**Министерство строительства
и жилищно-коммунального хозяйства
Российской Федерации**

**Федеральное автономное учреждение
«Федеральный центр нормирования, стандартизации
и оценки соответствия в строительстве»**

Методическое пособие

РЕМОНТ И УСИЛЕНИЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Москва 2016

gost.e-ecolog.ru

Содержание

Введение	3
1. Область применения	4
2. Нормативные ссылки	5
3. Термины и определения	8
4. Оценка технического состояния железобетонных конструкций для последующего их усиления	11
5. Общие требования к проектированию	19
6. Материалы	24
7. Композиционные системы для внешнего армирования	40
8. Расчет параметров реконструкции и усиления железобетонных конструкций	72
9. Технология производства работ	97
10. Контроль качества и приемка выполненных работ	111
11. Техника безопасности при производстве работ	117
12. Охрана окружающей среды	119
Приложение А Основные буквенные обозначения	120
Приложение Б Пример расчета изгибаемой железобетонной конструкции	125
Приложение В Пример расчета железобетонных колонн	134
Приложение Г Пример расчета свода железобетонного купола, усиленного сеткой на основе углеродных волокон	155

Введение

Цели и принципы стандартизации в Российской Федерации установлены Федеральным законом от 27 декабря 2002 г. № 184-ФЗ «О техническом регулировании».

Настоящее методическое пособие разработано в развитие положений СП 63.13330.2012 «СНиП 52-01-2003 «Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения», СП 164.1325800.2014 Усиление железобетонных конструкций композитными материалами. Правила проектирования.

Методическое пособие разработано с целью повышения качества проектирования и выполнения работ при ремонте и усилении железобетонных конструкций, а также обеспечения долговечности и надежности зданий и сооружений в соответствии с Федеральным законом от 30 декабря 2009 г. № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений». Методическое пособие направлено на повышение уровня гармонизации российских нормативных требований с американскими и европейскими нормативными документами.

Методическое пособие содержит рекомендации по расчету, проектированию и технологии производства работ при ремонте и усилении железобетонных конструкций внешним армированием из композиционных материалов.

Пособие разработано авторским коллективом специалистов ЗАО «Триада-Холдинг»: д. т. н. Шилин А.А., к. т. н. М.В. Зайцев, к. т. н. В.А. Пшеничный, к. т. н. Д.В. Картузов.

1 Область применения

Методическое пособие распространяется на проектирование ремонта и усиления железобетонных конструкций зданий и сооружений различного назначения путем устройства внешнего армирования из композиционных материалов на основе углеродных, арамидных и стеклянных волокон.

Методическое пособие содержит рекомендации по проектированию ремонта и усиления железобетонных конструкций, изготовленных из тяжелого и мелкозернистого бетонов, на которые распространяются требования СП 63.13330.2012 [5].

Усиление железобетонных конструкций внешним армированием производятся в случаях:

- наличия дефектов и повреждений конструкций (например, вследствие силовых, коррозионных, температурных или иных воздействий, в том числе неравномерных просадок фундаментов), которые снижают прочностные, деформационные характеристики конструкций и ухудшают эксплуатационное состояние здания или сооружения в целом;

- увеличения эксплуатационных нагрузок и воздействий на конструкции зданий и сооружений;

- реконструкции зданий и сооружений даже в случаях, не сопровождающихся увеличением нагрузок;

- выявления отступлений от проекта, снижающих несущую способность и эксплуатационные качества конструкций;

- изменения функционального назначения зданий и сооружений.

2 Нормативные ссылки

В настоящем пособии использованы ссылки на следующие правовые, нормативные и рекомендательные документы:

1. 123-ФЗ от 22 июля 2008 г. «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности»

2. 384-ФЗ от 30 декабря 2009 г. «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений».

3. СНиП 12-03-2001 Безопасность труда в строительстве. Общие требования.

4. СНиП 12-04-2002 Безопасность труда в строительстве. Строительное производство.

5. СП 63.13330.2012 Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения.

6. СП 164.1325800.2014 Усиление железобетонных конструкций композитными материалами. Правила проектирования.

7. СП 13-102-2003 Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений.

8. ГОСТ 17624-2012 Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности.

9. ГОСТ 22690-2015 Бетоны. Определение прочности механическими методами неразрушающего контроля.

10. ГОСТ 22904-93 Конструкции железобетонные. Магнитный метод определения толщины защитного слоя бетона и расположения арматуры.

11. ГОСТ 24105-80 Изделия из пластмасс. Термины и определения дефектов.

12. ГОСТ 24297-2013 Верификация закупленной продукции. Организация проведения и методы контроля.

13. ГОСТ 25388-2001 Волокна химические. Упаковка, маркировка, транспортирование и хранение.

14. ГОСТ 25.601-80 Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытания плоских образцов на растяжение при нормальной, повышенной и пониженной температурах.

15. ГОСТ 26433.1-89 Система обеспечения точности геометрических параметров в строительстве. Правила выполнения измерений. Элементы заводского изготовления.

16. ГОСТ 26589-94 Мастики кровельные и гидроизоляционные. Методы испытаний.

17. ГОСТ 2789-73 Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики.

18. ГОСТ 28570-90 Бетоны. Методы определения прочности по образцам, отобранным из конструкций.

19. ГОСТ 29104.1-91 Ткани технические. Методы определения линейных размеров, линейной и поверхностной плотностей.

20. ГОСТ 29104.2-91 Ткани технические. Метод определения толщины.

21. ГОСТ 27751-2014 Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения.

22. ГОСТ 7000-80 Материалы текстильные. Упаковка, маркировка, транспортирование и хранение.

23. ГОСТ 18105-2010 Бетоны. Правила контроля и оценки прочности.

24. ГОСТ 31937-2011 Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния.

25. ГОСТ 32016-2012 Материалы и системы для защиты и ремонта бетонных конструкций. Общие требования.

26. ГОСТ 32017-2012 Материалы и системы для защиты и ремонта бетонных конструкций. Требования к системам защиты бетона при ремонте.

27. ГОСТ 32943-2014 Материалы и системы для защиты и ремонта бетонных конструкций. Требования к клеевым соединениям элементов усиления конструкций.

28. ГОСТ 33762-2016 Материалы и системы для защиты и ремонта бетонных конструкций. Требования к инъекционно-уплотняющим составам и уплотнениям трещин, полостей и расщелин.

29. ГОСТ 33762-2016 Материалы и системы для защиты и ремонта бетонных конструкций. Требования к инъекционно-уплотняющим составам и уплотнениям трещин, полостей и расщелин.

30. ГОСТ Р 56378-2015 Материалы и системы для защиты и ремонта бетонных конструкций. Требования к ремонтным смесям и адгезионным соединениям контактной зоны при восстановлении конструкций.

31. Шилин А.А. Пшеничный В.А. Картузов Д.В. Внешнее армирование железобетонных конструкций композиционными материалами – М.: Издательство «Стройиздат», 2007.

3 Термины и определения

Адгезионные составы (клеи) – составы для приклеивания холстов и ламинатов на поверхность конструкций.

Внешнее армирование композиционными материалами – приклеивание к поверхности железобетонной конструкции ламинатов и холстов на основе углеродных, арамидных и стекловолокон.

Восстановление (ремонт) железобетонной конструкции – комплекс технологических и конструктивных мероприятий, направленных на придание конструкции первоначальных (утраченных) качеств и характеристик, нарушенных вследствие дефектов изготовления, монтажа или в процессе ее эксплуатации.

Грунтовки – составы для пропитки бетонного основания и обеспечения необходимого сцепления адгезионного состава с бетонной поверхностью.

Категория технического состояния – градация технического состояния строительной конструкции и ее элементов, которая характеризуется соответствием или несоответствием определенным наборам показателей, установленных технической документацией.

Композиционные материалы - материалы, состоящие из армирующих углеродных, арамидных или стекловолокон, включающие однонаправленные и двунаправленные сетки, объединенных в единое целое полимерной матрицей.

Ламинаты – готовые для устройства внешнего армирования конструкций многослойные ленты различной толщины и ширины, изготовленные в заводских условиях путем пропитки и горячего прессования.

Оценка технического состояния – установление степени повреждения строительных конструкций на основе сопоставления фактических значений количественно оцениваемых параметров со значениями этих же параметров, установленных проектом или нормативным документом для определения категории технического состояния.

Поверочный расчет – расчет существующей конструкции по действующим нормам проектирования с введением в расчет полученных в результате

обследования или по проектной и исполнительной документации: геометрических параметров конструкции, фактической прочности строительных материалов, действующих нагрузок, уточненной расчетной схемы.

Полимерная матрица – компонент композиционного материала, объединяющий и защищающий его армирующие волокна от повреждений и распределяющий нагрузку между отдельными волокнами.

Активная сетка – изделие, образованное на ткацком станке переплетением продольных и поперечных нитей, имеющих заданную ячейку, которая перед укладкой в полимерцементную матрицу пропитывается в связующем составе из полимеров и модифицирующих компонентов.

Температура стеклования – значение температуры, при которой полимерная матрица необратимо меняет свои физико-механические свойства.

Техническое состояние – совокупность свойств строительной конструкции, изменяющихся в процессе эксплуатации и характеризующиеся в определенный момент времени значениями показателей и/или качественными признаками, установленными в нормативной, проектной и эксплуатационной документации.

Композиционные системы для внешнего армирования – совокупность технологий и материалов, которые обеспечивают надежность совместного функционирования внешнего армирования с восстанавливаемой (усиливаемой) конструкцией в течение заданного промежутка времени.

Усиление железобетонных конструкций – комплекс технологических и конструктивных мероприятий, направленных на обеспечение несущей способности и эксплуатационной пригодности конструкции при увеличении действующих на нее нагрузок, изменения условий эксплуатации или объемно-планировочных решений сооружения.

Холсты – тканые ленты и полотна из углеродных, арамидных и стеклянных волокон, предназначенные для изготовления системы внешнего армирования в построечных условиях.

Шпаклевки – составы для заполнения каверн и выравнивания поверхности конструкции.

Другие термины и определения в настоящих правилах использованы согласно Градостроительному кодексу РФ и федеральному закону №384-ФЗ от 30 декабря 2009 г. «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений», а также по нормативным документам, на которые имеются ссылки в тексте.

4 Оценка технического состояния железобетонных конструкций для последующего их усиления

4.1 Определение состояния железобетонных конструкций перед выполнением работ по усилению

Для оценки технического состояния и надежности железобетонных конструкций необходимо проведение обследования.

Обследование начинается со следующих обмерных работ:

- уточнение разбивочных осей сооружения, его горизонтальных и вертикальных размеров;

- проверка пролетов и шага несущих конструкций;

- замеры основных геометрических параметров несущих конструкций;

- определение фактических размеров расчетных сечений конструкций и их элементов и проверка их соответствие проекту;

- определение формы и размеров узлов стыковых сопряжений элементов и их опорных частей, проверка их соответствия проекту;

- проверка вертикальности и соосности опорных конструкций, наличие и местоположение стыков, мест изменения сечений;

- замеры прогибов, изгибов, отклонений от вертикали, наклоны, выпучивания, перекосы, смещения и сдвиги;

- определение наличия, расположения, количества и класса арматуры, признаков коррозии арматуры и закладных деталей, а также состояния защитного слоя;

- определения наличие трещин и измерение величины их раскрытия;

По результатам обследования составляется ведомость дефектов.

4.2 Определение параметров материалов усиливаемых конструкций

Для бетонных и железобетонных конструкций основной характеристикой является прочность. Ее определяют механическими методами неразрушающего

контроля по ГОСТ 22690-2015 «Бетоны. Определение прочности механическими методами неразрушающего контроля» [9], ультразвуковым методом по ГОСТ 17624-2012 «Бетоны. Ультразвуковой метод определения прочности» [8], а также методами определения прочности по образцам, отобранным из конструкций, по ГОСТ 28570-90 «Бетоны. Методы определения прочности по образцам, отобранным из конструкций» [18] и приложению 10 ГОСТ 22690-2015 [9].

До определения прочности бетона целесообразно предварительно любым оперативным (экспертным) методом (молотком Шмидта, ультразвуковым поверхностным прозвучиванием и прочие) обследовать бетон по его поверхности в расчетных сечениях конструкций и их элементов с целью выявления возможного наличия зон с различающейся прочностью бетона.

Фактическая прочность бетона в конструкциях, определенная неразрушающими методами или испытанием отобранных от конструкции образцов, является необходимым фактором для получения расчетных характеристик бетона.

В практике обследования в ряде случаев, помимо оценки прочности бетона, может потребоваться определение и других его характеристик.

Определение плотности, влажности, водопоглощения, пористости и водонепроницаемости бетона следует проводить по ГОСТ 12730.0-78-ГОСТ12730.5.84.

Морозостойкость бетона определяют испытанием отобранных от конструкций образцов по ГОСТ 10060-2012.

Щелочность бетона определяют по значению pH поровой жидкости в соответствии с ГОСТ 5382-91.

Состав и структуру бетона определяют специальными методами химического, физико-химического и микроскопического анализа бетона.

4.3 Типовые дефекты бетонных и железобетонных конструкций

Основным дефектом или повреждением бетонных и железобетонных конструкций являются трещины. Количество, ширина и расположение трещин позволяют сделать выводы о надежности работы конструкции и ее долговечности.

Наиболее распространенными являются:

- трещины от изгиба;

- трещины от сдвига;

- трещины от кручения;

- трещины от напряжения сдвига при продавливании;

- трещины вследствие анкеровки или устройства соединения внахлест арматурных стержней;

- трещины от коррозии арматуры;

- трещины от щелочной коррозии бетона.

- ослабление сечения в местах коррозии (сколы).

Для обеспечения долговечности и эксплуатационной пригодности железобетонных конструкций необходимо ограничить ширину раскрытия трещин предельно допустимым значением, определяемым в соответствии с действующими строительными нормами в зависимости от типа сооружения и условий воздействия внешней среды. Строительные нормы и правила рассматривают трещинообразование, происходящее в результате приложения внешних нагрузок или воздействии временных нагрузок и приводят уравнения для вычисления ширины трещин. Важное значение имеет также тип сооружения (из железобетона или из предварительно напряженного железобетона). Эти уравнения относятся почти исключительно к трещинообразованию, произошедшему в результате изгиба или растяжения и осевых нагрузок. Направление у таких трещин перпендикулярно направлению стержней рабочей арматуры. Трещины от пластической усадки могут иногда соответствовать направлению арматуры.

4.4 Оценка технического состояния и принятие решений об усилении

Повреждения конструкций (дефекты) подразделяются в зависимости от причин их возникновения на две группы: от силовых воздействий и от воздействия внешней среды. Последняя группа повреждений снижает не только прочность конструкции, но и уменьшает ее долговечность.

Общую оценку технического состояния железобетонных конструкций выражают категории технического состояния, которую назначают с учетом совокупности подверженных изменению в процессе эксплуатации основных свойств сооружений, а также частными оценками технического состояния по критерию «безопасность эксплуатации», по безотказности и долговечности.

В зависимости от степени соответствия свойств функциональному назначению в рассматриваемый период времени и имеющихся дефектов назначается соответствующая оценка технического состояния. Оценка состояния качественно отражает это соответствие:

- отличное техническое состояние: конструкции соответствуют всем требованиям нормативной и конструкторской (проектной) документации. Необходимости в усилении нет;

- хорошее техническое состояние: конструкции, у которых все основные элементы имеют исправное состояние, при этом значения одного или нескольких параметров технического состояния элементов могут не в полной мере соответствовать установленным действующим нормативным документам, но при этом в конкретных условиях эксплуатации не нарушаются основные функциональные свойства сооружения. Необходимости в усилении нет;

- удовлетворительное техническое состояние: конструкции, основные функциональные свойства которых частично нарушены, но при этом все основные элементы находятся в работоспособном состоянии и обеспечивается безопасная эксплуатация. Ремонтные мероприятия для сооружений, имеющих удовлетворительное техническое состояние, организуют в плановом порядке;

- неудовлетворительное техническое состояние: конструкции, имеющие в основных элементах значительные дефекты по несущей способности и деформации, влияющие на безопасность и долговечность. Сооружение с неудовлетворительной оценкой технического состояния способно только частично выполнять требуемые функции, нормальная эксплуатация нарушена, но при этом критический отказ, в результате которого одна или несколько основных конструкций могут перейти в предельное состояние первой группы и вызвать аварию, в настоящее время маловероятна. Сооружениям с такой оценкой технического состояния в

первоочередном порядке необходим ремонт, капитальный ремонт или реконструкция;

- непригодное для нормальной эксплуатации (предаварийное) техническое состояние: конструкции, имеющие непригодное для нормальной эксплуатации состояние, или имеющие предаварийное состояние, при котором в случае продолжения неблагоприятных воздействий может произойти авария. Конструкции, отнесенные к данной категории, требуют срочных восстановительных ремонтных мероприятий;

- аварийное техническое состояние: конструкции, имеющие признаки аварийного состояния, свидетельствующие о возможности потери устойчивости, разрушения или обрушения, или у которых уже установлен факт наступления предельного состояния первой группы.

При выявлении аварийного состояния конструкции требуется незамедлительное принятие мер по разгрузки конструкции и ее замене или усилению.

4.5 Рекомендуемые степени усиления железобетонных конструкций

При внешнем усилении железобетонных конструкций композиционными материалами можно выделить два случая, различающихся как по условиям дальнейшей эксплуатации конструкции после приклеивания полос композиционного материала, так и по принципам проектирования и технологии ведения работ.

В первом случае возникает ситуация, соответствующая условиям, когда композиционный материал служит для усиления строительной конструкции, то есть по условиям эксплуатации предполагается увеличение нагрузки на сооружение в целом или отдельные его элементы, и, следовательно, необходимо увеличить несущую способность сечения конструкции. В этом случае, как правило, сама конструкция находится в хорошем эксплуатационном состоянии и требует минимальных затрат для проведения косметического ремонта ее поверхности, к которой будет приклеиваться композиционный материал.

Вторая ситуация соответствует условиям, когда композиционный материал применяется с целью восстановления несущей способности конструкции. В этом случае в процессе эксплуатации мостовой конструкции из-за неблагоприятного воздействия на нее окружающей среды произошли коррозия арматуры и деструкция бетона, что привело к снижению первоначальной проектной несущей способности конструкции. Необходимо отметить, что речь идет о мостовых конструкциях, которые еще можно отремонтировать и восстановить их несущую способность, а не о конструкциях, подлежащих замене.

Одним из наиболее важных вопросов, которые приходится решать при проектировании усиления конструкций композиционными материалами, является допустимая степень усиления, то есть насколько можно увеличить несущую способность существующего элемента без ущерба дальнейшей безопасной эксплуатации усиленной конструкции.

С одной стороны, в силу сравнительно небольшого опыта долговременной эксплуатации строительных конструкций, усиленных КМФ, минимализация риска проектных решений достигается использованием увеличенных коэффициентов надежности по применяемым материалам усиления и условиям их работы.

С другой стороны, вполне логичным выглядит требование того, что даже при возможном разрушении композиционного материала усиления строительная конструкция какое-то время должна сохранять свои эксплуатационные качества во избежание возникновения аварийных ситуаций. Исходя из этого, многие зарубежные исследователи рекомендуют не более чем двукратное увеличение несущей способности конструкции при ее усилении при изгибе.

В принципе разрушение композиционного материала возможно:

- при силовых воздействиях от статических нагрузок;
- при силовых воздействиях от динамических нагрузок;
- при внешних воздействиях (огонь при пожаре, агрессивная внешняя среда, акты вандализма и т.д.).

