

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 ПЕРЕД ГЭК

Зав. кафедрой \_\_\_\_\_ ПГС и ЭН \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_ Н.И. Фомин \_\_\_\_\_  
(подпись) (Ф.И.О.)  
« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2023 г.

## ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

Тема: Технико-экономическое обоснование оптимальной конструкции  
усиленных балок с использованием различных методов в условиях Ирака

Научный руководитель: Ф.И.О. <u>Руткаускас Т. К.</u>	подпись
д. э. н., профессор (профессор)	
Нормоконтролер: Ф.И.О. <u>Руткаускас Т. К.</u>	подпись
Студент группы <u>СТМ-210101</u> Ф.И.О. <u>Альмуслехи О. Ф.</u>	подпись

Екатеринбург  
2023

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 Организационно-технологические и экономические решения в строительстве

**УТВЕРЖДАЮ**

Зав. кафедрой \_\_\_\_\_  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2023 г.

### ЗАДАНИЕ

на выполнение выпускной квалификационной работы

студента Альмуслехи Омар Фархан Халаф группы СТМ-210101  
(фамилия, имя, отчество)

- 1. Тема выпускной квалификационной работы** Технико-экономическое обоснование оптимальной конструкции усиленных балок с использованием различных методов в условиях Ирака. Утверждена распоряжением по ИСА от «11» 10. 2022 г. № 33.00-05/12/02/
- 2. Руководитель** профессор, профессор, д. э. н. Руткаускас Татьяна Константиновна
- 3. Исходные данные к работе** рабочие чертежи балочных конструкций здания ТЦ
- 4. Перечень демонстрационных материалов** защитное слово, презентация.
- 5. Календарный план**

№ п/п	Наименование этапов выполнения работы	Срок выполнения этапов работы	Отметка о выполнении
1.	<i>изучить теоретические и методические основы усиления железобетонных балок с использованием различных методов в условиях Ирака</i>	до 31.12. 2022 г.	выполнено
2.	<i>изучить методики расчета усиления железобетонных балок</i>	до 1.03. 2023 г.	выполнено
3.	<i>Провести технико-экономическое обоснование практического применения методов усиления железобетонных балок композитными материалами на примере торгового центра в Ираке</i>	до 1.05. 2023 г.	выполнено
4.	<i>ВКР в целом</i>	до 30.05. 2023 г.	выполнено

Руководитель \_\_\_\_\_ Руткаускас Т. К.  
(подпись) Ф.И.О.

Задание принял к исполнению 01.09.2022 г.  
дата \_\_\_\_\_ (подпись)

**6. Выпускная квалификационная работа закончена** «30» мая 2023 г. считаю возможным допустить Альмуслехи Омара Фархана Халафа к защите выпускной квалификационной работы в Государственной экзаменационной комиссии.

Руководитель \_\_\_\_\_ Руткаускас Т. К.  
(подпись) Ф.И.О.

**7. Допустить** Альмуслехи Омара Фархана Халафа к защите магистерской диссертации в Государственной экзаменационной комиссии (протокол заседания кафедры № 9 от «02» июня 2023 г.).

Зав. кафедрой \_\_\_\_\_ Фомин Н. И.  
(подпись) Ф.И.О.

## Реферат

**Объем и структура работы.** Выпускная квалификационная работа магистранта (ВКРМ) изложена на 85 страницах основного текста, и состоит из введения, трех глав, заключения, библиографического списка, включающего 61 наименование и одного приложения на 2 страницах. Работа содержит 18 таблиц, 20 рисунков, 21 формулу.

**Ключевые слова:** усиление, балка, железобетон, сдвиг, углеродное волокно, прочность, изгиб, полимерный композит, ламели, ткань, стержень.

**Целью исследования** является технико-экономическое обоснование оптимальной конструкции усиленных железобетонных балок с применением композиционных материалов в качестве систем высокопрочного армирования.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

1. Изучить теоретические и методические основы усиления железобетонных балок с использованием различных методов в условиях Ирака.
2. Предложить методику расчета армирования изогнутых железобетонных элементов композитными материалами, включающая расчеты силы изгибающего момента и усиления сдвига.
3. Исследовать материалы, используемые для усиления железобетонных балок, провести расчеты усиления балки в направлении действия изгибающего момента и поперечной силы с использованием композитных материалов с их технико-экономическим обоснованием.

**Объект исследования** – конструкции железобетонных балок различного назначения, применяемые в здании торгового центра, расположенного в Ираке, провинция Анбар, город Рамади, на перекрестке улиц Мейн-Синема.

**Предмет исследования** – методы усиления железобетонных балок современными способами с применением композиционных материалов.

## Abstract

**Scope and structure of work.** The graduation qualification work of a master's student (VKRM) is presented on 85 pages of the main text, and consists of an introduction, three chapters, a conclusion, a bibliographic list that includes 61 titles and one appendix on 2 pages. The work contains 18 tables, 20 figures, 21 formulas.

**Keywords:** strengthening, beam, reinforced concrete, shear, carbon fiber, strength, bending, polymer composite, lamellae, fabric, rod.

**The purpose of the study** is to provide a feasibility study for the optimal design of reinforced concrete beams using composite materials as high-strength reinforcement systems.

To achieve the goal, it is necessary to solve the following tasks:

1. To study the theoretical and methodological foundations for strengthening reinforced concrete beams using various methods in the conditions of Iraq.
2. To propose a method for calculating the reinforcement of bent reinforced concrete elements with composite materials, including calculations of the bending moment force and shear reinforcement.
3. Investigate the materials used to reinforce reinforced concrete beams, carry out calculations of the beam reinforcement in the direction of the bending moment and shear force using composite materials with their feasibility study.

**The object of the study** is the structures of reinforced concrete beams for various purposes used in the building of a shopping center located in Iraq, Anbar province, Ramadi city, at the intersection of Main - Cinema streets.

**The subject of the study** is the methods of strengthening reinforced concrete beams by Modern methods using composite materials.

## Содержание

<b>Введение</b> .....	7
<b>Глава 1. Теоретические и методические основы усиления железобетонных балок с использованием различных методов в условиях Ирака</b> .....	11
1.1 Методы усиления железобетонных балок различного назначения традиционными способами и с применением композиционных материалов.....	11
1.2 Зарубежные исследования по применению конструкции усиленных балок с использованием различных методов .....	24
1.3 Нормативно-техническая документация в области применения усиленных балок, требования к их проектированию и эксплуатации.....	31
Вывод.....	34
<b>Глава 2. Методика расчета усиления железобетонных балок</b> .....	35
2.1 Расчет силы изгибающего момента.....	35
2.1.1 Расчет свойств материала FRP-системы.....	36
2.1.2 Расчет режимов отказа .....	37
2.1.3 Расчет предела прочности одинарного армированного прямоугольного сечения.....	39
2.2. Расчет усиления сдвига.....	41
Вывод.....	45
<b>Глава 3. Практическое применение методов усиления железобетонных балок композитными материалами на примере торгового центра в Ираке и их технико-экономическое обоснование</b> .....	46
3.1 Материалы, используемые для усиления балок.....	46

3.2 Расчет по прочности сечения балки .....	49
3.2.1 Расчет усиления конструкции балки углеродными ламелями.....	51
3.2.2 Расчет усиления конструкции балки углеродными тканями.....	55
3.2.3 Расчет усиления конструкции балки углепластиковыми стержнями.....	58
3.3. Усиление внутренней балки на сдвиг.....	62
3.3.1 Усиление с использованием ламинатов FRP при упрочнении на сдвиг под углом 45°.....	63
3.3.2 Усиление с использованием тканей FRP при упрочнении на сдвиг под углом 45°.....	66
3.4. Технико-экономическое обоснование вариантов усиления балочных элементов здания торгового центра.....	69
Вывод.....	74
<b>Заключение.....</b>	<b>75</b>
<b>Библиографический список.....</b>	<b>77</b>
<b>Приложение. Акт внедрения результатов исследования.....</b>	<b>86</b>

## Введение

**Актуальность темы исследования.** Важность изучения усиления конструкций с использованием различных методов, в частности, применения композиционных материалов заключается в том, что эти материалы впервые используются на рынке Ирака, а также в связи с тем, что многие жизненно важные объекты и мосты за последние годы повреждены в результате войн и террористических актов. В связи с тем, что снос этих зданий и создание новых требуют больших денежных средств, усилий и времени, поэтому укрепление этих зданий считается более выгодным с экономической точки зрения. Кроме того, использование композитных материалов из углеродного волокна характеризуется легкостью конструкции, отсутствием влияния на архитектурно-эстетический вид здания, высокой прочностью, устойчивостью к агрессивным средам и простотой монтажа. Отсюда следует, что метод устройства усиливающей системы из композитных материалов является самым инновационным способом в области строительных технологий, который успешно применяется во всем мире и приобретает большую популярность в Ираке. Поэтому определение наиболее эффективной с экономической точки зрения системы во многом зависит от типа используемого композиционного материала и его доступности на конкретном рынке, что обуславливает актуальность настоящего научного исследования.

**Степень разработанности темы.** Среди ученых, исследующие свойства материалов при растяжении, сжатии, изгибе и детали армирования бетонных балок, методы усиления железобетонных конструкций зданий и сооружений различного назначения полимерными композиционными материалами, труды которых послужили теоретической и методической базой написания ВКРМ являются: С.М. Есипов, Т. N. Azizov, D. V. Kochkarev, T. A. Galinska, A. H. Abdel-Kareem, Д. Г.

Неволин, Д. Н. Смердов, С. А. Бокарев, Г. М. Власов, А. А. Неровных, М. N. Danraka, А. Р. Волик, Т. С. Новикова, С.В. Кудрявцев, А. А. Свинцицкий, Д. А. Михалевич, В. П. Устинов, А. Н. Яшнов, В. J. Mohammed, В. А. Muhaiddin, Д. Р. Маилян, М. А. Zaki, Н. А. Rasheed и др.

Вместе с тем, анализ публикаций показал недостаточную проработанность проблемы усиления железобетонных конструкций зданий и сооружений различного назначения полимерными композиционными материалами для разных условий, учитывающих особенности разрушений и территорию, что определило выбор темы исследования и его общую направленность.

**Целью исследования** является технико-экономическое обоснование оптимальной конструкции усиленных железобетонных балок с применением композиционных материалов в качестве систем высокопрочного армирования.

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

1. Изучить теоретические и методические основы усиления железобетонных балок с использованием различных методов в условиях Ирака.
2. Предложить методику расчета армирования изогнутых железобетонных элементов композитными материалами, включающая расчеты силы изгибающего момента и усиления сдвига.
3. Исследовать материалы, используемые для усиления железобетонных балок, провести расчеты усиления балки в направлении действия изгибающего момента и поперечной силы с использованием композитных материалов с их технико-экономическим обоснованием.

**Объект исследования** – конструкции железобетонных балок различного назначения, применяемые в здании торгового центра, расположенного в Ираке, провинция Анбар, город Рамади, на перекрестке улиц Мейн-Синема.

**Предмет исследования** – методы усиления железобетонных балок современными способами и с применением композиционных материалов.

**Теоретической и методологической основой исследования** послужили Руководство по проектированию и строительству FRP-систем с наружным приклеиванием для усиления бетонных конструкций, исследования проводились в соответствии с действующей комиссией ACI 440, а также современная нормативная правовая база в строительстве, методы математической статистики, метод теории графов, структурно-функциональный анализ, методы эвристического синтеза технических систем.

**Научная новизна исследования** заключается в постановке и комплексном решении проблемы усиления железобетонных балок различными методами с применением композиционных материалов и выбора наиболее экономичного способа усиления в соответствии с требованиями иракского рынка без ущерба для качества прочности.

**Теоретическая значимость** ВКРМ заключается в том, что были изучены три вида углеродных волокнистых материалов, доступных на рынке Ирака, и исследованы их эффективность при усилении железобетонных элементов, а также изучен экономический аспект усиления этими материалами, что позволяет находить решения подобных задач, а также прогнозировать стоимость усиления конструкции.

**Практическая значимость** заключается в возможности использования данного исследования при выявлении и выборе наиболее эффективной системы усиления конструкций зданий и других сооружений, а также определения стоимости усиления железобетонных элементов этих сооружений.

Работа имеет прикладное значение для строительной отрасли. Результаты исследования могут быть использованы в учебном процессе по дисциплинам «Строительные материалы», «Технология строительного производства» и др.

Практические результаты исследования автора, их использование подтверждены актом о внедрении (приложение 1).

**Публикация.** Основные положения ВКРМ опубликованы в Русском журнале строительных наук и технологий. – 2022. – № 1. – Том 8. – С. 30–42.

**Объем и структура работы.** ВКРМ изложена на 78 страницах основного текста, и состоит из введения, трех глав, заключения, библиографического списка, включающего 56 наименований и одного приложения. Работа содержит 18 таблиц, 20 рисунков, 21 формулу.

*Во введении* обосновывается актуальность и степень разработанности темы, определены цель, задачи, объект и предмет исследования, ее теоретическая и методологическая основа, методы исследования, отражены новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов.

*В первой главе* рассмотрены существующие методы усиления традиционными способами и с применением композиционных материалов, обобщены зарубежные исследования по использованию композитных материалов для усиления конструкций, приведена современная нормативно-техническая документация в области применения усиленных балок, требования к их проектированию и эксплуатации в условиях Ирака.

*Во второй главе* предложена методика расчета армирования изогнутых железобетонных элементов композитными материалами, включающая расчеты силы изгибающего момента и усиления сдвига на основе руководства по проектированию и строительству систем FRP с внешним соединением для усиления бетонных конструкций.

*В третьей главе* обоснованы материалы, используемые для усиления железобетонных балок, приведены расчеты усиления железобетонной балки в трех случаях в направлении действия изгибающего момента с использованием панелей, ткани и стержней из углеродного волокна, а также расчет усиления бетонной балки в направлении поперечной силы с использованием панелей и тканей из углеродного волокна и их технико-экономическое обоснование.

*В заключении* сформулированы выводы и предложения по теме исследования.

# **Глава 1. Теоретические и методические основы усиления железобетонных балок с использованием различных методов в условиях Ирака**

## **1.1 Методы усиления железобетонных балок различного назначения традиционными способами и с применением композиционных материалов**

Длительный срок эксплуатации здания, а также подверженность здания внешним повреждениям приводит к снижению расчетного значения несущей способности здания, что требует усиления здания одним из традиционных способов усиления, или современными методами в результате низкого расчетного значения несущей способности поврежденной конструкции [26, 14]. Один из традиционных методов, широко используемых при усилении бетонных конструкций, например, увеличение поперечного сечения армируемого бетонного элемента за счет добавления новых материалов (бетона и стальной арматуры) [55], как показано на рисунке 1.1 [40].

Структурное исследование элементов определяет размер кожуха, а также количество и диаметр стальных стержней, используемых в процессе кожухования [54]. Механические домкраты между этажами иногда используются для временного снижения или даже снятия нагрузки, воздействующей на элементы, перед использованием этого метода. На рисунке 1.2 изображен процесс укрупнения сечения бетонной балки при усилении [50].

Одним из распространенных способов усиления железобетонных конструкций в зоне растяжения является применение стальных пластин на армируемой поверхности [38].

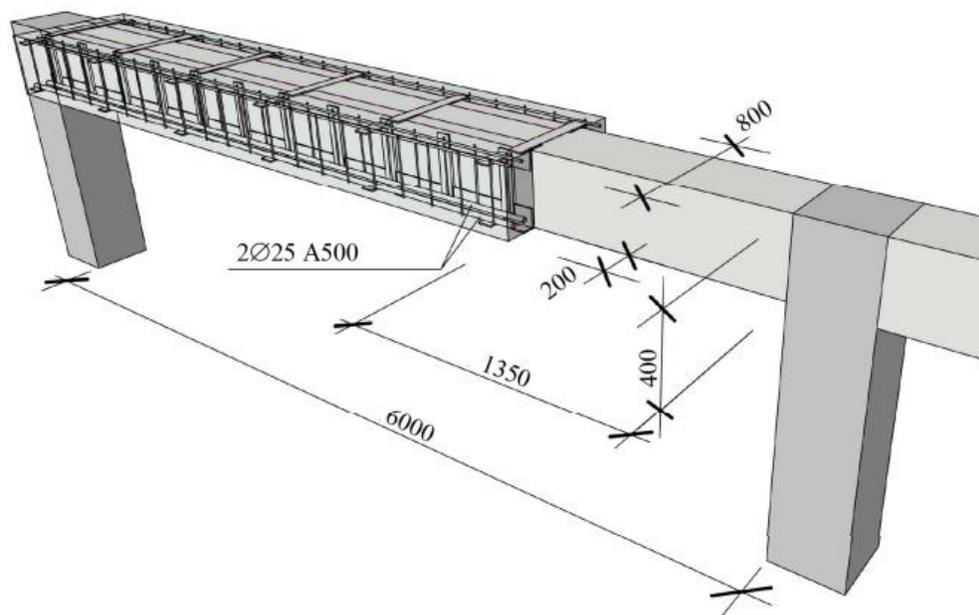


Рисунок 1.1. Схема наружного армирования за счет увеличения сечения железобетонной балки



Рисунок 1.2. Железобетонная оболочка колонны и ее опорных балок

Там, где он связан на поверхности связующими веществами. Высокие напряжения торцевой плиты делают конструкцию склонной к преждевременному разрушению из-за отрыва плиты, сдвига или разрыва бетонного покрытия [36]. При использовании метода обшивки рекомендуется соблюдать осторожность и рациональный дизайн. Одним из преимуществ этой технологии является то, что ее можно использовать, пока здание еще эксплуатируется [58]. С экономической точки зрения укрепление таким способом является одним из наименее затратных способов по сравнению с другими способами. Технология приклеивания стальных листов зарекомендовала себя как наиболее эффективный метод наружного ремонта в области усиления деградировавших железобетонных элементов. Бетонная армированная балка со стальной пластиной, приложенной к нагруженной поверхности, видна на рисунке 1.3 [62].



Рисунок 1.3. Элемент из стального листа, используемый для армирования железобетонных балок

Третий из традиционных способов усиления железобетонных балок – использование стальных пластин, обернутых в форме буквы (U). Этот способ считается одним из важных способов усиления железобетонных балок, так как является одним из быстрых в реализации способов усиления и не вызывает

увеличения сечения усиливающей части, а также улучшает несущую способность элементов [65].

Процесс усиления конструктивного элемента здания осуществляется в следующей последовательности: 1) отполируйте и очистите покрытие после удаления штукатурного покрытия с балки рамы; 2) добавьте раствор эпоксидной смолы в пространство; 3) используйте химические анкеры для установки стальных пластин и убедитесь, что зазор между стальной пластиной и бетоном не превышает 3 мм; 4) стальная пластина также нуждается в антикоррозионной обработке (дважды); 5) эпоксидная смола должна полностью покрыть пространство между стальной пластиной и бетоном; 6) после сварки внешней поверхности стальных пластин с проволочной сеткой отремонтируйте ее с помощью цементного раствора 1:3 для выравнивания и придания гладкости перед окраской распылением для восстановления.

Хотя усиление стальными пластинами в форме буквы (U) характеризуется экономией времени, есть и недостатки, например, невозможность контролировать качество сварки, так как это зависит от уровня мастерства сварщика, и он потребляет относительно большое количество эпоксидной смолы и химического анкерного болта. Также из-за того, что вес стали большой, это вызывает дополнительные нагрузки на здание. Принципиальная схема конструктивного метода балки железобетонной рамы, усиленной с использованием U-образной стальной пластины с внешней оболочкой в инженерном примере, показана на рисунке 1.4 [65].

