

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

Архитектурно-строительный институт

(наименование института полностью)

Кафедра «Промышленное, гражданское строительство и городское хозяйство»

(наименование кафедры)

08.04.01 Строительство

(код и наименование направления подготовки)

Технология строительного производства

(направленность (профиль))

## МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

на тему Совершенствование технологии усиления железобетонных  
конструкций с применением композитных материалов

Студент

Т.В. Тимошкин

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

Научный

А.А. Руденко

(И.О. Фамилия)

(личная подпись)

руководитель

Руководитель программы д.э.н., к.т.н., профессор А. А. Руденко

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

(личная подпись)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019 г.

Допустить к защите

Заведующий кафедрой

к.т.н., доцент Д.С. Гошин

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

(личная подпись)

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019 г.

Тольятти 2019

# ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	4
1 Теоретические аспекты технологии бетонирования и армирования бетонных конструкций арматурой, из композитных материалов .....	8
1.1 Основные характеристики и сведения о бетоне .....	8
1.2 Характеристика процессов бетонирования и армирования строительных конструкций.....	16
1.3 Свойства композитных материалов, назначение, область применения и классификация композитной арматуры в строительстве .....	17
1.4 Аналитический обзор отечественных и зарубежных исследований железобетонных конструкций, усиленных композитными материалами ...	26
1.5 Аналитический обзор применения неметаллической арматуры в России и за рубежом .....	29
2 Анализ технологии усиления бетонных и железобетонных конструкций композитными материалами и свойств применяемых материалов .....	34
2.1 Анализ технологии и особенностей бетонирования и армирования бетонных и железобетонных конструкций .....	34
2.2 Анализ технологии усиления бетонных и железобетонных конструкций композитными материалами.....	38
2.3 Методика расчета железобетонных конструкций, усиленных композитными материалами, принятая в РФ и за рубежом.....	40
2.3.1 Методика расчета, принятая в РФ .....	41
2.3.2 Зарубежные методики расчета.....	42
2.4 Программа исследования и характеристика опытных балок.....	44
2.5 Методика усиления балок и проведения испытаний .....	46
2.5.1 Методика усиления испытываемых балок .....	46
2.5.2 Методика проведения испытаний балок.....	47
2.6 Характеристика используемых материалов и оборудования .....	49
2.7 Результаты экспериментальных исследований влияния вида композитных материалов на прочность усиленных балок.....	52

3 Технические и технологические решения по оптимизации бетонирования строительных конструкций с применением композитной арматуры .....	55
3.1 Предложения по составу и производству строительной композитной арматуры с применением микрокорундового порошка, нанопорошка ( $Al_2O_3$ ) и микрокремнезема.....	55
3.1.1 Предложения по составу строительной композитной арматуры.....	55
3.1.2 Предложения по производству строительной композитной арматуры и применяемым механизмам и оборудованию.....	58
3.2 Предложения по техническим решениям усиления конструкций композитными материалами.....	61
3.3 Оценка технико-экономической эффективности разработанных предложений.....	62
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	65
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	66

## ВВЕДЕНИЕ

Актуальность работы. В настоящее время строительные технологии всё чаще требуют применения новых, прогрессивных, энергоэффективных решений во многих областях. Одним из таких решений является усиление конструкций композитными полимерными материалами, которые занимают передовые позиции в строительстве.

Несмотря на то, что в настоящее время на Российском рынке композитную арматуру представляют, как новейшее и высокотехнологичное решения, первые попытки её применения приходится на 70-е годы 20-го века. Композитная арматура не применялась широко в СССР, однако в странах дальнего востока и ближнего зарубежья пользовалась достаточно активно. Поэтому, в данном контексте, для России это достаточно новый материал.

Композитную арматуру применяют в качестве армирования фундаментов, расположенных ниже уровня земли, в том числе и ленточных, применяемых как в массовом строительстве общественных зданий, так и для частных домов. Также целесообразно применять данную арматуру при строительстве опор и мостов, в качестве усиления дорожного полотна и в местах, где сталь наиболее подвержена коррозии, за исключением мест подверженных воздействию высоких температур.

Использование композитных материалов в строительстве позволяет эффективно сэкономить средства за счёт более низкой её стоимости по сравнению со стальной арматурой.

Однако, композитные материалы имеет и некоторые недостатки, в числе которых является пониженная термостойкость. При очень сильном нагревании или пожаре, такая арматура теряет свои прочностные свойства или разрушается соответственно. Для исключения таких проблем, необходим поиск новых решений и совершенствование существующих методов улучшения свойств композитной арматуры в том числе и в её совместном взаимодействии с бетоном, что может обеспечиваться в том числе и за счет технических, технологических и организационных решений.

В связи с этим, данная тема диссертационного исследования будет являться актуальной и востребованной.

Степень разработанности темы. Особые успехи в решении теоретических и практических вопросов развития науки об армировании композитными материалами различных видов строительных конструкций внесли работы Ильина Д.А., Кузеванова Д.В., Васильева А.С., Уманского А.М. и других специалистов.

Вместе с тем, вопросы совершенствования технологии бетонирования и улучшения эксплуатационных свойств бетона с применением композитных материалов проработаны недостаточно.

Целью исследований является совершенствование конструктивно-технологических решений при бетонировании строительных конструкций с использованием композитных материалов.

Предметом исследования диссертационной работы являются конструкции, организационно-технологические приемы и средства бетонирования с использованием композитных материалов.

Объектом исследования в магистерской диссертации являются бетонные строительные конструкции, армированные композитными материалами.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Проанализировать область применения композитных материалов в качестве средства усиления железобетонных конструкций.
2. Обобщить научно-технические достижения по усилению железобетонных конструкций композитными материалами.
3. Уточнить существующую классификацию композитных материалов.
4. Провести экспериментальные испытания железобетонных конструкций, усиленных композитными материалами с обобщением и сравнением полученной информации.
5. Разработать мероприятия, обеспечивающие эффективность конструктивных решений, технологических и организационных приемов

процесса бетонирования и усиления железобетонных конструкций композитными материалами.

Методы исследования - анализ, синтез, индукция, дедукция, факторный анализ, моделирование.

Научная новизна заключается в:

1. Дополнении классификационной типологии композитной арматуры.
2. Разработке конструктивных решений, технологических и организационных приемов процесса бетонирования и усиления железобетонных конструкций композитными материалами.

Практическая значимость работы заключается в возможном использовании строительными организациями предложенных мероприятий в главе 3 диссертации по технологии и организации армирования железобетонных конструкций композитными материалами.

Достоверность результатов магистерской диссертации подтверждена материалами проведенных исследований.

По теме диссертации автором опубликовано 4 статьи. Основные положения, материалы и результаты диссертационного исследования опубликованы в научных изданиях:

1. Тимошкин, Т.В. К сравнительному анализу композитных материалов на основе полимеров, применяемых при армировании бетонных конструкций / Т.В. Тимошкин, А.А. Руденко // Электронный журнал «Наука и образование: новое время». – 2018, №2.

2. Тимошкин, Т.В. Применение композитных материалов при возведении каменной кладки / Т.В. Тимошкин, А.В. Крамаренко // Электронный журнал «Наука и образование: новое время». – 2018, №2.

3. Тимошкин, Т.В. Сравнительная характеристика пластификаторов при возведении конструкций из смеси цементосодержащих компонентов / Т.В. Тимошкин, А.В. Крамаренко // Электронный журнал «Наука и образование: новое время». – 2018, №2.

4. Тимошкин, Т.В. Сравнительный анализ стеновых блоков из керамзитобетона, пенобетона и газобетона / Т.В. Тимошкин, А.В. Крамаренко // Наука. Техника. Технологии. – 2019. – № 1. – С. 402-404.

Объем и структура работы.

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы из 50 источников. Общий объем работы 70 страниц машинописного текста.

# **1 Теоретические аспекты технологии бетонирования и армирования бетонных конструкций арматурой, из композитных материалов**

## **1.1 Основные характеристики и сведения о бетоне**

Известно, что бетон – «искусственный камневидный строительный материал, получаемый в результате формования и твердения рационально подобранной и уплотненной бетонной смеси» [1], а бетонная смесь — это «готовая к применению перемешанная однородная смесь вяжущего, заполнителей и воды с добавлением или без добавления химических и минеральных добавок, которая после уплотнения, схватывания и твердения превращается в бетон» [2].

Также, следует отметить, что активными составляющими бетона являются минеральные вяжущие вещества и вода, которые в смеси предназначены для обволакивания зерна заполнителя и, по истечению определенного промежутка времени, вяжущие вещества затвердевают и связывают их.

Известно [3, 4, 5], что «заполнители пористые (гравий, щебень и песок) - неорганические сыпучие минеральные материалы (природные, искусственные из металлургических, топливных шлаков и других отходов промышленности) с плотностью зерен в сухом состоянии не более 2 г/см<sup>3</sup>» [3]. Также существуют и «заполнители мелкие плотные (песок) - неорганические сыпучие минеральные материалы (природные, искусственные из металлургических, топливных шлаков и других отходов промышленности) с плотностью зерен в сухом состоянии более 2 г/см<sup>3</sup>» [3].

Проанализировав материалы и научные работы по данной теме [3, 4, 5], можно выделить основные эксплуатационные свойства бетона, которые обеспечивают повышение долговечности конструкций:

- прочность;
- деформативность;



- проницаемость;
- морозостойкость;

Классификация бетонов. Анализ данных [3, 4, 5] позволяет отметить основные подразделения в данной классификации: по плотности (рис. 1.1), виду вяжущего вещества (рис. 1.2), по виду заполнителей (рис. 1.3), по структуре (рис. 1.4), по прочности (рис. 1.5), по скорости набора прочности при нормальных условиях твердения (рис. 1.6) и по назначению (рис. 1.7).

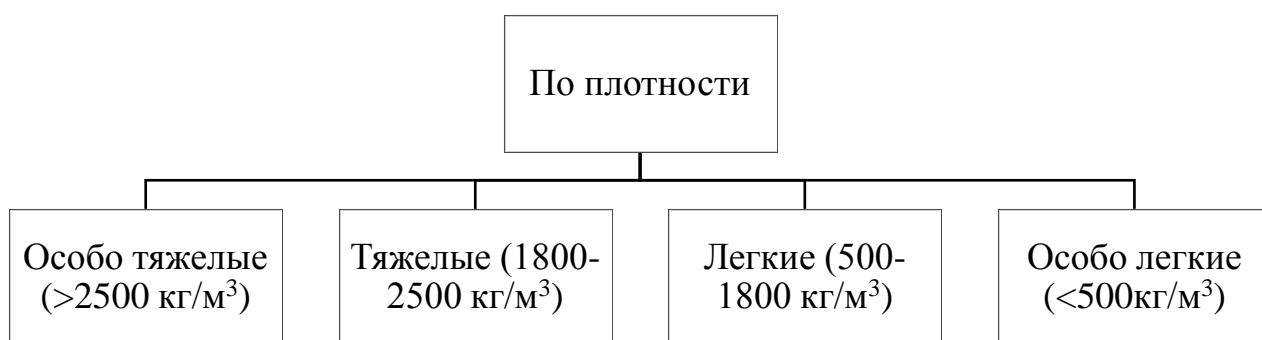


Рисунок 1.1 – Классификация бетонов по плотности



Рисунок 1.2 – Классификация бетонов по виду вяжущего вещества

По рис. 1.2 необходимо провести дополнительные пояснения. К цементным относятся бетоны, изготовленные на портландцементе, шлакопортландцементе, пуццолановых портландцементе и т.д. К известковым относятся бетоны, которые изготавливают, в основном, на известково-кремнеземном вяжущем. Специальные бетоны изготавливаются на основе полимерных связующих, состоящих из полиэфирных, эпоксидных, карбомидных смол или мономеров, которые твердеют с помощью дополнительных специальных добавок.



Рисунок 1.3 – Классификация бетонов по виду заполнителей

По рис. 1.3 необходимо провести дополнительные пояснения. В данном случае, в специальных бетонах в качестве заполнителя отражает наличие вспененного гранулированного полистирола, металлической дроби т.д.



Рисунок 1.4 – Классификация бетонов по его структуре

Известно [4, 7, 8], что «бетон, у которого пространство между зернами крупного и мелкого заполнителей или только мелкого заполнителя заполнено затвердевшим вяжущим и порами вовлеченного воздуха, в том числе образующихся за счет применения добавок, регулирующих пористость бетонной смеси и бетона» [4], является бетоном с плотной структурой. Также известно, что «бетон, у которого пространство между зернами крупного заполнителя заполнено затвердевшим поризованным вяжущим» [4], является бетоном поризованной структуры. Установлено, что «бетон, состоящий из затвердевшей смеси вяжущего, кремнеземистого компонента и искусственных равномерно распределенных пор в виде ячеек, образованных газо- и пенообразователями» [4], является бетоном ячеистой структуры. А «бетон, у которого пространство между зернами крупного заполнителя не

полностью заполнено мелким заполнителем и затвердевшим вяжущим» [4], соответственно является бетоном крупнопористой структуры.



Рисунок 1.5 – Классификация бетонов по прочности

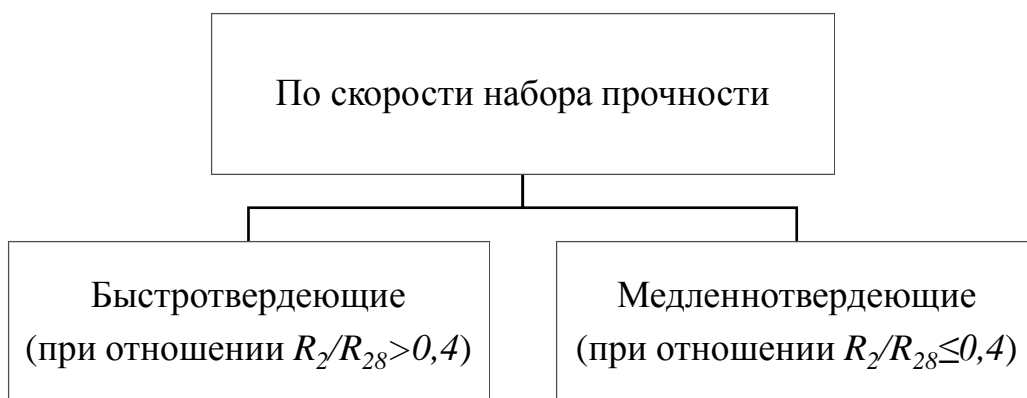


Рисунок 1.6 – Классификация бетонов по скорости набора прочности при нормальных условиях твердения бетона

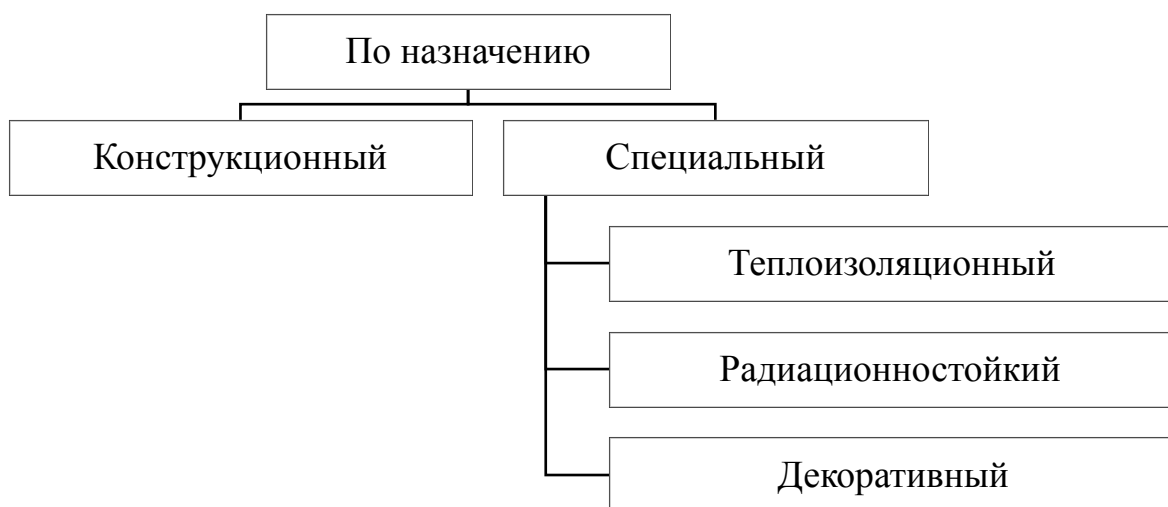


Рисунок 1.7 – Классификация бетонов по назначению

Прочность. Проанализировав основные особенности бетона и нормативную литературу [6, 7, 8], можно отметить, что «образцы, предназначенные для твердения в нормальных условиях, после изготовления до их распалубливания хранят в формах, покрытых влажной тканью или другим материалом, исключая испарение из них влаги, в помещении с температурой воздуха  $(20\pm 5)^\circ\text{C}$ » [9].

