мм
1	Образование трещин при непродолжительном действии нагрузки	7,8	15,500	0,60	0,56	0,244544
2	Образование трещин при продолжительном действии нагрузки	8	6,460	1,44	1,36	0,601553
3	Раскрытие трещины шириной 0,1 мм при продолжительном действии нагрузки	8	6,460	120	85,20	3,39743
4	Бетон без сетки при непродолжительном действии нагрузки	7,8	15,500	-	-	0,244638
5	Бетон без сетки при продолжительном действии нагрузки	8	6,460	-	-	0,602231
6	Бетон без сетки при раскрытии трещины шириной 0,1 мм при продолжительном действии нагрузки	8	6,460	-	-	27,3614

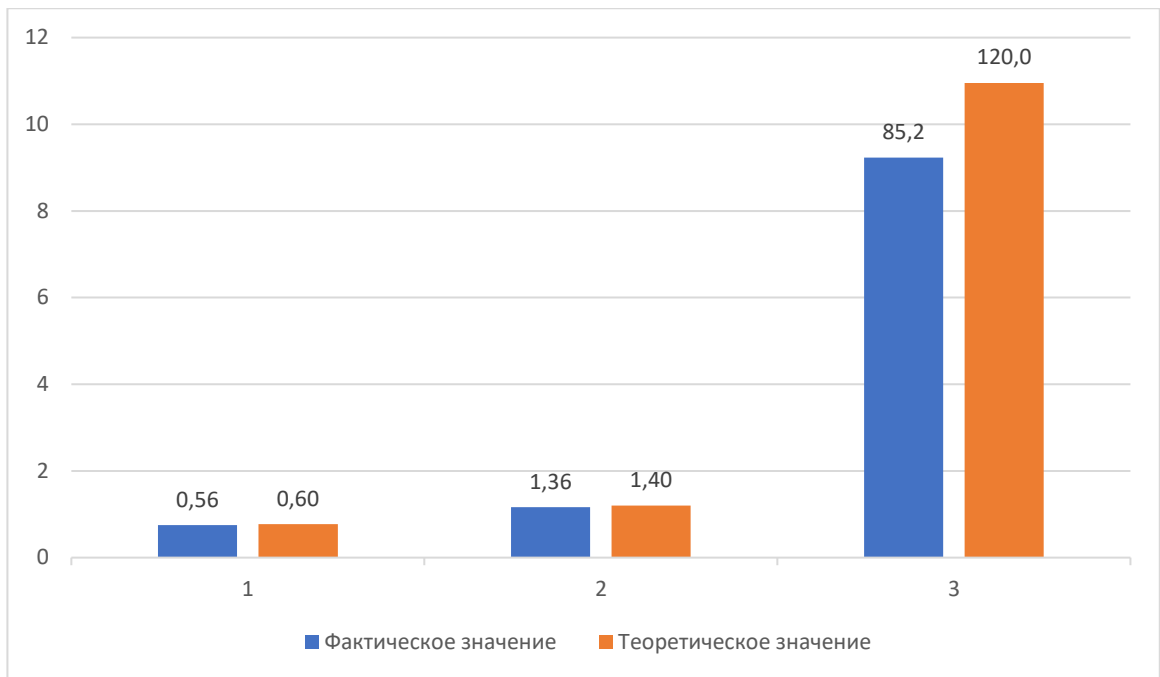


Рис. 17. Сравнительная диаграмма результатов теоретического и численного расчетов усилий в стержнях сетки