Из традиционных способов усиления железобетонных балок различного назначения мы рассмотрели три метода наиболее часто используемые ранее в условиях Ирака. В мировой практике имеются и другие технологии усиления железобетонных конструкций традиционными способами (бетоном, железобетоном, металлом), но все они обладают рядом недостатков, основными из которых являются [22]:

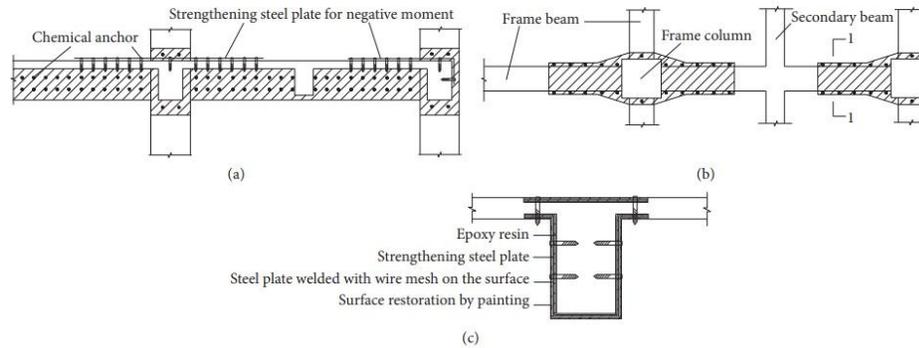


Рисунок 1.4. Схематическая диаграмма конструктивного метода усиления: (а) высота арматуры; (b) плоскость усиления; (с) арматурный профиль (1-1 секция)

- повышение постоянной нагрузки на усиливаемую конструкцию, которое способствует снижению эффективности усиления, возникновению дополнительных внутренних усилий в конструктивных элементах, к которым осуществляется монтаж материалов усиления;

- трудности в монтаже материалов усиления в стесненных условиях (например, при усилении внешних колонн каркасных зданий перед кладкой наружных стен);

- плохая связь материалов усиления бетона, железобетона и металла с элементами усиливаемых конструкций, к которым осуществляется монтаж;

- требуется дополнительная защита материалов усиления, так как бетон, железобетон и металл подвержены коррозии, что может привести к увеличению затрат на текущее содержание усиленных конструкций;

- усиление конструкций крупногабаритными элементами может привести к потере архитектурной выразительности зданий и сооружений.

Наиболее современной технологией усиления и восстановления несущей способности железобетонных конструкций является технология с применением композиционных материалов. Предпочтительнее усиление поврежденных конструкций с помощью современных упрочняющих материалов, таких как

углеволокно, поскольку эти материалы обладают многими преимуществами, в том числе высокой прочностью, стойкостью к истиранию, устойчивостью к агрессивным средам и не увеличивают габариты подлежащей упрочнению детали, а также легкий вес [32, 57].

Полимерные материалы изготавливаются из волокон композиционных материалов, состоящих из оградений из очень тонких нитей диаметром около (1...10) микрометров, которые используются для получения различных форм композиционных волокон [22]. В таблице 1.1 приведены прочностные и деформационные характеристики композитных волокон [30, 9].

Таблица 1.1 – Прочностные и деформационные характеристики составляющих композиционных материалов

Материал	Е, ГПа	R <sub>c</sub> , МПа	ε, %	Коэффициент температурного расширения α, 10 <sup>-6</sup> °C <sup>-1</sup>	Удельный вес ρ, г/см <sup>3</sup>
Углеволокно (высокоупругое)	> 390	> 2400	0,5	-1,45	1,85
Углеволокно (высокопрочное)	> 240	> 4100	1,6	-0,6	1,75
Полимерная матрица и полимерный клей	> 2,7	40–82	1,4	30	1,1
Стекловолокно	> 85	> 3500	4,5	1,6	2,46
Арамид-волокно	> 62	>3600	1,9	-2	1,4

Примечание. Е – модуль упругости; R<sub>c</sub> – сопротивление осевому растяжению; ε – относительная деформация при разрыве.

В производстве композитных материалов в настоящее время используются различные типы волокон, как показано на рисунке 1.5.

Одним из современных методов, используемых в укреплении элемента, является использование внешней арматуры (NSM) и вблизи поверхности [51].

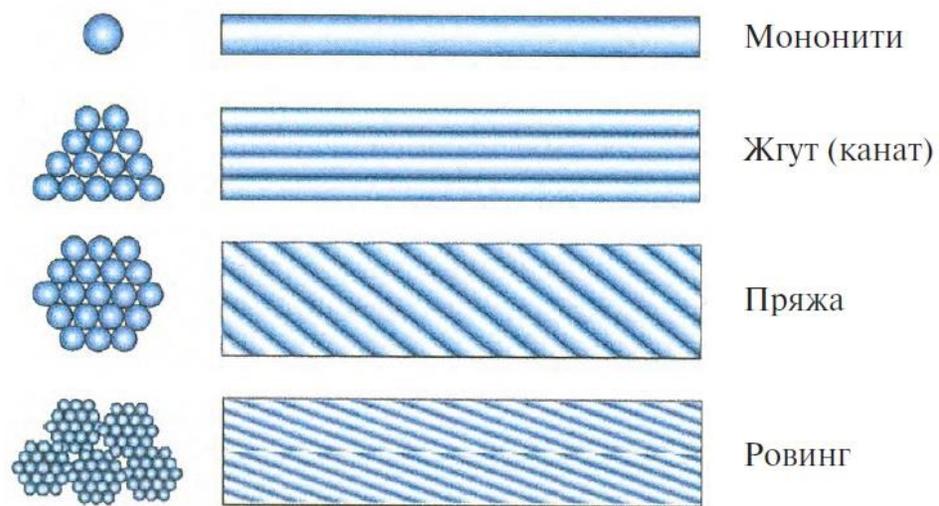


Рисунок 1.5. Формы волокон композитных материалов [22]

Преимуществом этого метода является то, что помимо увеличения мощности армируемого этим методом элемента, он также считается хорошим методом для усиления элементов в местах с агрессивной средой, поскольку является защищенным. Также с архитектурной точки зрения это хорошо тем, что усиление незаметно. Кроме того, стержни в этом методе менее склонны к преждевременному отслоению [33]. Несмотря на эти преимущества, иногда усиливаемый элемент недостаточно широк, чтобы сделать паз, в котором размещаются арматурные стержни. Поверхность элемента, который необходимо укрепить, должна быть проточена в нужном направлении, на нужную глубину и на нужную ширину для заделки стержней [47]. После того, как канавка частично заполнена эпоксидной смолой или цементной пастой, стержень из стеклопластика вставляется и слегка сжимается, в результате чего паста обтекает стержень и полностью заполняет пространство между ней и стенками канавки. Затем поверхность сглаживается после добавления большего количества пасты в канавку.

Стержни FRP могут быть изготовлены практически в бесконечном количестве форм. В результате в качестве арматуры (NSM) можно использовать

полосы и круглые, квадратные, прямоугольные и овальные стержни, рисунки 1.6 и 1.7 [48].

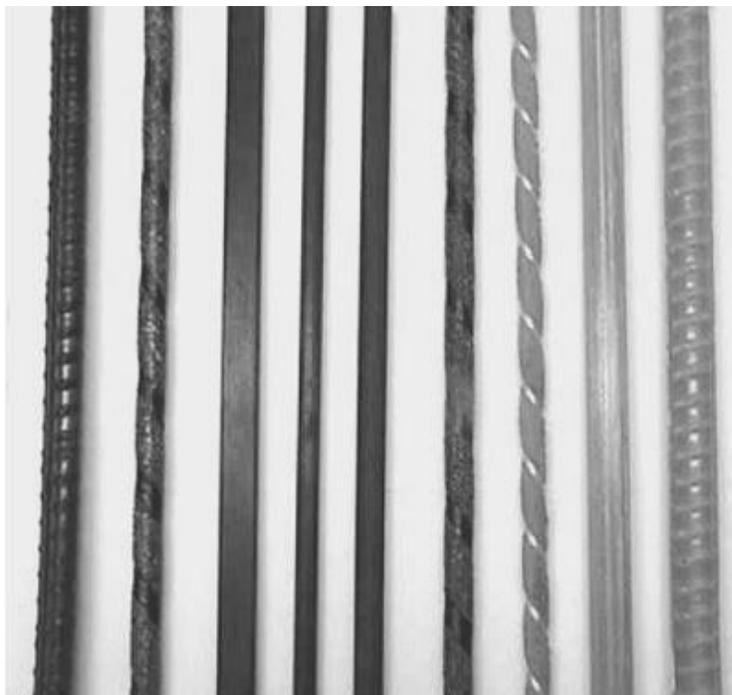


Рисунок 1.6. Типы стержней FRP, используемые в качестве арматуры (NSM)

Различные формы поперечного сечения имеют различные преимущества и предоставляют множество возможностей для практического применения. Например, круглые стержни более распространены и их легче закрепить в процедурах предварительного напряжения, тогда как квадратные стержни максимально увеличивают площадь поперечного сечения стержня для заданного размера квадратной канавки. Хотя они требуют более толстого покрытия для данной площади поперечного сечения, узкие полосы максимизируют отношение площади поверхности к площади сечения для данного объема и, следовательно, снижают опасность отслоения. В реальных условиях использования решение сильно зависит от ограничений разных обстоятельств, таких как глубина покрытия, а также стоимость и доступность определенного типа стержня FRP.

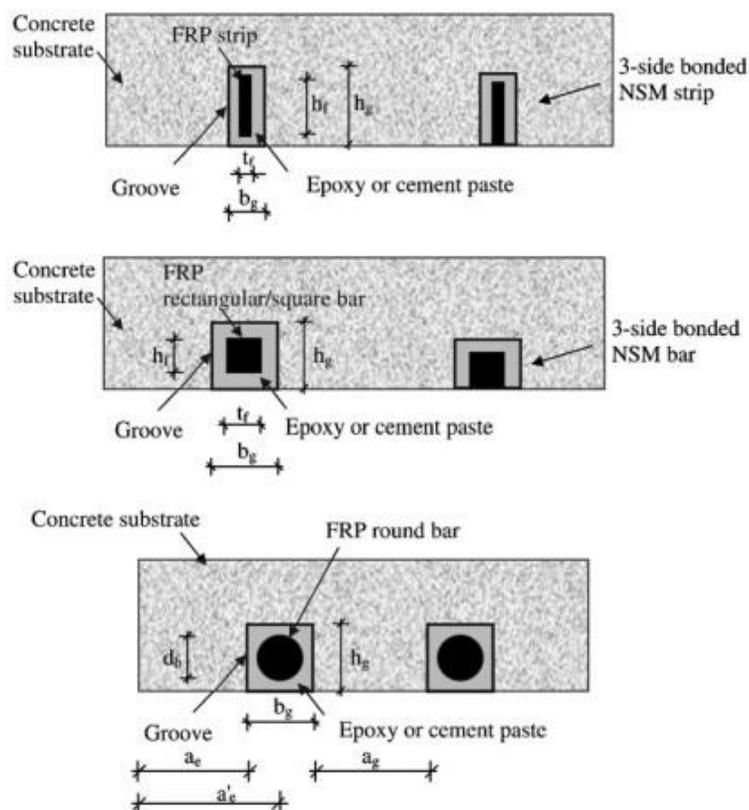


Рисунок 1.7. Различные системы NSM и номенклатура

Также одним из современных способов усиления элементов железобетонных конструкций является использование пластин из углеродного волокна. Этот метод является одним из важнейших современных методов укрепления поврежденных элементов строительных конструкций. Одним из преимуществ этого метода является то, что применение пластин из углеродного волокна делает конструктивный элемент легкий по весу, а также коррозионностойкий, более прочный и прост в монтаже, так как не требует специального оборудования, много времени, можно работать с ним без необходимости разгрузки укрепляемого здания [52].

Эффективность работы таким образом зависит от величины прочности сцепления между плитами из углеродного волокна и бетоном, где важна подготовка поверхности для опорного элемента с целью достижения хорошего сцепления

между плитами из углеродного волокна и бетоном, бетонная поверхность [46]. Схематическое изображение шести основных режимов отказа, наблюдаемых при испытаниях, показано на рисунке 1.8 [42, 46, 63].

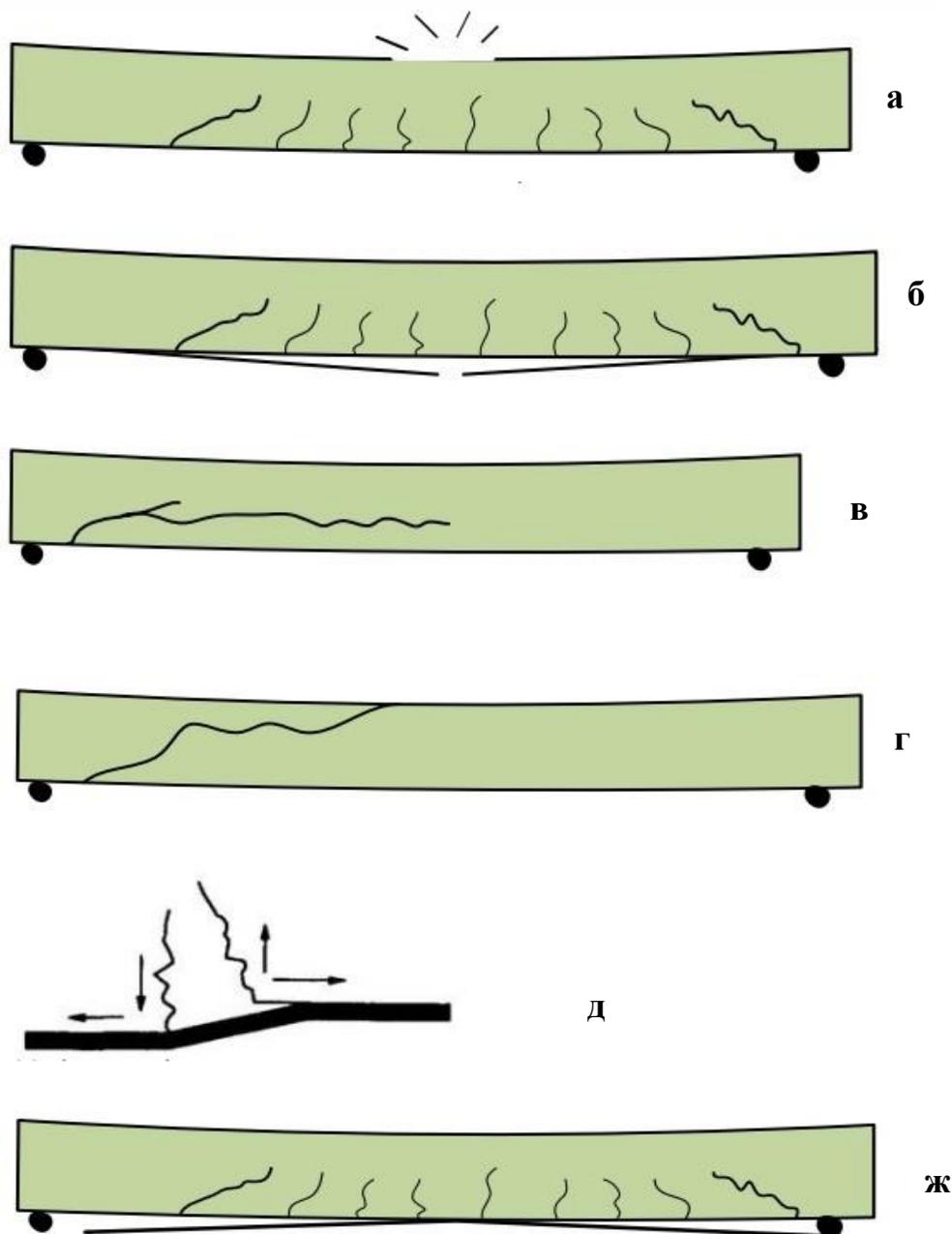


Рисунок 1.8. Отказ Modea в FRP модернизированных бетонных балок: (а) отказ, вызванный сжатия бетона; (б) разрушение, вызванное разрывом стеклопластика и текучестью стали; (в) отслоение слоя вдоль арматуры; (г) разрушение, вызванное сдвигом; (д) явная трещина, вызванная пилингом; (ж) расслоение плиты FRP

Третьим из современных способов усиления поврежденных бетонных элементов является усиление углеволокнистыми тканями, преимущества этого метода заключаются в следующем [11]:

- сохраняется исходное сечение конструктивного элемента;
- не увеличивает массу конструкций, когда укрепляем элементы;
- композитные материалы обладают высокой коррозионной стойкостью;
- простое применение, сжатые сроки производства работ;
- можно избежать необходимости в сложных строительных лесах и в подъемных устройствах, поскольку холсты и ламинаты имеют длину не менее 50 метров.

Композиционные материалы состоят из двух и более компонентов. Первый компонент, известный как наполнитель или армирующая фаза, служит для корректировки характеристик матрицы в нужном направлении [20]. Непрерывная фаза известна как матрица.

В композиционных материалах можно найти керамическую, металлическую или полимерную матрицу. Волокнистый наполнитель обычно изготавливается из прочных жестких материалов, таких как сталь, бор, стекло, углерод и полиэтилен [19]. Углеродное волокно, стекловолокно и материалы, полученные из арамидных волокон, используются для армирования железобетонных балок, рисунок 1.9 [20].



Рисунок 1.9. Композиционные материалы (стекловолокно, углеволокно, арамидное волокно)

Рассмотренные нами и другие существующие способы усиления конструкций композиционными материалами по сравнению с традиционными методами имеют ряд преимуществ, к которым относятся [22]:

- небольшой объемный вес композиционных материалов;
- полимерные композиционные материалы более прочные по сравнению с металлом и бетоном;
- композиционные материалы не теряют свои качества при действии агрессивных факторов окружающей среды;
- полимерный эпоксидный клей, с помощью которого осуществляется приклейка холстов и ламелей за счет гигроскопичности бетона, проникает в его поры, обеспечивая прочность и сплошность соединений материалов усиления с усиливаемой конструкцией;
- при производстве работ по усилению конструкций зданий и сооружений композиционными материалами требуются небольшие трудовые ресурсы;
- с помощью холстов существует возможность производить усиление конструктивных элементов зданий и сооружений со сложными геометрическими пропорциями;
- производство усиления зданий и сооружений композиционными материалами не изменяет их архитектурную выразительность.

Как показали представленные выше сведения, композиционные материалы имеют различные свойства, которые во многом зависят от типа применяемого волокна и характеристик полимерной матрицы. Следует отметить, что на сегодняшний день широкое распространение в строительной практике получили композиционные материалы на основе углеродного волокна, что в дальнейшем использовано в настоящем исследовании. Это связано с их лучшими свойствами по сравнению с другими композитами. В целом технология усиления железобетонных конструкций полимерными композиционными материалами нашла широкое применение в странах Европы и США, включая Ирак.

Из композитных материалов на строительном рынке Ирака появились за последние два десятилетия углепластиковые ламинаты, которые использовались в качестве пригодного для применения строительного материала в конструкционной промышленности [39], за рубежом их применение известно с начала 70-х гг. XX в. Композитными материалами или фиброармированными пластиками называют стеклянные, арамидные, углеродные и другие волокна, объединенные полимерной матрицей. При усилении железобетонных конструкций композитные материалы применяют в виде ламинатов (пластин) или тканых полотен (холстов) различного плетения [31].

Дополнительно отметим, что при воздействии огня, стекловолокна сохраняют свою прочность до точки плавления (более  $1000^{\circ}\text{C}$ ), углеродные волокна окисляются на воздухе при температуре около  $350^{\circ}\text{C}$ . Арамидные волокна не могут использоваться при температуре свыше  $200^{\circ}\text{C}$ . Все типы волокон не поддерживают горение. В системах усиления из композитных материалов при воздействии высоких температур определяющим является поведение полимерной матрицы и полимерного клея, с помощью которых осуществляется объединение волокон и монтаж композита на поверхность усиливаемой конструкции. Полимерные клеи обеспечивают включение в совместную работу волокон композитных материалов с усиливаемой конструкцией на восприятие нагрузок. Работоспособность большинства клеящих составов сохраняется от  $-50$  до  $+100^{\circ}\text{C}$ .

Наиболее прочными и менее деформативными являются углеродные материалы. Поэтому при усилении железобетонных конструкций наиболее эффективным является применение композитных материалов на основе углеродного волокна (углепластики) [21].

В качестве усиления железобетонных балок была выбрана система из композитных материалов на основе углеродных волокон и поверхностных стержней из стеклопластика. Приклейка ламелей и углеродных тканей

осуществляется полимерным клеем, выпускаемым каждым брендом [10], в условиях Ирака на основе эпоксидной смолы.

Проанализировав строительный рынок Ирака, можно выбрать наиболее популярные композитные материалы фирм SIKА (ЕС, Ирак), CarbonWrab (Россия), MARPEL (Италия) [23]. Для сравнения систем усиления железобетонных балок были взяты углеродная ламель, поверхностные стержни из стеклопластика и углеродная ткань данных брендов.

## **1.2 Зарубежные исследования по применению конструкции усиленных балок с использованием различных методов**

Впервые экспериментальные исследования усиления конструктивных элементов зданий и сооружений с использованием композиционных материалов были начаты за рубежом, где были изучены и проведены испытания железобетонных конструкций с использованием композиционных материалов на основе арамидных, углеродных, стеклянных и других волокон. После этого был сделан вывод о том, что композитные материалы, содержащие углеродные волокна, являются наиболее эффективными в укреплении конструкций.

Многие российские и зарубежные специалисты проводили экспериментальные исследования в этой области, которые содержатся в работах С. А. Бокарева [5–7], Mohammed B. J. [56], Есипов С. М. [13] и др.