«При определении прочности бетона на сжатие образцы распалубливают не ранее чем через 24 ч и не позднее чем через 72 ч, прочности на растяжение - не ранее чем через 72 ч и не позднее чем через 96 ч» [9].

«После распалубливания образцы помещают в камеру с нормальными условиями твердения: с температурой  $(20\pm 2)^\circ\text{C}$  и относительной влажностью воздуха  $(95\pm 5)\%$ . Образцы укладывают на подкладки так, чтобы расстояние между образцами, а также между образцами и стенками камеры было не менее 5 мм. Площадь контакта образца с подкладками, на которые он установлен, должна быть не более 30% площади опорной грани образца. Образцы в камере нормального твердения не должны орошаться водой. Допускается хранение образцов под слоем влажного песка, опилок или других систематически увлажняемых гигроскопичных материалов» [9].

«Образцы, предназначенные для твердения в условиях тепловой обработки, должны быть помещены в формах в тепловой агрегат (пропарочную камеру, автоклав, отсек формы или кассеты и т.д.) и твердеть вместе с конструкциями (изделиями) или отдельно по принятому на производстве режиму» [9].

Отметим, что «допускаются другие условия твердения образцов, например, в воде или в условиях, аналогичных условиям твердения бетона в монолитных конструкциях, если эти условия установлены стандартами, техническими условиями или технологическими регламентами на производство работ» [9].

График изменения прочности бетона со временем показан на рис. 1.8.

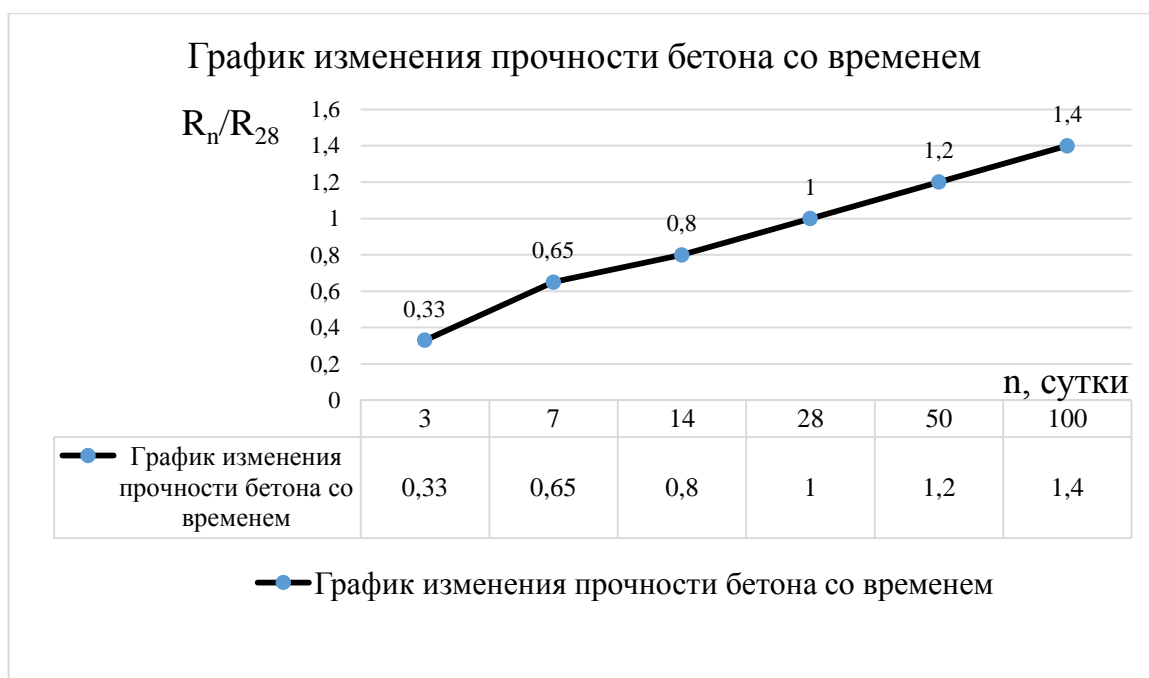


Рисунок 1.8 - График изменения прочности бетона со временем, в условиях нормального твердения

Деформативность бетона. Основными показателями прочности и деформативности бетона являются нормативные значения их прочностных и деформационных характеристик, а именно:

- бетона осевому сжатию  $R_{b,n}$ ;
- сопротивления бетона осевому растяжению  $R_{bt,n}$ .

Научно доказано, что при значительном нагружении он ведет себя как упруго - пластичное тело, однако при деформациях бетона, не превышающих 0,2 от предела прочности бетона, ведет себя как упругий материал. Стоит отметить, что проявление пластических (остаточных) деформаций осуществляется при значительных напряжениях, которые развиваются в результате возрастания количества и качества микротрещин.

«Начальный модуль упругости при этом зависит от пористости и прочности и составляет для тяжелых бетонов  $(2,2-3,5) \times 10^4$  МПа (у высокопористых ячеистых бетонов модуль упругости около  $1 \times 10^4$  МПа)» [10].

Анализ данных [11, 12, 13] позволяет сформировать соотношение марок и классов бетона по прочности при коэффициенте 13,5%, результаты которого приведены в табл. 1.1.

Таблица 1.1 - Соотношение между марками и классами тяжелого бетона по прочности при коэффициенте 13,5%

Класс бетона	Средняя прочность данного класса, кгс/см <sup>2</sup>	Ближайшая марка бетона	Класс бетона	Средняя прочность данного класса, кгс/см <sup>2</sup>	Ближайшая марка бетона
B3,5	46	M50	B30	393	M400
B5	65	M75	B35	458	M450
B7,5	98	M100	B40	524	M550
B10	131	M150	B45	589	M600
B12,5	164	M150	B50	655	M600
B15	196	M200	B55	720	M700
B20	262	M250	B60	786	M800
B25	327	M350	-	-	-

Водопоглощение и проницаемость. В связи с тем, что бетон обладает капиллярно-пористым строением, то он может поглощать влагу не только при непосредственном контакте с ней, но и напрямую из воздуха.

Водопоглощением бетона является его способность впитывания влагу, находящаяся в капельножидком состоянии, которая напрямую зависит от характера пор. Известно [2, 8, 9], что водопоглощение напрямую зависит от количества капиллярных сообщающихся пор, а соответственно тем больше, чем больше таких пор в бетоне.

Стоит отметить, что «водопроницаемость бетона определяется в основном проницаемостью цементного камня и контактной зоны «цементный камень — заполнитель»; кроме того, путями фильтрации жидкости через бетон могут быть микротрещины в цементном камне и дефекты сцепления арматуры с бетоном» [2].

Однако, стоит также отметить, что снижение показателя водопроницаемости достигается путем применения заполнителей надлежащего качества (с чистой поверхностью), а также использования

специальных уплотняющих добавок (например, жидкого стекла, шорного железа) или расширяющихся цементов, которые применяются для устройства бетонной гидроизоляции.

Морозостойкость – один из основных показателей, который определяет срок службы бетонных и железобетонных конструкций, определяющийся путем попеременного замораживания при температуре, составляющей  $(18\pm 2)^\circ\text{C}$ , и оттаивания в воде при температуре  $(18\pm 2)^\circ\text{C}$  испытуемых образцов бетона, насыщенных предварительно водой. Продолжительность одного цикла составляет 5-10 ч. Однако, время цикла зависит от размеров испытуемого образца.

По проведенному анализу данных [1, 14, 15] можно произвести соотношение между марками и классами бетона по водонепроницаемости и морозостойкости, результаты которого приведены в табл. 1.2.

Таблица 1.2 - Соотношение между марками и классами бетона по водонепроницаемости и морозостойкости

Класс бетона	Марка бетона	Морозостойкость	Водонепроницаемость
B7,5	M100	F50	W2
B12,5	M150	F50	W2
B15	M200	F100	W4
B20	M250	F100	W4
B22,5	M300	F200	W6
B25	M350	F200	W8
B30	M400	F300	W10
B35	M450	F200- F300	W8- W14
B40	M550	F200- F300	W10- W16
B45	M600	F100- F300	W12- W18

Стоит отметить, что наиболее распространенными марками относятся бетоны с показателями F150 – F250, а классификация, приведенная в ГОСТе, не распространяется на бетоны, применяемые в дорожном строительстве.

## **1.2 Характеристика процессов бетонирования и армирования строительных конструкций**

Работы по возведению монолитных бетонных конструкций можно разделить на три основных процесса: заготовительные, транспортные и монтажно-укладочные [14].

К заготовительным и транспортным процессам относят изготовление опалубки, подготовка арматуры, сборка арматурно-опалубочных блоков, подбор материалов, а осуществление выбора состава и приготовление бетонной смеси происходит, как правило, в специально оснащенных цехах, установках или на заводах. Опалубка, арматура, арматурно-опалубочные блоки и бетонная смесь доставляется к объектам строительства обычными или специальными технологическими транспортными средствами [14, 15].

Монтажно – укладочные процессы, рекомендуемые к выполнению поточными методами, выделяя специализированные потоки в составе объектных потоков, включают в себя установку опалубки и арматурных каркасов. Следует отметить, что наряду с установкой опалубки и каркасов, также монтируются арматурные и арматурно-опалубочные блоки, производится подача, распределение и уплотнение бетонной смеси. После чего, уложенная бетонная смесь сопровождается тщательным уходом за собой, происходит натяжение арматуры и инъектирование растворной смеси в каналы (в предварительно напряженных конструкциях). Затем проводится контроль качества, демонтаж вспомогательных элементов готовых конструкций и их отделка [15].

Возведение монолитных бетонных конструкций является очень тяжелым и трудоемким процессом, в котором выполнение основных операций предусмотрено 80-81% рабочих, в том числе бетонные работы осуществляют 43-45%, арматурные — 13-14% и опалубочные — 24-25%. Остальные 20-16% рабочих загружены различными вспомогательными операциями [14]. Графическое представление технологического комплекса процессов представлена на рис. 1.9.





Рисунок 1.9 - Графическое представление технологического комплекса процессов возведения монолитных конструкций

Вместе с тем, данная схема показывает, что возведение монолитных бетонных конструкций является тяжелым и трудоемким процессом, так как выполнением основных операций занято только 80-81% рабочих, в том числе бетонными работами 43 - 45, арматурными - 13 - 14 и опалубочными - 24 - 25%. Остальные 20 - 16% рабочих загружены различными вспомогательными операциями.

### 1.3 Свойства композитных материалов, назначение, область применения и классификация композитной арматуры в строительстве

Как известно, «композит - сплошной продукт, состоящий из двух или более материалов, отличных друг от друга по форме и/или фазовому состоянию и/или химическому составу и/или свойствам, скрепленных, как правило, физической связью и имеющих границу раздела между обязательным материалом (матрицей) и ее наполнителями, включая

армирующие наполнители» [16]. Изменением состава матриц и наполнителей, а также их соотношений, ориентаций наполнителей, можно добиться получения широкого спектра материалов с необходимым набором свойств. Изменяя состав наполнителей и матриц, появляется возможность получения широкого спектра различных материалов с требуемым набором характеристик. Большинство композитов превосходят стандартные материалы и сплавы, как по своим физико - механическим свойствам, так и по транспортабельности, отражаемой в сниженном весе материала. Применяют композиты с целью уменьшения массивности конструкции, при этом сохраняя неизменность, а в некоторых случаях и способствуя улучшению, своих механических характеристик [17].

Изменяя объемное содержание компонентов, можно сделать вывод, о получении композитных материалов с требуемыми значениями прочности, жаропрочности, модуля упругости, абразивной стойкости, а также создании композиции с требуемыми необходимыми магнитными, диэлектрическими, радиопоглощающими и другими специальными свойствами [18, 19].

Назначение композитных материалов в строительной сфере. Проанализировав основное назначение композитных материалов, можно выделить разные типы композитных материалов, различающиеся по своему составу и свойствам. Наиболее распространены и востребованы в строительстве, например, такие виды, как сэндвич-панели, углепластиковые панели, слоистые материалы, текстолиты, стеклопластики [14, 20]. Все они обладают высокими эксплуатационными характеристиками и декоративным эффектом. Композит применяется не только при возведении жилых объектов. Различные архитектурные элементы, такие как арки или купола, тоже зачастую создаются с применением композитных материалов. Это выгодно для застройщиков, поскольку обеспечивает им значительную экономию на возведении конструкций, монтаже, хранении и перевозке материала, и при этом надежность, качество и прочие эксплуатационные характеристики будущего здания никак не страдают.

Структура композиционных материалов. Согласно данным [7, 9, 13], по структуре композиты можно разделить на несколько основных классов, представленных на рис. 1.10.

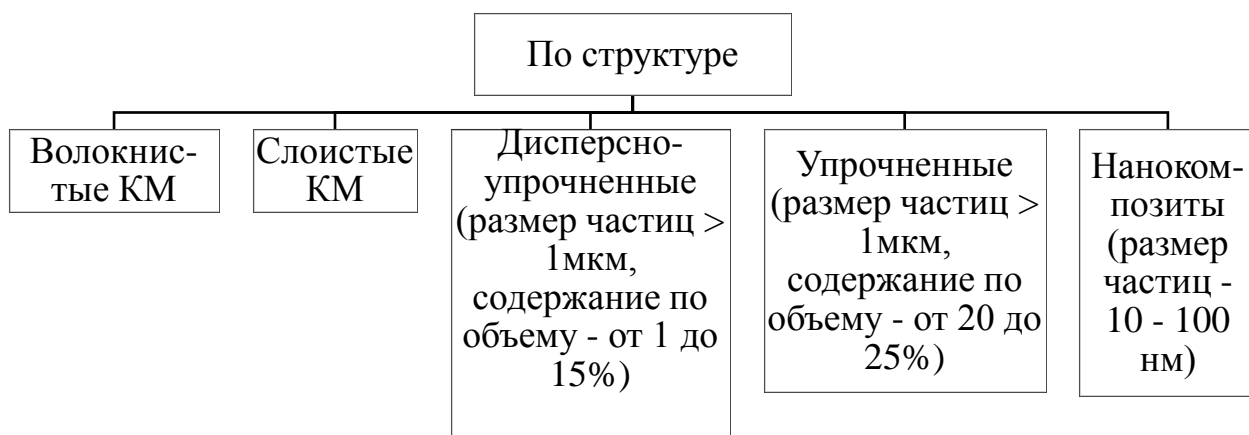


Рисунок 1.10 – Классификация композитных материалов по структуре

Как известно, композиты, армированные волокнами или нитевидными кристаллами, называются волокнистыми, примерами которых можно определить кирпичи с соломой и папье-маше. Однако, применение в таких композитах даже небольшого содержания наполнителей, способствует к появлению новых и качественно улучшенных физико - механических свойств и характеристик. Следует отметить, что изменение размерной конфигурации и концентрации волокон способствует широкому варьированию свойств материала. Кроме этого, «армирование волокнами придает материалу анизотропию свойств (различие свойств в разных направлениях), а за счет добавки волокон проводников можно придать материалу электропроводность вдоль заданной оси» [16]. Матрицы и наполнители данной структуры материала располагаются слоями (слои особо прочных стекол, армированных полимерными пленками).

Классификация композитных материалов. Анализ данных [7, 9, 11, 13] позволяет отметить основные разделения в данной классификации: по типу композитных материалов (рис. 1.11), по геометрии наполнителя (рис. 1.12), по виду упрочнителя (рис. 1.14) и по схеме расположения наполнителей.

Типы композитных материалов. Также, проведя анализ [4, 9, 21], композитные материалы по природе компонентов (обычно материала матрицы) можно разделить на две основные группы:

- с металлической матрицей;
- с неметаллической матрицей.

Однако, в связи с тем, что данная классификация захватывает довольно большую сферу применения в строительной отрасли, то необходимо уточнение данной классификации, результат которой представлен на рис. 1.11.

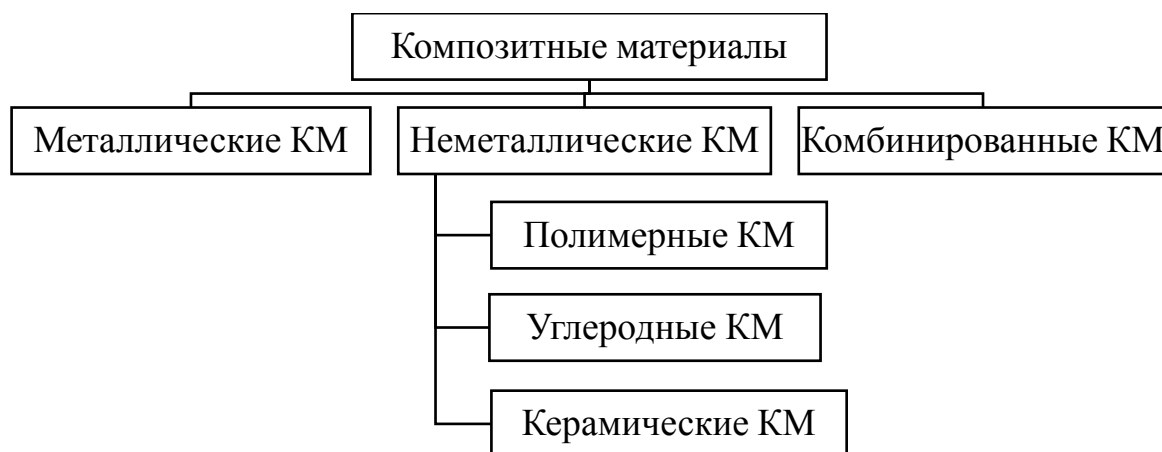


Рисунок 1.11 – Уточненная классификация композитных материалов по природе компонентов

Следует отметить, что к металлическим композитным материалам относятся материалы, основанные на компоненте металла или сплава (чаще всего в качестве таких компонентов выступают Al, Mg, Ni и их сплавы).