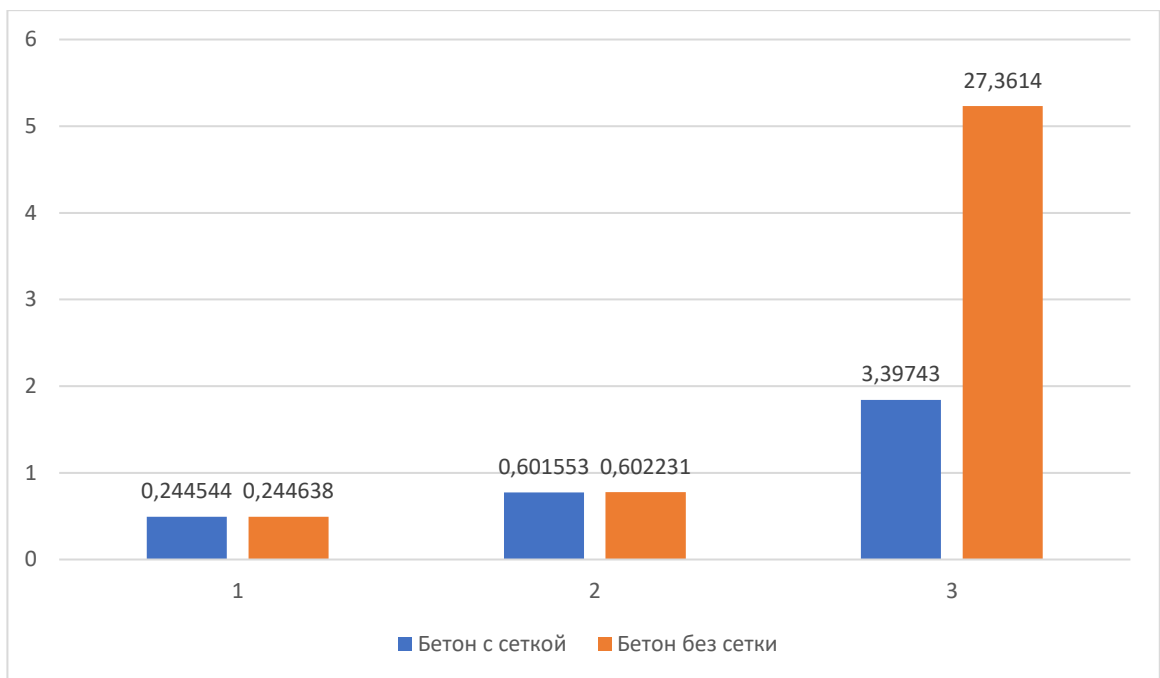


Рис. 18. Сравнительная диаграмма относительных перемещений узлов в бетоне без сетки и в бетоне с сеткой

Относительные перемещения узлов в бетоне с сеткой по сравнению с бетоном без сетки составляют:

$$\left(1 - \frac{3,39743}{27,3614}\right) \cdot 100 \% = 88 \%. \quad (23)$$

3.3. Выводы по главе 3

1. После образования микротрещин в бетоне усилия N_f , воспринимаемые горизонтально расположенными стержнями сетки, существенно возрастают, что препятствует дальнейшему развитию трещин.

2. Влияние усилий в стержнях сетки вертикального направления ΔN_f на образование и раскрытие трещин в бетоне незначительно.

3. После образования микротрещин от растяжения наличие стекловолоконной сетки препятствует развитию относительных деформаций бетона на 88 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения исследовательской работы была изучена научно-техническая и нормативная литература, относящаяся к теме повышения долговечности железобетонных конструкций, их усиления и свойств стекловолоконных сеток; выполнены расчеты прочности защитного слоя бетона со стекловолоконными сетками и без них и проведен численный эксперимент.

Долговечность железобетонных конструкций определяется способностью конструкции сохранять минимальные эксплуатационные качества и выполнять требования по безопасности в течение заданного промежутка времени под влиянием расчетных воздействий. Дефекты, возникающие в процессе изготовления и эксплуатации конструкции, снижают её возможный срок службы. Борьба с образованием и раскрытием трещин в железобетонных конструкциях позволяет повысить их надежность и долговечность в стадии эксплуатации.

В результате исследовательской работы выявлено:

1. При непродолжительном действии нагрузки стекловолоконные сетки в защитном слое бетона не оказывают существенного влияния на образование трещин.

2. При длительном действии нагрузки наличие стекловолоконных сеток снижает образование трещин до 2%.

3. После образования микротрещин в бетоне, в том числе от усадочных деформаций, стекловолоконные сетки существенно препятствуют их дальнейшему развитию.