В настоящее время накоплен большой опыт отечественных исследований в области усиления железобетонных конструкций композиционными материалами. В 2008 году в России в области армирования железобетонных элементов композитными материалами в Сибирском государственном университете путей

сообщения (СГУПС) были начаты широкомасштабные испытания усиленных железобетонных балок композиционными материалами. В ходе испытаний решались одни из первых задач экспериментальных исследований, где были подобраны эффективные конструкции для усиления железобетонных элементов, а также проведена экспериментальная оценка несущей способности и проанализированы схемы разрушения конструктивных элементов [3, 7, 27]. Первоначальная задача в продолжающихся усилиях заключалась в том, чтобы найти каждый потенциальный план сноса железобетонных компонентов. Для испытаний было собрано три комплекта образцов. В первую группу вошли неармированные железобетонные балки из серии «А» (рисунок 1.10, а). Во второй группе представлены железобетонные балки с композитной арматурой по нижним граням: серия «Б» имеет один слой шириной 50 мм, серия «В» имеет один слой шириной 100 мм, серия «Г» имеет один слой шириной 150 мм (рисунок 1.10, б), серия «Д» имеет два слоя шириной 150 мм (рисунок 1.10, в), а серия «Е» имеет один слой шириной 150 мм с закрепленной на нем U-образной обмоткой в опорных зонах (рисунок 1.10, г). В третьей категории находились железобетонные балки серии «Ж», армированные слоем композитного материала в виде П-образной обоймы длиной 1400 мм (рисунок 1.10, д), и железобетонные балки серии «З», армированные слоем композитного материала шириной 150 мм по нижним граням и полосами шириной 300 мм по боковым граням, наклеенным под углом  $60^\circ$  к продольной оси (рисунок 1.10, е). На каждую серию готовили по три-четыре пучка.

На рисунке 1.11 показана процедура загрузки балки. Испытания проводились на железобетонных балках длиной 1,65 м и поперечным сечением 16 x 22 см. Для усиления балок использовались углеродные волокна SikaWrap® 530 C (VP), которые приклеивались к поверхности бетона с помощью двухкомпонентного эпоксидного клея, известного как Sikadur®-330. Всего было использовано три разные группы образцов.

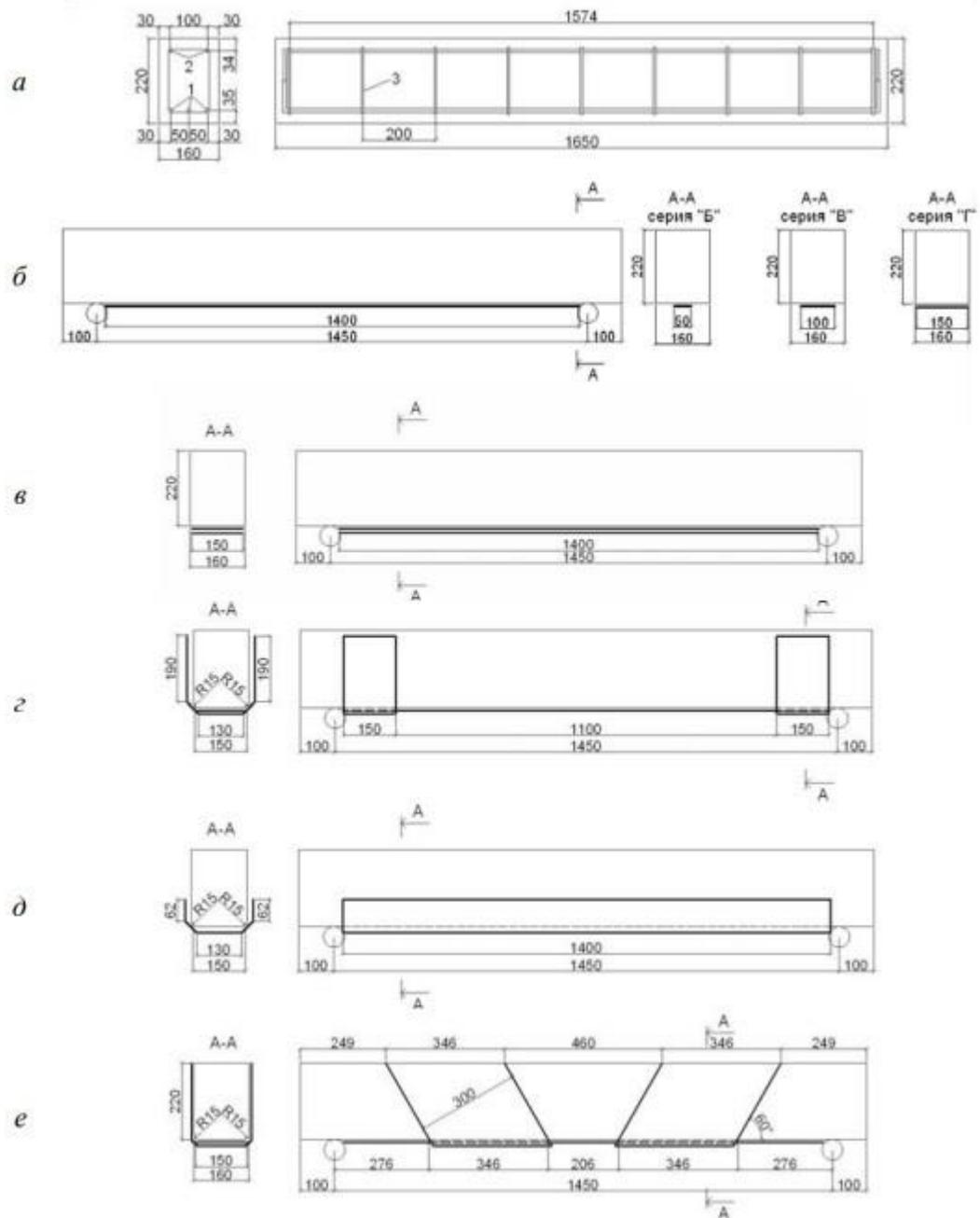


Рисунок 1.10. Модели тестируемых балок: а – серии «А»; б – серии «Б», «В» и «Г»; в – серии «Д»; г – серии «Е»; д – серии «Ж»; е – серии «З»; 1 – рабочая арматура класса АIII Ø 10 мм; 2 – рабочая арматура класса АIII Ø 8 мм; 3 – поперечная арматура класса АI Ø 6 мм

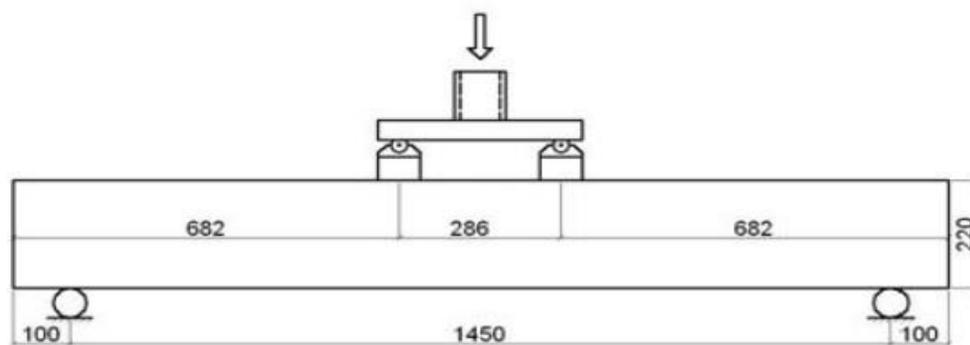


Рисунок 1.11. План приложения нагрузок к образцам

При оценке железобетонных балок на действие изгибающего момента образцы разрушаются в результате отслоения композиционного материала от поверхности бетона, согласно экспертизе результатов экспериментальных исследований СГУПС. В этой ситуации разрушающая нагрузка для усиленных балок типа «Б-Д» может превышать разрушающую нагрузку для неармированных балок на 35–88 % (тип «А»). Образцы серии «З», разрушенные из-за разрыва композитного материала в середине пролета, были частью наиболее логичной конструкции усиления балок. Образцы конструктивного типа «Ж», у которых разрывная нагрузка оказалась на 120 % выше, чем у неармированного образца типа «А», оказались лучшими по конструкции для армирования балок [7].

В Ираке и в Университете Мосула в 2010 г. усиление бетонных балок изучалось снаружи с использованием лент из полимерного волокна (FRP), где было отлито 18 бетонных балок с размерами (1000 мм) в длину, (200 мм) в высоту и (150 мм) в ширину и они перегибались через продольную арматуру, как на рисунке 1.12. Два из этих порогов были оставлены для усиления волокнистыми полосами, поскольку они были задуманы как контрольные образцы. Что касается остальных порогов, то они были разделены на две группы. Пространство сдвига обернуто снизу и с боков полосами из полимерного волокна, причем в первой группе оно

расположено под углом 90 градусов, а во второй группе – под углом 45 градусов. После изучения этих балок и их разрушения в результате сдвига по сторонам балки его результаты показали, что внешнее армирование полосами из полимерного волокна способствует увеличению сопротивления сдвигу балок с покрытием по сравнению с контрольными балками без покрытия в пропорциях, которые зависят от качества волокнистых лент, угла наклона лент и их толщины, так как это увеличение составило (10–28%) для балок, намотанных под углом (90°) и (20–44%) для балки, обернутые под углом (45°), а внешнее усиление работает на увеличение энергии поглощения, а также снижение пластичности обернутых балок по сравнению с контрольными балками без покрытия с процентами (12–23%) % для балки, завернутые под углом (90°) и (14–37%) для балок, завернутых под углом (45°). Кроме того, внешнее армирование увеличивает жесткость обернутых балок, и это было видно по отказу, который произошел внезапно в обернутых моделях, в то время как это происходило постепенно в неинкапсулированных контрольных моделях [56].

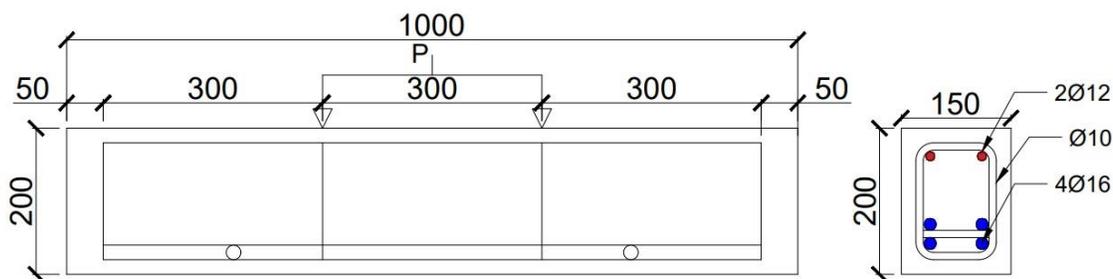


Рисунок 1.12. Размеры и детали внутреннего армирования железобетонных балок

В России в Белгородском государственном технологическом университете в 2015 году обсуждались методики расчета и проектирования железобетонных элементов с использованием композиционных материалов для разных стран. Было проведено сравнение исходных требований сходства и различия подходов к расчету с учетом основных факторов, определяющих эксплуатационную надежность

железобетонных конструкций. Следует подчеркнуть, что нормы России и США являются наиболее всеобъемлющими. В основу этих методик положены Правила проектирования железобетонных конструкций с металлической арматурой и Методические указания по проектированию сборно-монолитных железобетонных конструкций. В таблице 1.2 представлены общие рекомендации по расчету внешнего армирования железобетонных конструкций с использованием композиционных материалов [13].

Таблица 1.2 – Сравнение методик Российской Федерации и США по определению усиления изгибаемых железобетонных элементов

АСИ 440.2R-02	СП 164.1325800.2014
1	2
А. Расчет прочности нормального сечения	
1. Предположения	
<p>1. Напряжение в бетоне и усилии обратно пропорционально расстоянию от нейтральной оси.</p> <p>2. Отсутствие проскальзывания между бетоном и арматурой.</p> <p>3. Деформации сдвига в клеевом слое не учитываются</p> <p>4. <math>\varepsilon_{b,ult} = 0.003</math></p> <p>5. <math>R_{bt} = 0</math></p> <p>6. Эластичная композитная работа</p>	<p>1. Отсутствие проскальзывания между бетоном и арматурой.</p> <p>2. Деформации сдвига в клеевом слое не учитываются.</p> <p>3. <math>\varepsilon_{b,ult} = 0.003</math></p> <p>4. Нелинейная модель деформации используется для расчета прочности нормальных сечений.</p> <p>5. В случае разрушения 50 % и более сечения бетона или 50 % и более сечения рабочей арматуры несущей способностью армированной конструкции пренебрегают.</p> <p>6. С учетом уже существующих условий армирования <math>R_f \leq (\varepsilon_{s2} - \varepsilon_f^0) \cdot E_f</math>.</p> <p>7. <math>\xi \leq \xi_{RF}</math>.</p>
2. Рассматриваемые схемы разрушения	
<p>1. Разрушение сжатого бетона до деформации арматуры</p> <p>2. Достижение предела текучести арматуры перед разрушением бетона</p> <p>3. Достижение предела текучести арматуры перед разрушением бетона</p> <p>4. Расслоение защитного слоя</p> <p>5. Отслаивание усиления</p>	<p>1. Разрушение сжатой зоны бетона до достижения напряжений текучести в растянутой арматуре</p> <p>2. Наступление текучести в растянутой стержневой арматуре и последующий разрыв усиления без разрушения сжатой зоны бетона</p> <p>3. Наступление текучести в растянутой стержневой арматуре и последующее разрушение усиления и сжатой зоны бетона</p> <p>4. Отслаивание усиления</p>

1	2
3. Значение коэффициента ограничения деформации композита	
$k_m = \begin{cases} \frac{1}{60\varepsilon_{fu}} \left(1 - \frac{n \cdot E_f \cdot t_f}{360000}\right) \leq 0,9, n \cdot E_f \cdot t_f \leq 180000 \\ \frac{1}{60\varepsilon_{fu}} \left(\frac{90000}{n \cdot E_f \cdot t_f}\right) \leq 0,9, n \cdot E_f \cdot t_f \leq 18000 \end{cases}$	Отсутствует (присутствует в Руководстве по усилению ЖБК композитными материалами)
4. Значения начальной деформации стали и бетона	
Сталь: $\varepsilon_s^0 = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \left(\frac{d-c}{h-c}\right)$	Сталь: $\varepsilon_s^0 = \frac{M_0}{E_{b1} \cdot I_{red}} (h_0 - x_0)$ Бетон: $\varepsilon_b^0 = \frac{M_0}{E_{b1} \cdot I_{red}} \cdot x_0$
5. Основная формула расчета	
$M \leq M_{f1} = A_s \cdot f_s \left(d - \frac{\beta_1 c}{2}\right) + \psi_f \cdot A_f f_{fe} \left(h - \frac{\beta_1 c}{2}\right)$	$M \leq M_{ult} = R_b \cdot b \cdot x (h_0 - 0,5x) + R_{sc} \cdot A_s (h_0 - a) + R_f \cdot A_f \cdot a$
6. Напряжение во внешней арматуре из композита под нагрузкой	
$f_{fs} = f_{ss} \left(\frac{E_f}{E_s}\right) \frac{h - kd}{d - kd} - \varepsilon_{bi} \cdot E_f$	$\sigma_f = \left[ \varepsilon_{b2} \left(\frac{\omega \cdot h}{x} - 1\right) - k \cdot \varepsilon_{bt}^0 \right] E_f$
7. Учет нелинейной модели деформации	
Отсутствует	Присутствует
Б. Расчет прочности наклонных секций	
1. Основная формула расчета	
$V_u \leq \varphi V_n = \varphi (V_c + V_s + \psi_f V_f)$	$Q \leq Q_b + Q_{sw} + Q_{fw}$
2. Поперечная сила, воспринимаемая композитным внешним армированием	
$V_f = \frac{A_{fv} \cdot f_{fe} (\sin \alpha + \cos \alpha) d_f}{S_f}$	$Q_f = \psi_f \frac{A_{fw} \cdot R_{fw} \sin \alpha \cdot C_{fw}}{S_f}$
3. Значение коэффициента учета для схемы наклейки внешнего армирования	
$\psi_f = \begin{cases} 0,95 - \text{для замкнутых хомутов} \\ 0,85 - \text{для двух и трехсторонних хомутов} \end{cases}$	$\psi_f = \begin{cases} 0,95 - \text{для замкнутых хомутов} \\ 0,85 - \text{для двух и трехсторонних хомутов} \end{cases}$
4. Условие предотвращения разрушения усиления от потери общего сцепления с бетоном	
$\varepsilon_{fe} = 0,004 \leq 0,75\varepsilon_{fu}$	$R_{fw} = 0,75R_f \leq 0,004E_f$
5. Коэффициент прочности сцепления	
$k_v = \frac{k_1 k_2 \cdot L_f}{11900\varepsilon_{fu}} \leq 0,75$ $k_1 = \left(\frac{f_c'}{27}\right)^{2/3}$ $k_2 = \begin{cases} \frac{h_{fw} - L_f}{h_{fw}}, \text{ трехсторонний хомут} \\ \frac{h_{fw} - 2L_f}{h_{fw}}, \text{ двухсторонний хомут} \end{cases}$ $L_f = \frac{23300}{(n \cdot t_f \cdot E_f)^{0,58}}$	$\gamma_{f3} = \frac{k_1 k_2 \cdot L_f \cdot E_f}{1190R_f} \leq 0,75$ $k_1 = (0,1R_b)^{2/3}$ $k_2 = \begin{cases} \frac{h_{fw} - L_f}{h_{fw}}, \text{ трехсторонний хомут} \\ \frac{h_{fw} - 2L_f}{h_{fw}}, \text{ двухсторонний хомут} \end{cases}$ $L_f = \frac{23300}{(n \cdot t_f \cdot E_f)^{0,58}}$
6. Предел полного армирования, работающего на срез	
$V_s + V_f \leq 0,66 \sqrt{f_c' b_w d}$	Не ограничено

### **1.3 Нормативно-техническая документация в области применения усиленных балок, требования к их проектированию и эксплуатации**

Многие международные стандарты проектирования и расчета железобетонных конструкций, армированных композиционными материалами, разработаны в России и во многих других странах, которые включают в себя:

- технические спецификации для условий, в которых применяются композитные материалы;
- перечень типов конструкций, которые можно армировать композитными материалами;
- область применения композиционных материалов;
- технические условия на проектирование усиления (методика расчета, технические условия на проектирование);
- спецификации на создание работ;
- стандарты безопасности;
- приемочные требования (осмотр и испытания конструкций, оценка работоспособности).

Можно выделить следующие нормативно-технические документы по усилению железобетонных конструкций композитными материалами, касающиеся проектирования и эксплуатации, которые включают в себя:

- СП 164.1325800.2014 [28]. Усиление железобетонных конструкций композитными материалами – Россия;
- ACI 440.2R-17 [45]. Руководство по проектированию и строительству систем FRP с наружным приклеиванием для усиления бетонных конструкций – США;

– ЕН 1991:2002-2007. Еврокод 1. Воздействия на конструкции. Часть 1–4. Общие действия. Воздействия ветра (1991:2002-2007. Eurocode 1: Actions on structures – Part 1–4: General actions – Wind actions);

– Центр исследований и нормирования в гражданском строительстве. Рекомендации 96-2003 [29]. Применение пластмасс, армированных волокном в несущих конструкциях зданий и сооружений (CUR Recommendation 96:2003. Fibre reinforced plastics in civil engineering supporting frameworks);

– ИСО 527-4:1997 [17]. Пластмассы. Определение свойств при растяжении. Часть 4. Условия испытаний изотропных и ортотропных пластиковых композитов, армированных волокном (ISO 527-4:1997 Plastics – Determination of tensile properties – Part 4: Test conditions for isotropic and orthotropic fibre-reinforced plastic composites);

– ИСО 14126:1999 Материалы композиционные пластмассовые, армированные волокнами [24]. Пластиковые композиты, армированные волокном. Определение свойств сжатия в плоскостном направлении (ISO 14126:1999 Fibre-reinforced plastic composites – Determination of compressive properties in the in-plane direction);

– ИСО 178:2001 [18]. Пластмассы. Определение свойств при изгибе (ISO 178:2001 Plastics – Determination of flexural properties);

– ИСО 14125:1998 [15]. Материалы композиционные полимерные, армированные волокном. Определение свойств при изгибе (ISO 14125:1998 Fibre-reinforced plastic composites – Determination of flexural properties);

– ИСО 14130:1997 [16]. Материалы композиционные полимерные, армированные волокном. Определение кажущейся межслойной прочности на сдвиг методом испытания коротких балок (ISO 14130:1997 Fibre-reinforced plastic composites – Determination of apparent interlaminar shear strength by short-beam method);

– CNR-DT 200/2004 [44]. Руководство по проектированию усиления эксплуатируемых конструкций путем внешнего армирования фиброармированными пластиками. – Рим, 2004;

При расчетах все нормативные документы опираются на тип применяемых композиционных материалов и условия их применения, а также на метод расчета усиливаемых конструкций и технологию, по которой усилены железобетонные конструкции.