Неметаллические композитные материалы подразделяются на:

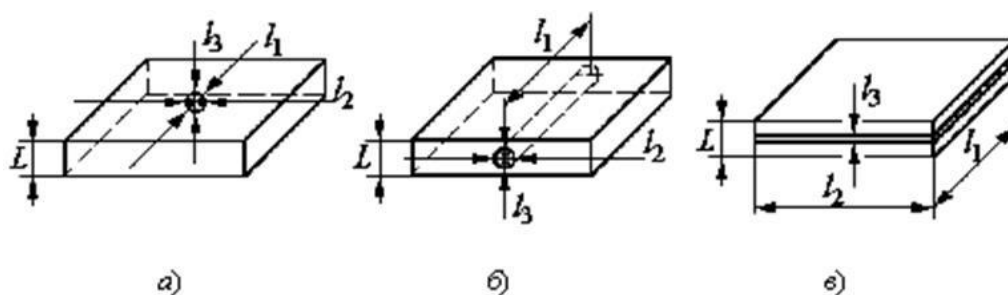
- полимерные (эпоксидные, полиэфирные, термоактивные смолы и полимерные термопласты);
- углеродные;
- керамические.

В основе предложенной классификации композитных материалов были определены следующие признаки: геометрическая составляющая компонентного состава материала, расположение и природа композитов.



Рисунок 1.12 – Классификация композитных материалов по геометрии наполнителя

Схематичное представление форм наполнителей показано на рис. 1.13.



а – нульмерные; б – одномерные; в – двумерные;  $l_1, l_2, l_3$  - размеры наполнителя;  $L$  - толщина матрицы

Рисунок 1.13 – Схематичное представление форм наполнителей

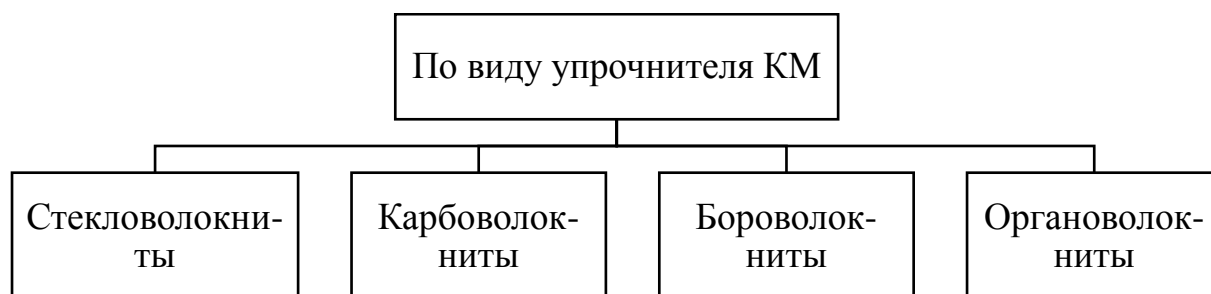


Рисунок 1.14 – Классификация композитных материалов по геометрии наполнителя

Композитные материалы можно разделить «по схеме расположения наполнителей выделяют три группы композиционных материалов:

- с одноосным (линейным) расположением наполнителя в виде волокон, нитей, нитевидных кристаллов в матрице параллельно друг другу;
- с двухосным (плоскостным) расположением армирующего наполнителя, матов из нитевидных кристаллов, фольги в матрице в параллельных плоскостях;

- с трехосным (объемным) расположением армирующего наполнителя и отсутствием преимущественного направления в его расположении» [5].

Проанализировав научные труды Кузеванова Д.В., Уманского А.М., а также материалы [16, 21, 22] основными преимуществами, которые можно обеспечить использованием композитных материалов:

- сравнительно низкая плотность;
- высокие удельная прочность и жесткость, средние значения которых, в сравнении с традиционными материалами, приведены в табл. 1;
- высокая химическая и коррозионная стойкость;
- технологичность переработки в изделия;
- высокие усталостные характеристики волокнистых КМ;
- возможность управлять силовыми потоками за счет рационального расположения арматуры;
- наличие специальных свойств (радиопрозрачность, термостойкость и др.).

Однако, следует отметить, что композитные материалы обладают также и рядом недостатков [21, 22]:

- анизотропия - одни и те же свойства могут в десятки раз различаться в зависимости от направления внешнего воздействия (вдоль волокон или поперек);
- большой удельный объем;
- гигроскопичность – свойство материала, которое характеризуется поглощением водяных паров из воздуха;
- токсичность.

Проанализировав основные сведения о композитной и металлической арматуре, основные области ее применения, а также характеристики и основные ее свойства, был проведен сравнительный анализ металлической и композитной арматуры, результаты которого сведены в табл. 1.3. В составе анализа виды арматуры сравнивались по параметрам, основные из которых: модуль упругости, коэффициент линейного расширения и временное сопротивление при растяжении.

Таблица 1.3 – Сравнительный анализ металлической и композитной арматуры

Характеристики	Металлическая арматура класса А-III (А400)	Неметаллическая композитная арматура (АСП — стеклопластиковая, АБП — базальтопластиковая)
Удельный вес	По нормам	Легче металлической арматуры
Модуль упругости, МПа	200 000	45 000-АСП 60 000-АБП
Относительное удлинение, %	0,195	2,2-АСП и АБП
Коэффициент линейного расширения $\alpha \times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	13-15	9-12
Плотность, т/м <sup>3</sup>	7,85	1,9-АСП и АБП
Электропроводность	Электропроводна	Неэлектропроводна — диэлектрик
Выпускаемые профили	6-80	Россия: 4-20. Иностранские поставщики 6-40
Экологичность	Экологична	Экологична — не выделяет вредных и токсичных веществ
Долговечность	По строительным нормам	Прогнозируемая долговечность не менее 80 лет
Замена арматуры по физико-механическим свойствам (кроме величины удлинения под нагрузкой)	- 5Вр-1 проволока - 6А-III - 8А-III - 10А-III - 12А-III - 14А-III - 16А-III	- - АСП-4, АБП-4 - АСП-6, АБП-6 - АСП-8, АБП-8 - АСП-8, АБП-8 - АСП-10, АБП-10 - АСП-12, АБП-12
Замена арматуры по величине удлинения под нагрузкой (одинаковое удлинение под одинаковой нагрузкой, в пределах упругой деформации стальной арматуры)	- 6А-III - 8А-III - 10А-III - 12А-III - 14А-III - 16А-III	- АСП-12 - АСП-16 - АСП-20 - - -
Временное сопротивление при растяжении, МПа	390	600-1200 — АСП (с увеличением диаметра временное сопротивление растяжению уменьшается, например, АСП8-1200, АСП16-900, АСП20-700) 700—1300 — АБП

Область применения композитной арматуры в строительстве. Прежде всего следует отметить, что использование композитной арматуры в конструкциях и сооружениях должно осуществляться в соответствии с требованиями проектной документации. Согласно проведенным исследованиям в научных работах «К сравнительному анализу композитных материалов на основе полимеров, применяемых при армировании бетонных конструкций», Тимошкин Т.В., Руденко А.А., было выявлено, что наиболее востребована композитная арматура в сферах, где материалы подвержены воздействию агрессивных сред, а также там, где особо ценится небольшой вес такой арматуры, низкая теплопроводность, высокая прочность и ее коррозионная устойчивость, соответственно были предложены наиболее подходящие и перспективные области применения композитной арматуры:

- стеклопластиковая арматура отлично показала себя в дорожном строительстве (при необходимости увеличения прочности дорожного полотна широко используются композитные армирующие материалы, кроме этого, с помощью пластиковой арматуры добиваются улучшения качественных характеристик мостов и оградительных опор);
- поскольку стеклопластиковая арматура отличается небольшим весом и практически не растягивается, то этим оправдывается активное использование ее при изготовлении фундаментов, к тому же как известно, коэффициент температурного расширения пластиковой арматуры приблизительно такой же, как у бетона, поэтому при использовании ее для армирования фундамента можно избежать появления трещин;
- в ряде случаев стеклопластиковая арматура успешно используется при создании опор для линий электропередач (ЛЭП) высокого напряжения, осветительных опор (применение оправдано к тому же тем, что пластиковая арматура практически не проводит ток, что сводит к минимуму потери энергии и способствует безопасности всей конструкции);
- композитная арматура широко используется в строительстве причалов и доков, при укреплении и заграждении прибрежных зон и т.п. (причина тому –



устойчивость пластиковой арматуры к коррозионным повреждениям, повышенной влажности и другим агрессивным химическим средам);

- с использованием пластиковой арматуры осуществляют строительство промышленных и гражданских сооружений, выполняют слоистую кладку кирпичных зданий, применяют при креплении наружной теплоизоляции, как гибкие связи в трехслойных стенах здания, при обустройстве несъемной опалубки, для создания сейсмопоясов зданий;

- стеклопластиковая арматура незаменима при строительстве коммуникационных каналов для прокладки трубопроводов, мелиорации, водоотведения и т.д.;

- арматура из композитных материалов применяется также при производстве заборных плит, тротуарной плитки, железнодорожных шпал, бордюров, столбиков и т.д.

Классификация композитной арматуры. Классификация видов композитной арматуры напрямую зависит от основного компонента в составе [16, 21]:

- АБП (базальтовое изделие) производится с применением волокон базальта и смол органического происхождения, которые выполняют функцию связующего элемента. Отличительным качеством вида является устойчивость к воздействию агрессивных веществ и сред (щелочей, солей, газов);

- АСП (стеклопластиковое изделие) получается в результате смешивания стекловолокна и терморезистивных смол. Достоинством данного вида считается высокая прочность при небольшом весе;

- АУП (углепластиковое изделие) состоит на основе углеводорода. Обладает высокой прочностью, но ввиду высокой себестоимости данный вид не получил широкого спроса;

- АКК (комбинированное изделие) производится на основе базальта и стекловолокна. Отличается высокими показателями износостойкости и широкой областью применения.

#### **1.4 Аналитический обзор отечественных и зарубежных исследований железобетонных конструкций, усиленных композитными материалами**

В последние годы в России, а также за рубежом, для усиления железобетонных конструкции все чаще используются композитные материалы. Можно утверждать, что на данный момент, для достижения увеличения прочностных характеристик, снижения стоимости, при обеспечении равноценной замены усиленных конструкций, применяются композитные материалы.

В России метод усиления композитными материалами железобетонных конструкций появился относительно недавно, если быть точнее, в 2001 году, а первым крупнейшим объектов является Эстакада 3-го транспортного кольца в г. Москва и железнодорожный мост в г. Домодедово. Однако, за рубежом, а именно в Швейцарии, данный метод используется на протяжении уже 50 лет.

Рассмотрим работы, посвященные усилению железобетонных конструкций композитными материалами, проведенные в России. Проанализировав научные труды по данной теме, можно выделить следующих авторов: Хаютин Ю.Г., Чернявский В.Л., Аксельрод Е.З., Бокарева С.А., Ефимов С.В., Шилин А.А., Шевцов Д.А., Польский П.П., Маилян Д.Р.

В работе Хаютина Ю.Г., Чернявского В.Л., Аксельрода Е.З. [23], рассмотрен вопрос усиления конструкций с наличием различных дефектов, с целью ремонта и компенсации потерь несущей способности. «Усиление конструкций, которое осуществляется путем внешнего армирования высокопрочными тканями из углеродных и специальных стеклянных волокон на эпоксидном связующем» [23], по мнению автора и будет способствовать восстановлению потерей несущей способности, с одновременным повышением жесткости железобетонной конструкции и трещиностойкости.

Работа Бокаревой С.А. и Ефимова С.В. «В данной работе рассмотрены возможные принципы и критерии подобия при моделировании строительных конструкций, в частности главных балок пролетных строений. Проведены экспериментальные исследования моделей типовой балки усиленной системой внешнего армирования путем её наклейки на нижнюю грань балки. В работе определены масштабные коэффициенты для переноса результатов выполненного эксперимента на реальные конструкции» [24]. Схема внешнего армирования экспериментальной балки таврового сечения показана на рис. 1.15.

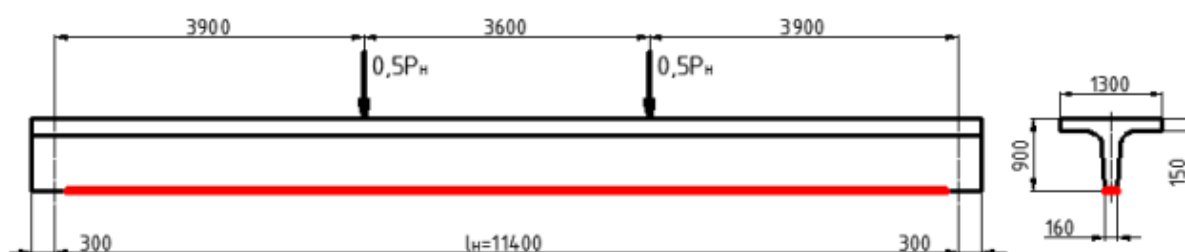


Рисунок 1.15 – Схема внешнего армирования экспериментальной балки

Работа Шевцова Д.А. была посвящена рассмотрению основных методов усиления железобетонных и бетонных конструкций. Были определены и обоснованы преимущества и недостатки современных методов усиления конструкций с использованием волокнистого композиционного материала. Сформулировано и обосновано проведение необходимых мероприятий, способствующих в будущем при проектировании применять способы усиления железобетонных конструкций с использованием волокнистого композиционного материала.

Результатом экспериментальных исследования были зафиксированы увеличения значений несущих способностей балок на изгиб от 109 до 213%. Опытным путем определен хрупкий характер разрушения усиленных на основе фиброармированного пластика образцов, при полученном коэффициенте безопасности  $S=1,6$ » [25]. Схема предложенного внешнего армирования экспериментальных балок показана на рис. 1.16.

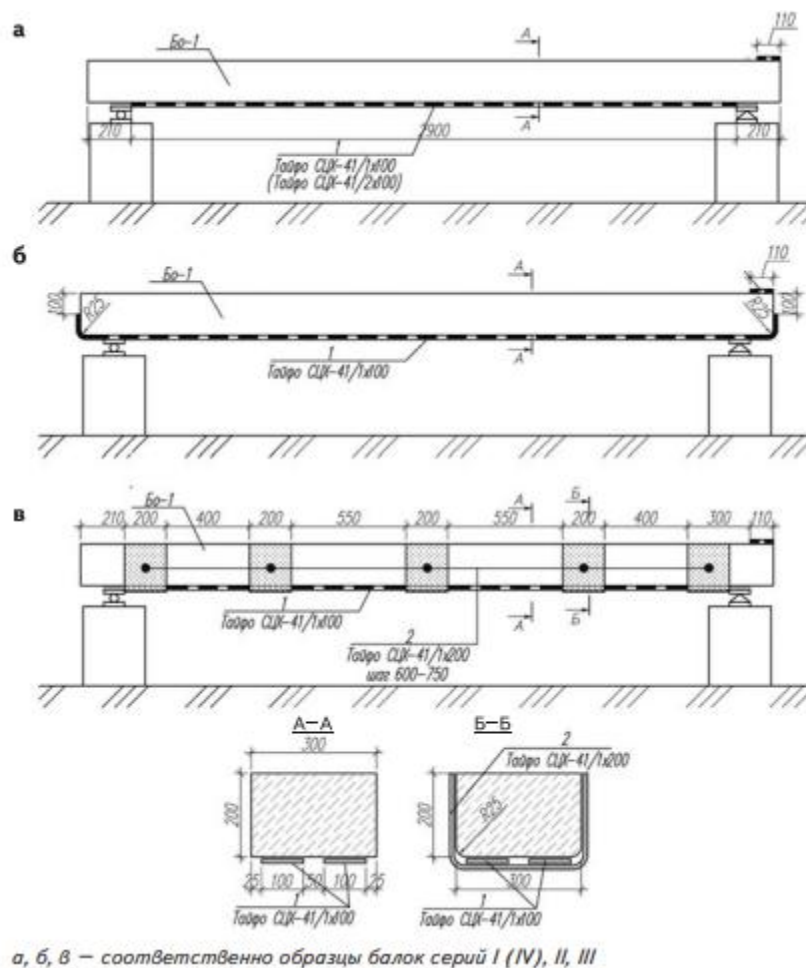


Рисунок 1.16 – Схема внешнего армирования экспериментальных балок

В работе Польского П.П., Маиляна Д.Р., был проведен краткий обзор данных о результатах исследования сжатых элементов, усиленных композитными материалами, а также предложена широкая программа исследований, направленная для восполнения указанных пробелов. Предлагаемая программа исследования и испытаний, предусматривающая большие объемы сложных, но интересных, а порой и абсолютно новых испытаний изгибаемых и сжатых опытных образцов, изготовленных из тяжелого бетона классов В30 и В60. При различном виде напряженно-деформированных состояний были исследованы прочностные характеристики, а также деформативность и трещиностойкость по нормальным и наклонным сечениям. Программа исследования железобетонных конструкций с использованием композитных материалов в качестве внутренней и наружной арматуры представлена на рис. 1.17.