Рекомендациями по проектированию усиления железобетонных конструкций композиционными материалами, принятыми Американским институтом бетона (США), предусмотрен следующий подход к ограничению уровня усиления:

конструкция с пониженными в процессе эксплуатации значениями прочности арматурной стали и бетона и без учета композиционного материала не должна разрушаться от воздействия высоких температур при действии эксплуатационных нагрузок. Естественно, время сопротивления железобетонной конструкции огневому воздействию определяется нормами противопожарной безопасности. Исходя из этого, даже в случае разрушения композиционного материала конструкция будет способна воспринимать определенный уровень нагрузок в течение какого-то промежутка времени. Правилами проектирования усиления, принятыми ACI, устанавливается следующее ограничение степени усиления:

$$(R_s)_{ck} > (1{,}2q + 0{,}85p)_n, \quad (1)$$

где $(R_s)_{ck}$ – фактическая несущая способность подлежащей усилению железобетонной конструкции до начала работ по усилению; q и p с индексом n — постоянная и временная эксплуатационные (нормативные) нагрузки от новых воздействий, то есть тех воздействий, на которые будет проектироваться усиленная конструкция. При этом усиленная конструкция должна иметь несущую способность:

$$(R_x)_{nk} > (1{,}4q + 1{,}7p)_n \quad (2)$$

Как видно из приведенных выражений, при определении степени усиления дробная часть коэффициента надежности по нагрузке для постоянной нагрузки уменьшается в два раза (1,4 и 1,2), и в два раза снижается вся величина временной нагрузки (1,7 и 0,85).

Учитывая, что для большинства наземных конструкций из железобетона $\gamma_{fq} = 1{,}1$, а для равномерно распределенной временной нагрузки свыше 2,0 кПа $\gamma_{fp} = 1{,}2$, выражения для предельно допустимых новых значений эксплуатационных постоянных и временных нагрузок в зависимости от их значений до усиления q_{ck} и p_{ck} можно записать следующим образом:

$$p_n = 2p_{ck} + 0{,}08q_{ck}, \quad (3)$$

$$q_n = 1{,}05q_{ck} + 0{,}57p_{ck}. \quad (4)$$

Исходя из заданных нормами коэффициентов надежности по нагрузкам, максимальная степень усиления возможна при увеличении временной нагрузки – ее

можно увеличить более чем в два раза. Минимальная степень усиления – увеличение постоянной нагрузки при отсутствии временной (не более чем на 5%).

Во всех остальных случаях степень усиления зависит от соотношения постоянной и временной нагрузок до усиления конструкции.

Еще одним важным моментом при назначении степени усиления является то обстоятельство, что на новую, повышенную нагрузку необходимо проверять не только усиливаемые конструкции, но и все сооружение в целом.

При восстановлении первоначальной несущей способности ремонтируемых конструкций композиционными материалами необходимо ориентироваться на тот факт, что, несмотря на произошедшее снижение несущей способности, конструкция продолжает оставаться работоспособной, пусть и с меньшей степенью надежности. По крайней мере, она еще до установки КМФ воспринимает постоянные нагрузки от собственного веса.

5 Общие требования к проектированию

Блок-схема по проектированию и выполнению работ по восстановлению и усилению железобетонных конструкций с применением композиционных материалов представлена на рис. 1.



Рисунок 1 – Блок-схема комплекса работ по восстановлению (усилению) железобетонных конструкций

Элементы внешнего армирования на основе композиционных материалов используются для продольного и поперечного армирования изгибаемых стержневых элементов, для создания охватывающих обойм на колоннах и опорах мостов, для усиления плит, оболочек и других конструкций.

При выполнении работ по устройству внешнего армирования изгибаемых конструкций путем приклеивания композиционных материалов максимальная степень усиления на действие постоянных нагрузок составляет до 25% от начальной несущей способности усиливаемой конструкции, на действие временных нагрузок – 100%. При назначении степени усиления на новую, повышенную нагрузку необходимо проверять не только усиливаемые конструкции, но и все конструкции сооружения в целом.

При восстановлении эксплуатационных качеств ремонтопригодных конструкций обеспечивается их первоначальная несущая способность.

При проектировании усиления конструкций следует учитывать, что несущая способность неусиленной конструкции должна быть достаточной для восприятия постоянной и временной длительной нагрузок.

Проектирование восстановления и усиления железобетонных конструкций следует выполнять на основе результатов их натурного обследования и поверочных расчетов.

В результате натурных обследований должны быть установлены: геометрические размеры конструкций, армирование конструкций, прочность бетона, вид и класс арматуры, и ее состояние, прогибы конструкций, расположение трещин и ширина их раскрытия, размеры и характер дефектов и повреждений, категория технического состояния, действующие нагрузки, статическая схема конструкций.

Натурные обследования следует проводить с учетом указаний СП 13-102-2003, ГОСТ 17624-2012, ГОСТ 22690-2015, ГОСТ 22904-93 и ГОСТ 28570-90 [7, 8, 9, 10, 18].

Поверочные расчеты конструкции следует производить на основе проектных материалов и результатов натурных обследований и с учетом указаний СП 63.13330.2012 [5]. При проведении поверочных расчетов должны быть учтены дефекты и повреждения конструкции, выявленные в процессе натурных

обследований: снижение прочности, местные повреждения или разрушения бетона; обрыв арматуры, коррозия арматуры, нарушение анкеровки и сцепления арматуры с бетоном; опасное образование и раскрытие трещин.

На основе поверочных расчетов следует установить категорию технического состояния конструкции и ее пригодность к дальнейшей эксплуатации, необходимость и возможность восстановления или усиления конструкции и выбрать систему внешнего армирования.

Допускается при восстановлении конструкции не производить поверочные расчеты по эксплуатационной пригодности, если перемещения и ширина раскрытия трещин в существующих конструкциях при максимальных фактических нагрузках не превосходят допустимых значений.

Система усиления конструкций внешним армированием композиционными материалами должна обеспечивать включение в работу элементов усиления и их совместную работу с усиливаемой конструкцией.

При проектировании усиливаемых конструкций следует, как правило, предусматривать, чтобы нагрузка во время усиления не превышала 65% расчетной величины. При сложности или невозможности достижения требуемой степени разгрузки допускается выполнять усиление под большей нагрузкой. В этом случае расчетные характеристики композиционных материалов усиления умножаются на коэффициент условий работы $\gamma = 0{,}9$.

Фактическая прочность на сжатие бетона существующей конструкции, усиливаемой внешним армированием композиционными материалами, должна составлять не менее 15 МПа.

При усилении сжатых конструкций обоймами из композиционных материалов минимально допустимый класс бетона по прочности на сжатие должен быть не менее В15.

Конструкции внешнего армирования на основе композиционных материалов могут применяться, если фактическая когезионная прочность бетона составляет не менее 1.5 МПа для ламинатов и 1.0 МПа для холстов. Это ограничение не распространяется на усиление сжатых и внецентренно сжатых элементов

горизонтальными обоймами, когда важна только механическая связь обоймы с конструкцией.

Не рекомендуется производить усиление внешним армированием из композиционных материалов изгибаемых конструкций, для которых поверочными расчетами установлено, что высота сжатой зоны бетона при расчете прочности по нормальным сечениям усиливаемой конструкции превышает ее граничное значение, установленное по указаниям СП 63.13330.2012 [5].

Максимальная эксплуатационная температура конструкций после усиления композиционными материалами не должна превышать температуру стеклования полимерной матрицы и клея (55–80 °С).

Расчет огнестойкости усиленных конструкций следует производить без учета работы системы усиления внешним армированием из композиционных материалов в соответствии с требованиями №123-ФЗ от 22 июля 2008 г. «Технический регламент о требованиях пожарной безопасности» [1].

Усиление железобетонных конструкций композиционными материалами производится после проведения необходимых ремонтных мероприятий (антикоррозионной обработки арматуры, восстановления защитного слоя бетона).

Для внешнего армирования железобетонных конструкций применяются материалы, сертифицированные на территории Российской Федерации в соответствии с требованиями Федерального закона от 27 декабря 2002 г. № 184-ФЗ «О техническом регулировании».

К работам по внешнему армированию железобетонных конструкций композиционными материалами допускаются организации подрядчики, имеющие свидетельство о допуске к таким видам работ, полученное от саморегулируемой организации. Подрядчик, выполняющий установку композиционных систем, должен быть компетентным в подготовке поверхности и применении системы внешнего армирования.

К работам по внешнему армированию железобетонных конструкций допускаются лица, прошедшие обучение и сдавшие экзамен по правилам производства работ и технике безопасности. Компетентность подрядчика может быть продемонстрирована предоставлением документального подтверждения

обучения и проведения схожих работ, ранее выполненных подрядчиком, или непосредственной демонстрацией подготовки поверхности и установки системы внешнего армирования на отдельных участках конструкции. Изготовитель систем внешнего армирования или его уполномоченный представитель производят обучение рабочего персонала подрядчика по технологии установки своих систем и проверяет уровень его готовности к установке системы.

6 Материалы

6.1 Расчетные характеристики бетона и стальной арматуры эксплуатируемой конструкции

Расчетные характеристики бетона и арматуры эксплуатируемых железобетонных конструкций необходимо принимать на основании их натурного обследования и диагностики в соответствии с положениями СП 13-102-2003 [7] и ГОСТ 31937-2011 [24].

Расчетные значения характеристик бетона существующей конструкции следует принимать исходя из класса бетона, указанного в проекте, или по СП 63.13330.2012 [5] в зависимости от фактического (условного) класса бетона.

Фактический класс бетона следует определять с помощью переводных коэффициентов, обеспечивающих прочность бетона, эквивалентную его фактической средней прочности, установленной по данным испытаний бетона неразрушающими методами или по данным испытаний отобранных из конструкции образцов.

Нормативные и расчетные значения характеристик существующей стальной арматуры следует принимать исходя из класса арматуры, указанного в проекте, или по СП 63.13330.2012 [5] в зависимости от класса арматуры, указанного в проекте, или условного класса арматуры.

Класс арматуры следует определять с помощью переводных коэффициентов, обеспечивающих прочность арматуры, эквивалентную ее фактической средней прочности, установленной по данным испытаний образцов арматуры, отобранных из обследуемых конструкций.

При отсутствии проектных данных и невозможности отбора образцов допускается класс стальной арматуры устанавливать по виду ее профиля, а расчетные сопротивления принимать на 20% ниже соответствующих значений, установленных в действующих нормативных документах для данного класса.

6.2 Компоненты композиционных материалов и их свойства

Неразрезные композиционные материалы (композиты) с полимерной матрицей, армированные волокном, могут рассматриваться как разнородные, анизотропные материалы, у которых вплоть до разрушения преобладает линейное упругое поведение. Они широко применяются для усиления объектов гражданского строительства. Использование материалов, армированных волокном (композитов) обеспечивает множество преимуществ: малый вес, хорошие механические свойства, коррозионная стойкость и другие. На микроуровне композиционные материалы состоят из двух (чаще всего) или более различных компонентов. Непрерывная фаза называется матрицей, а второй компонент – наполнителем, или армирующей фазой, роль которой заключается в изменении в нужном для практических целей направлении свойств матрицы.

Композиционные материалы на основе фибры (волокон), применяемые при ремонте и усилении строительных конструкций, изготавливаются из собственно продолговатых микроволокон, омоноличенных в отверждающем полимере, и связывающим их в единое целое. Наиболее распространенными типами волокон являются углеродные, арамидные и стекловолокна. В качестве отверждающего полимера чаще всего используются эпоксидные и полиакринитриловые смолы. В зависимости от типа волокон (фибры), используемых для изготовления композиционного материала (КМФ), их подразделяют на композиционные материалы на основе углеродных волокон (КМФУ), арамидных волокон (КМФА) и стекловолокон (КМФС). В зарубежной научно-технической литературе такие материалы получили название FRP (fibre reinforced polymer).

В композиционных материалах на основе стекловолокон используются кварцевые стекла. Стекловолокна, предназначенные для внешнего армирования, подразделяются на три типа: Е-стекловолокно, А-стекловолокно и AR-стекловолокно, имеющие высокую сопротивляемость щелочным воздействиям. Е-стекловолокно содержит большое количество борной кислоты и алюмината, хорошо работает в водных растворах и плохо сопротивляется щелочной и кислотной агрессии. А-стекловолокно является более прочным и жестким, но практически не

выдерживает щелочных воздействий; его стоимость выше по сравнению с другими стекловолокнами. В AR-стекловолокно для предотвращения негативных воздействий щелочной агрессии на контакте с усиливаемой железобетонной конструкцией вводится значительное количество циркония.

Арамидные волокна по химической структуре аналогичны нейлону. Эти волокна анизотропны по своей структуре и по сравнению с другими имеют более высокие прочность и модуль упругости, в поперечном направлении. Их диаметр составляет приблизительно 12 мкм. Они более пластичны при действии растягивающих нагрузок, но при сжатии остаются упругими вплоть до разрушения. Арамидные волокна обладают хорошей выносливостью и жесткостью, а также низкими электро- и теплопроводностью.

Углеродные волокна изготавливаются из различных исходных материалов, называемых прекурсорами. Механические свойства волокон сильно зависят от прекурсора и условий карбонизации, т. е. от степени насыщения исходного материала углекислым газом, так как они определяют степень дефектности образующегося кристалла. Эти факторы являются определяющими для физико-механических свойств изготавливаемых углеродных волокон.

Выбор типа фибры для использования в системе усиления строительных конструкций зависит от многих факторов: типа усиливаемой конструкции и условий ее работы; ожидаемой нагрузки после усиления; вида и степени воздействия агрессивных внешних факторов. Физико-механические свойства композиционных материалов определяются типом и количеством применяемых волокон, их ориентацией и распределением в поперечном сечении ленты, а также объемным соотношением волокон и отверждающего полимера в композите. Типичные механические свойства применяемых в строительстве волокон композиционных материалов приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Типичные свойства волокон композиционных материалов

Тип фибры	Прочность на растяжение, МПа	Модуль упругости, ГПА	Деформация удлинения, %	Плотность, т/м^3
Углеродные волокна*	4300 – 5100	230 – 280	1,6 – 1,73	1,75
Углеродные волокна*	2740 – 5490	294 – 329	0,7 – 1,9	1,78 – 1,81
Углеродные волокна**	2600 – 4020	390 – 760	0,4 – 0,8	1,85 – 1,90
Арамидные волокна***	3200 – 3600	124 – 130	2,4	1,44
Стекловолокна	2400 – 3500	70 – 85	3,5 – 4,7	2,6

* На полиакринитриловой матрице.
** На матрице из эпоксидной смолы.
*** Арамид может иметь ту же прочность с меньшим модулем упругости.

В отдельных случаях при научном сопровождении работ по ремонту (усилению) железобетонных конструкций допускается использовать композиционные материалы на основе других типов волокон: борных, базальтовых, керамических.

Роль полимера сводится к передаче действующих напряжений между волокнами и их защите от внешних воздействий. Полимеры для омоноличивания волокон (изготовления матрицы) могут быть различного типа, но чаще всего применяются термоотвержденные полимеры. Отверждающая матрица (полимер) определяет некоторые механические свойства композиционных материалов – прочность и модуль упругости в поперечном направлении, сопротивление сдвигу и характер поведения материала при сжатии. Для отверждения волокон чаще всего используются эпоксидные, полиэфирные, полиамидные и фенольные составы. Все они обладают хорошей сопротивляемостью различным химическим воздействиям.

Эпоксидные составы обладают лучшими механическими свойствами, а полиамидные составы более дешевы.

Важным качеством композиционных материалов, имеющим существенное значение при выборе системы усиления железобетонной конструкции, является их упругое деформирование, вплоть до разрушения. На рис. 2 приведена типичная диаграмма деформирования для различных композиционных материалов и арматурной стали. Как видно из приводимых графиков, КМФ не обладают пластическими свойствами стали и их разрушение носит хрупкий характер. В силу этого при проектировании усиления железобетонных элементов композиционными материалами необходимо накладывать ограничения на величину упругих деформаций бетона и стали, работающих совместно с КМФ.

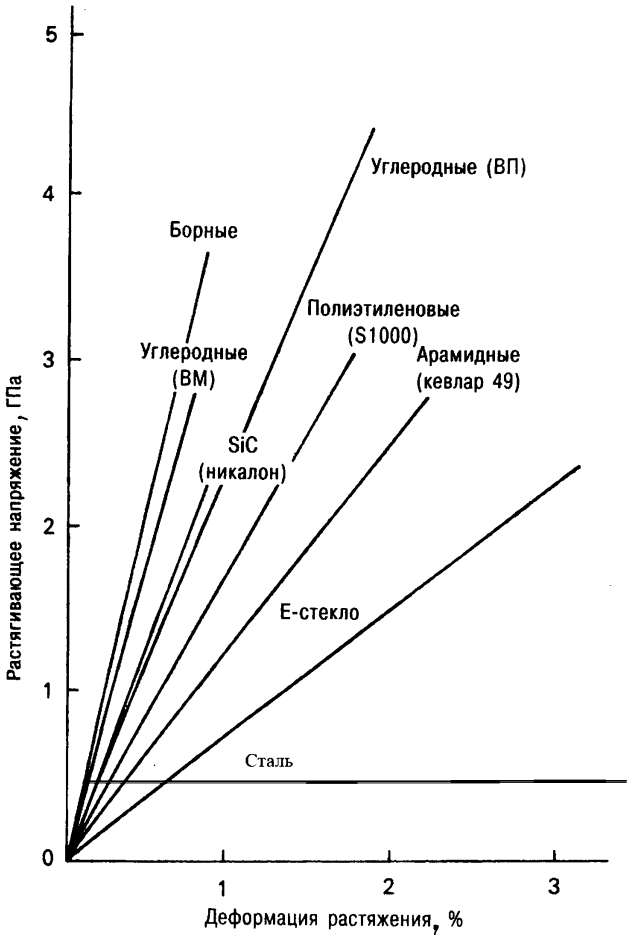


Рисунок 2 – Диаграмма «напряжение – деформация» для различных типов КМФ и арматурной стали

Композиционные материалы являются материалами с резко выраженными анизотропными свойствами. Их прочностные и деформационные характеристики зависят от направления расположения волокон. В табл. 3. приведены отношения основных физико-механических характеристик композиционных материалов при их

испытаниях вдоль расположения волокон (индекс 1) и в поперечном направлении (индекс 2).

Таблица 3 – Анизотропные свойства композиционных материалов

	E_1/E_2	E_1/G_{12}	σ_{r1}/σ_{r2}	α_1/α_2
Боросиликатное стекло/эпоксид	4,42	8,76	17,7	0,13
Бор/эпоксид	9,27	37,40	24,6	0,20
Углерод/эпоксид	13,60	19,10	41,4	–0,07
Арамид/эпоксид	15,30	27,80	26,0	–0,07

E_i – модуль (продольной) упругости (модуль Юнга); G_{ij} – модуль сдвига; σ_{ri} – разрушающее напряжение; α_i – коэффициент температурного расширения.

При присоединении композиционного материала к железобетонной конструкции для повышения несущей способности сечения элемента его необходимо располагать таким образом, чтобы направление расположения волокон совпадало с направлением действия внутренних усилий в конструкции, подлежащей усилению. В противном случае его характеристики значительно снижаются и не могут быть использованы в полной мере. На рис. 3. приведены графики изменения модуля упругости композита при отклонении направления расположения волокон от направления действия главного нормального напряжения на угол θ.