На этапе проектирования усиления композиционными материалами, где оценивается прочность конструкции, следовательно, должны быть определены характеристики эксплуатации усиленных конструкций, а это делается путем правильного задания значений параметров условий работы. и установление необходимых мер предосторожности для защиты композиционных материалов при использовании усиления железобетонных элементов.

Следует обратить внимание на значение клея, обеспечивающего сцепление композиционного материала с бетонной поверхностью, которое зависит от ряда факторов, в том числе от химического состава материала, способа обработки поверхности усиливаемого элемента, вязкости связующего материала и техники установки композитных материалов.

В России правила проектирования армирования железобетонных конструкций с использованием композиционных материалов были опубликованы впервые в виде свода правил (СП 164 1325800.2014). Эти правила зависят от определения областей армирующей стали, проектирования бетонных конструкций и выбора областей армирования с использованием композитных материалов. Уравнения модели деформации или обычные уравнения используются при расчете прочности армированного сечения [25].

## ***Вывод***

На основе анализа данной главы можно сделать вывод, что в последнее время большое развитие получили методы повышения несущей способности зданий, и связано это с применением композиционных материалов при усилении элементов железобетонных конструкций, нуждающихся в повышении их несущей способности, так как в результате возложенных на них повышенных нагрузок, либо вследствие повреждения зданий внешними факторами или агрессивными условиями. Благодаря этим исследованиям был накоплен большой экспериментальный опыт в области усиления железобетонных конструкций. Также во многих предыдущих исследованиях в этой области отмечалось, что экономический аспект этих исследований не всегда изучается, так как учитываются только технические аспекты без уделения внимания экономическим аспектам и выбора экономически эффективной усиливающей системы из композитных материалов.

## Глава 2. Методика расчета усиления железобетонных балок

### 2.1 Расчет силы изгибающего момента

В последние годы системы FRP подверглись многочисленным исследованиям, которые включают в себя укрепление и ремонт поврежденных бетонных элементов в дополнение к новым бетонным конструкциям [65,60]. Тот факт, что системы FRP легкие, высокопрочные и простые в использовании, делают этот метод усиления бетонных элементов идеальным для использования [59]. В этом типе применения предварительный отказ контролируется отслаиванием листа FRP [61]. Этот тип отказа можно оценить с помощью уравнений ACI 440.2R-08.

Для расчета изгибающего момента балок FRP с внешней связью для усиления бетонных элементов используются деформационная совместимость, баланс внутренних сил и основные схемы разрушения в ACI 440.2R-08 для балок FRP с внешней связью [35]. Распределение деформации и условия баланса сил приведены на рисунке 2.1 [35, 52].

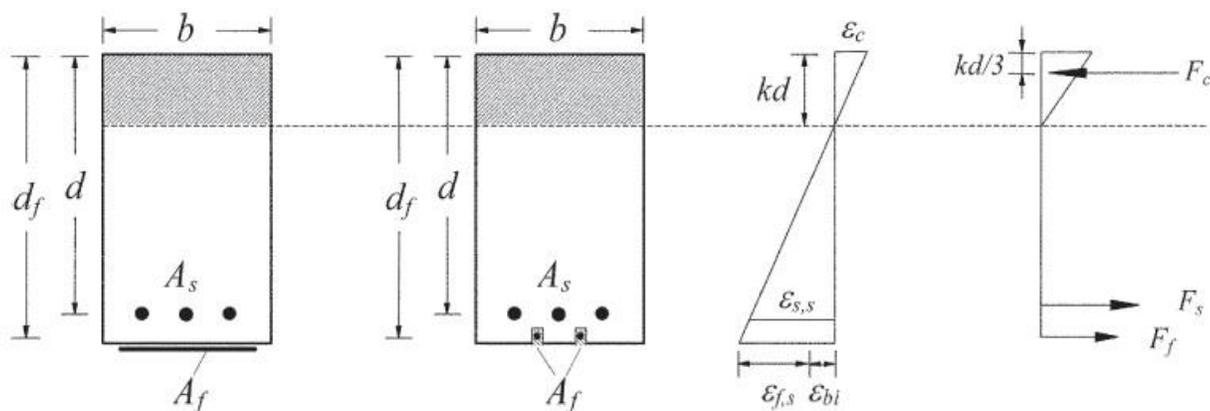


Рисунок 2.1. Распределение деформации и условия равновесия сил для усиленных балок

### 2.1.1 Расчет свойств материала FRP-системы

Благодаря информации, полученной от производителей ламелей из FRP, характеристики этого материала, такие как предел прочности при растяжении, не учитывали длительное воздействие на эти ламели различных условий окружающей среды. Длительное воздействие различных условий окружающей среды приводит к снижению свойств материала при растяжении и устойчивости к ползучести и разрыву. Для этого мы должны уменьшить свойства растяжения, используя в расчетах формулу 2.1. Пониженная проектная деформация при разрыве также необходима для ситуаций воздействия окружающей среды, которая может быть рассчитана по формуле 2.2.

$$f_{fu} = C_E f_{fu}^* \quad (2.1)$$

$$\varepsilon_{fu} = C_E \varepsilon_{fu}^* \quad (2.2)$$

где  $f_{fu}$  – расчетный предел прочности при растяжении стеклопластика, МПа;  
 $f_{fu}^*$  – предел прочности при растяжении материала FRP, заявленный изготовителем, МПа;  
 $C_E$  – экологический коэффициент снижения;  
 $\varepsilon_{fu}$  – расчетная разрывная деформация стеклопластиковой арматуры, мм/мм;  
 $\varepsilon_{fu}^*$  – предел прочности при разрыве арматуры из стеклопластика, мм/мм.

Фактор снижения воздействия окружающей среды определяется в зависимости от типа волокна и условий воздействия, как показано в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Понижающий коэффициент окружающей среды для различных систем FRP и условий воздействия

Условия воздействия	Тип волокна	Фактор снижения воздействия на окружающую среду $C_E$
Внутреннее воздействие	Углерод	0,95
	Стекло	0,75
	Арамид	0,85
Внешний вид (мосты, пирсы и закрытые гаражи)	Углерод	0,85
	Стекло	0,65
	Арамид	0,75
Агрессивная среда (химические заводы и очистные сооружения)	Углерод	0,85
	Стекло	0,50
	Арамид	0,70

### 2.1.2 Расчет режимов отказа

Системы отказа при изгибе элементов, армированных FRP, должны быть проверены для контроля режимов отказа. Где происходит разрушение бетона, если сжимающее напряжение достигает максимального напряжения перед использованием ( $\epsilon_c = \epsilon_{cu} = 0,003$ ). Разрыв также происходит в FRP с внешней связью, если напряжение в FRP равно расчетному напряжению разрыва ( $\epsilon_f = \epsilon_{fu}$ ) до того, как напряжение в бетоне достигнет своего максимального значения перед использованием. Эффективное напряжение в арматуре FRP должно быть ограничено уровнем напряжения, которое возникает при  $\epsilon_{fu}$ . Чтобы предотвратить разрушение, вызванное промежуточным растрескиванием, при котором может произойти отслоение,  $\epsilon_{fd}$ , величина которого определяется по формуле 2.3.

$$\varepsilon_{fd} = 0.41 \sqrt{\frac{f_c}{nE_f t_f}} \leq 0.9\varepsilon_{fu}, \quad (2.3)$$

где  $\varepsilon_{fd}$  – деформация разрушения наружной арматуры из стеклопластика, мм/мм;

$f_c$  – заданная прочность бетона на сжатие, МПа;

$n$  – количество слоев армирования FRP;

$E_f$  – модуль упругости стеклопластика при растяжении, МПа;

$t_f$  – номинальная толщина одного слоя стеклопластиковой арматуры, мм.

Поскольку материалы FRP линейно эластичны до разрушения, уровень напряжения в FRP будет определять уровень напряжения, развиваемого в FRP. Уровень напряжения, возникающего в FRP в точке, где бетон разрушается, в точке, в которой FRP разрывается, или в точке, когда FRP отделяется от основания, будет определять максимальный уровень напряжения, который может быть достигнут в армировании FRP. Эффективный уровень напряжения в арматуре FRP при предельных условиях может быть определен по формуле 2.4.

$$\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{cu} \left( \frac{d_f - c}{c} \right) - \varepsilon_{bi} \leq \varepsilon_{fd}, \quad (2.4)$$

где  $\varepsilon_{fe}$  – эффективное напряжение в арматуре из стеклопластика, достигаемое при разрушении, мм/мм;

$\varepsilon_{cu}$  – предельная осевая деформация сжатия замкнутого бетона, соответствующая предельной осевой деформации сжатия замкнутого бетона  $0,85f_c$ , соответствующая разрушению сильно ограниченного элемента или разрушению слабо ограниченного элемента (элемент ограничивается для восстановления расчетной прочности бетона на сжатие);

$d_f$  – эффективная толщина арматуры на изгиб из стеклопластика, мм;

$c$  – расстояние от волокна предельного сжатия до нейтральной оси, мм;

$\varepsilon_{bi}$  – деформация бетонного основания в момент укладки стеклопластика (натяжение положительное), мм/мм.

Значения ( $\varepsilon_{bi}$ ) и ( $k$ ) можно найти по формулам 2.5 и 2.6:

$$\varepsilon_{bi} = \frac{M_{DL}(h - kd)}{I_{cr}E_C}, \quad (2.5)$$

$$k = \sqrt{\left(\rho_s \frac{E_S}{E_C} + \rho_f \frac{E_f}{E_C}\right)^2 + 2 \left(\rho_s \frac{E_S}{E_C} + \rho_f \frac{E_f}{E_C} \left(\frac{h}{d}\right)\right) - \left(\rho_s \frac{E_S}{E_C} + \rho_f \frac{E_f}{E_C}\right)}, \quad (2.6)$$

где  $M_{DL}$  – момент статической нагрузки, кН·м;

$h$  – общая толщина или высота элемента, мм;

$k$  – отношение глубины нейтральной оси к глубине армирования, измеренной от предельно сжатого волокна;

$d$  – расстояние от крайне сжатого волокна до центра тяжести растянутой арматуры, дюймы;

$I_{cr}$  – момент инерции сечения с трещиной, перешедшей в бетон, мм<sup>4</sup>;

$E_C$  – модуль упругости бетона, МПа;

$\rho_s$  – коэффициент ненапрягаемой арматуры;

$\rho_f$  – коэффициент армирования FRP;

$E_S$  – модуль упругости стали, МПа;

$E_f$  – модуль упругости при растяжении стеклопластика, МПа.

### **2.1.3 Расчет предела прочности одинарного армированного прямоугольного сечения**

Предполагая идеально упругое поведение с учетом деформации в арматуре FRP, мы можем найти эффективный уровень напряжения в FRP по формуле 2.7.

$$f_{fe} = E_f \varepsilon_{fe}, \quad (2.7)$$

где  $f_{fe}$  – напряжение в FRP, которое эффективно; напряжение, достигаемое при разрушении сечения, МПа.

На основе совместимости деформаций в арматуре из стеклопластика, можно найти уровень деформации в ненапрягаемой стальной арматуре по формуле 2.8.

$$\varepsilon_s = (\varepsilon_{fe} - \varepsilon_{bi}) \left( \frac{d - c}{d_f - c} \right), \quad (2.8)$$

где  $\varepsilon_s$  – деформация в ненапрягаемой стальной арматуре, мм/мм.

По уровню деформации в ненапрягаемой стальной арматуре мы можем найти напряжение в ней, используя предполагаемую ее кривую напряжения-деформации, по формуле 2.9.

$$f_s = E_s \varepsilon_s \leq f_y, \quad (2.9)$$

где  $f_s$  – напряжение в ненапрягаемой стальной арматуре, МПа;

$f_y$  – нормативный предел текучести ненапрягаемой стальной арматуры, МПа.

Используя уравнения 2.10, можно проверить равновесие внутренних сил с определением уровня напряжения в FRP и напряжения в стеклопластиковой и стальной арматуре для предполагаемой глубины нейтральной оси. Значения  $\alpha_1$  и  $\beta_1$  можно использовать в качестве значений блока напряжений Уитни, если разрушение бетона является основным видом разрушения (до или после текучести стали) ( $\alpha_1 = 0,85$  и  $\beta_1$  из раздела 10.2.7.3 ACI 318-05 [34]). Блок напряжения Уитни дает достаточно точные результаты в случаях разрыва FRP, расслоения покрытия или отслоения FRP. Для уровня деформации бетона в предельном состоянии можно использовать более точный блок напряжения. Кроме того, могут применяться методы, учитывающие нелинейное распределение напряжений в бетоне.

$$\alpha_1 f_c \beta_1 b c = A_s f_s + A_f f_{fe}, \quad (2.10)$$

где  $\alpha_1$  – множитель на  $f_c$  для определения интенсивности эквивалентного прямоугольного распределения напряжений в бетоне;

$\beta_1$  – отношение глубины эквивалентного прямоугольного блока напряжения к глубине нейтральной оси;

$b$  – ширина сжатой поверхности элемента, дюйм, мм;

$A_s$  – площадь ненапрягаемой стальной арматуры, мм<sup>2</sup>;

$A_f$  – площадь внешней арматуры FRP, мм<sup>2</sup>.

**Использование коэффициента уменьшения на вклад прочности на изгиб для армирования FRP ( $\psi f$ ).** Этот понижающий коэффициент для сильного вклада в усиление жесткости FRP основан на анализе надежности, который был основан на экспериментально откалиброванных статистических свойствах прочности на изгиб. где было взято значение 0,85. Номинальная прочность на изгиб секции с внешней арматурой из стеклопластика рассчитывается по формуле 2.11.

$$M_n = A_s f_s \left( d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) + \psi f A_f f_{fe} \left( d_f - \frac{\beta_1 c}{2} \right), \quad (2.11)$$

где  $M_n$  – номинальная прочность на изгиб кН·м;

$\psi f$  – коэффициент снижения прочности FRP.

## 2.2. Расчет усиления сдвига

Только путем полной обшивки секции можно обеспечить усиление при сдвиге с использованием внешнего FRP в местах ожидаемых пластических

шарниров или реверсирования напряжения, а также для улучшения поведения элементов после текучести при изгибе в моментных рамах, выдерживающих сейсмические нагрузки. Межцентровое расстояние между отдельными полосами внешней арматуры из стеклопластика не должно превышать  $d/4$  ширины полосы. На рисунке 2.2 показаны три различных метода обертывания стеклопластиком, которые можно использовать для усиления прямоугольных или призматических балок, или колонн [41].

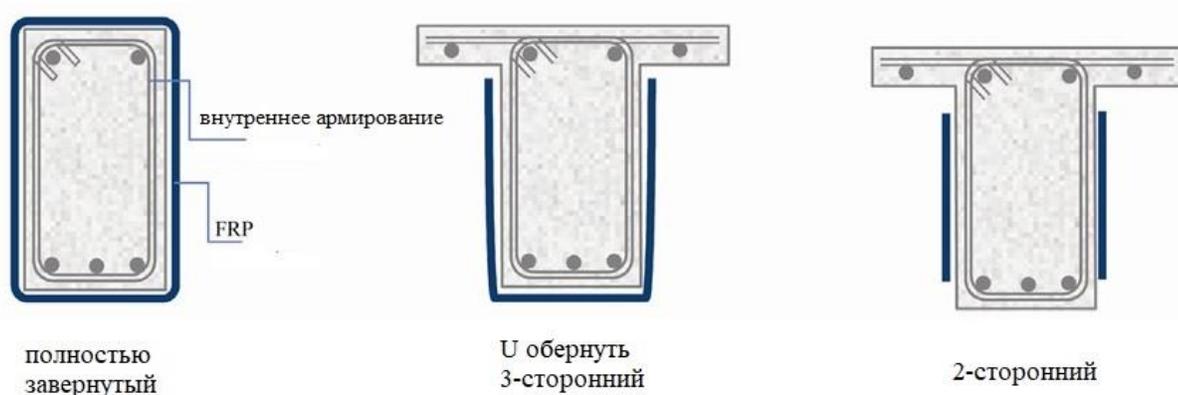


Рисунок 2.2. Типичные схемы обертывания для усиления на сдвиг с использованием ламинатов FRP

Бетонный элемент, армированный системой FRP, должен иметь расчетную прочность на сдвиг, превышающую необходимую прочность на сдвиг [34]. Необходимая прочность на сдвиг бетонного элемента, армированного FRP, должна рассчитываться с использованием коэффициентов нагрузки, указанных в ACI 318-05. Согласно таблице 2.2, необходимо умножить номинальную прочность на сдвиг на коэффициент снижения прочности ( $\psi f$ ), чтобы получить расчетную прочность на сдвиг. Комбинируя вклад бетона и арматурной стали (хомуты, связи или спирали), можно рассчитать номинальную прочность на сдвиг бетонной детали, усиленной

FRP. Вклад системы FRP уменьшается на понижающий коэффициент  $\psi_f$ , как в формуле 2.12.

Таблица 2.2 – Рекомендуемые дополнительные понижающие коэффициенты для поперечной арматуры FRP

Коэффициент снижения прочности, $\psi_f$	Схемы обертывания для усиления на сдвиг
$\psi_f=0,95$	Полностью завернутые члены
$\psi_f=0,85$	Трехсторонняя и двухсторонняя схемы

$$\phi V = \phi(\psi_f V_f + V_S + V_C). \quad (2.12)$$

### **Вклад FRP в прочность на сдвиг**

Размерные факторы, используемые в расчетах прочности при сдвиге для ламинатов FRP, показаны на рисунке 2.3. На основе ориентации волокон и предполагаемой картины разрушения рассчитывается вклад системы FRP в прочность на сдвиг члена. Расчет силы, вызванной растягивающим напряжением в FRP над гипотетической трещиной, покажет прочность на сдвиг, обеспечиваемую арматурой. Затем формула 2.13 обеспечивает вклад сдвиговой арматуры FRP.

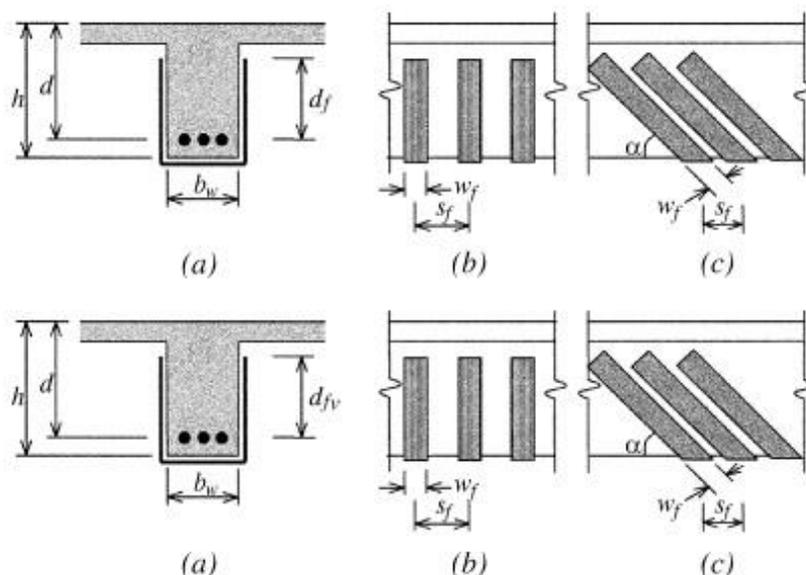


Рисунок 2.3. Иллюстрация размерных факторов, используемых в расчетах прочности на сдвиг для усиления, модернизации или ремонта с использованием ламинатов FRP

$$V_f = \frac{A_f E_f \varepsilon_{fe} (\sin \beta + \cos \beta) d}{S_f}, \quad (2.13)$$

где  $A_f$  – площадь внешней арматуры из стеклопластика, мм<sup>2</sup>, по формуле 2.14;

$\beta$  – угол наклона FRP;

$S_f$  – ширина FRP, мм.

$$A_f = 2nt_f w_f, \quad (2.14)$$

где  $n$  – количество листов FRP;

$t_f$  – толщина FRP, мм;

$w_f$  – ширина армирующих слоев FRP, мм.