Рисунок 1.17 - Программа исследования железобетонных конструкций с использованием композитных материалов в качестве внутренней и наружной арматуры

Большой вклад в развитие теории и практики усиления железобетонных конструкций так же внесли следующие ученые: Юбина А.Г., Костенко А.Н., Кортузов Д.Н., Грановский А.В., Юрьева А.Г., Курлапов Д.В., Куваев А.С., Родионов А.В., Валеев Р.М., использование композитных материалов в усилении автомобильных мостов: Кудрявцев С.В., Кудрявцев В.А., Гурьянов Ю.В., Пиунов Д.А., Умиров А.Д., Овчиников И.Г. и др.

Проанализировав научные труды по данной теме, можно выделить следующих зарубежных авторов: Horiguchi T. [26], Toutanji H. A. [27], Ritchiel P. A. [28], Meisam S. G. [30], Grace N.F. [29], Михуб Ахмад [31] и др.

### 1.5 Аналитический обзор применения неметаллической арматуры в России и за рубежом

Применение неметаллической композитной арматуры в российском строительстве было начато около десяти лет назад, и в течение этого времени она использовалась без описывающего ее ГОСТа. Благодаря усилиям компаний был разработан и с 2014 года введен в действие.

В 2003 году применение стеклопластиковой композитной арматуры было разрешено СНиП 52-01 (в частности, стало возможным ее использование в конструкциях из железобетона). Введение нового ГОСТ 31938-2012 [32] подняло на новый уровень применение неметаллической композитной арматуры в строительстве, позволит компаниям - производителям значительно улучшить ее качество и даже выйти с предложениями поставок на мировой рынок.

Производители уверены, что внедрение нового ГОСТ 31938-2012 [32] приведет к значительному расширению области применения неметаллической арматуры. Они надеются, что смогут увеличить объемы продаж, а соответственно, и прибыль, а также улучшить качество предлагаемой продукции.

После Москвы, Санкт-Петербурга, Новосибирска и Краснодара, активно использующих ее в строительстве, композитная арматура станет популярной и в других российских регионах, нуждающихся в современных высокотехнологичных материалах для строительства жилых зданий и промышленных сооружений. Внедрение ГОСТ на неметаллическую композитную арматуру разнообразит рынок, и потребители получат возможность убедиться в технологичной и экономической эффективности применения композитов.

Массовое производство композитной арматуры в России началось лишь в 2008 году. К этому времени накопился довольно солидный мировой опыт использования АСК. Успешно опробованная в СССР еще в 1960-1970-х годах, арматура из композитных материалов нашла свое применение в Германии и Японии, Канаде и США.

Помогло дальнейшему расширению сфер использования композитной арматуры появление магнитно-резонансных томографов. Аппараты МРТ подвержены влиянию полей, создаваемых металлом, а значит, его не стоит выбирать для укрепления бетона при строительстве новых лечебных учреждений. Примеры использования композитной арматуры в этой сфере -

здание клиники Майо в городе Рочестер штата Миннесота и Национальный институт здравоохранения в городе Бетесда (Мэриленд). По той же причине стеклопластиковая арматура активно используется за рубежом при возведении электростанций и генерирующих энергоблоков, а также аэропортов.

Не обходят неметаллическую композитную арматуру заслуженным вниманием и европейские строители. Первой, помимо СССР, страной, проверившей прочность, стала Германия. В 1986 году там был открыт автодорожный мост, при строительстве которого использовалась арматура из преднапряженного АСК. Во многом благодаря этому успешному опыту композитная арматура с успехом используется в странах Европы до сих пор. Так, в 2009-2010 годах в Цюрихе (Швейцария) стеклопластик был применен при строительстве взлетной полосы, а в 2010 году в Линце (Австрия) – в дорожном покрытии. Ранее – в 2003 году – неметаллическая арматура была использована при строительстве железнодорожного тоннеля под Темзой в Лондоне, арматура стала незаменимой и для метростроения – ее применяют как в Европе, так и в Азии.

Объем мирового рынка композитов составляет 12 млн. тонн в год и не менее 700 млрд. евро в денежном выражении. Производство композитов и изделий из них в мире растет на 5-8% в год, большая доля приходится на Китай, США, ЕС и страны Юго-Восточной Азии.

Объем производства композитов в России катастрофически низок и не превышает нескольких процентов от мирового рынка. Он исчисляется десятками тысяч тонн и составляют всего 0,3-0,5% от мирового объема. Но темпы роста в 2015 году по сравнению с 2013 годом увеличили объем производства композитной продукции почти на треть - с 23,1 млрд. руб. до 33 млрд. руб. Распоряжением Правительства РФ №1307р от 24 июля 2013 г. Утвержден план мероприятий «Развитие отрасли производства композитных материалов», представляющий комплекс мероприятий, обосновывающих необходимость развития в РФ отрасли производства композитов и изделий из

них. В связи с этим у российского рынка композитов имеются большие перспективы роста спроса. К 2020 году планируется увеличение рынка композитов более чем в 10 раз.

Проведя анализ маркетинговых исследований, были определены реальные объемы производства композитных материалов, результаты которого представлены на рис. 1.18.

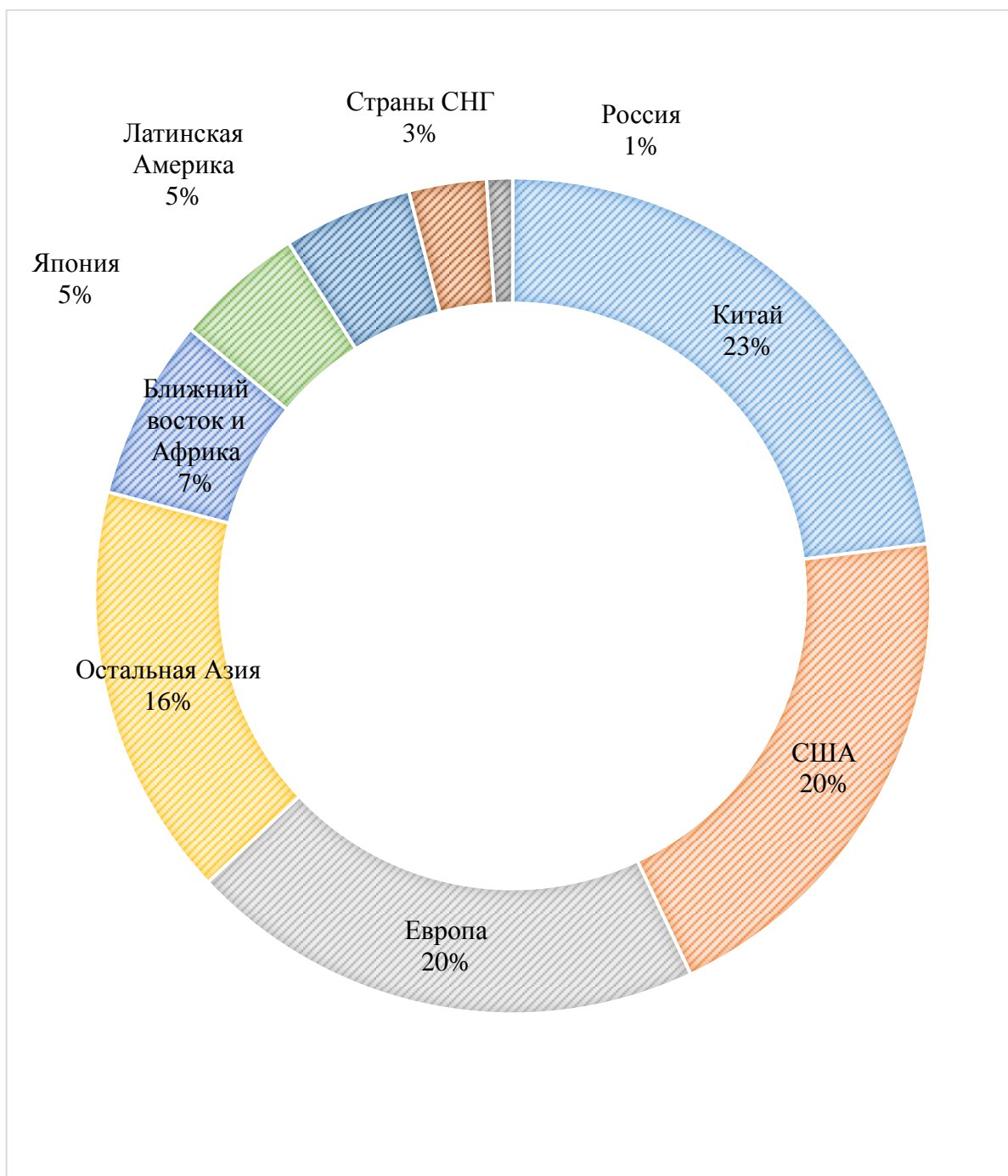


Рисунок 1.18 – Объем мирового рынка производства композитных материалов



## **Выводы по первой главе**

1. Определены основные технические характеристики, физико - механические свойства бетона.
2. Конкретизирована характеристика процессов бетонирования и армирования строительных, а именно железобетонных и бетонных конструкций.
3. Определены основные свойства, технические характеристики, физико - механические свойства композитных материалов и композитной арматуры.
4. Рассмотрены примеры наиболее распространённых видов композитной арматуры.
5. Проведен анализ областей применения композитов в строительстве, в качестве усиления железобетонных конструкций.
6. Проанализированы научные отечественные и зарубежные научные работы, статьи, исследования на тему усиления железобетонных конструкций.
7. Уточнена классификация композитных материалов по природе компонентов, содержащихся в составе данных материалов.

## **2 Анализ технологии усиления бетонных и железобетонных конструкций композитными материалами и свойств применяемых материалов**

### **2.1 Анализ технологии и особенностей бетонирования и армирования бетонных и железобетонных конструкций**

Бетон остается ключевым стройматериалом, который используется на разных этапах возведения конструкций. При неравномерной нагрузке, так называемые зоны растяжения дают трещины в бетоне, а для чтобы избежать появления преждевременной коррозии и повысить износостойчивость зданий, стали использовать метод армирования.

Прочность соединения арматуры с бетоном довольно велика. Она не разрушается даже при сильных температурных перепадах, потому что коэффициенты их теплового расширения почти одинаковые. Укрепление бетона ведет к перераспределению нагрузок в зоне растяжения балок (потому что упругость стали значительно выше).

Ранее для армирования бетонных конструкций использовались только металлические (стальные прутья) стержни. Сейчас же армирующие материалы для бетона представлены суперпрочными стеклянными, базальтовыми и углеродными композитными материалами.

Согласно [33, 38, 34], армирование конструкций можно разделить на основные типы (рис. 2.1).



Рисунок 2.1 – Типы армирования конструкций

По рис. 2.1 необходимо пояснить, что монолитное армирование подразумевает под собой одно-, многослойный каркасный монтаж прутьев,

соединенных проволокой, дисперсное армирование осуществляется путем добавки мелкодисперсного компонента (фибры) в раствор бетона, изготовленная из стали, базальта и т.д., сетчатое – армирование осуществляется путем укладки арматурных сеток, размером 0,5×2 или 1,5×2м.

Проанализировав [8, 35, 20 и др.], можно выделить основные технологические этапы армирования бетонной конструкции композитными материалами:

1. Осмотр и подготовка площади армирования.
2. Устройство горизонтальной и вертикальной опалубки.

«Опалубка на строительную площадку должна поступать комплектно, пригодной к монтажу и эксплуатации, без доделок и исправлений.

Поступившие на строительную площадку элементы опалубки до монтажа башенного крана размещают в зоне действия гусеничного автокрана. Все элементы опалубки должны храниться в положении, соответствующем транспортному, расположенные по маркам и типоразмерам. Хранить элементы опалубки необходимо под навесом, в условиях, исключающих их порчу. Щиты укладывают в штабели высотой не более 1-1,2 м на деревянных прокладках. Остальные элементы, в зависимости от габаритов и массы укладывают в ящики.

За состоянием установленной опалубки должно вестись непрерывное наблюдение в процессе бетонирования. В случаях непредвиденных деформаций отдельных элементов опалубки или недопустимого раскрытия щелей следует устанавливать дополнительные крепления и исправлять деформирование места» [15].

«Отрыв опалубки от бетона должен производиться с помощью домкратов или монтажных ломиков. Бетонная поверхность в процессе отрыва не должна повреждаться. Использование кранов для отрыва опалубки запрещено.

После снятия опалубки необходимо:

- Произвести визуальный осмотр элементов опалубки;
- Очистить от налипшего бетона все элементы опалубки;
- Произвести смазку поверхности палуб, проверить и нанести смазку на винтовые соединения;
- Произвести сортировку опалубки по маркам» [15].

### 3. Подготовка композитной арматуры.

После тщательного осмотра на предмет дефектов, прутья или сетку равномерно укладывают на горизонтальную поверхность и распределяют с учетом контура предполагаемой постройки. Для значительного повышения прочности конструкции, необходимо использование цельного арматурного прутка нужной длины. Расстояние между прутами должно быть рассчитано заранее и быть одинаковым на всех участках.

### 4. Соединение арматуры.

Композитная арматура не поддается сварке и требует грамотного подбора технологии вязки армирующих каркасов при усилении конструкций.

Известно [7, 9, 36, 35], что соединение композитной арматуры выполняется следующими способами:

- стальная вязальная проволока и специальные крючки (простой, экономичный метод, который актуален при вязке прутков разного диаметра);
- механические, электрические вязальные пистолеты – такое соединение востребовано при создании каркасов для армирования больших площадей;
- пластиковые хомуты, которые обеспечивают быстрое соединение пластиковой арматуры без применения специального инструмента (ручная вязка);
- тонкие пластиковые клипсы.

Вариант вязки элементов армирующего каркаса/пояса подбирается индивидуально и зависит от нескольких факторов:

- масштаб объекта – на этапах возведение фундамента с большой площадью или при создании промышленных полов ручное крепление пластиковой арматуры будет нецелесообразно;

- специфика работ – при армировании в промышленных условиях применение вязальных пистолетов, выполняющих вязку стальной проволокой или пластиковыми клипсами;
- требования к прочности конструкции – ручное соединение арматуры при помощи клипс и пластиковых хомутов не дает гарантии сохранения целостности каркаса в процессе заливки бетонной смеси.

## 5. Бетонирование конструкции.

Бетонирование конструкций является довольно сложным и трудоемким процессом.

Как известно, «распределение бетонной смеси в бетонируемой конструкции производят горизонтальными слоями одинаковой толщины, укладываемые в одном направлении. Перекрытие предыдущего слоя последующем выполняют до начала схватывания цемента, а время перекрытия устанавливается лабораторией в зависимости от температуры наружного воздуха, свойств применяемого цемента. Ориентировочно это время не более 2 ч» [15].

Следует учесть, что «продолжительность перерывов в бетонировании, при котором требуется устройство рабочих швов, определяется лабораторией в зависимости от вида и характеристики цемента и температуры твердения бетона. Укладку бетонной смеси после таких перерывов производят только после обработки поверхности рабочего шва цементным раствором толщиной 20-50 мм или слоем пластичной бетонной смеси» [15].

Отличительная особенность заключается в том, что «бетон, уложенный в жаркую солнечную погоду, следует немедленно покрыть. Во время дождя бетонная смесь должна быть защищена от попадания воды. Случайно размывтый слой бетона следует удалить» [15].

«Оптимальная продолжительность вибрирования на одном месте 20-30 с. Глубина погружения вибратора в бетонную смесь должна обеспечивать частичное углубление его в ранее уложенный незатвердевший слой бетона» [15].