4. Статья «Способы повышения долговечности железобетонных конструкций» была принята к публикации в журнале «Научный аспект». Статья «О повышении трещиностойкости железобетонных конструкций введением стекловолоконных сеток в защитный слой бетона» была зарегистрирована в журнале «Строительные материалы».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Н.И.Карпенко, С.Н.Карпенко, В.Н.Ярмаковский, В.Т.Ерофеев. О современных методах обеспечения долговечности железобетонных конструкций // Строительные науки, №1, 2015.
2. Ю. М. Баженов. Технология бетона. – М.: Изд-во АСВ, 2003.
3. СП 63.13330.2018 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. СНиП 52-01-2003 (с Изменениями N 1, 2). – М.: Стандартинформ, 2019.
4. Методическое пособие по назначению срока службы бетонных и железобетонных конструкций с учетом воздействия среды эксплуатации на их жизненный цикл. – М.: 2019.
5. ГОСТ 15467-79 Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения (с Изменением N 1). – М.: Стандартинформ, 2009.
6. А. Н. Добромылов. Дефекты в конструкциях при строительстве – М.: Изд-во Ассоциации строительных вузов, 2009.
7. В. М. Бондаренко и др. Железобетонные и каменные конструкции. – М.: Высшая школа, 2004.
8. В. Б. Ежов. Технология бетона, строительных изделий и конструкций. – Екатеринбург: УрФУ, 2014.
9. Шилин А.А., Пшеничный В.А., Картузов Д.В. Внешнее армирование железобетонных конструкций композитными материалами. – М.: Стройиздат, 2007.
10. Каталог конструктивных решений по усилению и восстановлению строительных конструкций зданий и сооружений. – М.: ОАО «ЦНИИПромзданий», 2009.
11. Римшин В.И., Кузина Е.С., Валевиц Д.М. Методы ремонта и усиления монолитных железобетонных перекрытий внешним армированием на основе углеволокна при восстановлении их работоспособного технического состояния // Вестник БГТУ имени В. Г. Шухова, №2, 2018.
12. Акулов М.В. Способы усиления железобетонных конструкций // Шаг в науку, №2, 2019.
13. С. Н. Алексеев. Коррозия и защита арматуры в бетоне. – М.: Госстройиздат, 1962.
14. Д. Н. Лазовский. Проектирование реконструкции зданий и сооружений. – Новополюцк: ПГУ, 2010.
15. Высокопрочные системы усиления ITECWRAP®/ITECRESIN®. Руководство по усилению железобетонных конструкций композитными материалами, Екатеринбург, 2006.

16. И.Г. Овчинников, Ш.Н. Валиев, И.И. Овчинников, В.С. Зиновьев, А.Д. Умиров. Вопросы усиления железобетонных конструкций композитами: 2. Натурные исследования усиления железобетонных конструкций композитами, возникающие проблемы и пути их решения // Интернет-журнал НАУКОВЕДЕНИЕ, №4, 2012.
17. И.Г. Овчинников, Ш.Н. Валиев, И.И. Овчинников, В.С. Зиновьев, А.Д. Умиров. Вопросы усиления железобетонных конструкций композитами: 1. Экспериментальные исследования особенностей усиления композитами изгибаемых железобетонных конструкций // Интернет-журнал НАУКОВЕДЕНИЕ, №4, 2012.
18. Полищук А.С. Применение композитных материалов при усилении железобетонных конструкций журнал // Вестник магистратуры, №4-2, 2019.
19. Антаков А.Б., Антаков И.А. Экспериментальные исследования изгибаемых элементов с полимеркомпозитной арматурой // Известия Казанского государственного архитектурно-строительного университета, №3, 2014.
20. Панченко Л.А. Железобетонные цилиндрические резервуары с дополнительным армированием стекловолокном // Вестник БГТУ им. В.Г. Шухова, №2, 2009.
21. Магасумова А. Т. В.С. Руднов. Технология изготовления и физико-механические свойства дисперсно-армированного бетона. Магистерская диссертация. Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина. 2019.
22. Ю. А. Прокофьева, В. Н. Шишканова. Исследование свойств фибробетонов с использованием фибры различного вида. Магистерская диссертация. Тольяттинский Государственный университет. 2019.
23. СП 31-111-2004. Применение стеклянных сеток при строительстве зданий. – М.: ФГУП ЦПП, 2005.
24. Патент РФ № 2744905. *Способ повышения надежности и долговечности железобетонных конструкций.* // Куршпель В. Х., Куршпель А.В.
25. Окольников Г.Э., Герасимов С.В. Перспективы использования композитной арматуры в строительстве. Экология и строительство, №3, 2015.
26. Курлапов Д.В., Куваев А.С., Родионов А.В., Валеев Р.М. Усиление железобетонных конструкций с применением полимерных композитов. Инженерно-строительный журнал, №3, 2009.
27. Curbach M, Hegger J, Bielak J, Schmidt C, Bosbach S, Scheerer S, et al. New perspectives on carbon reinforced concrete structures—Why new composites need new design strategies. *Civil Engineering Design*. 2023; 5(5-6): 67–94.
28. Фролов Н. П. Стеклопластиковая арматура и стеклопластбетонные конструкции. – М.: Стройиздат, 1980.

29. СП 164.1325800.2014 Усиление железобетонных конструкций композитными материалами. Правила проектирования (с Изменением N 1) – М.: Минстрой России, 2015.
30. СП 295.1325800.2017 Конструкции бетонные, армированные полимерной композитной арматурой. Правила проектирования (с Изменением N 1). – М.: Стандартинформ, 2017.
31. ГОСТ Р 55225–2017. Сетки из стекловолокна фасадные армирующие щелочестойкие. Технические условия. – М.: Стандартинформ, 2017.
32. СП 70.13330.2012. Несущие и ограждающие конструкции. – М.: Госстрой, ФАУ "ФЦС", 2013 год