Элементы, которые были полностью обернуты. Для железобетонных элементов колонн и балок, которые были полностью покрыты FRP, было замечено, что потеря блокировки бетонного заполнителя происходит при напряжениях волокна ниже, чем предельное напряжение волокна. Для элементов, которые могут быть полностью завернуты в FRP в соответствии с формулой 2.15, максимальная деформация, используемая в конструкции, должна поддерживаться на уровне 0,4%, чтобы предотвратить этот вид отказа.

$$\varepsilon_{fe} = 0.004 \leq 0,75\varepsilon_{fu}, \quad (2.15)$$

Было замечено, что системы FRP со склеенными лицевыми слоями или склеенными U-образными обмотками, которые не полностью окружают секцию (двух- и трехсторонняя обмотка), отслаиваются от бетона до того, как секция теряет сцепление с заполнителем. Чтобы оценить полезность этих систем и достижимый эффективный уровень деформации, были исследованы напряжения сцепления. Используя коэффициент уменьшения связи  $K_v$ , подходящий для сдвига по формуле 2.16, вычисляется эффективная деформация:

$$\varepsilon_{fe} = K_v \varepsilon_{fu} \leq 0,004. \quad (2.16)$$

Коэффициент уменьшения сцепления зависит от жесткости ламината, метода обертывания и прочности бетона. По формуле 2.17 можно рассчитать коэффициент уменьшения связи:

$$K_v = \frac{k_1 k_2 l_e}{11900 \varepsilon_{fu}} \leq 0,75, \quad (2.17)$$

Большая часть напряжения связи сохраняется по всей длине активной связи ( $l_e$ ). Длина рассчитывается по формуле 2.18:

$$l_e = \frac{23300}{(n_f t_f E_f)^{0.58}}. \quad (2.18)$$

Коэффициент уменьшения связи также зависит от двух коэффициентов модификации ( $k_1$  и  $k_2$ ), которые, соответственно, учитывают прочность бетона и тип применяемой схемы обертывания, формулы 2.19 и 2.20.

$$k_1 = \left(\frac{f_c}{27}\right)^{2/3} \quad (2.19)$$

$$k_2 = \frac{(d - l_e)}{d} \quad (2.20)$$

### ***Вывод***

В данной главе рассмотрены способы усиления железобетонной балки композиционными материалами в направлении действия изгибающего момента, а также в направлении сдвигающей силы.

### **Глава 3. Практическое применение методов усиления железобетонных балок композитными материалами на примере торгового центра в Ираке и их технико-экономическое обоснование**

#### **3.1 Материалы, используемые для усиления балок**

В ходе исследования для усиления балок использовались различные материалы, которые характеризуются следующими данными.

В частности, были использованы пластины из углеродного волокна типа (Sika® CarboDur® S512), которые представляют собой ламинаты из полимера, армированного углеродным волокном (CFRP) в соответствии свойствам материала, приведенным в таблице 3.1 [43].

Таблица 3.1 – Механические и физические свойства углеродного волокна Sika® CarboDur® S512

<b>Название характеристики</b>	<b>Единица измерения</b>	<b>Оценка характеристики</b>
Ширина	мм	50
Толщина	мм	1,2
Прочность на растяжение	МПа	3100
Модуль упругости при растяжении	МПа	160000
Удлинение при разрыве при растяжении	%	1,7

Использовалась ткань из углеродного волокна типа (SikaWrap®-530 C), представляющая собой ткань из углеродного волокна однонаправленного плетения,

которая применяется для мокрого нанесения согласно свойствам материала, приведенным в таблице 3.2 [12].

Таблица 3.2 – Механические и физические свойства углеродного волокна SikaWrap®-530 C

<b>Название характеристики</b>	<b>Единица измерения</b>	<b>Оценка характеристики</b>
Ширина	мм	400
Толщина	мм	0,29
Прочность на растяжение	МПа	4900
Модуль упругости при растяжении	МПа	230000
Удлинение при разрыве при растяжении	%	1,7

Кроме того, использовалась ткань из углеродного волокна типа (SikaWrap®-301 C), представляющая собой однонаправленную тканную ткань из углеродного волокна для процесса мокрого нанесения согласно свойствам материала, приведенным в таблице 3.3 [50].

Таблица 3.3 – Механические и физические свойства углеродного волокна SikaWrap®-301 C

<b>Название характеристики</b>	<b>Единица измерения</b>	<b>Оценка характеристики</b>
Ширина	мм	500
Толщина	мм	0,29
Прочность на растяжение	МПа	4900
Модуль упругости при растяжении	МПа	230000
Удлинение при разрыве при растяжении	%	1,7

Были использованы стержни из углеродного волокна типа (стержень Sika® CarboDur® 1/2 дюйма), а для армирования бетона – стержни из полимера, армированного углеродным волокном (CFRP). С эпоксидной смолой для крепления

стержней обычно используется технология Near Surface Mounted (NSM) в соответствии со свойствами материала, приведенными в таблице 3.4 [37].

Таблица 3.4 – Механические и физические свойства стержня Sika® CarboDur® 1/2 дюйма из углеродного волокна

Название характеристики	Единица измерения	Оценка характеристики
Диаметр стержня	мм	12
Прочность на растяжение	МПа	3100
Модуль упругости при растяжении	МПа	142000
Удлинение при разрыве при растяжении	%	0,8

Связующий материал типа (Sikadur®-330) представляет собой двухкомпонентную, не содержащую растворителей, тиксотропную пропиточную смолу/клей на основе эпоксидной смолы, согласно свойствам материала, приведенным в таблице 3.5 [54].

Таблица 3.5 – Механические и физические свойства для Sikadur®-330

Название характеристики	Единица измерения	Оценка характеристики
Модуль упругости при изгибе	МПа	3800
Прочность на растяжение	МПа	30
Модуль упругости при растяжении	МПа	4500
Удлинение при разрыве при растяжении	%	0,9 (7 дней при +23°C)

Из данных таблицы 5 видно, что модуль упругости при изгибе 3800 МПа, предел прочности при растяжении 30 МПа, модуль упругости при растяжении 4500 МПа и удлинение при разрыве 0,9% (7 дней при +23 °C).

### 3.2 Расчет по прочности сечения балки

По конструктивным планам здания размеры сечения балки принимаем на шестой этаж торгового центра города Рамади на примере торгового центра Аль-Салам и пронумеруем её (6-3В) ( $b = 400$  мм,  $h = 600$  мм,  $a = 40$  мм,  $l = 7,25$  м), рисунок 3.1.

Арматура находится в середине пространства, площадь сечения  $A_s = 1924,4$  мм<sup>2</sup> при растяжении ( $2\text{Ø}25+3\text{Ø}20$ ) и, соответственно,  $A_s' = 981,8$  мм<sup>2</sup> при ( $2\text{Ø}25$ ) и при напряжении  $A = 410$  МПа.

Прочность на сжатие по данным испытаний бетона, взятых для исследуемого здания, составляет ( $f_c = 31,3$  МПа).

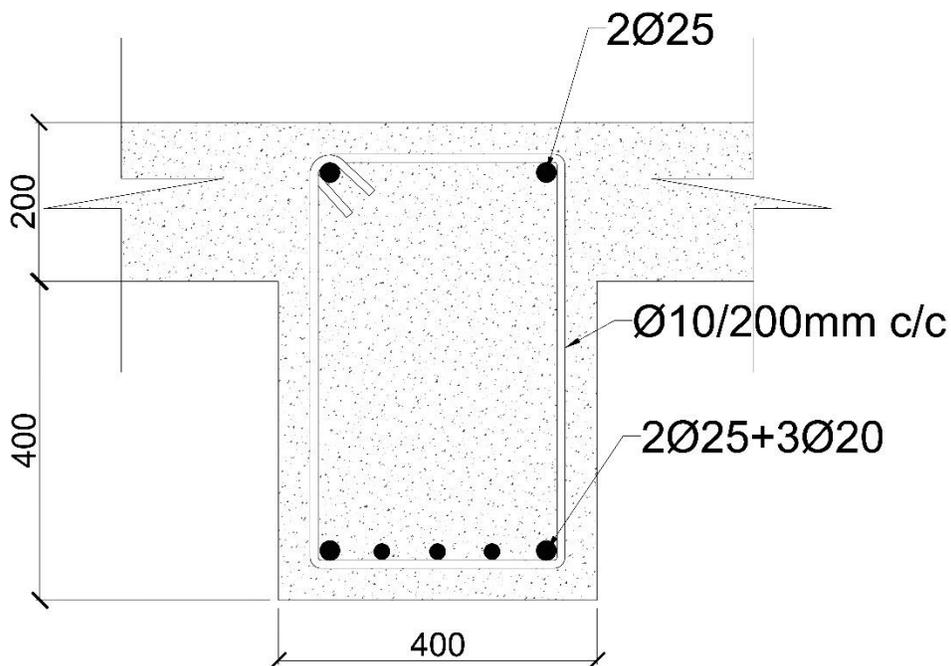


Рисунок 3.1. Сечение балки

В таблице 5 приведены существующие нагрузки и соответствующие им моменты на балку площадью сечения (600\*400) мм.

Мертвые и динамическая нагрузки были взяты из консультационного офиса, контролирующего усиление здания (Инженерно-консультационное офис Al-Aseel).

С помощью программы расчета конструкций (STAAD.Pro CONNECT Edition V22) были найдены моменты на балке = 397 кН · м (рисунок 3.2).

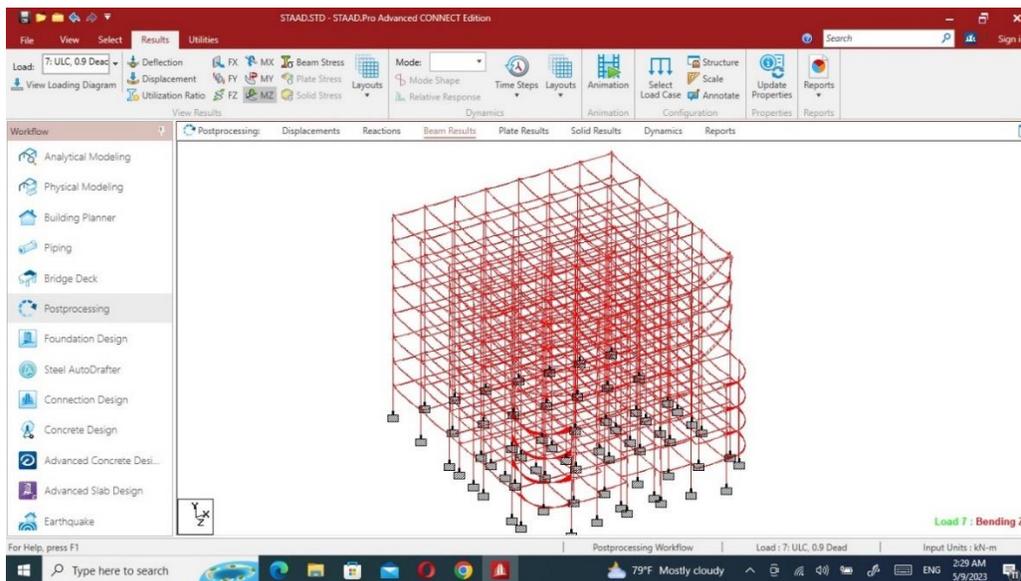


Рисунок 3.2. Анализ исходных нагрузок с помощью программы (STAAD.Pro CONNECT Edition V22)

В таблице 3.6 приведены нагрузки, которые применялись, а также перечислены загрузки согласно (ACI 318-14).

Таблица 3.6 – Нагрузки и соответствующие моменты на балку площадью сечения (600\*400) мм

Нагрузка/момент	Существующие нагрузки/моменты
Мертвые нагрузки $w_{DL}$ , кН/м	52
Динамическая нагрузка $w_{LL}$ , кН/м	60
Нефакторизованные нагрузки ( $w_{DL} + w_{LL}$ ), кН/м	112
Неусиленный предел нагрузки ( $1,1w_{DL} + 0,75w_{LL}$ )	NA
Факторные нагрузки ( $1,2w_{DL} + 1,6w_{LL}$ ), кН/м	158,4
Момент статической нагрузки $M_{DL}$ , кН · м	131
Момент динамической нагрузки $M_{LL}$ , кН · м	151
Сервисно-нагрузочный момент $M_s$ , кН · м	281
Неусиленный предел момента ( $1,1M_{DL} + 0,75M_{LL}$ )	NA
Факторный момент $M_u$ , кН · м	397

### 3.2.1. Расчет усиления конструкции балки углеродными ламелями

#### *Определяем параметры материала конструкции FRP-системы*

Для усиления балки используем (FRP) типа (Sika® CarboDur® S512), толщиной (1.2 мм) и шириной (50 мм) в один слой и со следующими свойствами:

$$E_{fu} = 160000 \text{ МПа}$$

$$\varepsilon_{fu} = 0.0170$$

Поскольку мы будем использовать материал из CFRP, а балка расположена во внутреннем пространстве и в соответствии с таблицей 2.1, коэффициент снижения воздействия на окружающую среду равен (0.95). Расчеты проводятся по формулам 2.1, 2.2.

$$f_{fu} = (0.95) * (3100) = 2945 \text{ МПа}$$

$$\varepsilon_{fu} = (0.95) * (0.0170) = 0.01615$$

### **Определяем проектную нагрузку системы FRP**

Расчетная деформация FRP с учетом режима разрушения при отслоении  $\varepsilon_{fd}$  рассчитывается по формуле 2.3.

$$\varepsilon_{fd} = 0.41 \sqrt{\frac{31,3}{3(160000)(1,2)}} = 0,00302 \leq 0.9(0,01615) = 0,014535,$$

### **Определяем возможный уровень деформации в арматуре FRP**

Эффективный уровень деформации в FRP может быть найден по формуле 2.4:

$$\varepsilon_{fe} = 0,003 \left( \frac{600 - 109,5}{109,5} \right) - 0,0004 = 0,013 > 0,00370,$$

$$\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{fd} = 0.00370$$

**Определяем существующее состояние деформации на софите (формулы 2.5, 2.6).**

$$K = 0.334$$

$$I_{cr} = 5159298786 \text{ мм}^4$$

$$E_c = 4,700 \sqrt{f_c'} = 4,700 * \sqrt{31,3} = 26,3 \text{ Н/мм}^2$$

$$\varepsilon_{bi} = \frac{131(600 - 0,334 * 547,5)}{5159298786 * 26,3} = 0,0004,$$

**Рассчитаем деформацию существующей арматурной стали (формулы 2.7, 2.8).**

$$f_{fe} = 160 * 0,00370 = 0.592 \text{ кН/мм}^2$$

$$\varepsilon_s = (0,00370 - 0,0004) \left( \frac{547,5 - 109,5}{600 - 109,5} \right) = 0,00294$$

Поскольку второй параметр в данной формуле контролирует уровень деформации в арматуре, то отслоение FRP будет в режиме отказа для заданной глубины нейтральной оси. Разрушение бетона было бы в режиме отказа, если бы применялось первое выражение. Деформация бетона при разрушении  $\varepsilon_c$  может

быть меньше 0,003 и может быть рассчитана с использованием сопоставимых треугольников, исходя из формулы 2.8 по следующей формуле 3.1, поскольку FRP регулирует разрушение секции.

$$\varepsilon_c = (\varepsilon_{fe} - \varepsilon_{bi}) \left( \frac{c}{d_f - c} \right), \quad (3.1)$$

$$\varepsilon_c = (0,00370 - 0,0004) \left( \frac{109,5}{600 - 109,5} \right) = 0,00074$$

**Рассчитаем уровень напряжения в арматурной стали и FRP (формула 2.9).**

$$f_s = 200 * 0,00294 * 1000 = 588 > 413 \text{ кН/мм}^2$$

$$f_s = 413 \text{ КН/мм}^2$$

**Рассчитаем равнодействующую внутренней силы и проверим равновесие внутренних сил с определением уровня напряжения в FRP и напряжения в стеклопластиковой и стальной арматуре для предполагаемой глубины нейтральной оси, используя уравнение 2.10.**

ACI 318 можно использовать для определения коэффициентов блока напряжений бетона. Основываясь на параболическом уравнении напряжения-деформации для бетона, приблизительные коэффициенты блокировки напряжения могут быть получены следующим образом, используя уравнение 2.10:

$$c = 0,20d = 0,20 (547,5) = 109,5 \text{ мм}$$

Свойства существующей предварительно напряженной стали:

$$A_s (2\emptyset 25 + 3\emptyset 20) = 1924,4 \text{ мм}^2$$

Армирующие свойства FRP, связанного снаружи:

$$A_f = n t_f w_f,$$

$$A_f = (3)(1,2)(50) = 180 \text{ мм}^2$$

$$\varepsilon'_c = \frac{1,7 f_c'}{E_c} = \frac{1,7(31,3)}{26295} = 0,002023,$$

$$\beta_1 = \frac{4\varepsilon'_c - \varepsilon_c}{6\varepsilon'_c - \varepsilon_c} = \frac{4(0,002023) - (0,00074)}{6(0,002023) - (0,00074)} = 0,645,$$

$$\alpha_1 = \frac{3\varepsilon'_c \varepsilon_c - \varepsilon_c^2}{6\beta_1 \varepsilon_c'^2} = \frac{3(0,00074)(0,002023) - (0,00074)^2}{3(0,6)(0,002023^2)} = 0,535,$$

Начальная оценка «с» проверяется с помощью уравнения для обеспечения баланса сил.

$$c = \frac{A_s f_s + A_f f_{fe}}{\alpha_1 f'_c \beta_1 b} = \frac{(1924,4)(413) + (180)(592)}{(0,535)(31,3)(0,645)(400)} = 208 \text{ мм} \neq 109,5,$$

Снова оценим «с» и продолжим шаги с 6 по 9, пока не достигнем равновесия.

***Регулируем «с» до тех пор, пока не будет достигнуто равновесие сил***

Шаги с 6 по 9 повторялись несколько раз с вещественными значениями «с» до тех пор, пока не было достигнуто равновесие. Результаты последней итерации таковы.

$$\beta_1 = 0,623$$

$$c = 180,7 \text{ мм}$$

***Рассчитаем компоненты прочности на изгиб***

Дополнительный понижающий коэффициент,  $\psi_f = 0,85$ , применяется к вкладу системы FRP (таблица 2.2).

Расчетная прочность на изгиб определяется по формуле 2.11.