## **2.2 Анализ технологии усиления бетонных и железобетонных конструкций композитными материалами**

Проанализировав научные труды [37, 33, 21 и др.], можно утверждать, что «технология внешнего армирования железобетонных конструкций с использованием композитных материалов (рис. 2.2) включает:

- подготовку поверхности конструкции;
- заготовку холстов и ламелей (ламинатов);
- приготовление клея;
- приклеивание элементов внешнего армирования» [33].

### **1. Подготовка основания под приклеивание.**

Как известно, основание - «поверхность железобетонной конструкции, на которую наносят ремонтные смеси, наклеивают ламинаты, изделия из непрерывного углеродного или стеклянного волокна (холсты, сетки и другие тканые материалы) при ее усилении внешним армированием из композитных материалов» [40].

«Основание должно быть полностью очищено от поврежденного слоя бетона и от остатков масел, лакокрасочных материалов, загрязнений или следов осуществлявшегося ранее ремонта. Перед непосредственным началом ремонтных работ основание должно быть абсолютно чистым, плотным, твердым и иметь необходимую шероховатость» [40]. «Перед нанесением на бетонное основание слоя клея поверхность бетона продувают сжатым воздухом, после чего на поверхность наносят праймерный слой с целью пропитки бетона и заполнения мелких неровностей. На высохшую поверхность наносят первый слой клея с помощью шпателя, кисти, валика с коротким ворсом» [41].

«Трещины с раскрытием более 0,3 мм должны быть заинъектированы низковязким эпоксидным составом, трещины с меньшим раскрытием могут быть затерты полимерцементным раствором. На поверхность основания мелом наносятся линии разметки в соответствии с принятой проектом схемой приклеивания элементов внешнего армирования» [33].

Технологическая схема внешнего армирования железобетонных конструкций композиционными материалами представлена на рис. 2.2.

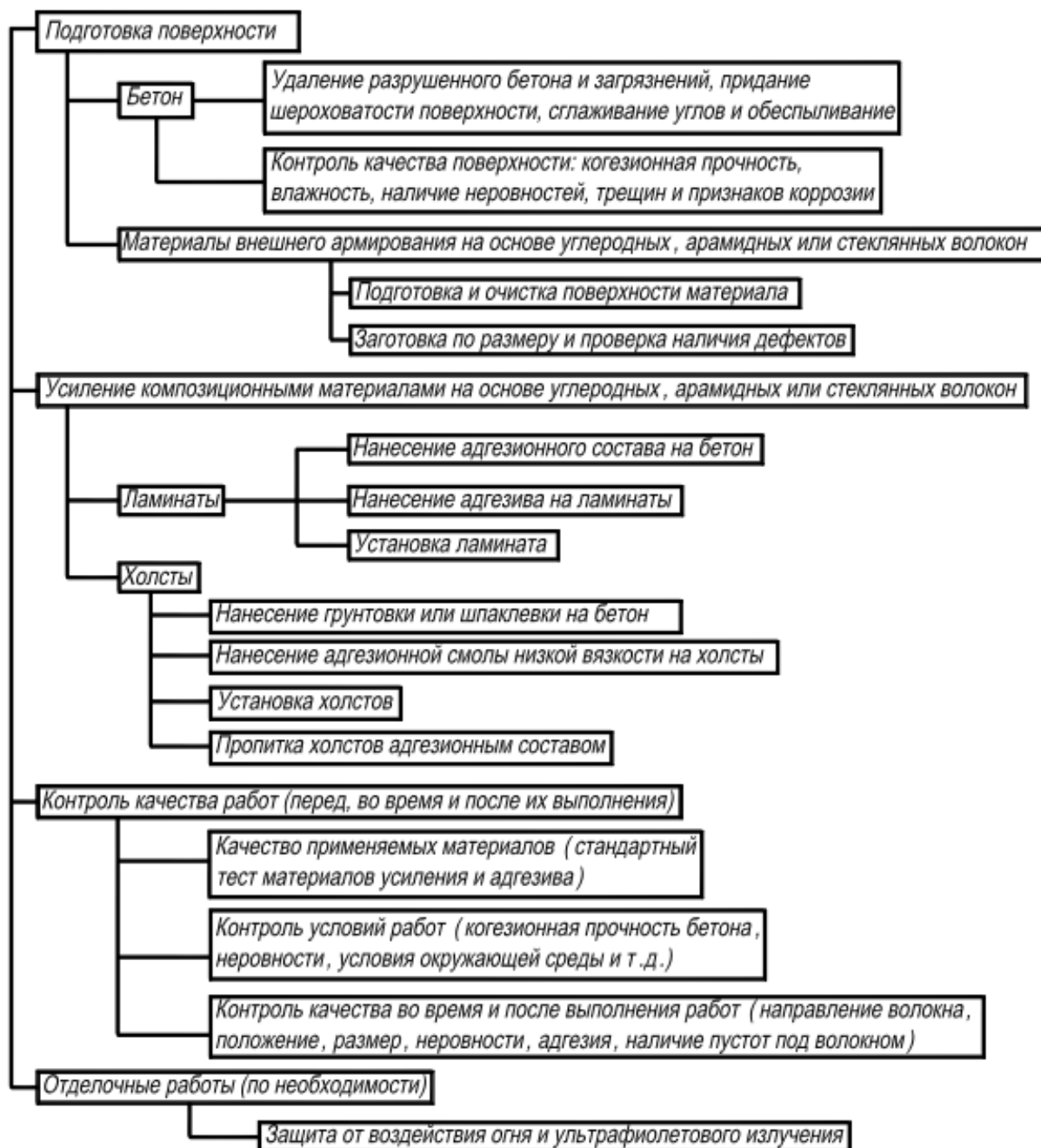


Рисунок 2.2 – Технологическая схема внешнего армирования железобетонных конструкций композиционными материалами

## 2. Заготовка холстов и ламелей (ламинатов).

«Раскрой холстов осуществляется на гладком столе (верстаке), покрытом полиэтиленовой пленкой. Рекомендуется, чтобы стол был снабжен приспособлением для разматывания холстов с бобины. Для резки холстов

используют ножницы или острый нож. Нарезанные холсты сматываются в рулон, снабжаются этикеткой с указанием номера, размера и количества заготовок и помещаются в полиэтиленовый мешок» [42].

### 3. Приготовление клея.

«Приготовление клея производится в чистой металлической, фарфоровой, стеклянной или полиэтиленовой емкости объемом не менее 3-х литров следующим образом. В емкость отвешивается необходимое количество компонента А, добавляется требуемое по соотношению количество компонента Б и производится тщательное перемешивание вручную деревянной или алюминиевой лопаткой, либо с помощью низкооборотной дрели с насадкой (до 500 оборотов в минуту с целью ограничения аэрации смеси). Емкость закрывают крышкой, снабжают этикеткой с указанием времени приготовления и передают к месту производства работ» [42].

### 4. Приклеивание элементов внешнего армирования.

«На слой клея укладывают (раскатывают) холст (ленту) с одного края усиливаемой конструкции до другого. В процессе укладки необходимо следить, чтобы внешняя кромка ленты была параллельна линии разметки на бетоне. Холсты (ленты) раскатывают таким образом, чтобы в них не было складок и без излишнего натяжения. После укладки осуществляется прикатка (прижатие) холста (ленты), в процессе которой происходит его пропитка. Прикатку осуществляют с помощью шпателя или жесткого резинового валика от центра к краям строго в продольном направлении (вдоль волокон холста)» [42].

Нанесение следующего слоя клея происходит перед укладкой второго слоя холста (при многослойной схеме внешнего армирования) на прикатанный первый слой. Нанесение финишного слоя осуществляется только после укладки последнего слоя холста. Расход клея зависит от качества поверхности конструкции, типа состава, температуры и влажности окружающей среды и указывается в проекте производства работ» [42].



## **2.3 Методика расчета железобетонных конструкций, усиленных композитными материалами, принятая в РФ и за рубежом**

В данный момент условно отмечено несколько основных расчетных моделей или методик по проектированию и расчету железобетонных элементов, усиленных композитными материалами, которые оформлены в виде рекомендаций, руководств и отраслевых норм, в таких странах как: Россия, Италия, США и т.д. Базой данных расчетных моделей является теория изгиба железобетонных балок, которые были реализованы в методе предельных состояний.

Другие расчетные модели тяготеют к использованию компьютерной техники, т.к. основаны на методе конечных элементов, модели изменения потенциальной энергии и реализуются на основе программного комплекса.

Несколько обособлено стоит метод расчета по ферменной аналогии, в котором каждый вид разрушения изгибаемого элемента, усиленного композитными материалами, представлен математической моделью в виде формул.

### **2.3.1 Методика расчета, принятая в РФ**

Нормативная база России представлена «Руководством по усилению железобетонных конструкций композитными материалами».

Расчет системы усиления на основе ФАП предполагает рассмотрение 4-х случаев предельных состояний для усиленного элемента, связанных с видами их разрушения. Однако проектирование усиления рекомендуется выполнять только для двух:

- наступление текучести в растянутой стержневой арматуре и последующий разрыв внешней арматуры ФАП без разрушения сжатой зоны бетона;
- наступление текучести в растянутой арматуре и последующее разрушение внешней арматурой ФАП и сжатой зоны бетона [31, 43]. Вместе с тем, следует отметить, что переармирование внешними композитными

материалами чаще всего бывает в балках таврового профиля при высоком коэффициенте усиления.

Подбор площади внешней арматуры  $A$  рекомендуется выполнять методом последовательного приближения, предварительно задавшись начальной величиной [31, 43, 44].

### 2.3.2 Зарубежные методики расчета

Нормативная база Италии по усилению железобетонных конструкций основана на «Руководстве по проектированию усиления эксплуатационных конструкций композитными полимерными материалами», которое разработано в 2004 году. В данном руководстве производится расчет железобетонных элементов, в которых усилены нижние грани, по двум группам предельных состояний. Можно выделить четыре типа разрушения, которые связаны с отслоением:

- 1) краев композитных материалов;
- 2) при возникновении моментов в середине пролета между вертикальными трещинами;
- 3) при действии поперечных сил в зонах образования наклонных трещин;
- 4) неправильное соблюдение технологической последовательности внешнего усиления композитными материалами.

Для предотвращения перечисленных видов разрушения по каждому накладываются некоторые ограничения [31, 50]. Например, для четвертого случая ограничивается изменение предельных значений напряжений между трещинами, определяемых по формулам:

$$f_{(f_{dd,2})} = \frac{3}{\gamma_{f,d} \cdot \gamma_c} \cdot \frac{2 \cdot E_f \cdot 0,03 \cdot K_b \cdot \overline{f_{ck}} \cdot \overline{f_{ctm}}}{t_f} \quad (2.1)$$

где  $\gamma_{f,d}$  - коэффициенты надежности, зависящие от типов разрушений систем усиления;

$\gamma_c$  - коэффициенты надежности для бетона;

$t_f$  - толщины холстов, лент, ламелей, ламинатов из композитного материала;

$E_f$  - модуль упругости волокон композитного материала;

$f_{ctm}$  - расчетные сопротивления бетона растяжению;

$f_{ck}$  - расчетные сопротивления бетона сжатию;

$K_b$  - геометрические коэффициенты, зависящие от ширины усиливаемых балок и ширины композитных материалов.

$$K_b = \frac{1 - \frac{B_c}{B}}{1 + \frac{B_c}{400}} \geq 1 \quad (2.2)$$

где  $B$  - ширина усиливаемых балок;

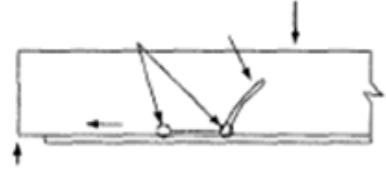
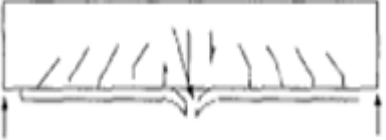
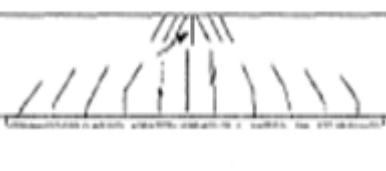
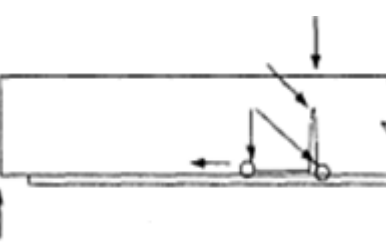
$B_c$  - ширина композитных материалов.

Расчетами железобетонных элементов по ферменной аналогии, предложенными в Италии, рассматриваются семь основных видов разрушений балок, которые усилены композитными материалами. Схемы таких разрушений и их характеристик приведены в табл. 2.1.

Таблица 2.1 - Схемы разрушений усиленных балок и характеристик видов разрушения

Вид разрушения	Схемы разрушения усиленных балок по видам разрушения	Характеристика вида разрушения
1	2	3
1		«Нарушение сцепления между бетоном и материалом усиления, которое может происходить у торца приклеенных композитным материалом, под сосредоточенными силами, либо вдоль наклеенной поверхности» [31]
2	а	«Дробление сжатой зоны бетона и одновременное или последовательное достижение в поперечной арматуре предела текучести» [31]
	б	

Продолжение таблицы 2.1

1	2	3
3		<p>«Достижение в продольных и поперечных стержнях арматуры предельных напряжений» [31]</p>
4		<p>«Дробление сжатой зоны бетона и (или) разрыва пластин усиления при достижении в стальной арматуре предела текучести» [31]</p>
5		<p>«Дробление сжатой зоны бетона без достижения предела текучести в стальной и композитной арматуре» [31]</p>
6		<p>«Дробление сжатой зоны бетона при одновременном достижении предельных напряжений в продольной арматуре, или только в продольной арматуре, при этом поперечная арматура отсутствует» [31]</p>

Несущая способность усиленной балки определяется по формуле:

$$V_{\text{теор}} = \left(\frac{\tau}{f_c}\right)^{\min} \cdot b \cdot d \cdot f_c \quad (2.3)$$

где  $\left(\frac{\tau}{f_c}\right)^{\min}$  - минимальные значения безразмерных величин, которые определяются по формулам, соответствующим виду разрушения с применением различных параметров и коэффициентов;

$b$  – ширина усиливающего композитного материала (ламели, ленты, ткани);

$d$  – поперечное сечение усиливающего композитного материала;

$f_c$  – расчетное сопротивление композитного материала.

#### 2.4 Программа исследования и характеристика опытных балок

При составлении программы испытаний были учтены разработки, отмеченные в научных трудах [31, 45, 46, 47] и была разбита на 2 этапа.

1. Проводились испытания балок с арматурой класса А500, которая имеет площадку текучести, с процентом армирования – 0,68%.

2. Проводились испытания балок с арматурой класса А600, у которой отсутствует площадка текучести, с процентом армирования – 1,15%, являющимся близким к оптимальному.

Целью проведения испытаний являлось исследование влияния подбора усиливающих композитных материалов (холстов, ламелей, ламината, лент и т.д.), процентного показателя армирования конструкции на прочностные характеристики экспериментальных образцов.

Экспериментальные балки Б4 имели идентичные размеры и являлись закупной позицией завода ТЗЖБИ г. Тольятти, которые составляют 2160×300×300 мм.

Шифром экспериментальных балок являлся:

- «Б4» - эталонная балка, являющаяся закупной позицией завода ТЗЖБИ;

- «У» - балка «Б4», которая усилена внешним армированием из композитных материалов;

- «С, У, П» - данное обозначение относится к виду композитного армирования (стеклоткань, углеткань, полоса (ламель, ламинат) на основе углепластика);

- первое число «1, 2» - обозначение рабочего армирования растянутой зоны экспериментальных балок («1» - 2Ø10, А500; «2» - 2Ø14, А600);

- второе число «1, 2» - обозначение дублирующей эталонной балки.

В качестве монтажной арматуры принята - 2Ø6 В500.

Испытания экспериментальных эталонных балок выполнялись с изготовлением двух идентичных балок. Усиленные экспериментальные балки «Б4У» были изготовлены с разным %-ом армирования композитными материалами. В первом случае – усиление однослойными холстами, во втором – усиление двухслойными холстами. Схема армирования экспериментальной балки представлена на рис. 2.3.

Механические свойства используемой арматуры приведены в табл. 2.2.