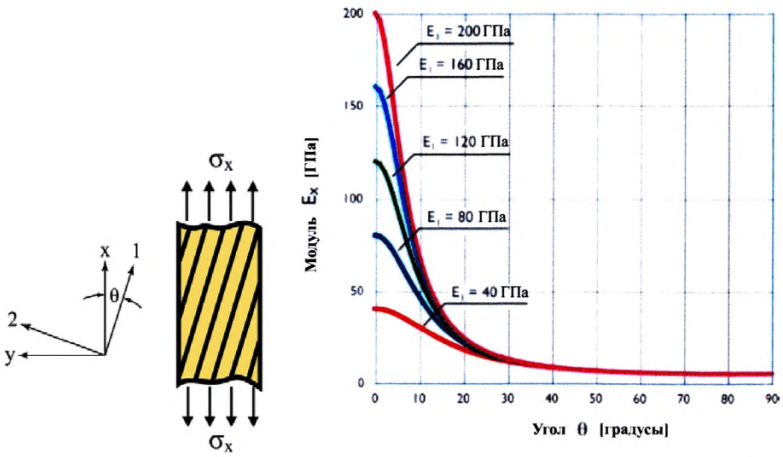


Рисунок 3 – Графики зависимости модуля упругости композита в зависимости от угла θ

Поведение композиционных материалов под нагрузкой определяется микромеханическими процессами деформирования и разрушения, зависящими от диаметра волокна, его распределения в матрице и параллельности волокон, местных дефектов материала и объемного соотношения волокон и полимера. Физико-механические свойства композиционного материала определяются свойствами его составляющих (волокон и полимера) и их объемным соотношением в композите. Модуль упругости композиционного материала E_c и его прочность на растяжение R_c определяются по формулам:

$$E_c = E_f V_f + E_m V_m \ , \tag{5}$$

$$R_c = R_f V_f + R_m V_m \ , \tag{6}$$

где E_f, R_f, V_f – соответственно модуль упругости, прочность на растяжение и объемное соотношение в композите волокон (арамидных, углеродных или стекловолокон); E_m, R_m, V_m – то же самое для отверждающего полимера. При этом $V_f + V_m = 1$.

В случае предварительно изготовленных полос композиционного материала их свойства зависят от площади поперечного сечения, принимаемой при расчете. При изготовлении композиционных материалов на месте (холсты, утапливаемые в клей-матрицу) конечная толщина КМФ и содержание волокон по площади материала являются переменными величинами и изменяются в широких пределах.

В силу того, что модуль упругости и прочность волокон намного превышают модуль упругости и прочность отверждающего полимера, механические свойства композиционного материала определяются свойствами волокон и площадью поперечного сечения не всего материала, а только площадью сечения одних волокон. Если свойства композиционного материала обусловлены его площадью поперечного сечения, включая волокна и полимер, то по сравнению со свойствами самих волокон модуль упругости и прочность всего материала будут меньше. Механические свойства композиционного материала не изменятся из-за увеличения площади его поперечного сечения по сравнению с сечением входящих в его состав волокон. Существует строгое соответствие между количеством волокон в

композиционном материале и его механическими свойствами. Это положение отражено в табл.5.3 и на рис. 4.

Таблица 4 – Зависимость физико-механических свойств композиционного материала от процентного содержания волокон

Физико-механические свойства входящих в композиционный материал компонентов: E_f=220 ГПа, R_f= 4000 МПА, E_m = 3 ГПа, R_m = 80 Мпа								
Площадь поперечного сечения, мм^2			Свойства КМФ				Разрушающая Нагрузка	
A_f	A_m	A_c^*	V_f, %	E_c, Мпа	R_c, МПа	Предельная деформация, %	кН	%
70	0	70	100	220 000	4000	1,818	280,0	100
70	30	100	70	154 900	2844	1,823	282,4	100,9
70	70	140	50	111 500	2040	1,830	285,6	102,0
* При использовании ленты шириной 100 мм ее толщина составит соответственно 0,7 мм; 1,0 мм и 1,4 мм								

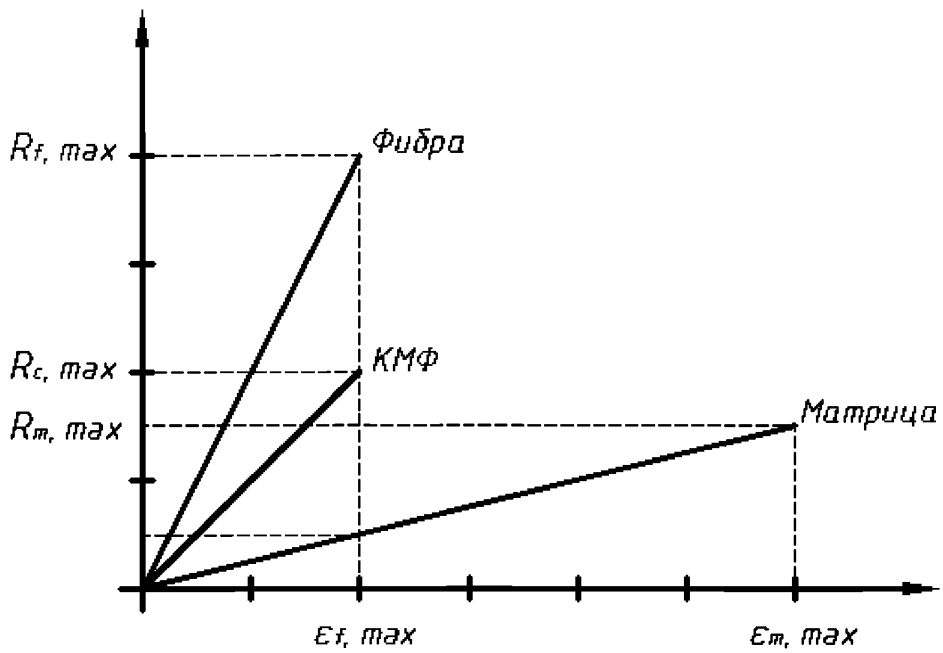


Рисунок 4 – Типичная диаграмма «напряжение – деформация» для волокон, матрицы и композиционного материала

Из табл. 5.3 следует, что при постоянном количестве волокна в композиционном материале разрушающая нагрузка и предельная деформация различаются всего на несколько процентов из-за возрастания площади поперечного сечения отверждающего полимера. Это обстоятельство особенно важно учитывать при проектировании усиления композиционными материалами непосредственно на месте производства работ («in situ»). При расчете параметров усиления принимаются во внимание только площадь поперечного сечения и механические свойства волокон, а не всей системы в целом.

При проектировании необходимо учитывать и целый ряд других физических свойств, оказывающих в дальнейшем влияние на эксплуатацию отремонтированного сооружения: стойкость к химическим воздействиям и ударным нагрузкам, длительная прочность, деформирование при сжатии, температурные воздействия, огнестойкость и электропроводимость, соответствие санитарно-гигиеническим требованиям.

Стойкость к химическим воздействиям. Углеродные и арамидные волокна хорошо сопротивляются многим химическим воздействиям: щелочам, кислотам, хлоридам, сульфатам, нитратам и др. Многие типы стекловолокон подвержены щелочной коррозии (при pH более 11), но мало поддаются воздействию солей. Арамид по сравнению с другими волокнами обладает большей водопроницаемостью. Большая концентрация солей может привести к изменению кристаллической решетки у всех типов волокон.

Электропроводимость. Арамидные и стекловолокна являются диэлектриками и могут быть использованы для защиты линий электропередачи и инженерных коммуникаций. Углеродные волокна проводят электрический ток, но и они могут быть использованы для усиления строительных конструкций, имеющих косвенное отношение к действию электрического тока (например, железнодорожные мосты с электровозным транспортом). Они должны быть хорошо изолированы от стальной арматуры, являющейся проводником электрического тока. Эта защита необходима только при нанесении холстов на основе углеродного волокна «по месту» от токопроводящих элементов.

Деформирование при сжатии. Испытания композиционных материалов, используемых для восстановления и усиления железобетонных конструкций, показали, что прочность на сжатие меньше прочности на растяжение. При продольном сжатии разрушение композита может происходить от деформаций поперечного растяжения, микроизгиба волокон в поперечном направлении или от среза. Вид разрушения зависит от типа волокон, их объемного количества в композите и типа отверждающего полимера. В среднем прочность на сжатие составляет от прочности на растяжение для КМФУ – 78%, для КМФС – 55% и для КМФА – 20%. Ввиду незначительного количества исследований в настоящее время применять композиционные материалы в сжатой зоне конструкции не рекомендуется, так как отсутствуют гарантии надежности работы такого усиленного железобетонного элемента.

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

Температурное воздействие. Величина температурного воздействия зависит от коэффициентов линейной температурной деформации составляющих конструкцию материалов. Для бетона она составляет $1 \cdot 10^{-5}$ $°C^{-1}$. Коэффициент линейной температурной деформации для стекловолокон близок к бетону, у полимера он примерно в 5 раз больше, а для углеродных волокон его значение близко к нулю. Исследования показали, что температурными воздействиями можно пренебречь в диапазоне температур от –28 °С до + 28 °С.

Воздействие огня. Стекловолокна сохраняют свою прочность вплоть до точки плавления (более 1000 °С), тогда как углеродные волокна окисляются на воздухе при температуре около 275 °С. Арамидные волокна не могут использоваться при температуре свыше 200 °С. При этом из-за уменьшения сил, передающихся между волокнами отверждающим полимером, ухудшается работа на

растяжение всего композиционного материала. Все типы волокон не поддерживают горение. В композиционных материалах при пожаре определяющим будет поведение отверждающего полимера, при возгорании которого могут выделяться токсичные вещества.

Реологические свойства. Все композиционные материалы в той или иной степени обладают ползучестью, то есть со временем их прочность на растяжение снижается. При этом время ретардации зависит от неблагоприятных внешних воздействий – высокой или низкой температуры, ультрафиолетового облучения, щелочного воздействия, циклов «замораживание – оттаивание». Длительная прочность композиционных материалов при проектировании учитывается соответствующими понижающими коэффициентами.

Безопасность и санитария. Все типы волокон не представляют опасности для здоровья в условиях нормальной эксплуатации. При непосредственном выполнении работ по усилению отдельные части фибры могут привести к раздражению кожи, глаз и слизистых оболочек. Поэтому при выполнении работ с ними необходимо пользоваться индивидуальными средствами защиты. Арамидные, углеродные и стекловолокна являются инертными материалами, не содержащими токсических веществ. Они не содержат вредных примесей, способных загрязнять воздух или проникать в почву при их применении для усиления подземных сооружений.

Система усиления конструкций композиционными материалами состоит из двух важных составляющих – собственно композиционного материала и адгезива или клеящего состава. Основным назначением адгезива помимо собственно приклеивания является восприятие сдвиговых и отрывающих усилий между соединяемыми поверхностями. Для приклеивания композиционного материала к бетонной поверхности чаще всего используются эпоксидные двухкомпонентные клеящие составы, способные схватываться при положительной температуре окружающей среды. Характеристики адгезивов на эпоксидной основе приведены в табл. 5.

Таблица 5 – Физико-механические характеристики применяемых адгезивов

Характеристики при 20°С	Единица измерения	Величина
Плотность	г/см^3	1,1 – 1.7
Модуль упругости	ГПа	0,5 – 20
Модуль сдвига	ГПа	0,2 – 0,8
Прочность на растяжение	МПа	9 – 30
Прочность на сдвиг	МПа	10 – 30
Прочность на сжатие	МПа	55 – 110
Предельная деформация	%	0,5 – 5
Коэффициент температурного Расширения	10^{-6}/°С	25 – 100
Температура стеклования	°С	45 – 80
Коэффициент Пуассона	-	0,3 – 0,4

В небольшом объеме применяются адгезивы и на другой основе. Однако им присущ целый ряд недостатков, ограничивающих область применения:

• адгезивы на основе полиэстера имеют большие усадочные деформации и высокий коэффициент температурного расширения. Они подвержены щелочной агрессии и быстро затвердевают;

• адгезивы на основе виниловых полиэфиров имеют большие усадочные деформации и в условиях повышенной влажности не могут обеспечить качественного сцепления соединяемых поверхностей;

• полиуретановые адгезивы имеют те же недостатки, что и полиэфирные, и с трудом обеспечивают необходимое сцепление между поверхностями.

Выбор типа эпоксидного адгезива зависит от особенностей его применения и определяется целым рядом факторов (температурно-влажностный режим окружающей среды и склеиваемых поверхностей и требуемая скорость твердения). Адгезивы должны выдерживать температуру до +50 °С во время эксплуатации и иметь температуру стеклования от +50 °С до +65 °С. В некоторых случаях, например при усилении верхних элементов мостовых конструкций, находящихся под прямым воздействием солнечных лучей, температура стеклования адгезива должна быть значительно выше. Большинство применяемых адгезивов используется для соединения сухих поверхностей.

В процессе твердения в адгезиве происходят химические процессы, резко замедляющиеся при температуре менее +10 °С. Поэтому в большинстве случаев во

время производства работ по усилению окружающая температура должна быть свыше 10 °С.

6.3 Нормативные и расчетные характеристики композиционных материалов

Исходными данными для определения нормативных и расчетных значений силовых и деформационных характеристик композиционных материалов являются сертифицированные значения этих характеристик, представляемые производителями. В обязательном порядке фирмами–производителями представляются следующие характеристики композиционных материалов, необходимые для проектирования и расчета усиливаемых конструкций:

R_{cf} – сопротивление композиционного материала растяжению, МПа;

E_{cf} – модуль упругости композиционного материала, МПа или ГПа;

ε_{cf} – предельно допустимые деформации композиционного материала;

t_c – толщина композиционного материала (для холстов – расчетная), мм;

b_c – ширина полосы или ленты композиционного материала, мм;

γ_c – плотность композиционного материала, г/см^3;

γ_{cp} – вес единицы площади холстового КМ или вес только волокон, г/м^2.

Дополнительно производители могут давать рекомендации по условиям применения поставляемых ими композиционных материалов и свои предложения по назначению коэффициентов надежности по материалу.

Нормативные значения сопротивления растяжению композиционных материалов R_{cn} и деформации ε_{cn} определяются по следующим зависимостям:

$$R_{cn} = R_{cf}\gamma_{c1}\gamma_{c2}; \quad (7)$$

$$\varepsilon_{cn} = \varepsilon_{cf}\gamma_{c1}\gamma_{c2}, \quad (8)$$

где γ_{c1} – коэффициент, учитывающий сцепление между композиционным материалом и бетоном. Он накладывает ограничения на уровень нормальных деформаций, развивающихся в композиционном материале. При определенном уровне деформаций композиционного материала в нем возникают силы, которые не могут быть восприняты бетонной поверхностью конструкции или адгезивом. Их

величина определяется жесткостью композиционного материала и условиями эксплуатации усиливаемой конструкции. Американский институт бетона рекомендует определять их по следующим зависимостям:

$$\gamma_{c1} = \frac{1}{60\varepsilon_{cd}}\left(1 - \frac{nE_c t_c}{360000}\right) \le 0{,}9 \text{ при } nE_c t_c \le 180000, \quad (9)$$

$$\gamma_{c1} = \frac{1500}{\varepsilon_{cd} nE_c t_c} \le 0.9 \qquad \text{при } nE_c t_c > 180000, \quad (10)$$

где n – количество слоев композиционного материала; $\varepsilon_{cd} = \varepsilon_{cf}\gamma_{c2}$ – деформация композиционного материала, используемая при определении коэффициента γ_{c1} и зависящая от условий эксплуатации; γ_{c2} – коэффициент, учитывающий тип волокна в композиционном материале и условия его эксплуатации. Его величины приведены в табл. 6.

Таблица 6 – Значения коэффициента γ_{c2}

Условия эксплуатации	Тип волокна (фибры) в КМ	Коэффициент γ_{c2}
Внутри зданий и сооружений	Углерод	0,95
	Стекло	0,75
	Арамид	0,85
На открытом воздухе	Углерод	0,85
	Стекло	0,65
	Арамид	0,75
В условиях агрессивной внешней среды (химические заводы)	Углерод	0,85
	Стекло	0,50
	Арамид	0,70

Коэффициенты условий работы зависят от вида прилагаемой нагрузки, длительной прочности и выносливости композиционного материала, а также дополнительных условий его эксплуатации:

$\eta_1 = 1$ при расчете конструкции на действие изгибающего момента, $\eta_1 = 0{,}85$ при расчете на действие поперечной силы и $\eta_1 = 0{,}9$ при охватывающем усилении колонн;

η_2 – коэффициент, учитывающий длительность действия нагрузки и цикличность ее приложения; при длительном приложении нагрузки η_2 = 0,3 для материалов на основе стекловолокон, η_2 = 0,5 для материалов на основе арамидных волокон и η_2 = 0,8 для материалов на основе углеродных волокон;

η_2 = 0,5 для всех типов волокон при циклическом приложении нагрузки;

η_3 – коэффициент, учитывающий циклы «замораживание – оттаивание» при эксплуатации конструкции на открытом воздухе в условиях знакопеременных температур; η_3 = 0,9 для ламинатов и η_3 = 0,85 для холстов;

η_4 – коэффициент, учитывающий 100% влажность окружающей среды; η_4 = 0,70 для полос ламинатов и η_4 = 0,90 для холстовых материалов.

Расчетные значения сопротивления растяжению R_c и деформаций композиционных материалов ε_{cp} определяются делением нормативных значений этих характеристик на коэффициент надежности по композиционному материалу γ_{cm} с учетом коэффициентов условий работы η_i:

γ_{cm} = 1,1 для полос заводского изготовления ;

γ_{cm} = 1,1 – 1,2 для однонаправленных холстов из углерода;

γ_{cm} = 1,2 – 1,4 для однонаправленных холстов из арамида;

γ_{cm} = 1,5 – 1,8 для двунаправленных холстов из стекловолокна.

7 Композиционные системы для внешнего армирования

7.1 Общие положения

Композиционные системы для внешнего армирования определяются совокупностью материалов (холсты, ламинаты, сетки и типы волокон в них) технологий (системы материалов заводского изготовления предварительно пропитанных смолой, системы мокрого способа укладки по месту производства работ, системы, монтируемые в пазах и системы предварительного отверждения) и работы конструкции (изгибаемые и сжатые).

Системы предварительной пропитки (ламинаты) подвергаются пропитке непосредственно на заводе фирмы-производителя и поставляются в рулонах. Смола может проходить предварительную полимеризацию. Система предварительной пропитки представляет собой тонкий листовой материал (обычная толщина 0,15 мм), эластичный и умеренно клейкий, со съемной /отделяющейся/ пленкой (силиконовой бумагой и т.п.), наносимой на поверхности, чтобы предохранить саму систему от внешнего загрязнения. Ламинаты с помощью адгезивов приклеиваются на заранее подготовленную поверхность усиливаемой конструкции.

Системы мокрого способа укладки (холсты) изготавливаются из волокон, идущих в одном или нескольких направлениях, в форме хостов или тканей, и пропитываются смолой на месте производства работ при установке на конструкцию.

Системы предварительного отверждения, производимые методом пултрузии или послойного формования и имеющие разнообразные формы, непосредственно приклеиваются к подлежащему усилению элементу конструкции.

Системы установки полос ламинатов или круглой арматуры из композиционных материалов в специально подготовленные щели или пазы (рис. 5). Таким способом можно усиливать как изгибаемые железобетонные конструкции типа плит и балок, так и центрально и внецентренно сжатые элементы. Использование полос в пазах значительно увеличивает их сцепление с бетоном по сравнению с приклеиванием к бетонной поверхности.