Вклад стали в изгиб:

$$M_n = (1924,4)(413) \left( 547,5 - \frac{(0,623)(180,7)}{2} \right) + 0,85(180)(592) \left( 600 - \frac{(0,623)(180,7)}{2} \right)$$

$$M_n = 440,3 \text{ кН} \cdot \text{м},$$

***Рассчитаем расчетную прочность сечения на изгиб***

$$\phi M_n = 0,9(440,3),$$

$$\phi M_n = 397 \text{ кН} \cdot \text{м} \geq M_u = 397 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

### 3.2.2. Расчет усиления конструкции балки углеродными тканями

#### ***Определяем параметры материала конструкции FRP-системы***

Для усиления балки используем FRP типа (SikaWrap-301C), толщиной (0.167 мм) и шириной (400 мм) в один слой со следующими свойствами:

$$E_{fu} = 230000 \text{ МПа}$$

$$\varepsilon_{fu} = 0.0170$$

$$f_{fu}^* = 4900 \text{ МПа}$$

Поскольку мы будем использовать материал из CFRP, а балка расположена во внутреннем пространстве в соответствии с таблицей 2.1, коэффициент снижения воздействия на окружающую среду равен (0.95) рассчитываем предел прочности при растяжении стеклопластика (формула 2.1) и разрывную деформацию стеклопластиковой арматуры (формула 2.2).

$$f_{fu} = (0.95) * (4900) = 4655 \text{ МПа}$$

$$\varepsilon_{fu} = (0.95) * (0.0170) = 0.01615$$

#### ***Определяем проектную нагрузку системы FRP.***

Расчетная деформация FRP с учетом режима разрушения при отслоении  $\varepsilon_{fd}$  определяется по формуле 2.3.

$$\varepsilon_{fd} = 0.41 \sqrt{\frac{31,3}{1(230000)(0,167)}} = 0.011 \leq 0.9(0,01615) = 0,014535,$$

#### ***Определяем возможный уровень деформации в арматуре FRP.***

Эффективный уровень деформации в FRP может быть найден по формуле 2.4:

$$\varepsilon_{fe} = 0,003 \left( \frac{600 - 109,5}{109,5} \right) - 0,0004 = 0,013 > 0,011,$$

$$\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{fd} = 0.011$$

**Определяем существующее состояние деформации на софите (формулы 2.5, 2.6).**

$$K = 0.334$$

$$I_{cr} = 5159298786 \text{ мм}^4$$

$$E_c = 4,700 \sqrt{f_c'} = 4,700 * \sqrt{31,3} = 26,3 \text{ Н/мм}^2$$

$$\varepsilon_{bi} = \frac{131(600 - 0,334 * 547,5)}{5159298786 * 26,3} = 0,0004,$$

**Рассчитаем деформацию существующей арматурной стали (формулы 2.7, 2.8).**

$$f_{fe} = 239 * 0,011 = 2.53 \text{ кН/мм}^2$$

$$\varepsilon_s = (0,011 - 0,0004) \left( \frac{547,5 - 109,5}{600 - 109,5} \right) = 0,0095$$

Поскольку второй параметр в данной формуле контролирует весь процесс, отслоение FRP будет в режиме отказа для заданной глубины нейтральной оси. Разрушение бетона было бы в режиме отказа, если бы применялось первое выражение. Деформация бетона при разрушении  $\varepsilon_c$  может быть меньше 0,003 и может быть рассчитана с использованием сопоставимых треугольников исходя из формулы 2.8 по формуле 3.1, поскольку FRP регулирует разрушение секции.

$$\varepsilon_c = (0,011 - 0,0004) \left( \frac{109,5}{600 - 109,5} \right) = 0,0024.$$

**Рассчитаем уровень напряжения в арматурной стали и FRP по формуле 2.9.**

$$f_s = 200 * 0,0095 * 1000 = 1900 > 413 \text{ кН/мм}^2$$

$$f_s = 413 \text{ кН/мм}^2$$

**Рассчитаем равнодействующую внутренней силы и проверим равновесие.** ACI 318 можно использовать для определения коэффициентов блока напряжений

бетона. Основываясь на параболическом уравнении напряжения-деформации для бетона, приблизительные коэффициенты блокировки напряжения могут быть получены следующим образом, используя уравнение 2.10:

$$c = 0,20d = 0,20 (547,5) = 109,5 \text{ мм}$$

Свойства существующей предварительно напряженной стали:

$$A_s (2\emptyset 25 + 3\emptyset 20) = 1924,4 \text{ мм}^2$$

Армирующие свойства FRP, связанного снаружи:

$$A_f = n t_f w_f,$$

$$A_f = (1)(0,167)(400) = 66,8 \text{ мм}^2$$

$$\varepsilon'_c = \frac{1.7 f_c'}{E_c} = \frac{1.7(31.3)}{26295} = 0,002023,$$

$$\beta_1 = \frac{4\varepsilon'_c - \varepsilon_c}{6\varepsilon'_c - \varepsilon_c} = \frac{4(0,002023) - (0,0024)}{6(0,002023) - (0,0024)} = 0,59,$$

$$\alpha_1 = \frac{3\varepsilon'_c \varepsilon_c - \varepsilon_c^2}{6\beta_1 \varepsilon_c'^2} = \frac{3(0,0024)(0,002023) - (0,0024)^2}{3(0,6)(0,002023^2)} = 1,22,$$

Начальная оценка «с» проверяется с помощью уравнения для обеспечения баланса сил.

$$c = \frac{A_s f_s + A_f f_{fe}}{\alpha_1 f'_c \beta_1 b} = \frac{(1924,4)(413) + (66,8)(2530)}{(1,22)(31,3)(0,59)(400)} = 107 \text{ мм} \neq 109,5,$$

Снова оцениваем «с» и продолжаем шаги с 6 по 9, пока не достигнем равновесия.

***Регулируем «с» до тех пор, пока не будет достигнуто равновесие сил***

Шаги с 6 по 9 повторялись несколько раз с вещественными значениями «с» до тех пор, пока не было достигнуто равновесие. Результаты последней итерации таковы.

$$\beta_1 = 0,59$$

$$c = 108,38 \text{ мм}$$

**Рассчитаем компоненты прочности на изгиб.** Дополнительный понижающий коэффициент,  $\psi_f = 0,85$  (таблица 2.2), применяется к вкладу системы FRP.

Расчетная прочность на изгиб рассчитывается по формуле 2.11.

Вклад стали в изгиб:

$$M_n = (1924,4)(413) \left( 547,5 - \frac{(0,59)(108,38)}{2} \right) + 0,85(66,8)(2530) \left( 600 - \frac{(0,59)(108,38)}{2} \right)$$
$$M_n = 491,3 \text{ кН} \cdot \text{м},$$

**Рассчитаем расчетную прочность сечения на изгиб**

$$\phi M_n = 0,9(491,3),$$

$$\phi M_n = 442,2 \text{ кН} \cdot \text{м} > M_u = 397 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

### **3.2.3. Расчет усиления конструкции балки углепластиковыми стержнями**

**Определяем параметры материала конструкции FRP-системы**

Основное армирование FRP: 2 (стержень Sika® CarboDur® 1/2 дюйма).

Минимальное расстояние в свету до края железобетонного элемента = 76,2 мм.

Минимальное свободное расстояние между последовательными профилями FRP = 38,1 мм.

$$E_{fu} = 142000 \text{ МПа}$$

$$\epsilon_{fu} = 0.0080$$

$$f_{fu}^* = 3100 \text{ МПа}$$

Поскольку мы будем использовать материал из CFRP, а балка расположена во внутреннем пространстве и в соответствии с таблицей 2.1, коэффициент снижения воздействия на окружающую среду равен (0.95) рассчитаем предел прочности при растяжении стеклопластика (формула 2.1) и разрывную деформацию стеклопластиковой арматуры (формула 2.2).

$$f_{fu} = (0.95) * (3100) = 2945 \text{ МПа}$$

$$\varepsilon_{fu} = (0.95) * (0.0080) = 0.0076$$

### ***Определяем возможный уровень деформации в арматуре FRP***

Эффективный уровень деформации в FRP может быть найден по формуле 2.4:

$$\varepsilon_{fe} = 0,003 \left( \frac{606,25 - 109,5}{109,5} \right) - 0,0004 = 0,0132 > 0,00532,$$

Безразмерный коэффициент, зависящий от связи, для изгиба  $k_m$  составляет 0,7, согласно указаниям производителя.

$$k_m = 0.7$$

$$k_m * \varepsilon_{fd} = (0,7) (0,0076) = 0,00532,$$

Следовательно,  $\varepsilon_{fe} = 0,00532$  (Способ разрушения – отслоение стеклопластика).

***Определяем существующее состояние деформации на софите (формулы 2.5, 2.6).***

$$K = 0.334$$

$$I_{cr} = 5159298786 \text{ мм}^4$$

$$E_c = 4,700 \sqrt{f_{c'}} = 4,700 * \sqrt{31,3} = 26,3 \text{ Н/мм}^2$$

$$\varepsilon_{bi} = \frac{131(606,25 - 0,334 * 547,5)}{5159298786 * 26,3} = 0,0004,$$

***Рассчитаем деформацию существующей арматурной стали (формулы 2.7, 2.8).***

$$f_{fe} = 142000 * 0,00532 = 2,53 \text{ кН/мм}^2$$

$$\varepsilon_s = (0,00532 - 0,0004) \left( \frac{547,5 - 109,5}{606,25 - 109,5} \right) = 0,00434$$

Поскольку второй параметр в данной формуле контролирует, то отслоение FRP будет в режиме отказа для заданной глубины нейтральной оси. Разрушение бетона было бы в режиме отказа, если бы применялось первое выражение. Деформация бетона при разрушении  $\varepsilon_c$  может быть меньше 0,003 и может быть рассчитана с использованием сопоставимых треугольников исходя из формулы 2.8 по формуле 3.1, поскольку FRP регулирует разрушение секции.

$$\varepsilon_c = (0,00532 - 0,0004) \left( \frac{109,5}{606,25 - 109,5} \right) = 0,00105$$

***Рассчитаем уровень напряжения в арматурной стали и FRP (формула 2.9).***

$$f_s = 200 * 0,00961 * 1000 = 868 > 413 \text{ кН/мм}^2$$

$$f_s = 413 \text{ кН/мм}^2$$

***Рассчитаем равнодействующую внутренней силы и проверим равновесие.***

ACI 318 можно использовать для определения коэффициентов блока напряжений бетона. Основываясь на параболическом уравнении напряжения-деформации для бетона, приблизительные коэффициенты блокировки напряжения могут быть получены следующим образом, используя формулу 2.10:

$$c = 0,20d = 0,20 (547,5) = 109,5 \text{ мм}$$

Свойства существующей предварительно напряженной стали:

$$A_s (2\emptyset 25 + 3\emptyset 20) = 1924,4 \text{ мм}^2$$

Армирующие свойства FRP, связанного снаружи:

$$A_f = n t_f w_f,$$

$$A_f = (2)(126,68) = 253,36 \text{ мм}^2$$

$$\varepsilon'_c = \frac{1.7fc'}{E_c} = \frac{1.7(31.3)}{26295} = 0,002023,$$

$$\beta_1 = \frac{4\varepsilon'_c - \varepsilon_c}{6\varepsilon'_c - \varepsilon_c} = \frac{4(0,002023) - (0,00105)}{6(0,002023) - (0,00105)} = 0,635,$$

$$\alpha_1 = \frac{3\varepsilon'_c\varepsilon_c - \varepsilon_c^2}{6\beta_1\varepsilon_c'^2} = \frac{3(0,00105)(0,002023) - (0,00105)^2}{3(0,6)(0,002023^2)} = 0,715,$$

Начальная оценка «с» проверяется с помощью уравнения для обеспечения баланса сил.

$$c = \frac{A_s f_s + A_f f_{fe}}{\alpha_1 f'_c \beta_1 b} = \frac{(1924,4)(413) + (253,36)(756)}{(0,715)(31,3)(0,635)(400)} = 174 \text{ мм} \neq 109,5,$$

Снова оцениваем «с» и продолжаем шаги с 6 по 9, пока не достигнем равновесия.

***Регулируем «с» до тех пор, пока не будет достигнуто равновесие сил.***

Шаги с 6 по 9 повторялись несколько раз с вещественными значениями «с» до тех пор, пока не было достигнуто равновесие. Результаты последней итерации таковы.

$$\beta_1 = 0,62$$

$$c = 141,3 \text{ мм}$$

***Рассчитаем компоненты прочности на изгиб.***

Дополнительный понижающий коэффициент,  $\psi_f = 0,85$  (таблица 2.1), применяется к вкладу системы FRP.

Расчетная прочность на изгиб рассчитывается по формуле 2.11.

Вклад стали в изгиб:

$$M_n = (1924,4)(413) \left( 547,5 - \frac{(0,62)(141,3)}{2} \right) + 0,85(253,36)(756) \left( 606,25 - \frac{(0,62)(141,3)}{2} \right)$$

$$M_n = 491,8 \text{ кН} \cdot \text{м},$$

### ***Рассчитаем расчетную прочность сечения на изгиб***

$$\phi M_n = 0,9(491,8),$$

$$\phi M_n = 442,6 \text{ кН}\cdot\text{м} > M_u = 397 \text{ кН}\cdot\text{м}$$

### **3.3. Усиление внутренней балки на сдвиг**

Через динамические нагрузки и постоянные нагрузки, воздействующие на изучаемый порог, которые были получены от офиса, осуществляющего надзор за восстановлением торгового центра, были проанализированы силы и получены поперечные силы, действующие на балку (рисунок 3.3).

В соответствии с ACI 318M-19 мы можем найти номинальную прочность на сдвиг, обеспечиваемую бетоном,  $V_c$ , а номинальную прочность на сдвиг, обеспечиваемую стальной арматурой на сдвиг, составляет  $V_s$ .

$$V_c = 0.17\lambda\sqrt{f_c}bw \cdot d,$$

$$V_c = 0,17(1)\sqrt{31,3(400)}(547,5) = 208 \text{ кН}$$

$$V_s = \frac{A_v \cdot f_y \cdot d}{s},$$

$$V_s = \frac{2\left(\frac{\pi}{4}\right)(10)^2(410)(547,5)}{200} = 176,2 \text{ кН}$$

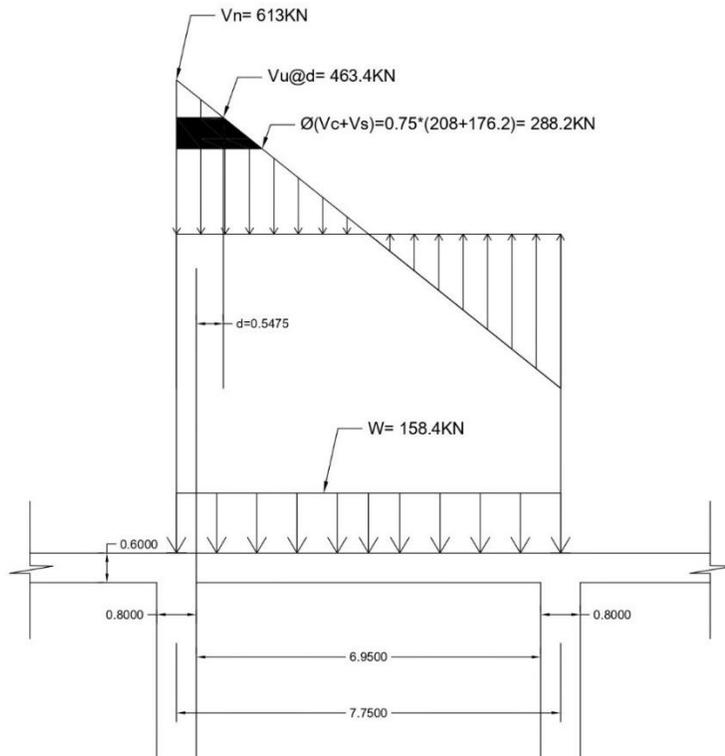


Рисунок 3.3. Диаграмма сдвига, показывающая спрос по сравнению с имеющейся прочностью

### 3.3.1. Усиление с использованием ламинатов FRP при упрочнении на сдвиг под углом 45°

Армирование железобетонной балки для первого случая исследовано углеродистыми листами типа (Sika® CarboDur® S512), как представлено на рисунке 3.4.

В таблице 3.7 представлены характеристики материалов (Sika® CarboDur® S512), используемые для армирования железобетонной балки, полученные от производителя.

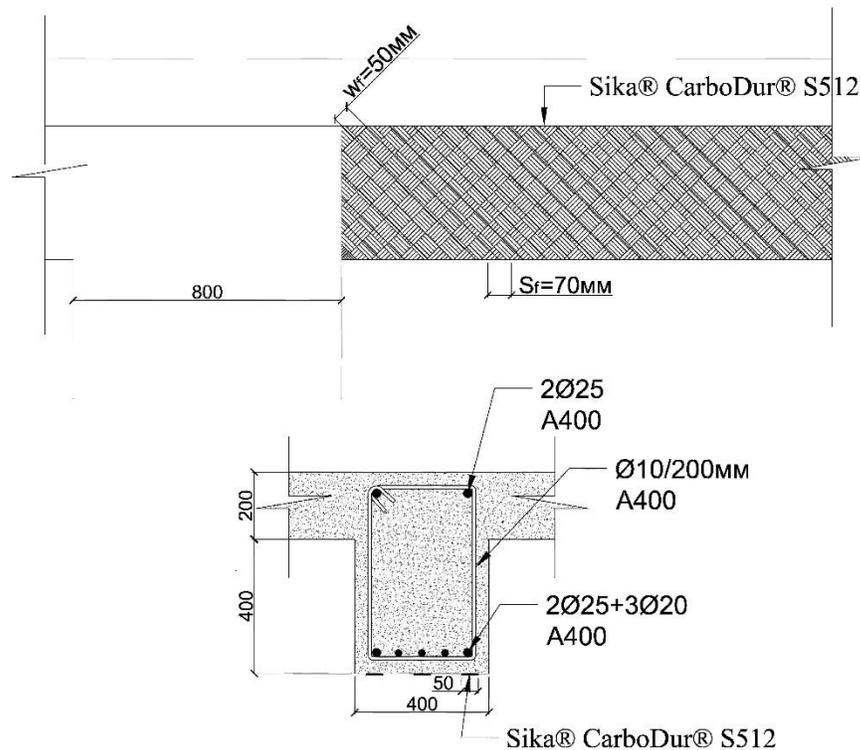


Рисунок 3.4. Размерные переменные, используемые в расчетах прочности на сдвиг для ремонта при использовании ламинатов FRP под углом 45°

Таблица 3.7 – Конфигурация дополнительной поперечной арматуры FRP и свойства системы (45°) типа (Sika® CarboDur® S512)

<i>Показатели, характеризующие дополнительную поперечную арматуру FRP</i>	<i>Величина показателя</i>
$d$ , мм	547.5
$d_{fv}$ , мм	345
$W_f$ (Ширина каждого листа), мм	50
$S_f$ (Промежуток между каждым листом), мм	70
$t_f$ (толщина листа), мм	1.2
$f_{fu}$ , МПа	3100
$\epsilon_{fu}$	0.0170
$E_f$ , МПа	160000

### ***Рассчитываем свойства материала конструкции***

Поскольку здание закрыто и законсервировано, а также в соответствии с требованиями кодекса АСІ, мы используем экологический коэффициент снижения воздействия различных условий окружающей среды  $C_E = 0,95$  в соответствии с таблицей 2.1. Определим предел прочности при растяжении стеклопластика (формула 2.1) и расчетную разрывную деформацию стеклопластиковой арматуры (формула 2.2).

$$f_{fu} = (0,95) * (3,1) = 2,95 \text{ кН/мм}^2$$

$$\varepsilon_{fu} = (0,95) * (0,0170) = 0,0162$$

### ***Рассчитываем эффективный уровень деформации в поперечной арматуре FRP***

Эффективную деформацию U-обертки витков из стеклопластика следует определять с помощью коэффициента уменьшения связи  $k_v$ . Этот коэффициент можно вычислить с помощью формул 2.16–2.20.

$$l_e = \frac{23300}{(2(1,2)(160000))^{0,58}} = 13,5 \text{ мм}$$

$$k_1 = \left[ \frac{31,3}{27} \right]^{\frac{2}{3}} = 1,1$$

$$k_2 = \frac{345 - 13,5}{345} = 0,96$$

$$k_v = \frac{1,1 * 0,96 * 13,5}{11900 * 0,0162} = 0,074 \leq 0,75$$

$$\varepsilon_{fe} = 0,074 * 0,0162 = 0,0012 \leq 0,004$$

### ***Рассчитываем вклад арматуры FRP в прочность на сдвиг***

Площадь поперечной арматуры FRP можно рассчитать по формулам 2.14 и 2.7:

$$A_f = 2 * 2 * 1,2 * 50 = 240 \text{ мм}^2$$

$$f_{fe} = 0,0012 * 160 = 0,192 \text{ кН/мм}^2$$

Сдвиг вклада арматуры FRP может быть затем рассчитан по формуле 2.13:

$$v_f = \frac{360 * 0,154 * (\sin 45 + \cos 45) * 345}{70} = 321 \text{ кН}$$

*Далее рассчитываем прочность на сдвиг сечения балки.* Рассчитываем устойчивость на сдвиг бетонной детали, усиленной FRP, на основе формулы 2.12 с учетом коэффициент снижения прочности  $\psi_f = 0,85$  для U-образных обмоток (таблица 2.2).

$$\phi V_n = 0.75(0.85 * 321 + 208 + 176,2)$$

$$\phi V_n = 492,8 \text{ кН} \geq V_u = 463,4$$

Для усиления балочной конструкции углеродными листами нам потребуется 268 м (CarboDur® S512) при использовании под углом 45°. Поэтому при расчете экономической целесообразности воспользуемся этим методом усиления балочной конструкции.

### **3.3.2. Усиление с использованием тканей FRP при упрочнении на сдвиг под углом 45°**

Армирование железобетонной балки для второго случая исследовано углеродистыми тканями типа (SikaWrap-530C), как на рисунке 3.5.

В таблице 3.8 представлены характеристики материалов (SikaWrap-530C), используемые для армирования железобетонной балки, полученные от производителя.