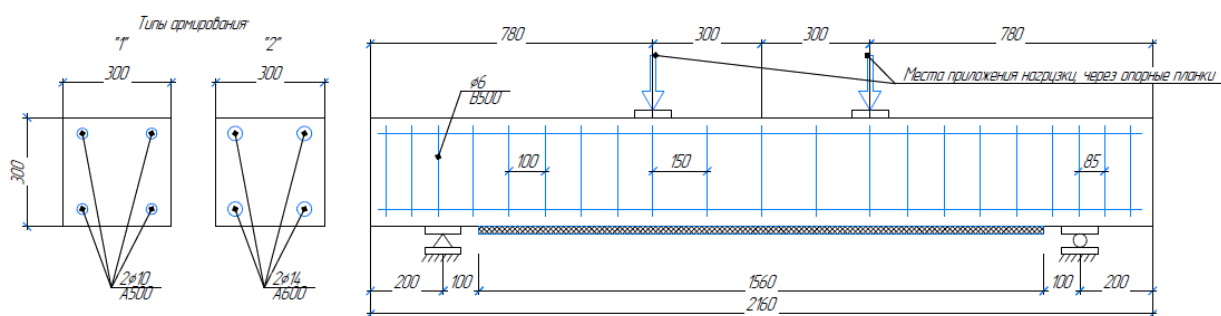


Рисунок 2.3 – Схема армирования экспериментальных балок

Первым слоем (второе число - «1») являются холсты, которые состоят из 3-х полотен стекло- или углеткани, ширина которых составляет - 150 мм, либо из 1-ой полосы (ламели), сечение которой составляет - 1,4×50мм. Вторым слоем (второе число - «2») являются холсты идентичной ширины, которые выполнены из 6-ти полотен стекло- или углеткани, либо из 2-х полос ламели на основе углепластика вышеуказанного сечения.

## 2.5 Методика усиления балок и проведения испытаний

### 2.5.1 Методика усиления испытываемых балок

В качестве усиления экспериментальных образцов было использовано 3 вида композитных материалов:

- стеклоткань, с прямоугольным плетением (характеристики материала табл. 2.2);
- однонаправленная углеткань (характеристики материала табл. 2.3);
- полосы (ламели), на основе углеродных волокон (характеристики материала табл. 2.5).

Проанализировав методику, которая была представлена в научных трудах [31, 48, 49], «усиление образцов осуществлялось по следующей технологии:

- разметка поверхности железобетонных балок в соответствии с конструктивной схемой усиления, согласно программе исследования;

- механическая очистка поверхности бетона (насечка) от цементного молока до оголения щебня и ее обеспыливание;
- создание угловых фасок радиусом 15 мм с помощью шлифовального круга в местах установки анкерных устройств;
- усиление балок, которое выполнялось в несколько этапов в зависимости от вида наклеиваемых композитных материалов (рис. 2.4)» [31].

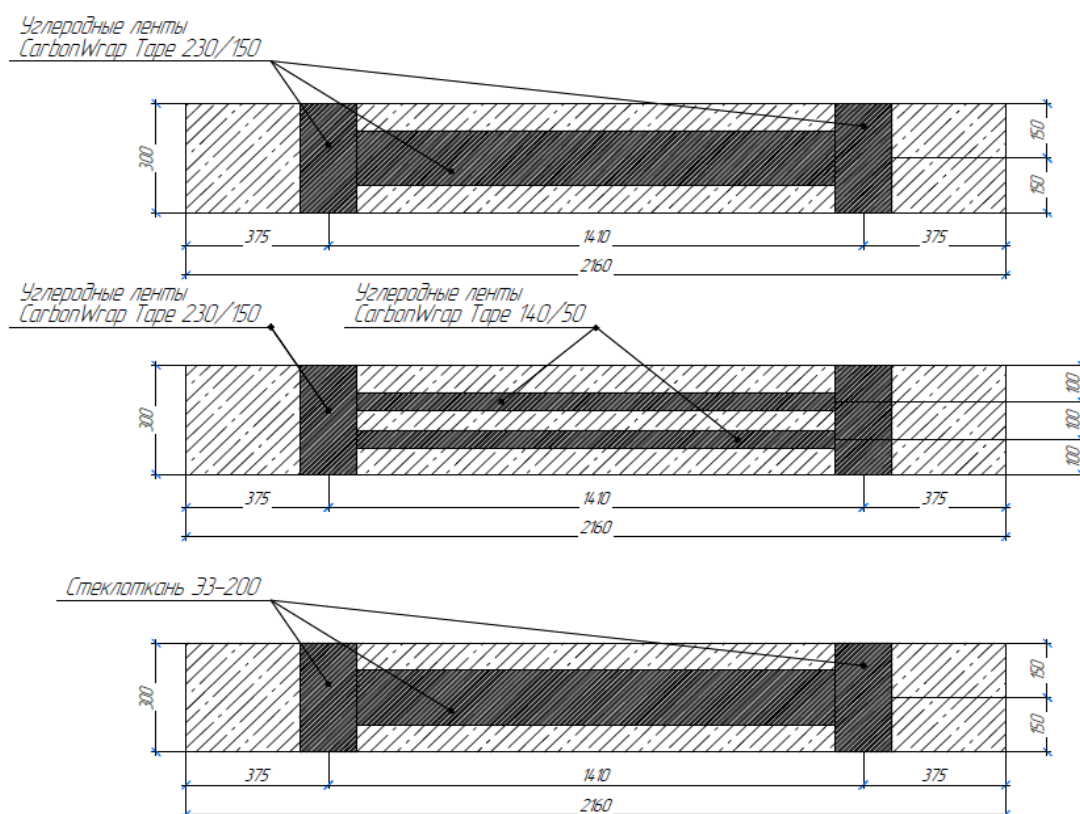


Рисунок 2.4 – Схема общего вида балок после наклеивания одной или двух полос из углеродистого пластика CarbonWrap Tape 140/50 и CarbonWrap Tape 230/150

### 2.5.2 Методика проведения испытаний балок

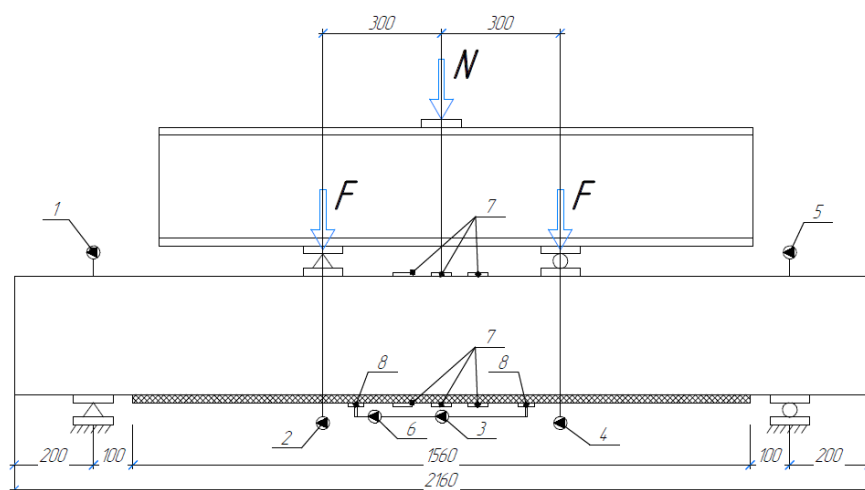
Опытные образцы были испытаны на специальном стенде (рис. 2.5), на котором осуществлялось приложение кратковременных нагрузок, которые передавались с помощью специальных опорных планок. Расчетная схема - однопролетные свободно опертые балки. Осуществление передачи нагрузки на опытные образцы производилось с помощью специальных траверс, 2-мя

сосредоточенными силами, расположенными на расстоянии 300мм от центра экспериментальных балок.

Приложение усилий осуществлялось через опорные пластины, толщина которых составляла - 25 мм, а ширина 100 мм. Расчетный пролет балок составлял 1860 мм, а пролет среза - 600 мм (рис. 2.5).

Испытания опытных образцов до разрушения производилось нагружением ступенчато - возрастающей нагрузкой с выдержкой 10 – 15 минут на каждом этапе, контроль которой осуществлялся индикаторами часового типа, установленных на образцовом динамометре системы Токаря с максимальным усилением 500 кН. Балки, которые были усилены стеклотканями, были подвержены испытаниям в возрасте 391 - 412, а углепластиком – 432 - 458 суток или через 13 - 15 месяцев после их изготовления. После усиления композитными материалами, балки до момента испытания выдерживались в течение 13 - 25 суток. Разница в возрасте балок - близнецов на момент испытания эталонных или усиленных образцов не превышало 2 - 3 суток.

Схема конструкции стенда для испытания образцов, со схемой расположения приборов при испытании балок представлена на рис. 2.5.



1, 2, 3, 4, 5 - индикаторы часового типа; 6 - тоже для определения деформаций растянутой зоны; 7 - тензодатчик сопротивлений; 8 - опора для крепления индикаторов

Рисунок 2.5 – Конструкция стенда для испытания образцов, со схемой расположения приборов при испытании балок



Интенсивность нагрузки на первых четырех этапах, т.е. до появления трещин и еще плюс один - два этапа, составляла 5 кН. Затем до уровня 0,8 от теоретической величины разрушающей нагрузки этапы составляли 10 и (или) 20 кН. Далее нагрузка на последующих этапах, вплоть до разрушения, составляла 6 или 8 кН. Принятый уровень нагрузки приблизительно был равен 1/20 и 1/10 от величины предельного значения.

## 2.6 Характеристика используемых материалов и оборудования

Для проведения экспериментов были приняты заводские балки типа Б4 завода ТЗЖБИ г. Тольятти, состоящие из бетона В10, наиболее распространенного в массовом строительстве, металлической арматуры периодического профиля классов А500 и А600, а также внешнего усиления в виде композитных материалов (стеклоткань ЭЗ-200, углеткань CarbonWrap Tape 230/150, ламели CarbonWrap Tape 140/50).

В качестве усиления внешним армированием композитными материалами растянутой зоны железобетонной балки приняты:

- стеклоткань ЭЗ-200, изготовленная в России;
- углеткань с однонаправленными волокнами холодного отверждения (CarbonWrap Tape 230/150), и полосы (ламели) из однонаправленных углеродных волокон (CarbonWrap Tape 140/50), изготовленные в России.

Технические характеристики указанных материалов приведены соответственно в табл. 2.2 - 2.6.

Таблица 2.2 - Технические характеристики ткани из стеклянных волокон ЭЗ-200

Наименование показателя	Фактическое значение
Марка	ЭЗ-200
Толщина, мм	0,190+0,01/-0,02
Прочность на растяжение волокна, не менее, ГПа	2,8
Модуль упругости при растяжении, ГПа	145
Плотность ткани, нитей/см	10+1
Ширина ткани, не менее, см	95
Транспортируется в рулонах длиной, не менее, м	150
Массовая доля веществ, удаляемых при прокаливании, % не менее	1,0

Таблица 2.3 - Технические характеристики клея для стеклоткани ЭЗ-200

Наименование показателя	Фактическое значение
Цвет	прозрачный
Плотность после смешения (А+В), кг/л	1,05 ±0,05
Прочность на сжатие через 7 суток при температуре +20°С, МПа	75-120
Модуль Юнга компонента А+В) через 7 суток при температуре +23°С, ГПа	6,5
Температура бетона и воздуха при наклейке, °С	От +5 до+30
Температура хранения составляющих, °С	От +5 до +25
Пропорции смешивания (весовые)	А:В = 1:0,25
Срок годности к применению после смешивания компонентов (А+В) при температуре 20°С, мин.	20
Адгезия к бетону, МПа	> 3
Покрытие, кг/м	1,5 кг/м <sup>2</sup> первый слой, и 0,9 кг/м <sup>2</sup> второй слой

Таблица 2.4 - Технические характеристики углеткани CarbonWrap Tape 230/150

Наименование показателя	Фактическое значение
Поверхностная плотность, г/м <sup>2</sup>	230г/м <sup>2</sup>
Ширина, мм	150 мм
Длина рулона, п.м.	50 п.м.
Модуль упругости при растяжении, ГПа	245 ГПа
Прочность на растяжение волокна, не менее, ГПа	4,9 ГПа
Удлинение на разрыв волокна	1,8 %

Таблица 2.5 - Технические характеристики ламелей CarbonWrap Tape 140/50

Наименование показателя	Фактическое значение
Тип связующего	Эпоксидное
Ширина, мм	100 мм
Длина рулона, п.м.	90 п.м.
Модуль упругости при растяжении, ГПа	170 ГПа
Прочность на растяжение волокна, не менее, ГПа	3,5 ГПа
Удлинение на разрыв волокна	1,4 %

Таблица 2.6 - Технические характеристики связующего CarbonWrap Resin WS+

Наименование показателя	Нормативные значения
Плотность компонента (А+В), г/см <sup>3</sup>	Отверждённое состояние - 1,08±0,024
Прочность на изгиб через 7 суток при температуре +20°С, МПа, не менее	20
Температура бетона и воздуха при наклейке, °С	От +5 до+30
Температура хранения составляющих, °С	От +5 до +25

Продолжение таблицы 2.6

1	2
Пропорции смешивания (весовые)	A:B = 6,9:3,1
Срок годности к применению после смешивания компонентов (A+B) при температуре 21°C, час.	2
Адгезия к бетону, МПа	>2,5
Толщина нанесения, мм	0,1-0,2

Для оценки эффективности принятых композитных материалов для усиления, проводилось по показателям: прочность на растяжение волокна (рис. 2.6) и модуль Юнга при растяжении (рис. 2.7).

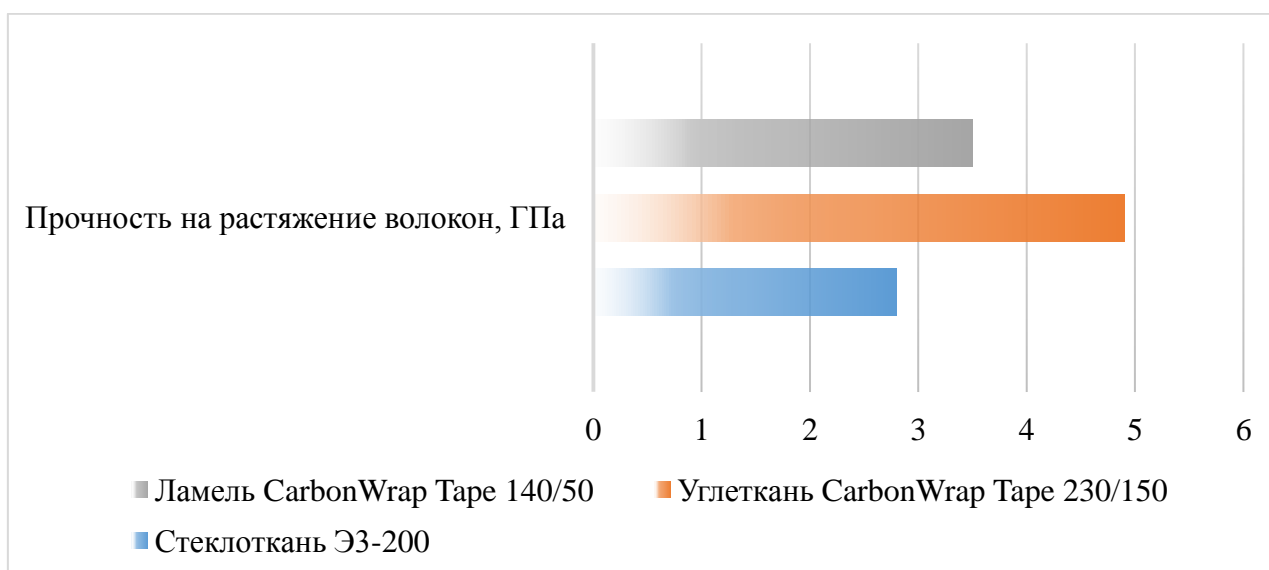


Рисунок 2.6 – График сравнения принятых композитных материалов по прочности на растяжение волокон

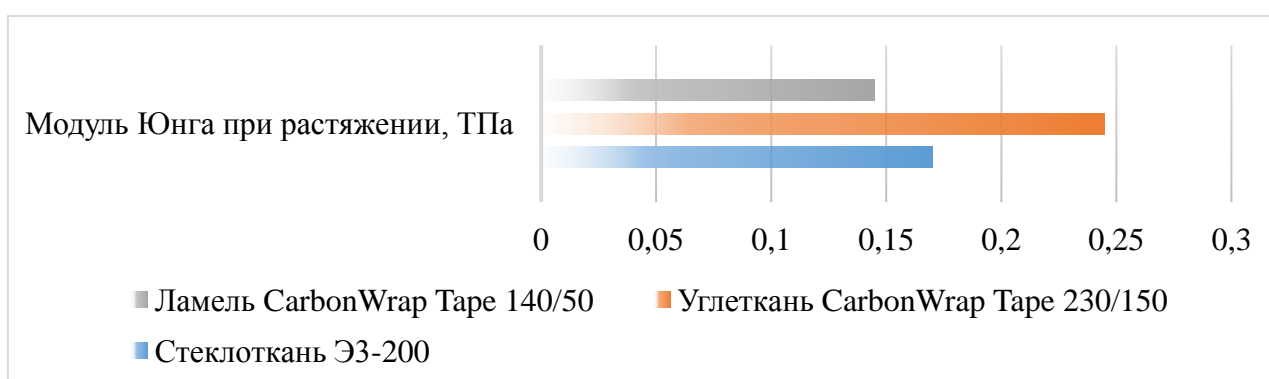


Рисунок 2.7 – График сравнения принятых композитных материалов по модулю Юнга при растяжении

Анализируя полученные данные, наиболее предпочтительной, в качестве усиления, является углеткань CarbonWrap Tape 230/150, которая по своим параметрам значительно превышает параметры ламелей и

стеклоткани, а по экономической стоимости незначительно дороже других материалов усиления.