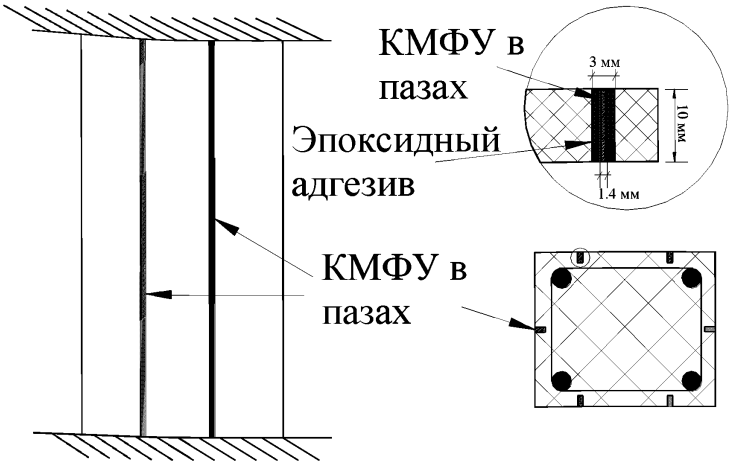


Рисунок 5 – Усиление железобетонных колонн установкой композиционного материала в пазах

Внешнее армирование изгибаемых балочных конструкций осуществляется путем приклеивания на нижнюю поверхность ребра усиливающих элементов с направлением армирующих волокон вдоль оси конструкции, а также вертикальных, либо наклонных хомутов в опорной зоне с направлением армирующих волокон перпендикулярно, либо наклонно продольной оси конструкции (рис. 6). Для создания продольных усиливающих элементов на нижней поверхности ребра могут быть использованы ламинаты и однонаправленные холсты, для создания хомутов – однонаправленные холсты.

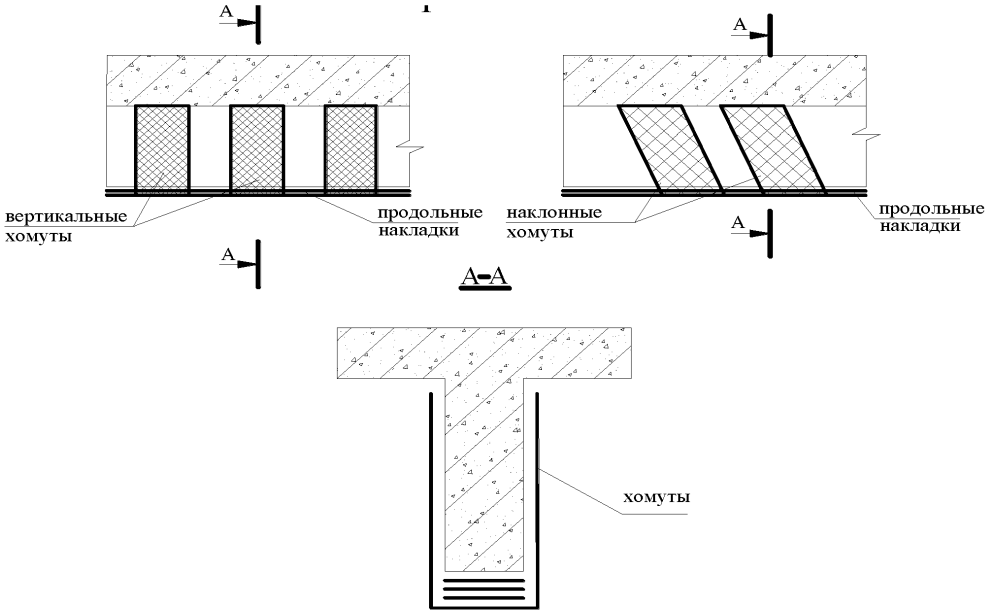


Рисунок 6 – Схема внешнего армирования балки

Внешнее армирование плитных конструкций осуществляется путем приклеивания на нижнюю поверхность плит элементов с направлением армирующих волокон вдоль оси конструкции и поверх них – поперечных элементов с направлением армирующих волокон перпендикулярно продольной оси конструкции (рис. 7). Для создания элементов внешнего армирования могут быть использованы ламинаты или однонаправленные холсты.

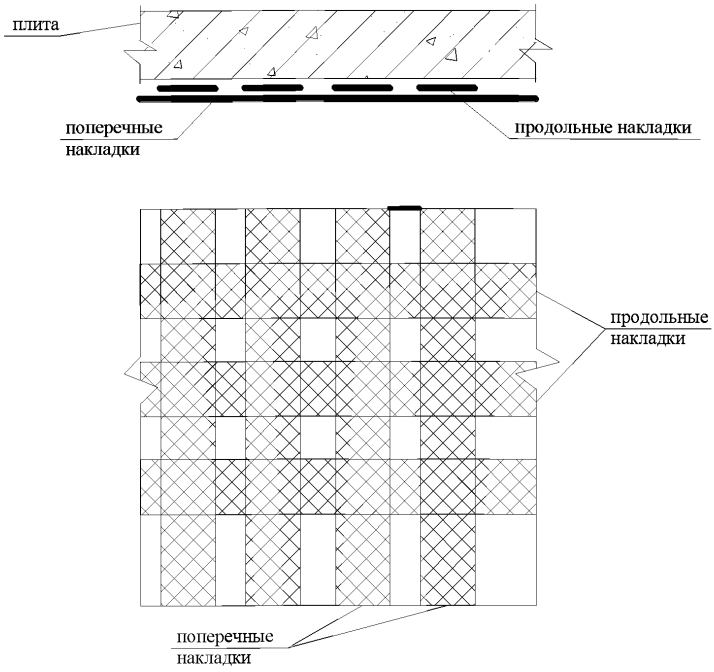


Рисунок 7 – Схема внешнего армирования плиты

На рис. 8 приведена схема анкеровки концевых участков при усилении однопролетной балки на шарнирных опорах. Особое внимание следует уделить усилению и анкеровке консольных плит и балок (рис. 9), а также неразрезных конструкций, когда растягивающие усилия на опорах действуют на верхней грани элемента (рис. 10). При этом гораздо более эффективной будет конструкция усиления, представленная на рис. 10, а, когда в опорной части элемента прорезается щель, куда заводится полоса композиционного материала. Схему на рис. 10 б можно рекомендовать только в том случае, если по каким-либо причинам невозможно или затруднено использование других схем.

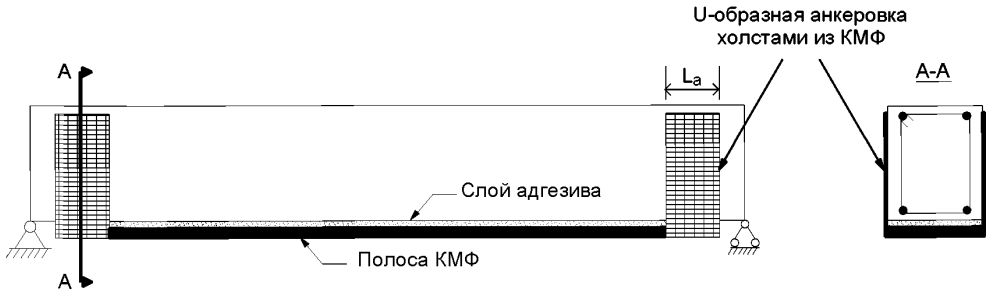


Рисунок 8 – Анкеровка концевых участков полосы композиционного материала

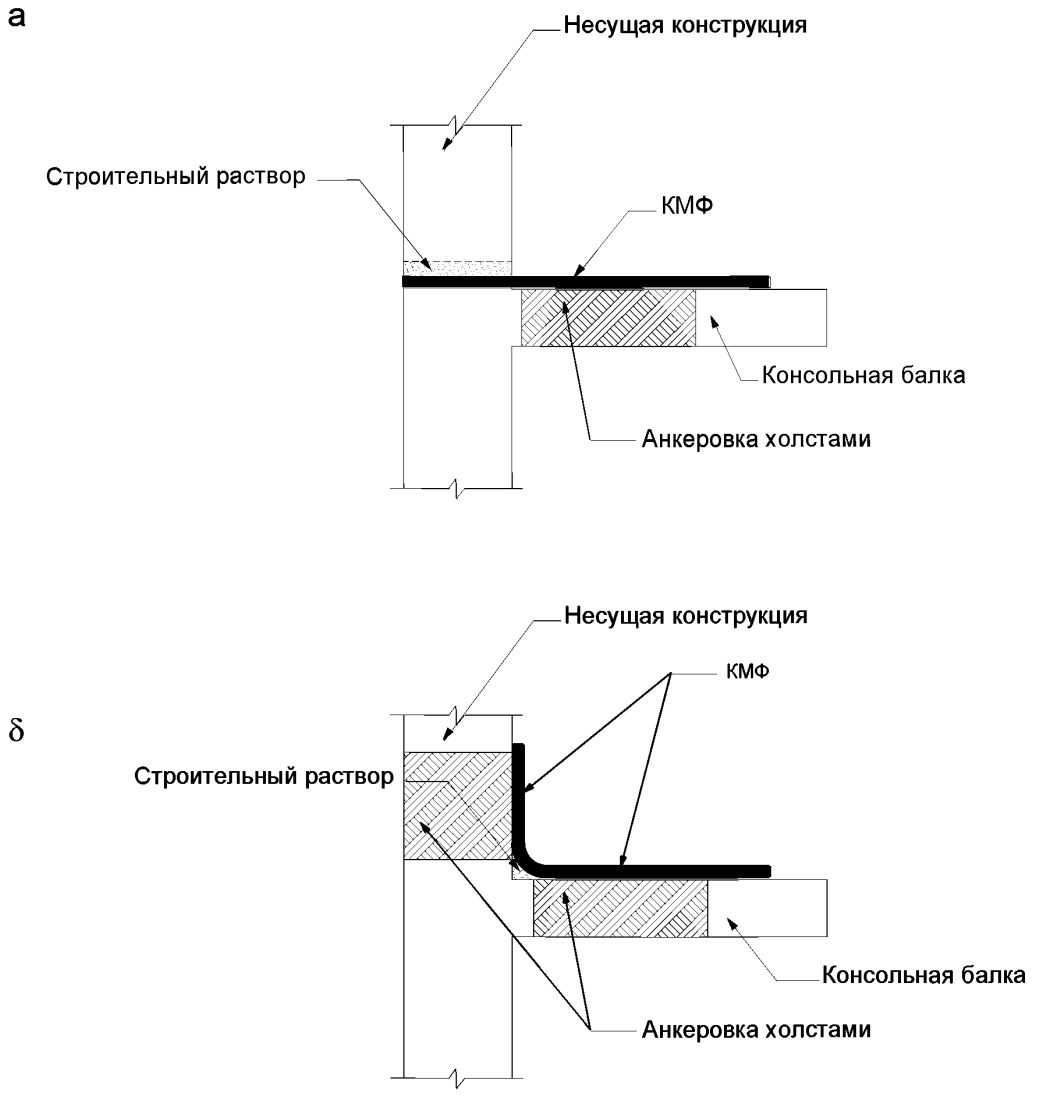


Рисунок 9 – Усиление и анкеровка консольных конструкций

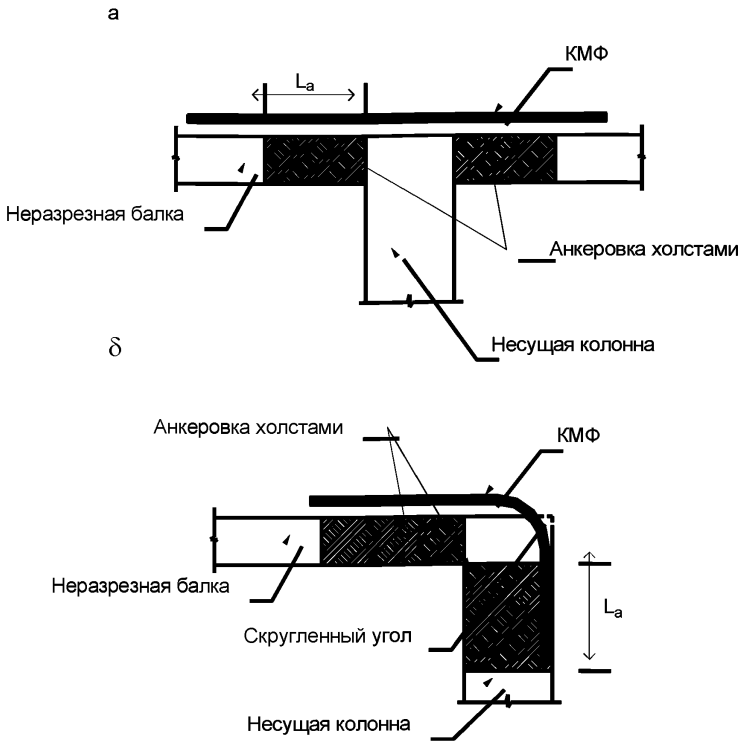


Рисунок 10 – Усиление и анкеровка неразрезных балок

Внешнее армирование сжатых конструкций (колонны, простенки) осуществляются путем устройства обойм из холстов вокруг сечения элементов. Для создания обойм с направлением армирующих волокон перпендикулярно оси усиливаемой конструкции холсты устанавливаются по всей высоте конструкций (рис. 11).

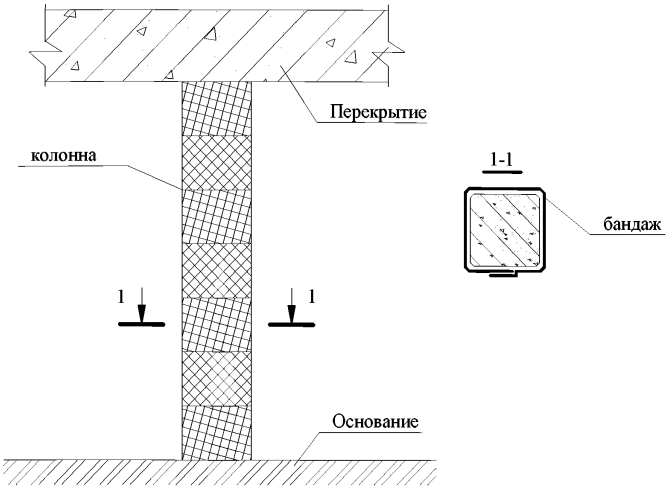


Рисунок 11 – Схема внешнего армирования колонны

В случае круглых колонн обоймы из холстов создаются путем их применения непрерывно по всей длине колонны (рис. 12, а), в виде отдельных обручей, устраиваемых через определенные промежутки (рис. 12, б), или путем спиральной навивки холстового композиционного материала (рис. 12, в).

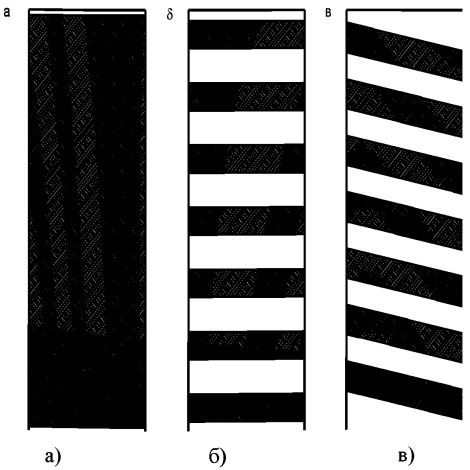


Рисунок 12 – Основные способы усиления круглых колонн

В случае усиления прямоугольных или квадратных колонн в зависимости от типа применяемых холстов их углы должны быть скруглены радиусами 15–25 мм. Усиление внешними обоймами прямоугольных колонн менее эффективно, чем круглых, так как концентрация напряжений локализуется в углах конструкции и основная толщина оболочки должна быть между углами для ограничения бокового расширения и исключения недопустимого изгиба колонны. В связи с этим квадратным колоннам перед ремонтом и усилением по возможности придают круглую форму поперечного сечения (рис. 13, а, б), а прямоугольным – эллипсовидную (рис. 13 в, г). Это достигается заключением колонн в опалубку соответствующей формы и последующим их обетонированием. Для уменьшения расхода бетона углы квадратных или прямоугольных колонн могут быть срезаны (рис. 13 б, г).

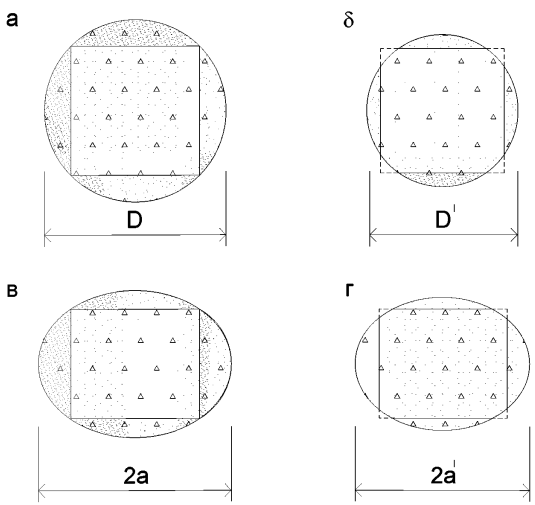


Рисунок 13 – Усиление квадратных (а, б) и прямоугольных (в, г) колонн с изменением их формы поперечного сечения соответственно на круглую и эллипсовидную

Композиционная система усиления должна проектироваться в расчете на соответствующую прочность, и соответствовать требованиям эксплуатационной

надежности и долговечности. В случае пожара прочность выбранной композиционной системы должна оказаться достаточной на требуемый период времени.

Композиционная система усиления должна размещаться на участках, где действуют растягивающие напряжения. Нельзя рассчитывать на то, что композиционные материалы совместно с усиливаемой конструкцией будут выдерживать сжимающие напряжения.

Проектирование и расчет композиционной системы усиления должны проводиться в соответствии со следующими принципами.

- Риски, в результате реализации которых может быть повреждено сооружение, должны быть точно определены, устранены или уменьшены.
- Конфигурация системы усиления не должна обладать повышенной чувствительностью к вышеперечисленным рискам.
- Системы усиления должны переносить возникновение допустимых локальных повреждений.
- Необходимо избегать систем усиления, которые обрушаются внезапно без предупреждения.

Определенные выше основные требования соблюдаются, если выполняются следующие условия:

- Подбираются подходящие материалы и технологии для восстановления и усиления железобетонной конструкции. Проектирование и расчет выполняются надлежащим образом согласно положениям настоящего свода правил;
- Выбираются методы контроля качества для проектирования и строительства, которые соответствуют конкретному проекту восстановления или усиления.

Применение усиления должно проектироваться так, чтобы ухудшение состояния подвергшегося этому усилению сооружения в течение проектного (расчетного) срока службы не привело к ухудшению его эксплуатационных характеристик ниже планируемого уровня. Необходимо тщательно рассмотреть вопрос об условиях воздействия внешней среды, а также о планируемой программе

технического ухода и текущего ремонта.

Для обеспечения долговечности железобетонных элементов, восстановленных или усиленных композиционными материалами, необходимо учесть следующее.

- Планируемое использование подвергшегося усилению сооружения.
- Ожидаемые условия воздействия внешней среды.
- Состав, свойства и эксплуатационные характеристики уже использующихся и новых материалов.
- Подбор системы усиления, ее конфигурации и строительных деталей.
- Качество выполнения работ и уровень контроля.
- Конкретные меры защиты (например, противопожарной или защиты от ударного воздействия).
- Планируемая программа мониторинга восстановленной (усиленной) конструкции и текущего ремонта в течение всего остаточного срока службы.

7.2 Параметры эксплуатируемых конструкций перед выполнением работ по внешнему армированию

Ремонт основания. Все проблемы, связанные с исходным состоянием бетона и бетонного основания, которые могут повлиять на целостность композиционной системы, должны быть устранены до начала подготовки поверхности. Все работы по ремонту бетона должны соответствовать требованиям конструкторских чертежей и проектным спецификациям.