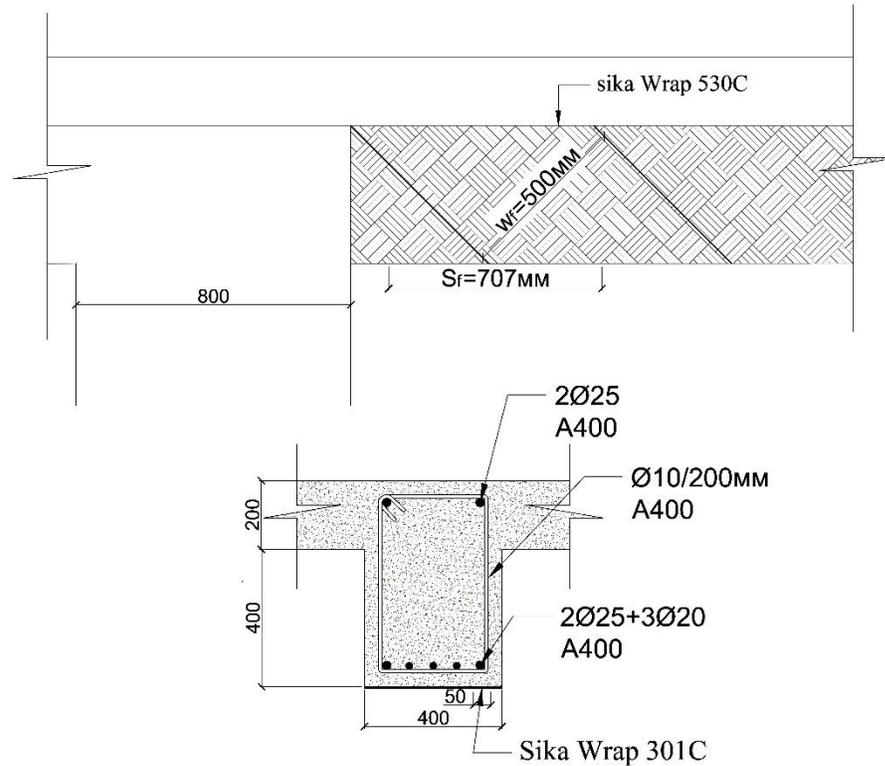


Рисунок 3.5. Размерные переменные, используемые в расчетах прочности на сдвиг для ремонта при использовании тканей FRP под углом  $45^\circ$

Таблица 3.8 – Конфигурация дополнительной поперечной арматуры FRP и свойства системы ( $45^\circ$ ) типа (SikaWrap-530C)

<i>Показатели, характеризующие дополнительную поперечную арматуру FRP</i>	<i>Величина показателя</i>
$D$ , мм	547.5
$d_{fv}$ , мм	355
$W_f$ (Ширина каждого листа), мм	500
$S_f$ (Промежуток между каждым листом), мм	707
$t_f$ (толщина листа), мм	0.29
$f_{fu}$ , МПа	4900
$\epsilon_{fu}$	0.0170
$E_f$ , МПа	230000

*Далее рассчитываем свойства материала конструкции.* Поскольку здание закрыто и законсервировано, а также в соответствии с требованиями кодекса АСІ, мы используем экологический коэффициент снижения воздействия различных условий окружающей среды  $C_E = 0,95$  в соответствии с таблицей 2.1. Определим предел прочности при растяжении стеклопластика (формула 2.1) и расчетную разрывную деформацию стеклопластиковой арматуры (формула 2.2).

$$f_{fu} = (0,95) * (4,9) = 4,66 \text{ кН/мм}^2$$

$$\varepsilon_{fu} = (0,95) * (0,0170) = 0,0162$$

***Рассчитываем эффективный уровень деформации в поперечной арматуре FRP***

Эффективную деформацию U-обертки витков из стеклопластика следует определять с помощью коэффициента уменьшения связи  $k_v$ . Этот коэффициент можно вычислить с помощью формул 2.16–2.20.

$$l_e = \frac{23300}{(4(0,29)(230000))^{0,58}} = 16,6 \text{ мм}$$

$$k_1 = \left[ \frac{31,3}{27} \right]^{\frac{2}{3}} = 1,1$$

$$k_2 = \frac{355 - 16,6}{355} = 0,96$$

$$k_v = \frac{1,1 * 0,96 * 16,6}{11900 * 0,0162} = 0,09 \leq 0,75$$

$$\varepsilon_{fe} = 0,09 * 0,0162 = 0,0015 \leq 0,004$$

***Рассчитываем вклад арматуры FRP в прочность на сдвиг***

Площадь поперечной арматуры FRP можно рассчитать по формулам 2.14 и 2.7, как:

$$A_f = 2 * 4 * 0,29 * 500 = 1160 \text{ мм}^2$$

$$f_{fe} = 0,0015 * 230 = 0,345 \text{ кН/мм}^2$$

*Сдвиг вклада арматуры FRP может быть затем рассчитан по формуле 2.13:*

$$V_f = \frac{1160 * 0,345 * (\sin 45 + \cos 45) * 345}{707} = 284,2 \text{ кН}$$

*Далее рассчитываем прочность на сдвиг сечения балки*

Рассчитываем устойчивость на сдвиг бетонной детали, усиленной FRP, на основе формулы 2.12 с учетом коэффициент снижения прочности  $\psi_f = 0,85$  для U-образных обмоток (таблица 2.2).

$$\Phi V_n = 0,75(0,85 * 284,2 + 208 + 176,2)$$

$$\Phi V_n = 470,0 \text{ кН} \geq V_u = 463,4 \text{ кН}$$

Для усиления балочной конструкции углеродными листами нам потребуется 34 м<sup>2</sup> (SikaWrap-530C) при использовании под углом 45°. Поэтому при расчете экономической целесообразности воспользуемся этим методом усиления балочной конструкции.

#### **3.4. Техничко-экономическое обоснование вариантов усиления балочных элементов здания торгового центра**

Для привязки материалов, рекомендованных для армирования бетонных балок, которые крепятся к самой балке с помощью полимерного клея. Расход данного вещества согласно таблице товара производителя, приведен в таблицах 3.9–3.11.

Таблица 3.9 – Расход полимерного клея при использовании ламинатов углеродного волокна

Ширина пластины CarboDur®, мм	Типичный расход Sikadur®-30, кг/м
50	0.20 – 0.28
60	0.24 – 0.32
80	0.32 – 0.44
90	0.40 – 0.56
100	0.44 – 0.64

Таблица 3.10 – Расход полимерного клея при использовании углепластиковых стержней

Диаметр стержня CarboDur®, мм	Типичный расход Sikadur®-30, кг/м
Sika® CarboDur® BC6	≤ 0.12
Sika® CarboDur® BC8	≤ 0.18
Sika® CarboDur® BC10	≤ 0.24
Sika® CarboDur® BC12	≤ 0.32
Sika® CarboDur® BC16	≤ 0.36

Таблица 3.11 – Расход полимерного клея при использовании тканей углеродного волокна

Сухое нанесение с Sikadur®-330, кг/м <sup>2</sup>	
Первый слой, включая грунтовочный слой	1.0-1.5
Следующие слои	0.8
Влажное нанесение с Sikadur®-300, грунтовка Sikadur®-330, кг/м <sup>2</sup>	
Грунтовочный слой	0.4-0.6
Слой ткани	0.6

***Для усиления конструкции балки углеродными ламелями***

В таблице 3.12 приведен расчет стоимости армирования железобетонной балки углепластиковыми плитами типа (Sika® CarboDur® S512), исходя из действующих на данный момент цен на материалы, используемые при усилении, а также заработной платы рабочих.

Согласно указаниям изготовителя в таблице (3.9), вяжущего материала типа (Sikadur®-30) требуется (0,2-0,28) кг/м при использовании панелей типа (Sika® CarboDur® S512) шириной 50 мм.

- $(20 + 268) * 0,28 = 80$  кг;
- для подготовки и очистки балок под армирование требуется один рабочий, ориентировочная стоимость 1000 руб.;
- для установки углепластиковых панелей (Sika® CarboDur® S512) для усиления балок нужны два рабочих, один стоимостью 4000 руб.

Таблица 3.12 – Расчет количества материалов и цены для усиления конструкции балки углеродными ламелями

№ п/п	Виды работ	Ед. измер.	Количество	Цена единицы, руб.	Общая стоимость, руб.
1.	Очистка балки перед началом работы	м <sup>2</sup>	2,18	-	1,000
2.	Sika® CarboDur® S512 для усиления балки в продольном направлении	м	20	1,800	36,000
	Sika® CarboDur® S512 для усиления балки в поперечном направлении	м	268	1,800	482,40
3.	Связующий материал Sikadur®-30	кг	80	993	79,440
4.	Стоимость монтажных работ для (Sika® CarboDur® S512)	руб.	-	-	4000
	Всего:	руб.			602,840

### *Для усиления конструкции балки углеродными тканями*

В таблице 3.13 приведен расчет стоимости армирования железобетонной балки углепластиковыми тканями типа (SikaWrap 530 C/500) и (SikaWrap 301 C), исходя из действующих на данный момент цен на материалы, используемые при усилении, а также заработной платы рабочих.

Согласно указаниям изготовителя в таблице (3.11), вяжущего материала типа (Sikadur®-300) требуется (1,0-1,5) кг/м при использовании тканей типа (SikaWrap-301C шириной 400 мм и SikaWrap 530C шириной 500 мм).

- $(3 + 34) * 1,5 = 55,5$  кг;
- для подготовки и очистки балок под армирование требуется один рабочий, ориентировочная стоимость 1000 руб.;

- для установки углепластиковых тканей (SikaWrap-301С и SikaWrap 530С) для усиления балок нужны два рабочих, один стоимостью 4000 руб.

Таблица 3.13 – Расчет количества материалов и цены для усиления конструкции балки углеродными тканями

№ п/п	Виды работ	Ед. измер.	Количество	Цена единицы, руб.	Общая стоимость, руб.
1.	Очистите балку перед началом работы	м <sup>2</sup>	2.18	-	1,000
2.	SikaWrap-301С для усиления балок в продольном направлении	м <sup>2</sup>	3	4,896	14,688
	SikaWrap-530С для усиления балок в поперечном направлении	м <sup>2</sup>	34	8,018	272,612
3.	Связующий материал Sikadur®-300	кг	55,5	3,408	189,144
4.	Стоимость монтажных работ для (Sika® CarboDur® S512)	руб.	-		4,000
	Всего:	руб.			481,444

***Для усиления конструкции балки углепластиковыми стержнями***

В таблице 3.14 приведен расчет стоимости армирования железобетонной балки стержнями из углеродного волокна типа (Sika® CarboDur® BC12), исходя из действующих на данный момент цен на материалы, используемые при усилении, а также заработной платы рабочих.

Согласно указаниям изготовителя в таблице (3.10) и (3.9), вяжущего материала типа (Sikadur®-330) требуется ( $\leq 0.32$ ) кг/м при использовании стержней типа (Sika® CarboDur® ½) и (1,0-1,5) кг/м при использовании тканей типа (SikaWrap-530С).

- Sikadur®-330 = 73кг;
- для подготовки и очистки балок под армирование требуется один рабочий, ориентировочная стоимость 1000 руб.;

- для установки углепластиковых стержней (Sika® CarboDur® ½ и SikaWrap 530C) для усиления балок нужны два рабочих, один стоимостью 5000 руб.

Таблица 3.14 – Расчет количества материалов и цены для усиления балки поверхностными стержнями из углеродного волокна

№ п/п	Виды работ	Ед. измер.	Количество	Цена единицы, руб.	Общая стоимость, руб.
1.	Очистите балку перед началом работы и копаем место армирования	м <sup>2</sup>	2.18	-	1,000
2.	Стержни из углеродного волокна типа (Sika® CarboDur® 1/2)	м	14	8,600	6,586
	SikaWrap-530C для усиления балок в поперечном направлении	м <sup>2</sup>	34	8,018	272,612
3.	Заполнение канавок будет выполнено с помощью Sikadur®-330.	кг	73	2,556	186,588
4.	Стоимость монтажных работ для (Sika® CarboDur® S512) и стержней из стекловолокна	руб.	-	-	5,000
	Всего:	руб.			471,786

На рисунке 3.6 показано сравнение цен на железобетонные балки, усиленные углепластиковыми панелями, тканями и стержнями в российских рублях. Из представленных данных видно, что стоимость конструкции усиленной балки с использованием стержней и тканей из углеродного волокна ниже в сравнении с пластинами из углеродного волокна. В то же время конструкция усиленной балки с использованием стержней из углеродного волокна дешевле, чем с применением тканей на 9 658 руб. или на 2%, но усиление тканью из углеродного волокна считается наиболее простым в монтаже, не требует большого количества рабочей силы, высокого мастерства, а также не требует много времени на монтаж. Поэтому усиление балок с использованием тканей из углеродного волокна принят за основу.

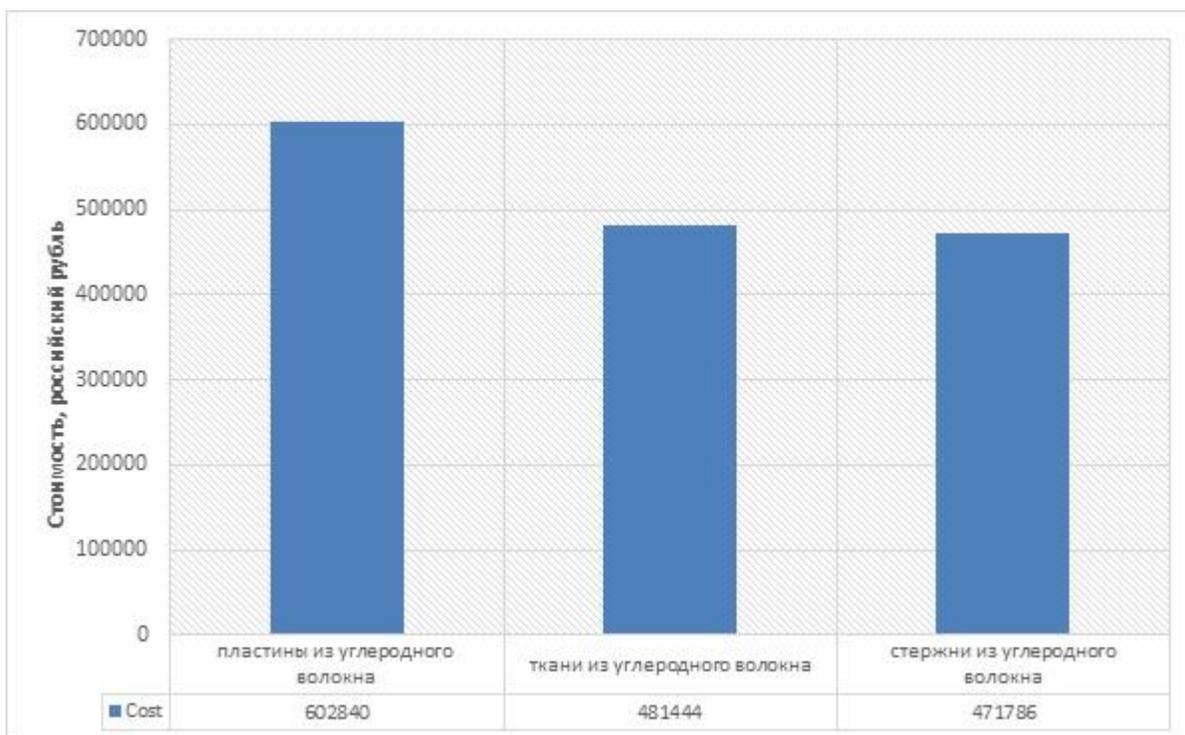


Рисунок 3.6. Сравнение стоимости вариантов усиления железобетонной балки композитными материалами, руб.

По полученным результатам установлено, что усиление железобетонной балки углепластиковыми плитами является наиболее затратным, несмотря на простоту монтажа и не требует больших трудозатрат. Стоимость усиления железобетонной балки составила 602 824 руб., больше, чем усиление балки углеволоконными тканями за 481 396 руб. и больше, чем армирование углеволоконными стержнями за 471 054 руб.

### ***Вывод***

В результате изучения усиления железобетонных балок углепластиковыми плитами, тканями и стержнями из углеродного волокна, а также изучение экономической целесообразности этих трех способов усиления железобетонных балок было установлено, что армирование углепластиковыми тканями является оптимальным с экономической точки зрения.

## Заключение

По результатам исследования были сделаны следующие выводы:

1) Доказана эффективность усиления железобетонной балки тремя изученными способами (пластинами, тканями и стержнями) из углеродного волокна. Это выгоднее с точки зрения увеличения несущей способности железобетонной балки. При использовании трех слоев углепластиковых листов (Sika® CarboDur® S512) шириной 50 мм результирующий изгибающий момент составил 397 кН·м, что равно предельному моменту изгиба. При использовании слоя ткани из углеродного волокна (SikaWrap-301C) шириной 400 мм результирующий изгибающий момент составил 442,2 кН·м, что больше предельного момента изгиба на 11,3%. При использовании двух стержней из углеродного волокна (Sika® CarboDur® 1/2) диаметром 12 мм результирующий изгибающий момент составил 442,6 кН·м, что больше предельного момента изгиба на 11,5%.

Также для прочности на сдвиг при использовании (Sika® CarboDur® S512) углеродных листов шириной 50 мм и под углом 45 градусов прочность на сдвиг составила 492,8 кН, что больше максимальной прочности на сдвиг на 6%. При использовании ткани из углеродного волокна (SikaWrap-530C) шириной 500 мм и под углом 45 градусов результирующая сила сдвига составила 470 кН, что больше максимальной силы сдвига на 2%.

2) Одним из преимуществ усиления железобетонных конструкций с использованием углепластиковых панелей является то, что они имеют малый вес, не нарушают архитектурную форму, обладают высокой прочностью, устойчивы к агрессивным средам, не требуют усилий при выполнении. Что касается использования углеродных тканей, то помимо высокой прочности и легкого веса

они не нарушают архитектурный облик и устойчивость к агрессивным средам, не требуют усилий при выполнении, а также легко поддаются формованию. Одним из преимуществ использования стержней из углеродного волокна является то, что они обладают высокой прочностью и малым весом, не нарушают архитектурный облик здания, устойчивы к внешним факторам, так как не видны, а также их устойчивость к агрессивной среде, но требует квалифицированных рабочих для реализации.

3) По полученным результатам установлено, что усиление железобетонной балки углепластиковыми плитами является наиболее затратным, несмотря на простоту монтажа и не требует больших трудозатрат. Стоимость усиления железобетонной балки составила 602 824 руб., больше, чем усиление балки углеволоконными тканями за 121 396 руб. и больше, чем армирование углеволоконными стержнями за 131 054 руб.

4) Усиление железобетонных балок углетканями и углепластиковыми стержнями очень близки по стоимости, но усиление тканями из углеродного волокна считается наиболее простым в монтаже, не требует большого количества рабочей силы, высокого мастерства, а также не требует много времени на монтаж. Поэтому было установлено, что усиление с использованием углепластиковых тканей лучше всего подходит для усиления бетонных балок.

5) Статья под названием «УСИЛЕНИЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК В ПОВРЕЖДЕННОМ ЗДАНИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УГЛЕРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ» была написана в журнале (Russian Journal of Construction Science and Technology) Том 8, № 1 (2022). Статья под названием «ИССЛЕДОВАНИЕ УСИЛЕНИЯ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ БАЛОК КОМПОЗИТНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ» также была представлена в журнал «Академический вестник УралНИИпроект РААСН» и находится в стадии редактирования.

## Библиографический список

1. Бокарев, С. А. Коэффициенты надежности для композиционных материалов, применяемых для усиления железобетонных элементов мостовых конструкций / С. А. Бокарев, Г. М. Власов, А. А. Неровных, Д. Н. Смердов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2012. – № 2. – С. 222–229.
2. Бокарев, С. А. Методика расчета по прочности сечений эксплуатируемых железобетонных пролетных строений, усиленных композитными материалами / С. А. Бокарев, Д. Н. Смердов, А. А. Неровных // Известия вузов. Строительство. – 2010. – № 2. – С. 63–74.
3. Бокарев, С. А. Нелинейный анализ железобетонных изгибаемых конструкций, усиленных композитными материалами / С. А. Бокарев, Д. Н. Смердов // Вестник Томского государственного архитектурно-строительного университета. – 2010. – № 2. – С. 113–125.
4. Бокарев, С. А. Оценка выносливости изгибаемых железобетонных конструкций, усиленных композитными материалами / С. А. Бокарев, Д. Н. Смердов, А. А. Неровных // Дальний Восток. Автомобильные дороги и безопасность движения: междунар. сб. науч. тр. – 2010. – № 10. – С. 287–294.
5. Бокарев, С. А. Управление техническим состоянием искусственных сооружений железных дорог России на основе новых информационных технологий. Новосибирск: Изд-во СГУПС, 2002. – 276 с.
6. Бокарев, С. А. Усиление пролетных строений с использованием композитных материалов / С. А. Бокарев, Д. Н. Смердов, В. П. Устинов, А. Н. Яшнов // Путь и путевое хозяйство. – 2008. – № 6. – С. 30–31.