## 2.7 Результаты экспериментальных исследований влияния вида композитных материалов на прочность усиленных балок

В эксперименте эталонными балками являются балки без внешнего усиления композитными материалами. Результаты экспериментальных исследований влияния вида композитных материалов на прочность усиленных балок приведены в табл. 2.7.

Таблица 2.7 - Результаты экспериментальных исследований влияния вида композитных материалов на прочность усиленных балок

Этапы испытания	Тип балок	Шифр балок	Наименование показателя				
			Площадь композита, см <sup>2</sup>	Опытная прочность балок $N_f, N_s, кН$	Мах. приращение несущей способности $N_f/N_s, \%$	Нагрузка $N_{ult}$ при предельно допустимом прогибе, кН	Приращение предельно допустимой нагрузки $N_{ult}/N_s, \%$
1	2	3	4	5	6	7	8
I этап	А эталон	Б4-1(1)	-	56,8	-	56,7	-
		Б4-2(1)	-	59,4	-	59,4	-
	Б стеклоткань	Б4У1-1(С)	0,75	71,6	22	68,8	18
		Б4У1-2(С)	1,5	89,4	52	74,8	26
	В углеткань	Б4У1-1(У)	0,58	92,1	57	92,1	59
		Б4У1-2(У)	1,16	83,5	41	83,5	41
	Г ламели	Б4У1-1(Л)	0,62	95,4	61	95,4	61
		Б4У1-2(Л)	1,24	83,3	41	83,3	41
II этап	А эталон	Б4-1(2)	-	122,8	-	110	-
		Б4-2(2)	-	121,9	-	109	-
	Б стеклоткань	Б4У2-1(С)	0,75	136,4	11	112,8	3
		Б4У2-2(С)	1,5	138,8	26	115	5
	В углеткань	Б4У2-1(У)	0,58	142,3	23	136,4	17
		Б4У2-2(У)	1,16	149,6	9	136,4	17
	Г ламели	Б4У2-1(Л)	0,62	129,2	8	126,8	15
		Б4У2-2(Л)	1,24	125,8	3	127,4	16
III этап	А эталон	Б4У-1*	1,5	148,5	15	135,8	13
Примечание: *Б4У-1 – балка, армированная композитной арматурой, эквивалентной металлической арматуре, упрочненной частицами микрокорунда							

Проанализировав данные таблицы, можно утверждать, что усиления железобетонных и бетонных конструкций соответствующим композитным материалом, зависит от материалов усиления и армирования, вида металлических стержней (арматуры) и композитных стержней (арматуры) и процентов армирования железобетонных и бетонных конструкций.

Исходя из табличных данных, показатели уровней приращения прочностных характеристик балок, с соответствующим классом арматуры А500 на первом этапе исследования, которые были усилены стеклопластиком, и усиленные образцы балок, с соответствующим классом арматуры А600 второго этапа, превышают практически в 2 раза.

Таким образом, можно отметить, что при увеличении процента армирования, меняется и эффективность композитных усилений, с обратной пропорциональной тенденцией, с показателем превышения в 2 раза.

Прочностные характеристики балок, которые были усилены стеклопластиковым композитным материалом, на первом этапе экспериментального исследования, увеличивались с увеличением площади сечения композитного материала. Однако, стоит отметить, что при увеличении процента металлического армирования (касательно балок второго этапа), наблюдается снижение эффективности усиления при уменьшении уровня приращения прочности.

Также из результатов видно, что с увеличением площади сечения углепластика в два раза, наблюдается уменьшение несущей способности опытных образцов примерно на 20 %.

В заключении, стоит обратить внимание на то, что при усилении опытных балок, в которых использовался большая площадь композитного армирования, снижается эффект от такого усиления, при отсутствии конструктивных мероприятий.

### **Выводы по второй главе**

1. Проанализирована технология и особенности бетонирования и армирования бетонных и железобетонных конструкций.
2. Проанализирована технология усиления бетонных и железобетонных конструкций композитными материалами.
3. Определена методика расчета железобетонных и бетонных конструкций в России и за рубежом.
4. Определение программы исследования и характеристики опытных балок.
5. Определена методика усиления и проведения испытаний опытных образцов.
6. Приведены характеристики применяемых материалов и оборудования при усилении железобетонных и бетонных конструкций.
7. Приведение и обоснование результатов экспериментальных исследований влияния вида композитных материалов на прочностные характеристики бетонных и железобетонных конструкций.

### **3 Технические и технологические решения по оптимизации бетонирования строительных конструкций с применением композитной арматуры**

#### **3.1 Предложения по составу и производству строительной композитной арматуры с применением микрокорундового порошка, нанопорошка ( $Al_2O_3$ ) и микрокремнезема**

##### **3.1.1 Предложения по составу строительной композитной арматуры**

Применяемая в настоящее время в строительстве металлическая арматура имеет ряд существенных недостатков – высокая стоимость, материалоемкость, масса, сложность транспортировки особенно больших объемов и т.д.

Указанное применение эффективных инновационных материалов, позволяет повысить или как минимум не привести к ухудшению свойств изделий, снизить их себестоимость, повысить в целом качество строительно-монтажных работ и продукции. Возможным решением проблемы может стать применение композитной арматуры (стеклопластик и производственно-бытовые отходы), превосходящей металлическую по экономическим и ряду эксплуатационных и технических параметров.

В настоящее время в различных отраслях широкое применение нашли композитные материалы, которые достаточно быстро заменяют традиционные металлические изделия, обгоняя их по экономическим и техническим параметрам.

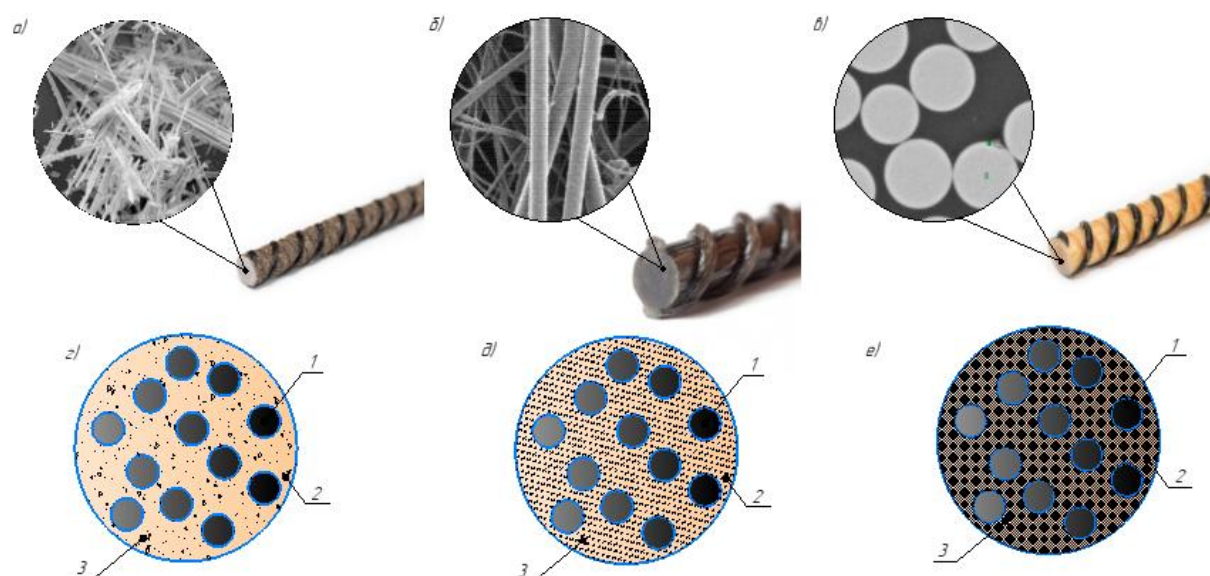
При этом, существенный вклад в решение экологической проблемы может стать использование в материале композитной арматуры частиц на основе отходов производства (микрокорунд, микрокремнезем, нанопорошок ( $Al_2O_3$ )) и бытовых отходов в виде пластиковых изделий (пластиковая посуда, бутылки).

Материал композитной арматуры будет состоять из традиционных компонентов стеклопластика и производственно-бытовых отходов

(микрорунд, микрокремнез, нанопорошок ( $Al_2O_3$ ), использованная пластиковая посуда, бутылки).

Нитяные волокна (стеклопластиковые или базальтовые) опускаются в полимерную смолу с измельченными частицами производственных отходов (микрорунд, микрокремнез, нанопорошок ( $Al_2O_3$ )), или бытовых (пластиковые бутылки или посуда), что приведет к армированию и к затверждению материала. Полученный ровинг направляется в видообразующую высокопрочную форму, через которую формируется стержень необходимого размера.

Пояснения по предложенной разработке показаны на рис. 3.1.



а) микроструктура композитной арматуры с включениями микрокремнезема; б) микроструктура композитной арматуры с включениями микрорунда; в) микроструктура композитной арматуры с включениями нанопорошка  $Al_2O_3$ ; г) сечение композитной арматуры с включениями микрокремнезема; д) сечение композитной арматуры с включениями микрорунда; е) сечение композитной арматуры с включениями нанопорошка  $Al_2O_3$ ; 1 – волокно (стекло-, угле-, базальто-); 2 - связующее вещество (эпоксидная смола и тд.); 3 – микрокремнез, микрорунд, нанопорошок  $Al_2O_3$

Рисунок 3.1 – Микроструктура композитной арматуры с различными включениями

Компоненты предлагаемого материала:

- ровинг (стеклоровинг или базальт);
- связующая нить (ровинг для обматывания);



- синтетическая смола;
- измельченные частицы производственных или бытовых отходов;
- дициандиамид;
- этил;
- ацетон.

Сравнивая прогнозируемые свойства, технико-экономические параметры отечественных и зарубежных материалов следует отметить, что отличия обнаружены также и по стоимости компонентов, которая у зарубежных аналогов выше на 28-36%, чем у отечественных. Кроме того, имеющийся научный задел, анализ и прогнозирование результатов дает основание считать, что включение в состав композитных материалов, предлагаемых микродисперсных порошков, приведет к улучшению термомеханических свойств материала примерно на 11-16 %, при незначительном увеличении цены примерно на 1,8 %.

В качестве элемента армирования предлагается арматурный стержень. Его профиль круглый или спиралевидный, а диаметр варьируется от 4 до 20 мм. Длина арматуры может достигать до 12 метров. Она может быть в виде скрученных бухт, диаметром примерно 10 мм.

Предлагаемая арматура из полимерных композитов и производственно-бытовых пластиковых отходов будет обладать важными достоинствами:

1. Прочность на разрыв в 3 раза выше чем у стальной арматуры класса АIII. Показатель предела прочности металлической арматуры - 390 МПа, композитной - не менее 1000 Мпа;
2. Слабо подвержена коррозии;
3. Кислотостойкая, в том числе и к морской воде;
4. Высокие упругие свойства;
5. Неэлектропроводна, практически не проводит тепло;
6. Магнитоэнертна, не меняет свойства под воздействием электромагнитных полей;
7. Не теряет прочностных свойств при воздействии низких температур;

8. Легче металлической арматуры в 9 раз;
9. Может иметь любую длину в соответствии с требованиями заказчика;
10. Финансовая экономия от замены металлической арматуры на равнопрочную композитную арматуру составляет 10-30%.

Объем мирового рынка композитов составляет 12 млн. тонн в год и не менее 700 млрд. евро в денежном выражении. Производство композитов и изделий из них в мире растет на 5-8% в год, большая доля приходится на Китай, США, ЕС и страны Юго-Восточной Азии.

Распоряжением Правительства РФ №1307р от 24 июля 2013 г. Утвержден план мероприятий «Развитие отрасли производства композитных материалов», представляющий комплекс мероприятий, обосновывающих необходимость развития в РФ отрасли производства композитов и изделий из них. В связи с этим у российского рынка композитов имеются большие перспективы роста спроса. К 2020 году планируется увеличение рынка композитов более чем в 10 раз.

### 3.1.2 Предложения по производству строительной композитной арматуры и применяемым механизмам и оборудованию

Для производства строительной арматуры предложенного состава необходимо определить технологическую линию, которая состоит из следующего необходимого оборудования:

1. Пульт управления – предназначен для управления и осуществления контроля за работой технологической линии по производству композитной арматуры, состоящий из металлического корпуса и панели прибора. Фотография пульта управления представлена на рис. 3.4.
2. Шпулярник для бобин - предназначен для установки бобин с нитями, представляющий собой металлический стеллаж с местами для установки бобин. Фотография шпулярника представлена на рис. 3.2.
3. Пропиточная ванна с натяжным устройством / устройство спиральной намотки / выравнивающее устройство - устройство предназначено для

выравнивания нитей, пропитки смолой и их намотки. Состоит из выравнивающего устройства, пропиточной ванны с двумя валиками, устройство спиральной намотки. Представляет собой конструкцию, установленную на металлический каркас. Фотография пропиточной ванны представлена на рис. 3.2.



Рисунок 3.2 - Пропиточная ванна с натяжным устройством / устройство спиральной намотки / выравнивающее устройство

4. Камера отжига - предназначена для полимеризации арматуры. Состоит из металлической станины, корпуса камеры, 6 тенов и 6 керамических ванн. Схема представлена на рис. 3.3.



Рисунок 3.3 - Камера отжига

5. Узел водяного охлаждения - предназначен для охлаждения арматуры. Состоит из металлического каркаса, металлической ванны для стока воды, ванны для создания охлаждающих струй воды, системы для подачи воды.

6. Тянущее устройство - предназначено для протягивания готовой арматуры. Состоит из металлического каркаса и установленного на него тянущего устройства (четырех подпружиненных валиков, привода валиков, эл. двигателя, пульта управления). Фотография узла представлена на рис. 3.4.



Рисунок 3.4 - Тянущее устройство/узел резки

7. Смотчик арматуры - предназначен для смотки готовой арматуры в бухты. Состоит из намотчика, привода и эл. двигателя. Фотография смотчика арматуры представлена на рис. 3.5.



Рисунок 3.5 - Смотчик арматуры

8. Устройство скрутки ровинга - предназначен для скручивания первичного материала в нити. Состоит из металлического каркаса, двух скручивающих шпулеров, привода и эл. двигателя. Фотография устройства скрутки ровинга представлена на рис. 3.4.

### 3.2 Предложения по техническим решениям усиления конструкций композитными материалами

После проведения испытаний и анализа полученных результатов, было принято решение в пользу внешнего усиления из углеткани CarbonWrap Tape 230/150. Схема внешнего усиления железобетонных балок представлена на рис. 3.6. Также был проведен анализ технических характеристик армирующего компонента CarbonWrap Tape 230/150, результат которого представлен в главе 2, табл. 2.4.

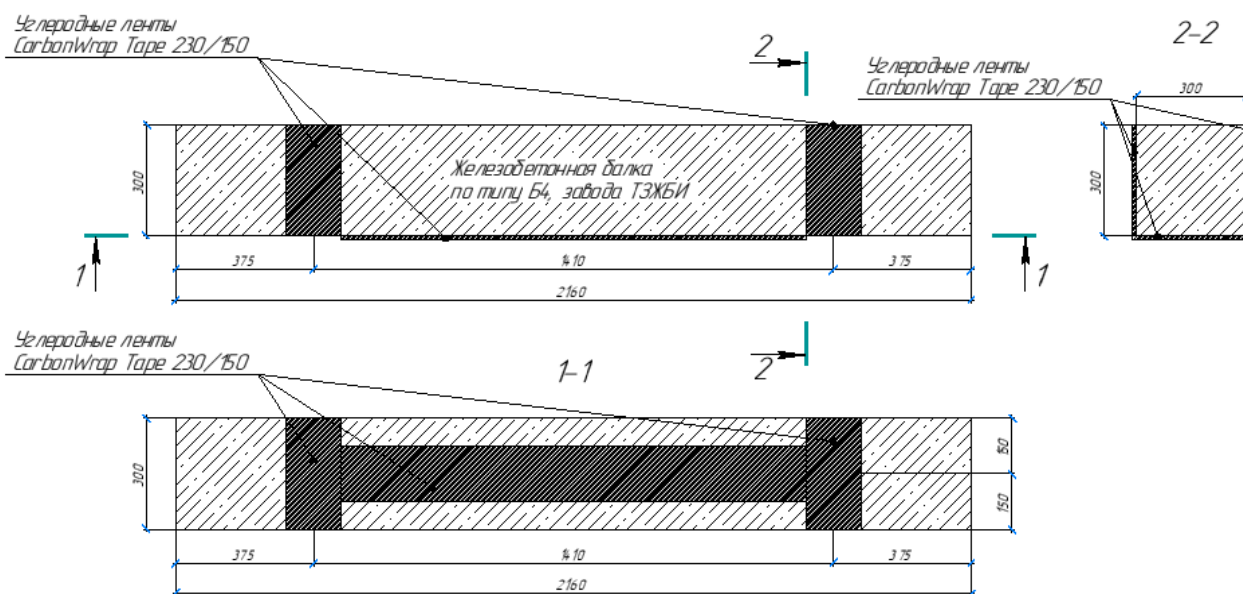


Рисунок 3.6 – Предложенная принципиальная схема внешнего усиления железобетонных балок с применением углеродных лент CarbonWrap Tape 230/150

На основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований можно предложить следующие принципиальные решения по повышению трещиностойкости железобетонных конструкций:

- на уровне цементирующего вещества: обеспечение торможение трещин за счет введения нитевидных кристаллов или самомикрoармирования

структуры композита, а также за счет введения минеральных волокон с размерами, соответствующими количеству и размерам дефектов, обеспечения качественной зоны контакта «армирующий элемент - матрица», при армировании материала на этом структурном уровне асбестовым волокном его оптимальная дозировка составляет 2,5-4,0% от объема материала;

- на уровне армирующих компонентов: обеспечение торможение трещин за счет введения в структуру композитной арматуры микрокорундового порошка, микрокремнезема и нанопорошка ( $Al_2O_3$ );

- на уровне осуществления процесса бетонирования конструкций: обеспечение торможение трещин за счет введения в бетон пластификаторов, с внедрением в структуру полимерных добавок;

- на уровне готовой железобетонной конструкции – внешнее армирование с применением угле-, стеклоткани и ламели.