Влияние коррозии. Системы внешнего армирования не должны устанавливаться на бетонные основания, для которых возможно наличие коррозии стальной арматуры. Растягивающие усилия, связанные с процессом коррозии, трудно поддаются определению и могут привести к нарушению структурного единства композиционной системы внешнего армирования. Причины коррозии должны быть устранены, последствия разрушающего воздействия коррозии должны быть ликвидированы до установки любой композиционной системы.

Заделка трещин. Имеющиеся трещины с шириной раскрытия более 0,3 мм могут повлиять на рабочие характеристики системы внешнего армирования, вызывая расслаивание или повреждение волокон. Эти трещины должны быть заделаны инъекцией эпоксидного клея под давлением перед установкой композиционной системы. Меньшие трещины, подверженные воздействию агрессивных сред, могут потребовать заделки полимерным составом или изоляцией для защиты существующей стальной арматуры от коррозии.

Подготовка поверхности. Требования к подготовке поверхности должны основываться на предполагаемом способе установки системы внешнего армирования. Способы установки могут быть классифицированы как критичные к способу крепления композиционного материала к бетонной поверхности и критичные к его контакту с нею. Способы установки, критичные к сцеплению, например, компенсация изгиба или компенсация деформаций сдвига балок, плит, колонн или стен, требуют адгезионного сцепления композиционной системы с бетоном. Способы установки, критичные к контакту, например, создание обойм из композиционного материала вокруг колонн, требуют только плотного контакта между системой внешнего армирования и бетоном. Способы установки, критичные к контакту, не требуют использования адгезионного крепления композиционной системы к бетонному основанию, хотя оно часто предусматривается для облегчения установки.

Способы установки, критичные к креплению. Подготовка поверхности при способах установки, критичных к креплению, должна производиться в соответствии с рекомендациями раздела 8 настоящего свода правил. Бетон или ремонтируемые поверхности, на которые устанавливается композиционная система, должны быть очищены и свободны от щебня или грунта. Грубые неровности необходимо выровнять при помощи шпаклевки. Препятствия, внутренние углы, вогнутые поверхности и внедренные объекты могут повлиять на рабочие характеристики композиционной системы и должны быть устранены. Внутренние углы и вогнутые поверхности могут потребовать специальных конструктивных решений для обеспечения надежности крепления системы внешнего армирования к основанию. Конечная обработка поверхности может производиться при помощи

абразивоструйной или водоструйной технологии. Необходимо удалить цементное молоко, пыль, грязь, масло, отвердитель, старые покрытия и любые другие материалы, которые могут препятствовать креплению композиционной системы к бетону. Каверны и другие небольшие поверхностные раковины должны быть полностью раскрыты при обработке поверхности. По завершении операций профилировки поверхность должна быть очищена, зачищена и готова к установке системы внешнего армирования.

Обнаруженные отклонения от плоскостности, включая линии рельефа, не должны превышать 5 мм или допусков, рекомендуемых изготовителем композиционной системы. Обнаруженные отклонения от плоскостности могут быть удалены посредством шлифовки перед абразивоструйной или водоструйной обработкой или сглажены при помощи полимерной шпаклевки, если они невелики. Каверны и раковины должны быть заполнены полимерной шпаклевкой.

Сухость всех поверхностей для системы усиления должна соответствовать рекомендациям изготовителя. Влага в порах может препятствовать проникновению полимеров и снижать прочность механического соединения.

Способы установки, критичные к контакту. При способах установки, включающих в себя защиту конструкций из бетона, подготовка поверхности должна обеспечивать непрерывный плотный контакт поверхности бетона и композиционной системы. Оборачиваемые поверхности должны, как минимум, быть плоскими или выпуклыми для обеспечения распределенной нагрузки (радиального давления) на систему внешнего армирования. Большие раковины на поверхности должны быть заделаны материалом для ремонта, совместимым с существующим бетоном.

Системы, устанавливаемые в пазах. Системы, монтируемые вблизи поверхности, обычно устанавливаются в пазах, прорезаемых на поверхности бетона. Не допускается повреждение существующей стальной арматуры при нарезке пазов. Перед установкой стержня необходимо убедиться в прочности поверхности бетона. Внутренние поверхности паза должны быть очищены для обеспечения надлежащего сцепления с бетоном. В пазу не должно быть цементного молока или других веществ, которые препятствуют креплению. Содержание влаги в исходном бетоне

должно контролироваться на соответствие связующим свойствам адгезива. Пазы должны быть полностью заполнены адгезивом. Тип адгезива определяет изготовитель композиционной системы.

7.3 Параметры внешней среды при выполнении работ по внешнему армированию

Температура, относительная влажность воздуха и влажность поверхности во время установки могут повлиять на рабочие характеристики композиционной системы. Условия, контролируемые до и во время установки, включают в себя температуру поверхности бетона, температуру воздуха, относительную влажность и соответствующую точку росы.

Грунтовки, полимерные материалы для пропитки и клеящие материалы в общем случае не должны наноситься на холодные или заиндевевшие поверхности. Если температура поверхности бетона опускается ниже минимального уровня, указанного изготовителем композиционной системы может проявиться влияние неправильной пропитки волокон и неправильного отверждения материалов полимерных компонентов, при этом целостность системы внешнего армирования может быть нарушена. Для увеличения температуры воздуха и поверхности во время установки может использоваться дополнительный источник тепла. Источник тепла должен быть чистым и не оказывать отрицательного влияния на поверхность или на неотвержденную композиционную систему.

Полимерные и клеящие материалы в общем случае не должны применяться на сырых или влажных поверхностях, если их состав не был разработан специально для таких случаев. Системы внешнего армирования не должны применяться на бетонных поверхностях с возможным выходом водяного пара через поверхность. Миграция водяного пара от поверхности бетона через неотвержденные полимерные материалы обычно проявляется в виде пузырьков на поверхности и также может ухудшить качество соединения композиционной системы и основания.

7.4 Установка системы внешнего армирования

Смешивание полимеров должно производиться в соответствии с процедурой, рекомендуемой изготовителем композиционной системы внешнего армирования. Все полимерные компоненты должны иметь требуемую температуру и смешиваться в заданных пропорциях до получения однородной целостной смеси. Полимерные компоненты часто имеют различные цвета, поэтому полное смешивание можно определить по отсутствию отдельных цветовых пятен. Полимеры должны смешиваться в течение предписанного времени, полученная смесь должна визуально контролироваться на однородность цвета.

Полимеры для смешивания должны браться в достаточно малых количествах, позволяющих использовать всю смесь в течение ее срока годности. Смеси полимеров, чей возраст превышает срок годности, использовать нельзя, так как их вязкость продолжает расти, что отрицательно влияет на способность полимера проникать в поверхность или пропитывать волоконную ткань.

При установке некоторых композиционных систем могут выделяться газы. Системы внешнего армирования должны выбираться с учетом их влияния на окружающую среду, включая образование неустойчивых органических соединений и токсичность.

Грунтовочное покрытие и шпаклевка. На все участки бетонной поверхности, где будет размещена композиционная система, должно быть нанесено грунтовочное покрытие. Грунтовочное покрытие необходимо наносить равномерно на подготовленную поверхность в соответствии с плотностью покрытия, рекомендованной изготовителем. Перед установкой системы внешнего армирования нанесенное грунтовочное покрытие должно пройти обработку от пыли, влаги и других загрязняющих веществ.

При нанесении шпаклевки необходимо выдерживать толщину слоя и последовательность операций, рекомендованную изготовителем композиционной системы. Совместимую с системой внешнего армирования шпаклевку, которая обычно представляет собой густую полимерную пасту, необходимо использовать только для заполнения раковин и сглаживания неоднородностей поверхности перед

применением других материалов. Необработанные края или неровности мазков затвердевшей шпаклевки должны быть отшлифованы перед продолжением установки.

Перед применением полимерных материалов для пропитки или клеящих материалов, необходимо высушить грунтовочное покрытие и шпаклевку в соответствии с рекомендациями изготовителя композиционной системы. После полного затвердения грунтовочного покрытия и шпаклевки может потребоваться дополнительная подготовка поверхности перед применением полимерных материалов для пропитки или клеящих материалов.

Системы установки холстов по месту (мокрого наслоения). Системы мокрого наслоения обычно устанавливаются вручную с использованием сухой волоконной ткани и полимерных материалов для пропитки, рекомендации по использованию таких систем обычно предоставляет изготовитель. Полимерные материалы для пропитки должны наноситься равномерно на подготовленные поверхности, на которых предполагается размещать систему. Перед размещением на бетонной поверхности волокна также могут отдельно пропитываться при помощи машины для пропитки полимерными материалами.

Армирующие волокна должны быть осторожно вдавлены в незатвердевший полимерный материал для пропитки способом, рекомендуемым изготовителем композиционной системы. До затвердевания полимерного материала необходимо удалить захваченный между слоями воздух – например, методом прокатывания роликом. Используемое количество материала для пропитки должно быть достаточно для полной пропитки волокон.

Следующие слои пропитывающего полимера необходимо наносить до полного отверждения предыдущего слоя. Если предыдущие слои затвердели, то в соответствии с рекомендациями изготовителя системы может потребоваться дополнительная подготовка поверхности между слоями, например, легкое шлифование или нанесение растворителя.

Системы, наносимые с помощью машин. Для систем, наносимых с помощью машин, могут использоваться предварительно пропитанные полимером жгуты волокна или жгуты с сухим волокном. Жгуты волокна предварительно

пропитываются полимером на заводе-изготовителе и доставляются к месту проведения работ в виде катушек подготовленного материала. Сухие волокна пропитываются на месте проведения работ во время процесса намотки.

Оборачивающие машины в основном используются для автоматического обертывания железобетонных колонн. Жгуты могут наматываться горизонтально или под определенным углом. Оборачивающая машина располагается вокруг колонны и автоматически оборачивает волоконный материал вокруг колонны, двигаясь по ней вверх и вниз.

После обертывания, предварительно пропитанные системы должны быть отверждены при повышенной температуре. Обычно источник тепла располагается вокруг колонны для обеспечения установленной температуры и графика выполнения работ в соответствии с рекомендациями изготовителя. Температуры контролируются для обеспечения качества выполненных работ. Полученные обоймы из композиционного материала не имеют швов или стыков, так как жгуты накладываются непрерывно.

Предварительно отвержденные системы. Предварительно отвержденные системы включают в себя обоймы, ленты и открытые сетчатые формы, обычно устанавливаемые с помощью клеевых материалов. Клеевые материалы должны равномерно наноситься на подготовленные поверхности, на которых предполагается размещать предварительно отвержденные системы, за исключением отдельных участков бетонных поверхностей, где не требуется приклеивать композиционную систему к бетонному основанию.

Предварительно отвержденные многослойные материалы, предназначенные для склеивания, должны быть очищены и подготовлены в соответствии с рекомендациями изготовителя. Предварительно отвержденные листы или изогнутые обоймы должны размещаться на или в жидком клеящем материале в соответствии с рекомендациями изготовителя композиционной системы. Перед нанесением клеевых материалов необходимо удалить воздух из воздушных полостей между слоями. Расход клеевых материалов должен соответствовать рекомендациям изготовителя.

Системы установки композиционных материалов в пазах. Данные

системы состоят из стержней и пластин композиционного материала прямоугольного или круглого сечения, закрепляемых в прорезанных на поверхности бетона пазах с помощью клеевых материалов. Пазы должны иметь соответствующие размеры для обеспечения правильного приклеивания стержней. На рис. 14 представлены типовые размеры для стержней и пластин композиционного материала. Системы в пазах могут использоваться на верхней поверхности элементов конструкции и для потолков. Тип клеевого материала и способ установки определяет изготовитель композиционной системы.

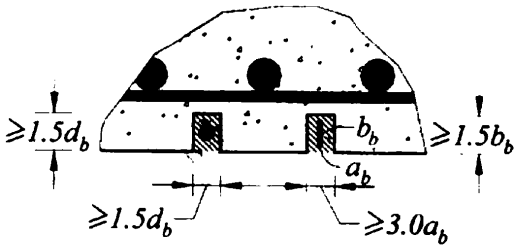


Рисунок 14 – Минимальные размеры пазов для установки композиционных материалов

Защитные покрытия. Покрытия должны быть совместимы с системой внешнего армирования и применяться в соответствии с рекомендациями изготовителя. Обычно не рекомендуется использовать растворители для очистки поверхности композиционного материала перед нанесением покрытия из-за вредного влияния, оказываемого на него растворителем. Любое использование растворителей при подготовке поверхности композиционного материала перед нанесением защитных покрытий должно быть согласовано с изготовителем системы внешнего армирования.

Необходимо периодически проверять состояние покрытий и проводить техническое обслуживание для обеспечения эффективности их работы.

Ориентирование материалов композиционной системы. Необходимо определить ориентацию нитей композиционного материала и последовательность

их укладки. Небольшие отклонения угла, порядка 5 градусов, от заданного направления расположения волокон могут вызвать существенное снижение прочности и модуля упругости. Отклонения в расположении нитей допускаются только с разрешения проектировщика.

Обращаться с тканью и тканевыми материалами необходимо таким образом, чтобы прямолинейность и ориентация волокон оставались постоянными. При обнаружении перекрученной ткани или других форм существенной волнообразности необходимо сообщить заказчику и проектировщику.

Многослойные системы и соединения внахлестку. Допускается в композиционной системе использовать много слоев, при условии полной пропитки всех слоев полимерами. Предела прочности полимеров на срез достаточно для распределения сдвигающей нагрузки между слоями, прочности соединения бетона и системы внешнего армирования. Для длинных пролетов могут использоваться составные линии волоконного материала или предварительно отвержденный материал для непрерывного распределения нагрузки посредством соответствующих соединений внахлестку. Соединения внахлестку должны быть расположены в шахматном порядке, если иное не указано проектировщиком. Характеристики соединения внахлестку, включая длину соединения, должны основываться на результатах испытаний, соединения должны устанавливаться в соответствии с рекомендациями изготовителя.

Отверждение полимеров – процесс, зависящий от времени и температуры. Отверждение полимеров при температуре окружающей среды может занять несколько дней до достижения полной сухости. Экстремальные значения температуры или ее колебания могут замедлить или ускорить срок отверждения полимеров. Изготовитель системы внешнего армирования может предложить несколько предварительно оцененных на соответствие техническим условиям сортов полимеров с учетом таких условий эксплуатации.

Все полимеры должны быть отверждены в соответствии с рекомендациями изготовителя. Модификации химического состава полимеров на месте проведения работ не допускаются.

Необходимо проверить степень отверждения установленных слоев перед

установкой последующих слоев. При обнаружении нарушений в процессе отверждения установку последующих слоев необходимо приостановить.

Временная защита. Неблагоприятные температуры, непосредственный контакт композиционного материала с дождевыми каплями, пылью или грязью, чрезмерная подверженность солнечному излучению, высокая влажность или умышленная порча могут привести к повреждению системы внешнего армирования во время установки и привести к неправильному отверждению полимеров. Во время установки и до окончания отверждения полимеров может потребоваться применение временной защиты, например, тентов и пластиковых экранов. При необходимости установки временных креплений композиционная система должна быть полностью отверждена перед удалением креплений и нагрузкой структурного элемента в соответствии с расчетными значениями. В случае возникновения подозрений повреждения системы внешнего армирования необходимо уведомить заказчика и проектировщика.

7.5 Возможные разрушения системы усиления внешним армированием и меры по его предотвращению

Причины разрушения изгибаемых железобетонных элементов, усиленных внешним армированием композиционными материалами, могут быть разбиты на две основные группы:

- работоспособность усиленной конструкции сохраняется вплоть до начала разрушения бетона сжатой зоны или разрушения растянутого композиционного материала;
- разрушение конструкции наступает ранее из-за отслоения композиционного материала от бетона.

Общее разрушение конструкции может наступить в следующих случаях:

- пластическое разрушение арматуры растянутой зоны при достижении напряжениями в стержневой арматуре физического (условного) предела текучести с дальнейшим разрушением бетона сжатой зоны. Если конструкция армирована высокопрочной проволокой с малым относительным удлинением при разрыве

(около 4%), то одновременно с разрывом проволоки происходит раздробление бетона сжатой зоны. Разрушение в данном случае носит хрупкий характер. Композиционный материал при этом не разрушается;

• хрупкое разрушение бетона сжатой зоны в элементах с избыточным содержанием растянутой стальной арматуры и растянутого композиционного материала. Применение внешнего армирования в данном случае малоэффективно;

• пластическое разрушение арматуры растянутой зоны при небольшом проценте армирования композиционными материалами, что в первую очередь приводит к их разрыву и перераспределению нагрузки на внутреннюю стальную арматуру, из-за чего начинается ее разрушение.

Местное разрушение усиленной внешним армированием железобетонной конструкции может произойти из-за потери сцепления между бетоном и композиционным материалом, а также из-за разрушения контактов слоев (адгезионное разрушение). Нарушение сцепления между поверхностью бетона и композиционным материалом под действием нормальных и касательных напряжений приводит к местному разрушению конструкции, что необходимо принимать во внимание при определении ее несущей способности с учетом внешнего армирования. В большинстве случаев такой вид разрушения происходит на участке с трещиной. При его распространении на другие участки внешний композиционный материал теряет способность воспринимать нагрузки и происходит его отслоение от бетона. При отсутствии возможности перераспределения напряжений с внешней арматуры из композиционного материала на внутреннюю стальную, отслоение может носить хрупкий характер и происходить внезапно.

В общем случае в результате ремонта и усиления железобетонного элемента внешним армированием композиционными материалами его сечение представляет собой слоистую конструкцию (рис. 15). Разрушение в таком случае возможно по следующим пяти слоям и поверхностям их раздела:

• разрушение в старом бетоне непосредственно у склеиваемой поверхности или возле внутренней растянутой арматуры (когезионное разрушение). При

выполнении ремонтных работ этот тип разрушения относится и к используемому ремонтному составу. Нормативная прочность на растяжение бетона или ремонтного состава должна составлять 1,5 – 3,0 МПа;

• разрушение на границе между старым бетоном и ремонтным составом (адгезионное разрушение). Для предотвращения этого вида разрушения необходимо использовать системный ремонтный состав, обладающий высокой адгезией с деформационными свойствами, близкими к деформационным свойствам существующего бетона, что обеспечит их совместную работу. Адгезия клеевой композиции к бетону в этом случае должна быть 2,0 – 2,5 МПа;

• разрушение в клеящем составе. Прочность на растяжение системного клеящего состава обычно выше, чем бетона, и поэтому разрушение происходит в бетоне. Разрушение по этой поверхности может произойти только при высокой температуре (выше температуры стеклования) или при очень большой прочности бетона на растяжение.

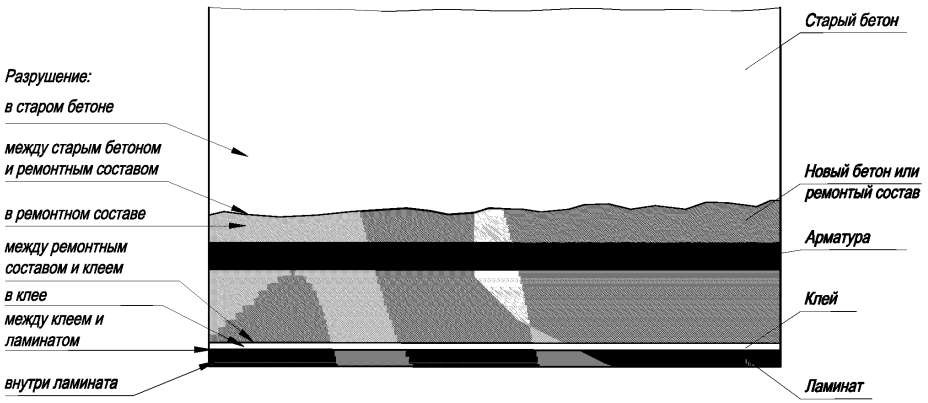


Рисунок 15 – Возможные поверхности разрушения усиливаемой (ремонтируемой) конструкции

• разрушение по контакту между бетоном и клеящим составом или между клеящим составом и полосой КМФ. Этот вид разрушения возможен только при некачественной подготовке бетонной поверхности в процессе приклеивания полосы композиционного материала. Во всех случаях адгезия между слоями должна быть не менее 2,0 – 2,5 МПа;

• разрушение собственно композиционного материала. Такой вид разрушения возможен только при некачественной обработке поверхности, при неправильном проектировании усиления и при превышении действующих на конструкцию нагрузок предельных величин, принятых при проектировании.