7. Бокарев, С. А. Экспериментальные исследования изгибаемых железобетонных элементов, усиленных композитными материалами / С. А. Бокарев, Д. Н. Смердов // Известия вузов. Строительство. – 2010. – № 2. – С. 112–124.

8. Бокарев, С. А. Экспериментальные исследования при пониженных и повышенных температурах железобетонных образцов, усиленных полимерными композиционными материалами / С. А. Бокарев, А. Н. Костенко, Д. Н. Смердов, А. А. Неровных // Интернет-журнал «Науковедение». – 2013. – № 3. – С. 1–9.

9. Бокарев С. А., Власов Г. М., Неровных А. А., Смердов Д. Н. Коэффициенты надежности для композиционных материалов, применяемых для усиления железобетонных элементов мостовых конструкций // Вестник ТГАСУ. 2012. № 2. [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/koeffitsienty-nadezhnosti-dlya-kompozitsionnyh-materialov-primenyaemyh-dlya-usileniya-zhelezobetonnyh-elementov-mostovyh> (дата обращения: 20.11.2022).

10. Бренд – образ марки товара, услуги или компании, выделенный потребителем среди конкурирующих марок. Защита принадлежащих компании брендов осуществляется путем их национальной или международной регистрации, что дает право исключительного использования бренда его владельцу. Большая экономическая энциклопедия. Москва: Эксмо, 2008. С. 67.

11. Волик А. Р., Новикова Т. С., Свинцицкий А. А. Усиление изгибаемых железобетонных элементов с применением композитных тканей. – 2018. – С. 128–131.

12. Дьячкова А. А., Кузнецов В. Д. Расчет усиления железобетонных плит углеродными композиционными материалами //Magazine of Civil Engineering. – 2009. – №. 3. – С. 25-28.

13. Есипов С. М. Анализ методик проектирования усиления железобетонных конструкций композитными материалами // Вестник БГТУ имени

В. Г. Шухова. 2015. № 6. [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-metodik-proektirovaniya-usileniya-zhelezobetonnyh-konstruktsiy-kompozitnymi-materialami> (дата обращения: 17.09.2022).

14. Есипов С. М. Анализ методик проектирования усиления железобетонных конструкций композитными материалами //Вестник Белгородского государственного технологического университета им. ВГ Шухова. – 2015. – № 6. – С. 114–118.

15. ИСО 14125:1998 Материалы композиционные полимерные, армированные волокном. Определение свойств при изгибе (ISO 14125:1998 Fibre-reinforced plastic composites – Determination of flexural properties). [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.iso.org/standard/23637.html>.

16. ИСО 14130:1997 Материалы композиционные полимерные армированные волокном. Определение кажущейся межслойной прочности на сдвиг методом испытания коротких балок (ISO 14130:1997 Fibre-reinforced plastic composites – Determination of apparent interlaminar shear strength by short-beam method). [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.iso.org/standard/23642.html>.

17. ИСО 527-4:1997 Пластмассы. Определение механических свойств при растяжении. Ч. 4. Условия испытаний для изотропных и ортотропных пластических композиционных материалов, армированных волокнами (ISO 527-4:1997 Plastics – Determination of tensile properties – Part 4: Test conditions for isotropic and orthotropic fibre-reinforced plastic composites). [Электронный ресурс]. Режим доступа: [https://standartgost.ru/g/ISO\\_527-4:1997](https://standartgost.ru/g/ISO_527-4:1997).

18. ИСО 178:2001 Пластмассы. Определение свойств при изгибе (ISO 178:2001 Plastics – Determination of flexural properties). [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.iso.org/standard/31258.html>.

19. Кракович, И. А. Обзор композитных материалов для усиления железобетонных конструкций [Электронный ресурс] / И. А. Кракович // Молодой ученый. – 2020. – № 20 (310). – С. 115–117. Режим доступа: <https://moluch.ru/archive/310/70074> (дата обращения: 23.05.2021).

20. Михалевич Д. А. Анализ способов усиления опорной зоны железобетонных балок //ТРАДИЦИИ, СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА. – 2021. – С. 152–154.

21. Неволин Д. Г. Усиление железобетонных конструкций зданий и сооружений различного назначения полимерными композиционными материалами: монография / Д.Г. Неволин, Д. Н. Смердов, М. Н. Смердов. Екатеринбург, УрГУПС, 2017. С. 122.

22. Неволин Д. Г., Смердов Д. Н., Смердов М. Н. Усиление железобетонных конструкций зданий и сооружений различного назначения полимерными композиционными материалами. – 2017. – 151 с.

23. ООО «МПКМ» [Электронный ресурс]. 2018. Режим доступа: URL: <https://mpkm.org/attachments/get/139/sika-carbodur-system.pdf>. ООО «МПКМ» [Электронный ресурс]. 2018. Режим доступа: URL: <https://mpkm.org/attachments/get/161/sikawrap-230-c.pdf>.

24. Определение свойств при сжатии в направлении плоскости расслаивания (ISO 14126:1999 Fibre-reinforced plastic composites – Determination of compressive properties in the in-plane direction). [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.iso.org/ru/standard/80371.html>.

25. Польской П.П., Маилян Д.Р. Универсальный метод подбора композитной арматуры для изгибаемых элементов // ИВД. 2016. №4 (43). [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/universalnyy-metod-podbora-kompozitnoy-armatury-dlya-izgibaemyh-elementov> (дата обращения: 20.05.2023).

26. Ремонт и усиление железобетонных конструкций: метод. пособие / М-во строит. и жил.-коммун. хоз-ва Рос. Федер. – М., 2016. – 160 с.
27. Смердов, Д. Н. Оценка несущей способности железобетонных пролетных строений мостов, усиленных композиционными материалами: дис. ... канд. техн. наук: 05.23.11 / Смердов Дмитрий Николаевич. – Новосибирск, 2010. – 159 с.
28. СП 164.1325800.2014 Усиление железобетонных конструкций композитными материалами. Правила проектирования. – М.: Минстрой России, 2015. – 50 с.
29. Центр исследований и нормирования в гражданском строительстве. Рекомендации 96-2003. Применение пластмасс, армированных волокном в несущих конструкциях зданий и сооружений (CUR Recommendation 96:2003. Fibre reinforced plastics in civil engineering supporting frameworks). [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://science.ursmu.ru/traineeship/dissertacionnye-sovety.html>.
30. Чипурной Д. Е., Плотников В. А. Прочностные свойства углепластиковых материалов. – 2019. – 61 с. [Электронный ресурс]. Режим доступа: URI: <http://elibrary.asu.ru/handle/asu/8249>.
31. Шилин А. А. Усиление железобетонных конструкций композитными материалами / А. А. Шилин, В. А. Пшеничный, Д. В. Картузов. Москва: Стройиздат, 2004. 139 с.
32. Al-Ridha A. S. D. et al. Effect of strengthening of steel beams with variable length by using carbon fiber //Journal of Engineering. – 2019. – Т. 2019. – 10 с. [Электронный ресурс]. Режим доступа: URI: <https://doi.org/10.1155/2019/1631692>.
33. ACI Committee 440. Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures (440.2R-08). Farmington Hills, MI: American Concrete Institute. 2008. – Pp. 23–31.

34. Abdel-Kareem A. H. et al. Repairing and strengthening of RC beams using thin lower concrete layer reinforced by FRP bars //International Journal of Civil Engineering and Technology. – 2019. – T. 10. – № 2. – C. 1949–1966.
35. Azizov, T. N., Kochkarev, D. V., & Galinska, T. A. (2019, December). New design concepts for strengthening of continuous reinforced-concrete beams. In IOP Conference Series: Materials Science and Engineering (Vol. 708, No. 1, p. 012040). IOP Publishing.
36. Alfeehan A. A. Strengthening of RC beams by external steel plate using mechanical connection technique //Journal of Engineering and Sustainable Development. – 2014. – T. 18. – № 2. – C. 202–215.
37. Akbas T. T. et al. Monotonic and cyclic bond behavior of deformed CFRP bars in high strength concrete //Polymers. – 2016. – T. 8. – №. 6. – C. 211.
38. Ajeel A. E., Ghedan R. H., Hamza D. M. Replacing of internal tension bars by external bonded plate //Journal of Engineering and Development. – 2011. – T. 15. – № 3. – C. 90–103.
39. Abdel-Kareem A. H. et al. Repairing and strengthening of RC beams using thin lower concrete layer reinforced by FRP bars //International Journal of Civil Engineering and Technology. – 2019. – T. 10. – № 2. – C. 1949–1966.
40. ACI Committee. Building code requirements for structural concrete (ACI 318-05) and commentary (ACI 318R-05). – American Concrete Institute, 2005.
41. Belarbi A., Acun B. FRP systems in shear strengthening of reinforced concrete structures //Procedia Engineering. – 2013. – T. 57. – C. 2-8.
42. Buyukozturk O., Hearing B. Failure behavior of precracked concrete beams retrofitted with FRP //Journal of composites for construction. – 1998. – T. 2. – № 3. – C. 138–144.
43. Blikharsky Y., Khmil R., Blikharsky Z. Research of RC columns strengthened by carbon FRP under loading //Matec Web of Conferences. – EDP Sciences, 2018. – T. 174. – C. 04017.

44. CNR-DT 200/2004. Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures. – Rome, 2004. – 144 p.
45. Committee A. C. I. 440.2 R-17 (2017) Guide for the design and construction of externally bonded FRP systems for strengthening concrete structures //American Concrete Institute, Michigan, USA.
46. De Lorenzis L., Teng J. G. Near-surface mounted FRP reinforcement: An emerging technique for strengthening structures //Composites Part B: Engineering. – 2007. – T. 38. – № 2. – C. 119–143.
47. Danraka M. N. et al. Strengthening of reinforced concrete beams using FRP technique: a review // International Journal of Engineering Science. – 2017. – T. 7. – № 6. – C. 13199.
48. De Lorenzis L., Rizzo A., La Tegola A. A modified pull-out test for bond of near-surface mounted FRP rods in concrete //Composites Part B: Engineering. – 2002. – T. 33. – № 8. – C. 589–603.
49. Faris S. T., Al-katawy A. A., Kadhum A. M. Improvement of the Mechanical Characteristics of Fiber Metal Laminate (FMLs) Used for Aircraft Wing Using Epoxy-Resole //Diyala Journal of Engineering Sciences. – 2021. – T. 14. – №. 4. – C. 79-89.
50. Gkournelos D. P., Bournas D. A., Triantafillou T. C. Combined seismic and energy upgrading of existing buildings using advanced materials, EUR 29172 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2019 //doi. – T. 10. – C. 17376.
51. Hosen M. et al. Inclusion of CFRP-epoxy composite for end anchorage in NSM-epoxy strengthened beams //Advances in Materials Science and Engineering. – 2015. – T. 2015.
52. Jayaprakash J. et al. External CFRP repairing of pretested beams reinforced using prestress rebars //Journal of reinforced plastics and composites. – 2011. – T. 30. – № 20. – C. 1753–1768.
53. Jiang C., Wu Y. F., Wu G. Plastic hinge length of FRP-confined square RC columns //Journal of Composites for Construction. – 2014. – T. 18. – №. 4. – C. 04014003.

54. Khalid Heiza A. N., Meleka N., Tayel M. State-of-the art review: Strengthening of reinforced concrete structures–different strengthening techniques //Sixth International Conference on Nano-Technology in Construction. – 2014. – Т. 6. – № 6 – С. 22–24.
55. Krainskyi P. et al. Experimental study of the strengthening effect of reinforced concrete columns jacketed under service load level //Matec Web of Conferences. – EDP Sciences, 2018. – Т. 183. – № 02008 – С. 1–5. [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <https://doi.org/10.1051/matecconf/201818302008>.
56. Mohammed B. J., Muhaidin B. A. Effect of Externally Bonded Strips of Polymer Fiber (frp) on the Shear Strength of RC Beam //Kirkuk University Journal-Scientific Studies. – 2010. – Т. 5. – № 2. – С. 1–20.
57. Qeshta I. M. I. et al. The use of wire mesh–epoxy composite for enhancing the flexural performance of concrete beams //Materials & Design. – 2014. – Т. 60. – С. 250–259.
58. Rahimi H., Hutchinson A. Concrete beams strengthened with externally bonded FRP plates //Journal of composites for construction. – 2001. – Т. 5. – № 1. – С. 44–56.
59. Rasheed H. A. Strengthening design of reinforced concrete with FRP. – CRC Press, 2014.
60. Rasheed H. A. et al. Ductile strengthening using externally bonded and near surface mounted composite systems //Composite Structures. – 2010. – Т. 92. – №. 10. – С. 2379-2390.
61. Rasheed H. A. et al. The influence of CFRP anchorage on achieving sectional flexural capacity of strengthened concrete beams //Fibers. – 2015. – Т. 3. – №. 4. – С. 539-559.
62. Shukur A. H. Mechanical Performance of Carbon Fibre Reinforced Vinyl Ester Composite Plate Bonded Concrete Exposed to Tropical Climate: дис. – PhD Thesis,

UTM, 2007. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://eprints.utm.my/id/eprint/1946/>.

63. Smith S. T., Teng J. G. FRP-strengthened RC beams. I: review of debonding strength models //Engineering structures. – 2002. – Т. 24. – № 4. – С. 385–395.

64. Zaki M. A., Rasheed H. A., Alkhrdaji T. Performance of CFRP-strengthened concrete beams fastened with distributed CFRP dowel and fiber anchors //Composites Part B: Engineering. – 2019. – Т. 176. – С. 107117.

65. Zhou C. et al. Studies on the RC beam strengthened by using the exterior-wrapping U-shaped steel plate and its application //Advances in Civil Engineering. – 2019. – С. 1–9. [Электронный ресурс]. Режим доступа: URL: <https://doi.org/10.1155/2019/2396764>.

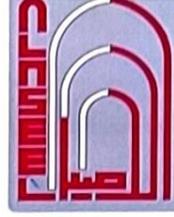
## **Приложение А**

**Акт внедрения результатов исследования**  
(на английском и русском языках)

**AL Aseel**

**For Engineering Consultancy**

Design, supervision, consultancy



الأسيل

الاستشارات الهندسية

تصاميم - اشراف - استشارات

Date : 11/ 5/ 2023

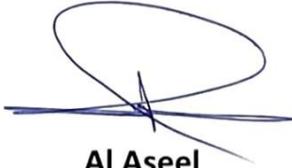
To/ Ural Federal University / Department of Construction

About the implementation of the results of the thesis  
works by Almuslehi Omar Farhan

"Feasibility Study for Optimal Design of Reinforced Beams Using Various Methods in Iraqi Conditions"

It confirms that the results of the thesis research carried out by (Almuslehi Omar Farhan) in the field of (Feasibility Study for Optimal Design of Reinforced Beams Using Various Methods in Iraqi Conditions) are characterized by scientific innovation and that the equations and calculations used are compatible with Iraqi conditions, and this topic is considered one of the important topics that need to be studied in Iraq. Where can be benefited from this study in choosing the type of strengthening as well as predicting the estimated cost of strengthening other buildings that need strengthening in the future. The article published in the Journal (Russian Journal of Construction Science and Technology) entitled (Strengthening of reinforced concrete beams in a damaged building using carbon fiber materials) was also reviewed.



  
Al Aseel

Engineering Consultancy

Mob (Iraq): 07812795099 07806662223  
Email: [alaseelarc@yahoo.com](mailto:alaseelarc@yahoo.com)

Mob(Dubai): 00971505059297  
Email: [Fareedkhayri@gmail.com](mailto:Fareedkhayri@gmail.com)

الرمادي . شارع المستودع  
عمارة . الجوهرة . ط ٣ شقة ١

Перевод с английского/арабского языков на русский язык.

От имени компании «Аль-Асель Инжиниринг  
Консалтенси» (Al Aseel Engineering Consultancy)

/Логотип/

**Проектирование, надзор, предоставление консультаций**

Дата: 11.05.2023

Кому: Уральский Федеральный Университет, Институт строительства и архитектуры

По вопросу: Внедрение результатов диссертации Альмуслехи Омара Фархана  
«Технико-экономическое обоснование оптимальной конструкции усиленных балок с использованием различных методов в условиях Ирака»

Настоящим подтверждаем, что результаты исследования, проведенного Альмуслехи Омаром Фарханом в рамках диссертации по теме «Технико-экономическое обоснование оптимальной конструкции усиленных балок с использованием различных методов в условиях Ирака», отличаются научной инновационностью, а также что используемые формулы и расчеты отвечают существующим условиям в Ираке. Кроме того, данная тема рассматривается как одна из важных тем, заслуживающих изучения для Ирака. Данное исследование может быть полезно при выборе типа усиления, а также для прогнозирования сметной стоимости усиления других зданий, нуждающихся в усилении в будущем. Нами также была изучена статья, опубликованная в журнале «Российский журнал Техники и технологий строительства», под заголовком «Усиление железобетонных балок в поврежденном здании с использованием углеродных материалов».

/Печать/:  
«Аль-Асель Инжиниринг Консалтенси»

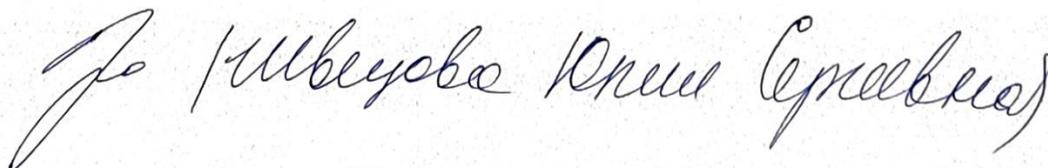
/Подпись/  
«Аль-Асель  
Инжиниринг Консалтенси»

Моб. тел. (Ирак): 07812795099  
Эл. почта: alaseelarc@yahoo.com

07806662223

Моб. тел. (Дубай): 00971505059297  
Эл. почта: Fareedkhayri@gmail.com

Настоящий перевод с английского/арабского языков на русский язык выполнен мной, переводчиком Швецовою Юлией Сергеевной. Идентичность перевода подтверждаю.



г.Екатерин-

-бург

Российская Федерация  
Город Екатеринбург Свердловской области

Двадцать пятого мая две тысячи двадцать третьего года

Я, Филиппова Ольга Владимировна, нотариус города Екатеринбурга,  
свидетельствую подлинность подписи переводчика Швецовой Юлии Сергеевны.

Подпись сделана в моем присутствии.

Личность подписавшего документ установлена.

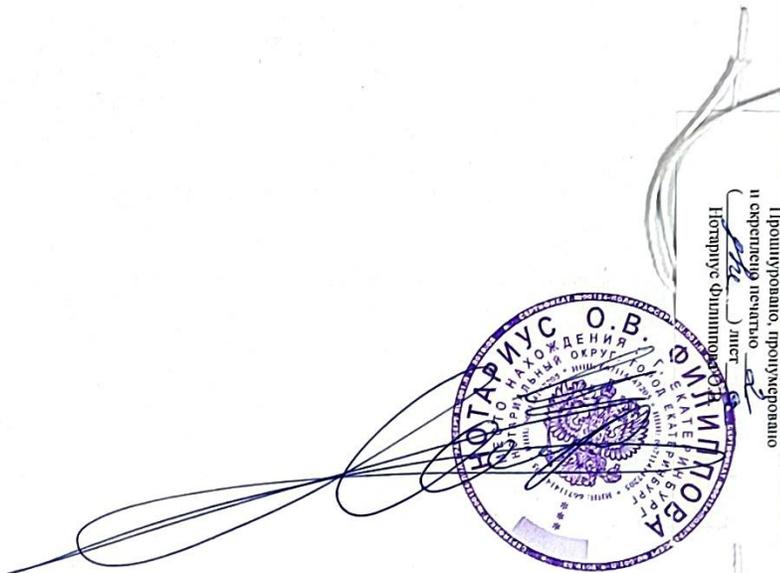
Зарегистрировано в реестре: № 66/201-н/66-2023-3-853.

Уплачено за совершение нотариального действия: 850 руб. 00 коп.

О.В. Филиппова



A handwritten signature in blue ink is written over a circular purple notary seal. The seal contains the text: "НОТАРИУС О.В. ФИЛИПОВА", "НЕОТЪЯЖЛИВО", "ЕКАТЕРИНБУРГ", "СВЕРДЛОВСКАЯ ОБЛАСТЬ", "РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ".



A handwritten signature in blue ink is written over a circular purple notary seal. The seal contains the text: "НОТАРИУС О.В. ФИЛИПОВА", "НЕОТЪЯЖЛИВО", "ЕКАТЕРИНБУРГ", "СВЕРДЛОВСКАЯ ОБЛАСТЬ", "РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ".

Проставлено, пропущено  
и скреплено печатью  
Нотариус Филиппова О.В.  
(иниц.)