### **3.3 Оценка технико-экономической эффективности разработанных предложений**

Анализируя всевозможные основные оценочные параметры, можно выделить основные из них, по которым и будет проводится оценка, а именно: разрушающая нагрузка, опытная прочность испытанных образцов, нагрузка при предельно допустимом прогибе, процент стального и композитного армирования, экономическая стоимость применения композитного и стального армирования, а также затрата материалов на сырье (бетон (с учетом доставки на объект, на котором проводились испытания), арматуру (с учетом доставки), с указанием вида внешнего усиления железобетонных и бетонных конструкций, и общая стоимость готовой конструкции. Оценка технико-экономической эффективности разработанных предложений проведена путем сопоставления затрат на материалы для изготовления железобетонной балки с композитным армированием (с включением в состав микрокремнезема – наиболее распространенного из отходов

металлургического производства), усиленной внешним армированием в качестве которого выступают углеродные ленты Carbon Wrap Tape 230/150 и заводской железобетонной балки по заготовительной стоимости сырьевых материалов для условий Самарской области приведено в табл. 3.1.

Таблица 3.1 - Оценка технико-экономической эффективности разработанных предложений

Оцениваемый параметр	Конструкция		Полученный эффект
	Заводская железобетонная балка	Изготовленная балка с внешним армированием из углеткани CarbonWrap Tape 230/150	
1	2	3	4
Разрушающая нагрузка, кН	23,54	64,43	+273%
Опытная прочность, кН	56,8	148,5	+261%
Нагрузка при предельно допустимом прогибе, кН	56,7	135,6	+239%
Размеры конструкции, м	2,16×0,3×0,3	2,16×0,3×0,3	0%
Бетонирование, м <sup>3</sup>	0,195	0,195	0%
Стоимость 1 м <sup>3</sup> , руб.	3800	3800	
Общая стоимость, руб.*	3762	3762	
Армирование, п.м.	14,4	14,4	-61%
Стоимость п.м., руб.	165	101	
Общая стоимость, руб.	2376	1455	
Внешнее армирование, м	-	CarbonWrap Tape 230/150, 3,06м (1 слой)	Увеличение себестоимости готовой конструкции на 2608 руб.
Стоимость п.м., руб.	-	284	
Общая стоимость, руб.	-	2608	
Процент армирования	$7,1 \cdot 10^{-6}$	$4,5 \cdot 10^{-6}$	-63%
Общая стоимость конструкции, т.руб	6,138	7,825	+127%
*Общая стоимость принята с учетом доставки стройматериалов на объект в с. Б. Рязань.			

Проанализировав полученные данные и результаты таблицы, можно утверждать, что за счет добавления углеродных лент CarbonWrap Tape 230/150, произошло увеличение прочностной составляющей в 2,61 раза и максимальной разрушающей нагрузки в 2,73 раза. Применение композитного армирования позволяет снизить стоимость готовой конструкции, без потерь по физико-механической и прочностной составляющей.

### **Выводы по третьей главе**

1. Сформированы предложения по составу строительной композитной арматуры с применением микрокорундового порошка, нанопорошка ( $Al_2O_3$ ) и микрокремнезема.
2. Выдвинуты предложения по производству строительной композитной арматуры и применяемым механизмам и оборудованию
3. Сформированы предложения по техническим решениям усиления конструкций композитными материалами.
4. Выдвинуты предложения по совершенствованию технологии бетонирования конструкций и повышению трещиностойкости и прочностных характеристик железобетонных и бетонных конструкций.
5. Проведена оценка технико-экономической эффективности разработанных предложений.



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По ходу выполнения диссертации были решены следующие задачи:

1. На основании проведенного анализа отечественного и зарубежного опыта усиления железобетонных и бетонных конструкций определены: предполагаемые схемы усиления конструкций, необходимость внедрения технологии внутреннего композитного армирования с включениями производственно-бытовых отходов.

2. Определены основные физико - механические свойства композитных материалов, а также бетонов с использованием последних.

3. Конкретизирована характеристика процессов бетонирования и армирования железобетонных и бетонных строительных конструкций.

4. Определены наиболее целесообразные области применения композитов в строительстве, а также материалы усиления железобетонных конструкций.

5. Внесены предложения по технологии бетонирования и армирования бетонных и железобетонных конструкций, усиления бетонных и железобетонных конструкций композитными материалами.

6. Обоснованы результаты экспериментальных исследований влияния вида композитных материалов на прочностные характеристики бетонных и железобетонных конструкций и определена методика усиления и проведения испытаний опытных образцов.

7. Сформированы предложения по составу и производству строительной композитной арматуры с применением микрокорундового порошка, нанопорошка ( $Al_2O_3$ ) и микрокремнезема.

8. Сформированы предложения по техническим решениям усиления конструкций композитными материалами.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ 26633 – 2015. Бетоны тяжелые и мелкозернистые. Технические условия. – Введ. 2016-09-01. – М. : Стандартинформ, 2016. – 12 с.
2. ГОСТ 7473-2010. Смеси бетонные. Технические условия. – Введ. 2012-01-01. – М. : Стандартинформ, 2011. – 16 с.
3. ГОСТ 25820-2014. Бетоны легкие. Технические условия. – Введ. 2015-07-01. – М. : Стандартинформ, 2015. – 16 с.
4. ГОСТ 25192-2012. Бетоны. Классификация и общие технические требования. – Введ. 2013-07-01. – М. : Стандартинформ, 2013. – 6 с.
5. Карпенко, Н.И. О построении более совершенной модели деформирования железобетона с трещинами при плоском напряженном состоянии // Карпенко С.Н. // Труды Международной конференции «Бетон и железобетон пути развития» том 2, - М. : НИИЖБ. - 2005. – С. 431-444.
6. Железобетонные и каменные конструкции: учеб. для вузов / В. М. Бондаренко [и др.]. - М. : Высш. шк., 2008. - 887 с.
7. Карпенко, Н.И. Модель деформирования железобетона в приращениях и расчет балок-стенок и изгибаемых плит с трещинами / Н.И. Карпенко, С.Н. Карпенко, А.Н. Петров, С.Н. Палювина. - Петрозаводск: Изд-во ПетрГУ, 2013. – 156 с.
8. Авренюк, А.Н. Восстановление бетонных и железобетонных конструкций / А.Н. Авренюк. – М. : Мир, 2011. - 184 с.
9. ГОСТ 10180-2012. Бетоны. Методы определения прочности по контрольным образцам. – Введ. 2013-07-01. – М. : Стандартинформ, 2013. – 32 с.
10. Армирование железобетонных конструкций [Электронный ресурс] : учеб. пособие / А. Н. Малахова. – М. : МГСУ : ЭБС АСВ, 2014. - 116 с. – URL: <http://www.iprbookshop.ru/26851.html> (дата обращения: 24.03.2018).
11. Бондаренко, В. М. Железобетонные и каменные конструкции / В.М. Бондаренко, В.Г. Назаренко, В.И. Римшин. - М.: Высш. шк., 2010. - 888 с.

12. СП 52-101-2003. Бетонные и железобетонные конструкции. Без предварительного напряжения арматуры. – Введ. 2004-03-01. – М. : Огни, 2004. - 128 с.
13. СНиП 52-01-2003. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. – Введ. 2004-03-01. - М.: ДЕАН, 2005. - 105 с.
14. ГОСТ Р 58033-2017. Здания и сооружения. Словарь. Часть 1. Общие термины. – Введ. 2017-12-19. - М.: Стандартиформ, 2017. - 74 с.
15. ППР. Возведение монолитных железобетонных конструкций здания [Электронный ресурс]. – 2015. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/450705406>
16. ГОСТ 32794-2014. Композиты полимерные. Термины и определения. – Введ. 2015-01-09. - М.: Стандартиформ, 2015. - 98 с.
17. Чернявский, В.Л. Современные материалы и технологии ремонта и усиления конструкций мостов / В.Л. Чернявский // Материалы Всероссийской научно-практической конференции "Современные технические решения по повышению надежности автомобильных дорог и искусственных сооружений" Краснодар, 2001. - С. 199-201.
18. Полимерные композиционные материалы. Структура. Свойства. Технологии: учебное пособие / М.Л. Кербер - СПб. : Профессия, 2008. – 560 с.
19. Пособие по проектированию бетонных и железобетонных конструкций из тяжелого бетона без предварительного напряжения арматуры (к СП 52-101-2003). – М., 2005. – 382 с.
20. Яковлева, М. В. Восстановление и усиление железобетонных и каменных конструкций / М.В. Яковлева, О.Н. Коткова, С.В. Широков. – М. : Наука, 2015. – 192 с.
21. Композитные материалы [Электронный ресурс]. – 2012. – URL: <https://edu.tusur.ru/publications/1329> (дата обращения: 11.01.2018).
22. ГОСТ Р 57921-2017. Композиты полимерные. Методы испытаний. Общие требования. – Введ. 2018-02-01. - М.: Стандартиформ, 2018. - 38 с.

23. Хаютин, Ю.Г. Применение углепластиков для усиления строительных конструкций / В.Л. Чернявский, Е.З. Аксельрод // Бетон и железобетон. - № 6. - 2002. - с. 17-20; № 1. - 2003. - С. 25-29.
24. Бокарева, О.Г. Практический опыт эксплуатации подкрановых конструкций при замене неразрезных подкрановых балок разрезными / А.А. Шевцов, Н.А. Круглова, И.С. Гуляева // Научная мысль. - № 4. – 2018. – С. 69-73.
25. Шевцов, Д.А. Усиление железобетонных конструкций материалами / Д.А. Шевцов // Промышленное и гражданское строительство. - № 8. – 2014. - С. 61-65.
26. Ritchie, P.A. External reinforcement of concrete beams using fiber reinforced plastics / P.A. Ritchie, D.A. Thomas, L.W. Lu, G.M. Connelly // ACI Structural Journal. - 1991. - Vol. 88, № 4. - Pp. 490 - 499.
27. Toutanji, H.A. Stress strain characteristics of concrete columns externally confined with advanced fiber composite sheet / H.A.Toutanji // ACI Structural Journal. - 1999. - Vol. 96, № 3. Pp. 397 - 405.
28. Horiguchi, T. Effect of test methods and quality of concrete on bond strength of CFRP sheet / T. Horiguchi, N. Saeki Ritchie P. A. External reinforcement of concrete beams using fiber // Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures Conference. - 2001. - Vol. 1. - Pp. 265 - 270.
29. Grace, N.F. Strengthening of concrete beams using innovative ductile fiber-fiber reinforced polymer fabric / N.F. Grace, G. Abdel-Sayed, W.F. Raghed // ACI Structural Journal. - 2002. - Vol. 99, № 5. - Pp. 692 - 700.
30. Meisam Safari Gorji. Analysis of FRP Strengthened Reinforced Concrete Beams Using Energy Variation Method / World Applied Sciences. – 2009. - Vol. 6, № 1. – Pp. 105 - 111.
31. Михуб, А. Прочность, деформативность и трещиностойкость изгибаемых железобетонных элементов, усиленных композитными материалами: дис. ... канд. техн. наук : 05.23.01 / Михуб Ахмад. – Ростов на Дону, 2013. – 211 с.

32. ГОСТ 31938-2012. Арматура композитная полимерная для армирования бетонных конструкций. Общие технические условия. – Введ. 2014-01-01. - М.: Стандартиформ, 2014. - 35 с.
33. СП 164.1325800.2014. Усиление железобетонных конструкций композитными материалами. Правила проектирования. – Введ. 2014-09-01. - М.: Стандартиформ, 2015. - 53 с.
34. ГОСТ 32943-2014. Материалы и системы для защиты и ремонта бетонных конструкций. Требования к клеевым соединениям элементов усиления конструкций. – Введ. 2014-09-01. - М.: Стандартиформ, 2015. - 63 с.
35. СП 70.13330.2012. Несущие и ограждающие конструкции. Актуализированная редакция СНиП 3.03.01-87 (с Изменениями N 1, 3). – Введ. 2012-07-15. - М.: Стандартиформ, 2013. - 54 с.
36. СП 27.13330.2017. Бетонные и железобетонные конструкции, предназначенные для работы в условиях воздействия повышенных и высоких температур. Актуализированная редакция СНиП 2.03.04-84. – Введ. 2011-08-16. - М.: Стандартиформ, 2012. - 187 с.
37. ППР. Устройство монолитных железобетонных стен. [Электронный ресурс]. – 2015. – URL: <http://docs.cntd.ru/document/450704467> (дата обращения: 20.05.2019).
38. Бушков, А.В. Железобетонные конструкции / А.В. Бушков. - М. : Медиа, 2012. – 986 с.
39. Строительные материалы из отходов промышленности : [учеб.-справ. пособие] / Л. И. Дворкин, О. Л. Дворкин. - Ростов-на-Дону : Феникс, 2007. – 363 с.
40. ОДМ 218.3.100-2017. Рекомендации по применению материалов для ремонта бетонных и железобетонных конструкций транспортных сооружений. – Введ. 2017-01-01. - М.: РОСАВТОДОР, 2017. - 54 с.
41. ОДМ 218.2.027-2012. Рекомендации по расчету и проектированию армогрунтовых подпорных стен на автомобильных дорогах. – Введ. 2013-01-01. - М.: РОСАВТОДОР, 2012. - 72 с.

42. ОДМ 218.3.027-2013. Рекомендации по применению тканевых композиционных материалов при ремонте железобетонных конструкций мостовых сооружений. – Введ. 2013-02-12. - М.: РОСАВТОДОР, 2012. – 64 с.
43. Клевцов, В.А., Расчет прочности нормальных сечений изгибаемых элементов, усиленных внешней арматурой из полимерных композиционных материалов / В.А. Клевцов, Н.В. Фаткуллин / Научно-техническая конференция молодых ученых и аспирантов ЦНИИС, 2006. – С. 54-58.
44. Сабиров, Р. Х., Технология ремонта и усиления сгустителей калийной промышленности / Р.Х. Сабиров, В.Л. Чернявский, Л.И. Юдина / Химическая промышленность, 2002, № 2. С. 1-5.
45. Маилян, Л.Р. Изгибаемые керамзитовофиброжелезобетонные элементы на грубом базальтовом волокне. - Ростов на Дону: Рост. гос. строит. ун-т. - 2001. – 174 с.
46. Звездов, А.И. XXI век — век бетона и железобетона / А.И. Звездов, К.В. Михайлов, Ю.С. Волков / Бетон и железобетон. - 2001. - № 1. - С. 2-6.
47. Плевков, В. С. Железобетонные и каменные конструкции сейсмостойких зданий и сооружений / В.С. Плевков, А.И. Мальганов, И.В. Балдин. – М. : Огни. - 2010. – 290 с.
48. Кузнецов, В. С. Железобетонные и каменные конструкции. Основы сопротивления железобетона. Практическое проектирование. Примеры расчета / В.С. Кузнецов. – М. : Наука. - 2014. – 304 с.
49. Шилин, А.А. Внешнее армирование железобетонных конструкций композиционными материалами / А.А. Шилин. - М.: Огни. - 2007. – 504 с.
50. Чернявский В.Л. Усиление железобетонных конструкций композитными материалами / В.Л. Чернявский // – М. : - 2013. - № 3. - С. 15-16.