При изгибе наиболее часто разрушение происходит в результате отслоения полосы композиционного материала от поверхности бетона. При этом по большей части слабым местом сцепления между полосой композита и бетоном является слой бетона, расположенный вблизи поверхности соединения. В зависимости от начальной точки процесса разрушения можно выделить четыре типа разрушения (рис. 16).

Тип 1. Разрушение начинается в не нарушенной трещинами зоне анкеровки. Композиционный материал может отслоиться в этой зоне в результате смятия бетона под действием сдвигающих напряжений на контакте слоев.

Тип 2. Отслоение композита происходит в результате образования трещин изгиба от действия внешней нагрузки. Трещины изгиба в бетоне, первоначально нормальные к продольной оси элемента, могут далее распространяться горизонтально. В этом случае отслоение полосы композиционного материала произойдет в центральной части конструкции, в отдалении от зон анкеровки.

Тип 3. Отслоение композита в результате образования наклонных трещин в результате совместного действия нормальных и касательных напряжений, и которые могут быть доминантными при отслоении полосы композиционного материала. Однако в конструкциях с достаточным внутренним и внешним поперечным армированием образование таких трещин маловероятно и отслоение композиционного материала возможно только при недостаточном поперечном армировании.

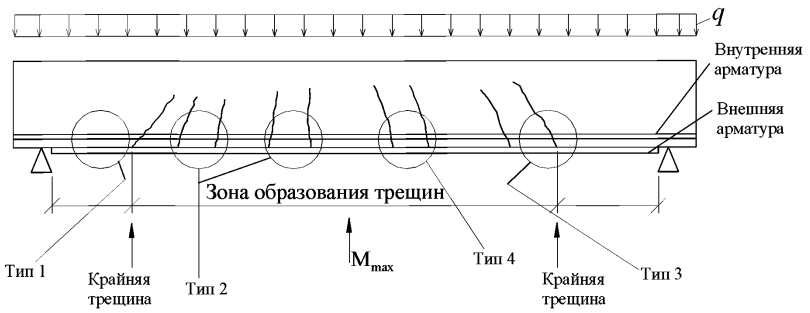


Рисунок 16 – Типы разрушения железобетонной конструкции, усиленной полосой композита

Тип 4. Отслоение композиционного материала может быть вызвано и неровностями поверхности бетона. Неровность и шероховатость бетонной поверхности являются концентраторами напряжений и вследствие этого могут служить причиной начальной местной потери сцепления полосы КМФУ с бетоном, которая может распространиться далее и стать причиной отслоения.

Наиболее типичными местами появления разрушений являются:

- примыкание к главной балке второстепенных;
- изменение геометрических размеров поперечного сечения усиленных балок;
- обрыв части стержней растянутой арматуры;
- изменение ширины и толщины самого композиционного материала;
- обрыв полосы композиционного материала перед опорой;
- приложение сосредоточенной силы.

Во всех этих местах наблюдаются скачки касательных напряжений на границе между бетоном и полосой композиционного материала, что приводит к отслоению последнего, а следовательно, и к разрушению конструкции. Эти места по длине усиливаемой конструкции нуждаются в дополнительной анкеровке.

Типичное распределение нормальных и касательных напряжений на концевом участке приклеенной к бетону полосы композиционного материала приведено на рис. 17. Максимальные напряжения действуют на самом конце полосы

композиционного материала (до 150 – 200 мм), при этом касательные напряжения по абсолютной величине в несколько раз больше нормальных.

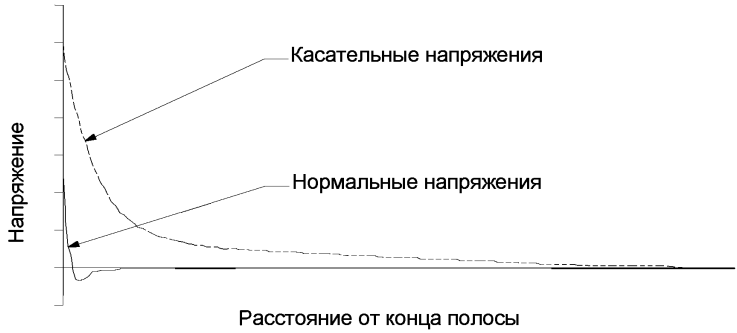


Рисунок 17 – Распределение нормальных и касательных напряжений на концевом участке полосы композиционного материала

Перед выполнением расчетов по усилению железобетонных конструкций на воздействие изгибающего момента, требуется определить максимальную силу сцепления, которая может передаваться от бетона к композиционному материалу, а также оценить напряжения сдвига и нормальные напряжения на границе раздела бетона и композиционного материала.

При определении прочности сцепления, предельная величина силы, передаваемой композиционной системе перед отслоением, зависит от длины участка со сцеплением. Оптимальная длина участка со сцеплением, l_e, определяется как длина, при превышении которой не происходит возрастание силы, передаваемой от бетона к композиту.

Оптимальную длину участка композиционного материала со сцеплением, l_e, определяют по формуле

$$l_e = \sqrt{\frac{E_c \cdot t_c}{2 \cdot R_{bt}}}, \text{ мм}, \qquad (11)$$

где E_c – модуль упругости композиционного материала; t_c – толщина композиционного материала; R_{bt} – прочность бетона при растяжении.

Удельное сцепление композиционного материала с бетоном, Nc, определяют по формуле:

$$N_c = 0.03 \cdot k_b \cdot \sqrt{R_{bn} \cdot R_{bt}}, \quad (12)$$

где R_{bn} – нормативная прочность бетона на сжатие; k_b – геометрический коэффициент, зависящий от ширины усиливаемой конструкции, b, и от ширины композиционного материала, b_c.

Коэффициент k_b определяют следующим образом:

$$k_b = \sqrt{\frac{2 - \frac{b_c}{b}}{1 + \frac{b_c}{400}}} \quad (13)$$

где $b_c/b \geq 0{,}33$ (если $b_c/b < 0{,}33$, принимается значение k_b, соответствующее $b_c/b = 0{,}33$).

Для исключения отслоения концевых участков композиционных материалов их прочность $\sigma_{ск}$ следует определять по формуле:

$$\sigma_{ск} = \frac{1}{\gamma_{cd} \cdot \sqrt{\gamma_c}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot E_c \cdot N_c}{n_c \cdot t_c}} \quad (14)$$

где γ_{cd} – коэффициент надежности по композиционному материалу, принимаемый 1,2 для сертифицированных компонентов и самого композиционного материала и 1,5 для сертифицированных компонентов композиционного материала; γ_c – коэффициент надежности по бетону.

При использовании специальных анкерных устройств (поперечные арматурные стержни из композитов, П-образная обертка листовым композиционным материалом и т. п.), максимальная прочность композиционного материала должна определяться непосредственно с помощью специально подобранных для этого случая экспериментальных испытаний.

Для предотвращения отслоения композиционного материала в средней части усиливаемой конструкции их прочность следует определять по формуле:

$$\sigma_{ск1} = \frac{k_{cr}}{\gamma_{cd} \cdot \sqrt{\gamma_c}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot E_c \cdot N_c}{n_c \cdot t_c}}, \quad (15)$$

где k_{cr} приниматься равным 3,0

Соответствующее значение расчетной деформации, ε_c, в композиционной системе следует определять по формуле:

$$\varepsilon_c = \frac{\sigma_{ck1}}{E_c} \,. \tag{16}$$

В процессе эксплуатации железобетонных конструкций, усиленных композиционным материалом, напряжение сдвига на границе раздела между адгезивом и бетоном $\tau_{b,e}$, должно быть меньше, чем расчетная прочность сцепления между композиционным материалом и бетоном, f_{bd}, и определяется по формуле.

$$\tau_{b,e} \le f_{bd} \,. \tag{17}$$

Напряжение сдвига, $\tau_{b,e}$, следует определять по формуле:

$$\tau_{b,e} = k_{id}\, \tau_m \quad , \tag{18}$$

где k_{id} – коэффициент ($\ge$ 1), учитывающий напряжение сдвига и нормальные напряжения вблизи концевых участков анкеровки, определяемый по формуле:

$$k_{id} = (\kappa_\sigma^{1,5} + 1{,}15 \cdot \kappa_\tau^{1,5})^{2/3} \tag{19}$$

Коэффициенты k_σ и k_τ следует определять по формуле:

$$\kappa_\sigma = \kappa_\tau \cdot \beta \cdot t_f \,, \tag{20}$$

$$\kappa_\tau = 1 + \alpha \cdot a \cdot \frac{M_{(z=a)}}{Q_{(z=a)} \cdot a} \,, \tag{21}$$

где $M_{(z\ =\ a)}$ – изгибающий момент, действующей на концевом участке железобетонной конструкции (см. рис. 18); $Q_{(z\ =\ a)}$ – поперечная сила, действующая на концевом участке железобетонной конструкции.

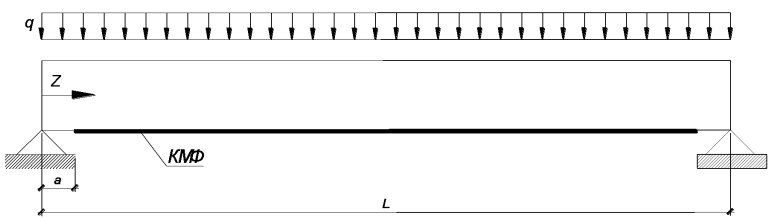


Рисунок 18 – Схема геометрических параметров усиливаемой железобетонной конструкции: a – величина привязки КМФ к центру опоры, мм; z – текущая координата, q – равномерно-распределенная нагрузка

Коэффициенты α и β представляют собой два упругих параметра, которые следует определять по формулам:

$$\alpha = \sqrt{\frac{K_1}{E_c \cdot t_c}}, \tag{22}$$

$$\beta = \left(\frac{b_c \cdot 2.3 \cdot K_1}{4 \cdot E_c \cdot I_c} \right)^{1/4}, \tag{23}$$

где E_c – модуль упругости композиционного материала; t_c – толщина композиционного материала; b_c – ширина композиционного материала; I_c – момент инерции композиционного материала; K_1 – параметр, который следует определять по формуле:

$$K_1 = \frac{1}{t_a / G_a + t_b / G_b}, \tag{24}$$

где G_a – модуль сдвига клеевого состава; G_b – модуль сдвига бетона, t_a – толщина клеевого состава, t_b – приведенная толщина бетона (стандартные значения t_b составляют 20–30 мм).

Среднее напряжение сдвига τ_m, в соответствии с теорией Журавского, следует определять по формуле:

$$\tau_m = \frac{Q_{(z=a)} \cdot t_c \cdot (h - x_e)}{I / \beta}, \tag{25}$$

где x_e – расстояние от крайнего волокна, работающего на сжатие, до нейтральной оси; I – момент инерции приведенного сечения; $\beta = E_c/E_b$ – коэффициент отношения модулей упругости композиционного материала и бетона.

В случае если обеспечивается концевая анкеровка композиционного материала с использованием П-образной обоймы, то воздействием нормальных напряжений можно пренебречь, а коэффициент k_σ в (20) принимается равным нулю.

Расчетная прочность сцепления, f_{bd}, представляет собой функцию нормативной прочности бетона на растяжение, R_{btn}, и определяется по формуле:

$$f_{bd} = k_b \cdot \frac{R_{btn}}{\gamma_b}, \tag{26}$$

где γ_b – коэффициент, принимаемый равным 1 для аварийных сочетаний нагрузок,

1,2 для установившихся сочетаний нагрузок.

Для однопролетных железобетонных конструкций (плиты, балки) усиление из композиционного материала должно быть заведено, по меньшей мере, на расстоянии, равном l_e после точки вдоль пролета, соответствующей моменту образования трещин M_{cr}. Для многослойного усиления материалов точки окончания слоев должны быть раздвинуты, образуя клиновидную поверхность.

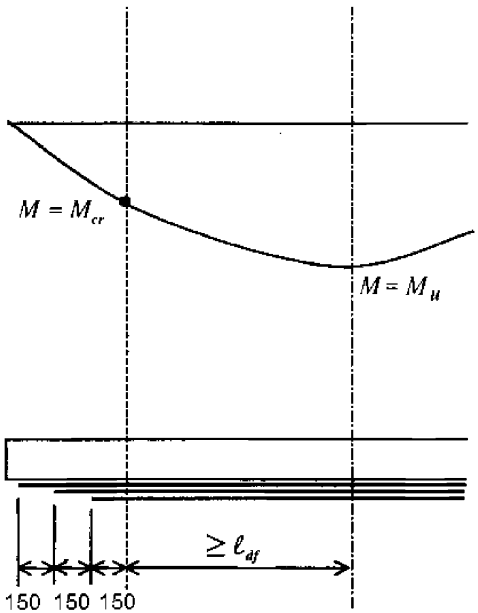


Рисунок 19 – Схема анкеровки однопролетных железобетонных конструкций

Наиболее удаленная от центра полоса из композиционного материала должна быть закончена на расстоянии не менее чем l_e после точки вдоль пролета, соответствующей моменту образования трещин. Каждый последующий слой должен быть закончен на расстоянии не менее чем 150 мм до конца предыдущего слоя (рис. 19).

Для многопролетных балок однослойное покрытие системы из композиционных материалов должно быть закончено на расстоянии минимум 150 мм до точки перегиба (точка нулевого момента результирующих расчетных

нагрузок). Для многослойных покрытий из композиционных материалов внешний слой должен быть закончен на расстоянии не менее 150 мм от точки перегиба.

Каждый последующий слой должен быть закончен на расстоянии не менее 150 мм от предыдущего слоя. Например, если требуется применить трехслойное покрытие, слой, находящийся в непосредственном контакте с бетонным основанием, должен быть закончен на расстоянии не менее чем на 450 мм после точки перегиба (рис. 20).

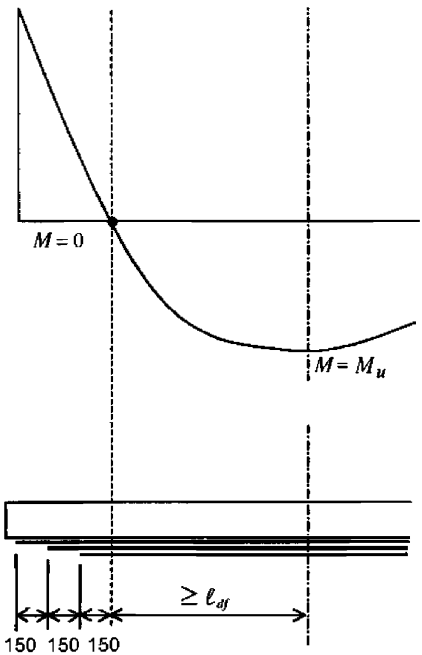


Рисунок 20 – Схема анкеровки многопролетных железобетонных конструкций

Данные рекомендации применяются для областей с положительным и отрицательным моментами.

7.6 Оценка композиционных систем для внешнего армирования

При оценке композиционных систем внешнего армирования необходимо учитывать следующие основные факторы: влияние окружающей среды, особенно щелочность и кислотность, тепловое расширение и электропроводность системы, условия приложения внешней нагрузки после восстановления (усиления), оставшийся срок службы железобетонной конструкции и наличие в проекте защитного покрытия.

Условия окружающей среды по-разному влияют на полимеры и волокна разных композиционных систем. Механические свойства (например, сопротивление на разрыв, предельное относительное удлинение и модуль упругости) некоторых композиционных систем ухудшаются под воздействием определенных условий окружающей среды, таких, как щелочность, соленая вода, химические вещества, ультрафиолетовое излучение, высокие температуры, высокая влажность и циклы замораживание – оттаивание. Свойства материала, используемого для восстановления (усиления), должны учитывать его ползучесть под влиянием приведенных факторов.

Проектировщик при выборе композиционной системы должен руководствоваться информацией о нежелательных факторах окружающей среды, влияющих на состояние конкретных систем внешнего армирования.

Щелочность/кислотность. Изменение рабочих характеристик композиционной системы, подверженной воздействию щелочной или кислотной среды, с течением времени зависит от материала матрицы и армирующего волокна. Сухое, непропитанное непокрытое или незащищенное углеродное волокно обладает сопротивлением воздействию как щелочных, так и кислотных сред, тогда как отожженное стекловолокно стареет с течением времени под воздействием этих сред. Однако, при правильном применении, полимерная матрица должна изолировать и защищать волокно от воздействия щелочных/кислотных сред и замедлять старение. В состав выбранной композиционной системы должна входить полимерная матрица, обладающая сопротивляемостью воздействию щелочных и кислотных сред. Для участков с высокой щелочностью и высокой сыростью или относительной влаж-

ностью предпочтительнее выбирать системы с углеродным волокном, чем системы со стекловолокном.

Тепловое расширение. Свойства теплового расширения композиционных систем могут отличаться от свойств бетона. Кроме того, свойства теплового расширения волокна и полимерных компонентов системы также могут варьироваться. Углеродные волокна имеют коэффициент теплового расширения, близкий к нулю, тогда как коэффициент теплового расширения стекловолокна близок к коэффициенту для бетона. Коэффициенты теплового расширения полимеров, используемых в композиционных системах, обычно примерно в пять раз меньше коэффициента теплового расширения бетона. Расчет разностей деформаций, вызванных воздействием температуры, усложняется различной ориентацией волокон, объемной долей волокна (соотношение объема волокон к объему волокон и полимеров в композиционной системе), а также толщиной клеевых слоев. Имеющийся практический опыт показывает, что разница в тепловом расширении не влияет на работоспособность композиционной системы при изменении температуры в пределах ±28 °С.

Электропроводность. Стеклопластик и пластик, армированный арамидным волокном, являются эффективными электрическими изоляторами, тогда как пластик, армированный углеродным волокном, является проводником. Во избежание возникновения электрохимической коррозии стальных элементов, композиционные материалы, содержащие в своем составе углерод, не должны касаться металла напрямую.

Учет нагрузки. Условия нагружения по-разному влияют на разные волокна композиционных систем. Некоторые факторы нагружения, влияющие на состояние конкретных композиционных систем, представлены ниже. Конкретная информация предоставляется изготовителями материала.

Допустимое циклическое воздействие – композиционные системы на основе арамидных и стекловолокон обладают лучшей устойчивостью к циклическим нагрузкам, чем системы на основе углеродных волокон.

Разрушение при длительных и усталостных нагрузках – композиционные системы на основе углеродных волокон обладают высокой сопротивляемостью

разрушению при длительных нагрузках и разрушению вследствие усталости материала. Системы на основе стекловолокон более чувствительны к обоим видам нагрузок.

Срок службы композиционных систем является предметом продолжающихся в настоящее время научных исследований. Проектировщик должен выбрать композиционную систему, которая прошла испытания на срок службы и соответствует условиям окружающей среды.

Любая композиционная система, полностью окружающая или покрывающая железобетонную конструкцию, должна быть испытана на сопротивление воздействию различных факторов окружающей среды, включая замораживание и оттаивание, коррозию металла, агрегатные реакции со щелочами и кислотами, водостойкость, давление водяных паров и паропроницаемость. Многие из композиционных систем создают влагонепроницаемый слой на поверхности бетона. В областях, где ожидается проникновение водяных паров, необходимо предусмотреть соответствующие средства удаления влаги с поверхности бетона.

Выбор защитного покрытия – на установленную композиционную систему может быть нанесено покрытие или система изоляции для защиты ее от воздействия отдельных факторов окружающей среды. Толщина и тип покрытия должны выбираться на основании требований к ремонту композиционных материалов, их сопротивлению влиянию окружающей среды, например, влажности, морской воде, перепадам температур, огню, ударным воздействиям и ультрафиолетовому облучению, другим отрицательным влияниям места установки, а также умышленной порче. Покрытия предназначены для защиты от ухудшения механических свойств композиционных систем. Необходимо периодически проверять состояние покрытий и проводить техническое обслуживание для обеспечения эффективности их работы.

Внешние покрытия (цементная штукатурная смесь) или уплотняющие полимерные покрытия волокон могут защищать их от ударных воздействий или трения. В зонах, подвергающихся ударному воздействию высокой интенсивности или расположенных в местах движения транспорта, может понадобиться установка дополнительной защиты.

8 Расчет параметров реконструкции и усиления железобетонных конструкций

8.1 Изгибаемые конструкции без предварительного напряжения арматуры

8.1.1 Начальное напряженно-деформированное состояние конструкции перед внешним армированием (данный подпункт развивает положения п. п.6.24 - 6.26 [5]).

Исходные данные для анализа начальной ситуации перед усилением (расчетная схема конструкции, действующие нагрузки, размеры конструкции и степень повреждения бетона и арматуры) определяются в результате проведения диагностического обследования подлежащей усилению железобетонной конструкции. Определение начального максимального изгибающего момента M_o производится как для второй группы предельных состояний без учета коэффициентов надежности по нагрузке и по материалу. На этом этапе производится определение распределения деформаций по сечению конструкции исходя из ее работы в упругой стадии.

Если начальный максимальный изгибающий момент M_o больше момента трещинообразования сечения M_{crc}, то расчет производится как для сечения с трещинами, приведенного на рис. 21. В случае если $M_o<M_{crc}$ его влиянием при дальнейшем расчете усиливаемой конструкции можно пренебречь.

Высота сжатой зоны сечения x_o находится из условия, что статический момент приведенного сечения относительно нейтральной оси равен нулю

$$S_{red}= bx_o^2/2 + \alpha A_s'(x_o - a') - \alpha A_s(h_o - x_o) = 0, \qquad (27)$$

где b – ширина сечения прямоугольного элемента, мм; $\alpha = E_s/E_b$ – отношение модулей упругости арматурной стали и бетона; A_s' – площадь поперечного сечения сжатой арматуры, мм^2; A_s – площадь поперечного сечения растянутой арматуры, мм^2; a' – расстояние от оси, нормальной к плоскости изгиба и проходящей через центр тяжести сечения сжатой арматуры, до внешнего сжатого края сечения

элемента, мм; h_o – рабочая (полезная) высота сечения, мм, $h_o = h - a$; h – полная высота сечения, a – расстояние от оси, нормальной к плоскости изгиба и проходящей через центр тяжести сечения растянутой арматуры, до внешнего растянутого края сечения.

Момент инерции приведенного сечения I_{red} определяется как

$$I_{red} = bx_o^3/3 + \alpha A_s(h_o - x_o)^2 + \alpha A_s'(x_o - a')^2 . \qquad (28)$$

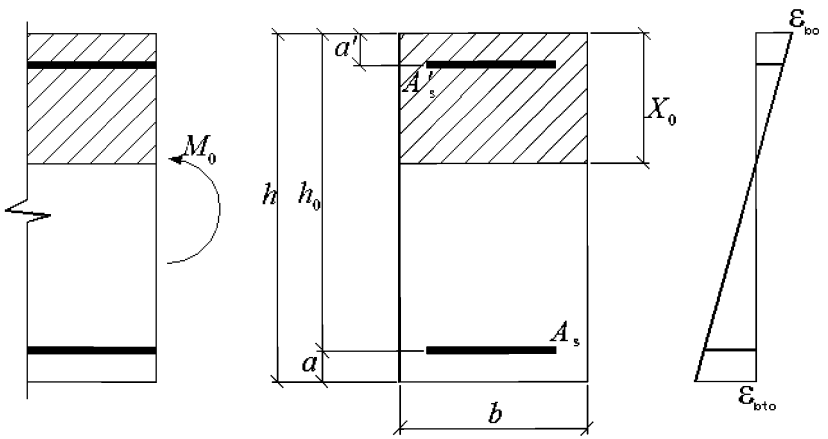


Рисунок 21 – Начальное напряженно-деформированное состояние элемента перед усилением

Исходя из принципа неразрывности деформаций и их линейного распределения по нормальному сечению при учете начального напряженно-деформированного состояния изгибаемых элементов, полученного ими до усиления максимальные деформации крайне растянутого волокна бетона, значения начальных относительной деформации существующей стальной арматуры ε_s^0 и относительной деформации сжатого бетона ε_b^0 во время усиления определяют по формуле, допускается определять по формулам:

$$\varepsilon_{bto} = \frac{M_0(h - x_0)}{E_b I_{red}}, \qquad (29)$$

$$\varepsilon_s^0 = \frac{M_0}{E_{b1} \cdot I_{red}} (h_0 - x_0), \tag{30}$$

$$\varepsilon_b^0 = \frac{M_0}{E_{b1} \cdot I_{red}} x_0, \tag{31}$$

где M_0 – изгибающий момент от фактической нагрузки, действующей на конструкцию до усиления, относительно оси, нормальной плоскости действия изгибающего момента и проходящей через центр тяжести приведенного поперечного сечения элемента; E_{b1} – модуль деформации сжатого бетона; I_{red} – момент инерции приведенного поперечного сечения относительно его центра тяжести; x_0 – высота сжатой зоны бетона.

Параметры E_{b1} , I_{red} и x_0 в формулах (26) и (27) следует определять по указаниям СП 63.13330.2012 с учетом отсутствия или наличия трещин в растянутой зоне сечения конструкции.

8.1.2 Прочность по нормальным сечениям (данный подпункт развивает основные положения п.п. 6.2.7 [6]).

При усилении железобетонных конструкций допустимый уровень деформаций в композиционном материале следует определять из условия:

$$\varepsilon_c = \varepsilon_{bu} \cdot \left(\frac{h-x}{x} \right) - \varepsilon_{bto} \le \varepsilon_{cd}. \tag{32}$$

Расчет напряжения в системе усиления из композиционных материалов следует производить по формуле:

$$\sigma_c = E_c \cdot \varepsilon_c. \tag{33}$$

Значение допустимого уровня деформаций в стальной арматуре в растянутой зоне следует производить по формуле:

$$\varepsilon_s = (\varepsilon_c + \varepsilon_{bto}) \cdot \left(\frac{h_0 - x}{x} \right). \tag{34}$$

Расчет напряжения в стальной арматуре определяется по формуле:

$$\sigma_s = E_s \cdot \varepsilon_s < R_s. \tag{35}$$

Значение допустимого уровня деформаций в стальной арматуре в сжатой зоне следует производить по формуле:

$$\varepsilon`_s = \varepsilon_{bu} \cdot \frac{x - a`}{x}. \quad (36)$$

Расчет напряжения в стальной арматуре сжатой зоны определяется по формуле

$$\sigma`_s = E_s \cdot \varepsilon`_s. \quad (37)$$

Расчет по прочности сечений изгибаемых элементов, усиленных внешним армированием из композитных материалов, следует производить из условия

$$M \le M_{ult}, \quad (38)$$

где M – изгибающий момент от внешней нагрузки; M_{ult} – предельный изгибающий момент, который может быть воспринят усиленным сечением элемента.

Значение M_{ult} для изгибаемых элементов прямоугольного сечения (рис. 22) следует определять по формуле:

$$M_{ult} = A_s \cdot \sigma_s \cdot \left(h_0 - \frac{\beta_1 \cdot x}{2}\right) + \psi_c \cdot A_c \cdot \sigma_c \cdot \left(h - \frac{\beta_1 \cdot x}{2}\right) + A_{sc} \cdot \sigma_{sc} \cdot \left(\frac{\beta_1 \cdot x}{2} - a`\right), \quad (39)$$

при этом высоту сжатой зоны x определяют по формуле

$$x = \frac{\sigma_s \cdot A_s - \sigma`_s \cdot A'_s + \sigma_c \cdot A_c}{\alpha_1 \cdot R_b \cdot \beta_1 \cdot b}, \quad (40)$$

где α_1 и β_1 в формуле (35) обозначают параметры, определяющие прямоугольную эпюру напряжений бетона, эквивалентную нелинейному распределению напряжения:

$$\beta_1 = \frac{4 \cdot \varepsilon`_b - \varepsilon_b}{6 \cdot \varepsilon`_b - 2 \cdot \varepsilon_b}, \quad (41)$$

$$\alpha_1 = \frac{3 \cdot \varepsilon`_b \cdot \varepsilon_b - \varepsilon_b^2}{3 \cdot \beta_1 \cdot \varepsilon`_b{}^2}. \quad (42)$$

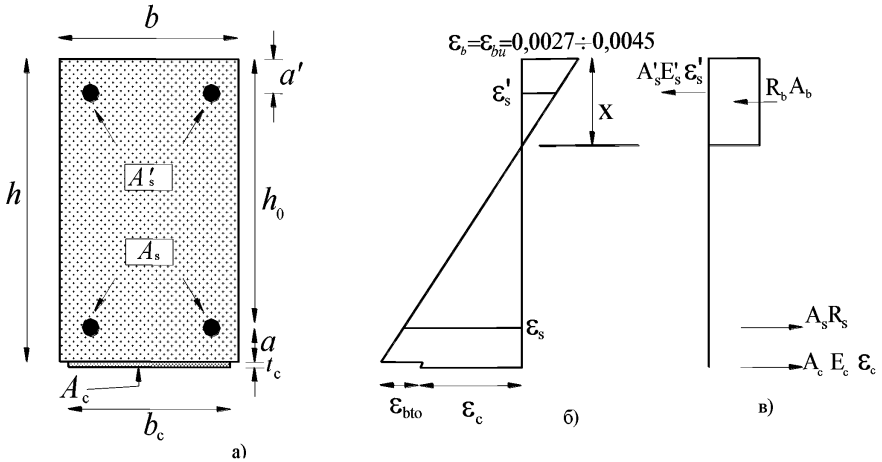


Рисунок 22 – Напряженно-деформированное состояние усиленного КМФ изгибаемого железобетонного элемента: *а* – поперечное сечение; *б* – распределение деформаций; *в* – распределение внутренних усилий

Высота сжатой зоны бетона x должна одновременно удовлетворять формулам (32) – (37), (40), обеспечивая равновесие внутренних сил и совместимость деформаций. Для определения высоты сжатой зоны бетона x необходимо использовать метод итерационных приближений. На первоначальном этапе задается значение высоты сжатой зоны бетона и далее производится расчет по формулам (32) – (37). Уточненное значение глубины нейтральной оси с рассчитывается затем по формуле (40). Затем рассчитанное и принятое значение для x сравниваются между собой. Если они совпадают, то найдено верное значение для x. Если расчетное и принятое значение не совпадают, то выбирается другое значение для x и процесс повторяется до их совпадения. На последнем этапе вычисляется значение несущей способности прямоугольного сечения по формуле 36.

Напряжения в стальной арматуре следует определять по формуле:

$$\sigma_{s,s} = \frac{\left[M_s + \varepsilon_{bto} \cdot A_c \cdot E_c \cdot \left(h - \frac{k \cdot h_0}{3}\right)\right] \cdot (h_0 - k \cdot h_0) \cdot E_s}{A_s \cdot E_s \cdot \left(h_0 - \frac{k \cdot h_0}{3}\right) \cdot (h_0 - k \cdot h_0) + A_c \cdot E_c \cdot \left(h - \frac{k \cdot h_0}{3}\right) \cdot (h - k \cdot h_0)}. \quad (43)$$

Напряжения в стальной арматуре, вычисленные по формуле (43), должны не превышать 80% прочности стали при растяжении.

Напряжения в композиционном материале следует определять по формуле:

$$\sigma_{c,s} = \sigma_{s,s} \cdot \left(\frac{E_c}{E_s}\right) \frac{h - k \cdot h_0}{h_0 - k \cdot d} - \varepsilon_{bi} \cdot E_c, \quad (44)$$

где κ – коэффициент, определяемый по формуле:

$$\kappa = \sqrt{\left(\rho_s \cdot \frac{E_s}{E_b} + \rho_c \cdot \frac{E_c}{E_b}\right)^2 + 2 \cdot \left(\rho_s \cdot \frac{E_s}{E_b}\right) + \rho_c \cdot \frac{E_c}{E_b} \cdot \left(\frac{h}{h_0}\right)} - \left(\rho_s \cdot \frac{E_s}{E_b} + \rho_c \cdot \frac{E_c}{E_b}\right) \quad (45)$$

здесь ρ_s и ρ_c – коэффициент армирования с учетом стальной арматуры и композиционного материала усиления.

Напряжения в композиционном материале, вычисленные по формуле (44), должны не превышать, 55% прочности композиционного материала на растяжение.

8.1.3 Прочность по наклонным сечениям.

Расчет железобетонных элементов с поперечной арматурой на действие поперечной силы для обеспечения прочности по наклонной трещине производится по наиболее опасному наклонному сечению из условия:

$$Q \le Q_b + Q_{sw} + \chi Q_c, \quad (46)$$

где χ – понижающий коэффициент, зависящий от применяемой схемы усиления. При охватывающем по всем четырем сторонам усилении прямоугольной балки $\chi = 0{,}95$, а при усилении таврового элемента по трем сторонам (U-образное усиление) χ = 0,85; Q_b и Q_{sw} – прочность бетона и поперечной арматуры в железобетонном элементе.

Поперечную силу, воспринимаемую композиционным материалом, следует определять по формуле:

$$Q_c = \frac{A_c R_c h_{co}}{s} \sin\alpha \left(\cot\theta + \cot\alpha\right), \quad (47)$$

где $A_c = 2 \cdot nt_c b_c$ – площадь поперечного сечения композиционного материала; t_c – толщина одного слоя композиционного материала, определяемая теоретически как частное от отношения площадного веса холста (г/м^2) к его плотности (г/м^3); h_{co} – рабочая высота сечения КМФ, обычно равняется h_o для прямоугольных элементов и (h_o – h_f) для элементов таврового сечения; s – расстояние между полосами композиционного материала по осям по длине элемента; θ – угол между наклонной трещиной и продольной осью элемента, в общем случае определяется как arctg h_o/c, где c – длина проекции наклонной трещины; α – угол между главной ориентацией волокон в композиционном материале и продольной осью элемента. При армировании вертикальными полосами (наиболее распространенный случай) α = 90°; $R_c = \varepsilon_{cq} E_c$ – растягивающие напряжения в композиционном материале, которые в предельном состоянии прямо пропорциональны расчетным деформациям растяжения КМФ ε_{cq} при действии поперечной силы и представляют собой расчетное сопротивление композиционного материала растяжению при усилении на действие поперечной силы.

8.1.4 Контроль образования трещин и прогибов.

Расчет по образованию трещин с усилением композиционными материалами следует проводить в соответствии с общими указаниями п.8.2.8 – 8.2.14 [5] с некоторыми изменениями, указанными ниже.

Момент инерции приведенного сечения п. 8.2.12 [5] рассчитывается с учетом композиционного материала усиления:

$$I_{red} = I + I_s \cdot \alpha + I_s` \cdot \alpha + I_c \cdot \alpha_c \qquad (48)$$

где A_{red} – площадь приведенного поперечного сечения элемента, определяемая по формуле:

$$A_{red} = A + A_s \cdot \alpha_s + A_s` \cdot \alpha_s + A_c \cdot \alpha_c , \qquad (49)$$

$$\alpha_c = \frac{E_c}{E_b} . \qquad (50)$$

При определении момента образования трещин на основе нелинейной деформационной модели нужно учитывать работу бетона в растянутой зоне нормального сечения.

Расчет по раскрытию трещин для усиленных железобетонных элементов композиционными материалами следует проводить в соответствии с указаниями пп. 8.2.15 – 8.2.18 [5] с некоторыми изменениями, указанными ниже.

Значение коэффициента приведения композиционного материала к бетону α_{c1} следует определять по формуле

$$\alpha_{c1} = \frac{E_c}{E_{b,red}} \tag{51}$$

Момент инерции приведенного поперечного сечения элемента I_{red} относительно его центра тяжести п. 8.2.16 [5] следует определять с учетом площади сечения бетона сжатой зоны, площади сечения сжатой и растянутой стальной арматуры с коэффициентом приведения арматуры к бетону α_{s1} и композиционного материала с коэффициентом приведения к бетону α_{c1}

$$I_{red} = I_b + I`_s \cdot \alpha_{s1} + I_s \cdot \alpha_{s1} + I_c \cdot \alpha_{c1}. \tag{52}$$

В настоящее время не существует точных и полностью надежных моделей для расчета ширины трещин в бетонных конструкциях, усиленных композиционными материалами. Экспериментальные данные свидетельствуют, что элементы, усиленные композиционными материалами, имеют меньшие по размеру, но расположенные ближе друг к другу трещины.

Ширина раскрытия трещин при наличии композиционного материала определяется по формуле

$$a_{crc} = 2{,}1 \cdot \mu_{bt} \frac{M}{E_s \cdot h_o \cdot \mu_{sum}(u_s + 0{,}694 u_c)}, \tag{53}$$

где M – максимальный изгибающий момент от эксплуатационных нагрузок, учитываемых при расчете железобетонных конструкций по образованию и раскрытию трещин; $\mu_{bt} = \frac{A_{bt}}{b \cdot h}$ – коэффициент части площади бетона, работающей на растяжение; A_{bt} – площадь части бетона, работающей на растяжение; принимается меньшее из двух значений $A_{bt} = 2{,}5(h - h_o)b$ или $(h - x)b/3$; $\mu_{sum} = \frac{A_s + A_c \cdot \frac{E_c}{E_s}}{b \cdot h_o}$ – суммарный коэффициент армирования сечения железобетонного элемента стальной

растянутой арматурой и композиционным материалом; u_s и u_c – периметры стальной арматуры и композиционного материала (в виду малой толщины КМФ и прилегания его к бетону одной стороной принимается $u_c = b_c$).

Расчет по деформациям железобетонных конструкций, усиленных композиционным материалом, следует проводить в соответствии с общими указаниями п. 5.5 [5].

Момент инерции приведенного поперечного сечения элемента I_{red} относительно его центра тяжести п. 8.2.26 [5] следует определять с учетом площади сечения бетона сжатой зоны, площади сечения сжатой и растянутой стальной арматуры с коэффициентом приведения арматуры к бетону α и композиционного материала с коэффициентом приведения арматуры к бетону $\alpha`_c$

$$\alpha_c` = \frac{E_c}{E_{b1}}. \qquad (54)$$

При использовании нелинейной деформационной модели полную кривизну сечения на участках без трещин в растянутой зоне усиленного сечения определяют по выражению 8.140 [5].

Полную кривизну на участках с трещинами в растянутой зоне усиленного сечения рекомендуется определять с помощью нелинейной деформационной модели по выражению 8.141 [5]. Значения кривизны, входящие в выражение 8.140 [5] определяют согласно п. настоящего СП.

Расчет усиленных железобетонных конструкций композиционными материалами по прогибам следует проводить в соответствии с пп. 5.5.1 – 5.5.5 [5].

Расчет по прочности нормальных к продольной оси сечений по деформационной модели.

Расчет прочности сечений, нормальных к продольной оси элемента, по деформационной модели проводится в соответствии с пп. 8.1.20 – 8.1.22 [5], дополненных следующими положениями:

- распределение деформаций бетона стальной арматуры и композиционного материала по высоте сечения принимается линейной (гипотеза плоских сечений);

- связь между напряжениями и деформациями бетона, стальной арматуры и композиционного материала принимается в виде диаграмм состояния (для бетона и стальной арматуры в соответствии с п.п. 6.1.19 и 6.2.14 [5], а для композиционного материала – линейной по закону Гука;

- связь бетона и композиционного материала принимается жесткой; после усиления вплоть до наступления предельного состояния сохраняются условия совместности деформаций;

- учитывается напряженно-деформированное состояние элемента до усиления.

Расчет равнодействующих внутренних усилий осуществляется численным интегрированием эпюры напряжений в нормальном сечении элемента. Для этого сечение разбивается на малые по высоте полосы (рис. 23).

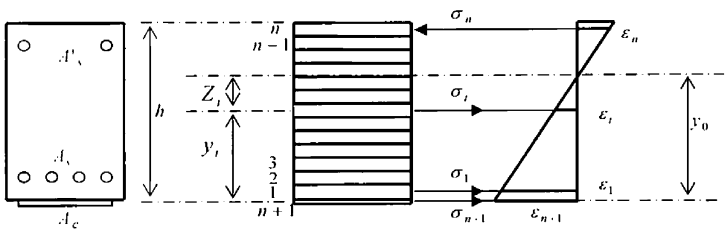


Рисунок 23 – Эпюры распределения деформаций и напряжений по высоте сечения

В случаях, когда элемент конструкции на момент усиления нагружен, в расчетах по деформационной модели должно учитываться НДС элемента до усиления. В таком случае расчет усиленной конструкции разбивается на 2 этапа:

1 этап. Определение НДС конструкции до усиления, и при необходимости, ее несущей способности;

2 этап. Определение НДС и несущей способности конструкции после усиления.

Расчетная схема деформационной модели представлена на рис. 24. Для изгибаемых в плоскости симметрии поперечного сечения железобетонных

элементов и расположения оси X в этой плоскости общие условия равновесия определяются по формулам (по аналогии с п. 8.1.28 [5]):

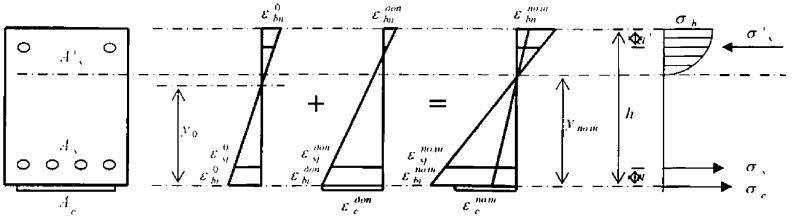


Рисунок 24 – Расчетная схема деформационной модели

$$\sum M = 0\, M_0 = D_{11}\frac{1}{r_x}, \tag{55}$$

$$\sum N = 0 \quad 0 = D_{13}\frac{1}{r_x}. \tag{56}$$

Кривизну элемента следует определять по формуле:

$$\frac{1}{r_x} = \frac{\varepsilon_{bt}}{Z_{bxi}} = \frac{\varepsilon_{sj}}{Z_{sxj}} = \frac{\varepsilon_{fk}}{Z_{fxk}}. \tag{57}$$

Жесткостные характеристики нормального сечения D_{ij} в общем случае следует определять по формулам:

$$D_{11} = \sum_i A_{bi} Z_{bxi}^2 E_b \nu_{bi} + \sum_j A_{sj} Z_{sxj}^2 E_{sj} \nu_{sj} + \sum_k A_{fk} Z_{fxk}^2 E_{fk}, \tag{58}$$

$$D_{13} = \sum_i A_{bi} Z_{bxi} E_b \nu_{bi} + \sum_j A_{sj} Z_{sxj} E_{sj} \nu_{sj} + \sum_k A_{fk} Z_{fxk} E_{fk}, \tag{59}$$

$$D_{33} = \sum_i A_{bt} E_b \nu_{bi} + \sum_j A_{sj} E_{sj} \nu_{sj} + \sum_k A_{fk} E_{fk}\,. \tag{60}$$

На первом этапе расчета задается некоторый шаг по приращению изгибающего момента. На каждом шаге определяется координата центра тяжести сечения y_0:

$$y_0 = \frac{\sum_i A_{bi} y_i E_b \nu_{bi} + \sum_j A_{sj} y_j E_s \nu_{sj}}{D_{33}}. \tag{61}$$

В матрице D_{33} последнее слагаемое $(\sum_k A_{fk} E_{fk})$ принимается равным нулю.

Деформации каждого волокна сечения определяют исходя из равновесия сечения и совместности деформаций при возрастающем внешнем моменте:

$$\varepsilon_{bt}^0 = M_0 \frac{Z_{bxt}^0}{D_{11}}, \text{ где } Z_{bxt}^0 = y_0 - y_i \tag{62}$$

$$\varepsilon_{sj}^{0} = M_0 \frac{Z_{sxj}^{0}}{D_{11}}, \text{ где } Z_{sxj}^{0} = y_0 - y_{ji} \quad (63)$$

Причем в матрице D_{11} последнее слагаемое ($\sum_k A_{fk} Z_{fxk}^2 E_{fk}$) на первом этапе также принимается равным нулю.

Модули упругости бетона и стали, соответственно, координата центра тяжести сечения, являются переменными величинами, зависящими от уровня нагружения. Значения y_0, E_b, E_s для каждого этапа нагружения уточняются в ходе итерационного процесса, используя соответствующие величины коэффициентов упругости.

Значения коэффициентов упругости ν_{bi} и ν_{sj} определяют из соотношения значений напряжений и деформаций в рассматриваемых точках соответствующих диаграмм состояния материалов, деленных на модуль упругости материала п.6.1.19-6.1.27 [5]:

$$\nu_{bi} = \frac{\sigma_{bi}}{E_b \varepsilon_{bi}}, \quad (64)$$

$$\nu_{sj} = \frac{\sigma_{sj}}{E_{sj} \varepsilon_{sj}}. \quad (65)$$

Условие сходимости итерационного процесса выполняется по кривизне элемента $1/r_x$. При требуемой точности δ на некотором шаге n условие сходимости будет иметь следующий вид:

$$\delta \geq \frac{\frac{1}{r_x^n} - \frac{1}{r_x^{n-1}}}{\frac{1}{r_x^n}}. \quad (66)$$

Повторяя расчет и уточняя значения секущих модулей деформаций, в каждом сечении элемента определяем НДС, соответствующее заданной нагрузке. Найденные значения деформаций в каждом волокне в дальнейшем расчете рассматриваются как начальные.

Для изгибаемых элементов влияние начального напряженно-деформированного состояния учитывается с использованием принципа суперпозиции. Элемент конструкции в общем случае до проведения усиления находится под нагрузкой и имеет некоторые деформации ε^0, определенные на первом этапе расчета. Деформации в основном сечении после усиления находятся

как сумма независимых деформаций от нагрузки до усиления и дополнительных деформаций:

$$\varepsilon^{\text{полн}} = \varepsilon^{0} + \varepsilon^{\text{доп}}. \quad (67)$$

Исходя из предположения о жестком контакте внешней арматуры и бетона основного сечения, условие деформирования внешней арматуры и бетона основного сечения, условие деформирования внешней арматуры под расчетной нагрузкой определяется из выражения:

$$\varepsilon_f^{\text{полн}} = \varepsilon_b^{\text{доп}} \quad (68)$$

где $\varepsilon_b^{\text{доп}}$ – дополнительная деформация крайнего растянутого волокна бетона.

В расчете деформаций координаты слоя композиционного материала по высоте для простоты и ввиду малой толщины (обычно порядка 1-2 мм) принимают равными координате крайнего растянутого волокна бетона.

Полный момент, воспринимаемый сечением после усиления:

$$\mathrm{M}_{\text{полн}} = \mathrm{M}_0 + \mathrm{M}_{\text{доп}}. \quad (69)$$

Деформированное состояние изгибаемого элемента характеризуется кривизной и координатой центра тяжести сечения:

$$\frac{1}{r_x^0} = \frac{\varepsilon_{bi}^0}{Z_{bxi}^0} = \frac{\varepsilon_{sj}^0}{Z_{sxj}^0}. \quad (70)$$

Значение кривизны на первом шаге расчета усиленного сечения принимается равным кривизне элемента конструкции до усиления $\frac{1}{r_x^{полн}} = \frac{1}{r_x^o}$, поскольку вес всей системы усиления незначителен и не оказывает влияния на напряженно-деформированное состояние конструкции.

При расчете на действие дополнительного момента $M_{\text{доп}}$ координату $y_{\text{полн}}$ положения нейтральной оси и деформации в бетоне, стальной арматуре и арматуре усиления следует определять по следующем зависимостям:

$$y_0 = \frac{\sum_i A_{bi} y_i E_b \nu_{bi} + \sum_j A_{si} y_j E_{sj} \nu_{si} + \sum_k A_{\text{ск}} y_k E_{ck}}{D_{33}}, \quad (71)$$

$$\varepsilon_{bi}^{\text{полн}} = \varepsilon_{bi}^0 + M_{\text{доп}} \frac{Z_{bxi}^{\text{полн}}}{D_{11}} \quad (72)$$

$$Z_{bxi}^{\text{полн}} = y_{\text{полн}} - y_i$$

где

$$\varepsilon_{sj}^{\text{полн}} = \varepsilon_{sj}^{0} + M_{\text{доп}} \frac{Z_{sxj}^{\text{полн}}}{D_{11}} \tag{73}$$

$$Z_{sxj}^{\text{полн}} = y_{\text{полн}} - y_j$$

где

$$\varepsilon_{\text{c}}^{\text{полн}} = \varepsilon_{sj}^{0} + M_{\text{доп}} \frac{Z_{sxj}^{\text{полн}}}{D_{11}}, \tag{74}$$

$$Z_{sxj}^{\text{полн}} = y_{\text{полн}} - y_j$$

где .

На этом этапе расчета в матрицы жесткости D_{33} и D_{11} входят слагаемые от внешней арматуры.

Дальнейший расчет с уточнением модуля деформаций усиленного сечения практически не отличается от расчета конструкции без усиления.

Расчет нормальных сечений железобетонных элементов по прочности производят из условий:

$$\left|\varepsilon_{b,max}\right| \leq \varepsilon_{b,ult} \tag{75}$$

$$\left|\varepsilon_{s,max}\right| \leq \varepsilon_{s,ult} \tag{76}$$

$$\left|\varepsilon_{c,max}\right| \leq \varepsilon_{c,ult}. \tag{77}$$

Значения предельных деформаций бетона и арматуры $\varepsilon_{b,ult}$ и $\varepsilon_{s,ult}$ принимают согласно п.8.1.24 и 8.1.30 [5].

Для изгибаемых элементов, в которых не допускаются трещины, учет работы растянутого бетона элемента осуществляют с использованием условия:

$$\varepsilon_{b,max} \leq \varepsilon_{bt,ult}, \tag{78}$$

$\varepsilon_{b,\,ult}$ – определяется согласно п. 8.1.29 [5]

Значения предельных деформаций композиционного материала $\varepsilon_{c,\,ult}$ следует принимать из условия:

$$\varepsilon_{c,ult} \leq \varepsilon_{c,u} \quad (79)$$

где $\varepsilon_{c,u}$ – предельная деформация растяжения композиционного материала с учетом коэффициента условий работы и отслаивания.

8.2 Сжатые конструкции

8.2.1 Основные положения усиления конструкций обоймами (данный подпункт развивает положения пп 6.2.15 [6].

Усиление сжатых железобетонных элементов производится путем устройства обоймы внешним армированием в поперечном направлении. Усиление железобетонных конструкций, колонн зданий, инженерных и мостовых сооружений, с целью повышения их несущей способности производится в случае предполагаемого увеличения нагрузки на несущие конструкции и повышения их жесткости.

Основные предпосылки для усиления колонн внешними обоймами:

- повышение несущей способности и деформативности бетона;
- предотвращение разрушения колонн в местах соединения продольной арматуры с выпусками арматуры из фундамента;
- обеспечение боковой устойчивости продольных стержней арматуры;
- предотвращение разрушения защитного слоя бетона.

Композиционный материал, создающей постоянное радиальное давление на усиливаемый элемент после достижения пластичности, упруго деформируется вплоть до разрушения и оказывает возрастающее пассивное радиальное давление на бетонный образец, находящийся под осевой нагрузкой. Эффективность усиления обоймами из КМФ зависит от боковой дилатансии бетона, являющейся в свою очередь функцией бокового давления. Предельные деформации бетона, усиленного обоймой из КМФ, находятся в функциональной зависимости от расчетных предельных деформаций композиционного материала, принятого для усиления. Экспериментальные исследования показывают, что тангенциальные разрушающие деформации имеют меньшие значения, чем разрушающие деформации, получаемые

при стандартных испытаниях холстов КМФ на растяжение. В виду этого расчетные предельные деформации обоймы из композиционного материала следует принимать $\varepsilon_{cp} \leq 0.004$, а сопротивление обоймы из композиционного материала растяжению составит $R_{co} = \varepsilon_{cp} E_c$.

Усиление путем устройства обоймы из композиционных материалов сжатых элементов рекомендуется производить при следующих условиях:

- расчетное значение эксцентриситета приложения сжимающей силы должно быть менее $0{,}1D$ (для круглых сечений диаметром D) или менее $0{,}1h$ (для прямоугольных сечений);
- соотношение сторон элементов прямоугольного сечения h/b не должно превышать значение 1,5;
- максимальный размер стороны элементов прямоугольного сечения h не должен превышать 900 мм;
- гибкость элементов не должна превышать значение $\lambda \leq 50$.

При расчете сжатых железобетонных элементов в начальном эксцентриситете приложения продольной силы следует учитывать случайный эксцентриситет, принимаемый по указаниям [5].

Бетон в колоннах, охваченных обоймами из композиционного материала, ведет себя как билинейный материал. При этом прочность бетона в направлении действия максимального напряжения значительно возрастает ввиду его перехода из одноосного напряженного состояния в объемное. Для элементов круглого поперечного сечения прочность заключенного в обойму бетона R_{bo} определяется по зависимости

$$R_{bo} = R_b \left[1 + 2.6 \cdot \left(\frac{\sigma_r}{R_b} \right)^{2/3} \right], \tag{80}$$

а для элементов других форм поперечного сечения по зависимости

$$\frac{R_{bo}(\sigma_r)}{R_b} = 2{,}254 \sqrt{1 + 7{,}94 \frac{\sigma_r}{R_b}} - 2 \frac{\sigma_r}{R_b} - 1{,}254 . \tag{81}$$

Для случая усиления круглого железобетонного элемента сплошной обоймой из композиционного материала с направлением расположения волокон по

касательной к поверхности цилиндра охватывающее радиальное давление можно записать в виде

$$\sigma_r = \frac{2R_{co}t_c}{D}, \tag{82}$$

где R_{co} – расчетное сопротивление растяжению обоймы из композиционного материала; D – диаметр обоймы из композиционного материала. Учитывая малую толщину обоймы, при расчетах его можно принимать равным диаметру колонны.

Усиление железобетонных элементов обоймой из композиционных материалов считается эффективным, если соотношение

$$\frac{\sigma_r}{R_b} > 0{,}05.$$

Углеродные композиционные материалы предпочтительнее в случае предполагаемого увеличения нагрузки на колонну, а арамидные или стекловолокна – в случае изменения гибкости конструкции. Обойма может состоять из активных или пассивных слоев или их комбинации. Пассивные обоймы из холстов обеспечивают восприятие пассивного бокового давления. При использовании активных (преднапряженных) оболочек боковое охватывающее давление обеспечивается раньше, чем при пассивном отпоре, вызванном радиальным расширением бетона колонны при его осевом сжатии.

В зависимости от формы колонны и расположения композиционного материала усиления распределение радиальных давлений в колонне будет неравномерным. Выделяют четыре основных типа усиления:

- усиление обоймой из КМФ цилиндрической колонны по всей ее длине с расположением волокон композиционного материала перпендикулярно продольной оси колонны;
- частичное усиление круглой колонны кольцами из КМФ;
- усиление обоймой из КМФ с произвольным расположением волокон относительно продольной оси колонны;
- усиление колонн некруглой формы поперечного сечения.

Все усиленные элементы проверяются по следующим критериям:

- разрыв композиционного материала обоймы под действием растягивающих напряжений;
- разрушение обоймы из КМФ в местах соединения слоев внахлестку;
- разрушение колонны под действием поперечных сил;
- соответствие условиям по второй группе предельных состояний: осевые и радиальные деформации колонны, разрушения от усталости и ползучести материала.

8.2.2 Усиление центрально сжатых колонн (данный подпункт развивает положения пп. 6.2.15 [6].

Несущая способность колонны до ремонта и усиления N определяется по результатам диагностических исследований по определению фактических размеров всей конструкции и составляющих ее элементов, а также прочностных свойств существующего бетона и арматуры с учетом их физического износа:

$$N = N_b + N_s < N^*, \tag{83}$$

$$N = R_b\left(A_g - A_s\right) + R_s A_s, \tag{84}$$

где N^* – осевая нагрузка на колонну; A_g – площадь сечения колонны, включая площадь бетона и арматуры.

Несущая способность колонны после ее усиления обоймой из композиционного материала N_y зависит от формы колонны и принятой схемы усиления. В общем случае прочность на сжатие усиленного обоймой бетона R_{bo} может быть определена по одной из двух полученных экспериментальным путем зависимостей:

$$R_{bo} = R_b + \beta_{ef}\beta_f\beta_l\sigma_r, \tag{85}$$

$$R_{bo} = \beta_1\beta_2\sigma_r, \tag{86}$$

где β_{ef} – коэффициент эффективности охватывающего усиления, $\beta_{ef} = 2$ для круглой, прямоугольной и эллипсовидной форм колонн; β_f – коэффициент, учитывающий форму колонны, для круглых колонн $\beta_f = 1$, а для остальных форм определяется по формулам, которые будут приведены ниже; β_l – коэффициент, учитывающий сплошность усиления колонны по ее длине. Необходимо отметить, что частичное усиление целесообразно применять только для круглых колонн; β_l – повышающий

коэффициент, учитывающий деформирование бетона при трехосном сжатии. Для его определения используется модифицированная формула:

$$\beta_1 = 1{,}25\left(1{,}8\sqrt{1+7{,}94\frac{\sigma_{r,\max}}{R_b}} - 1{,}6\frac{\sigma_{r,\max}}{R_b} - 1\right); \qquad (87)$$

$\sigma_{r,max}$ – максимальное радиальное напряжение в бетоне, вызванное обоймой из композиционных материалов. Для круглых колонн его значение определяется по зависимости (78); β_2 – понижающий коэффициент, учитывающий изменение уровня радиальных напряжений в бетоне в зависимости от формы колонны. Его величина определяется по следующей формуле:

$$\beta_2 = 1 + \left[1{,}4\frac{\sigma_{r,\min}}{\sigma_{r,\max}} - 0{,}6\left(\frac{\sigma_{r,\min}}{\sigma_{r,\max}}\right)^2 - 0{,}8\right]\sqrt{\frac{\sigma_{r,\max}}{R_b}}, \qquad (88)$$

для круглых колонн $\sigma_{r,\min} = \sigma_{r,\max} = \sigma_r$.

Наиболее эффективным является усиление круглых колонн по всей их длине. В этом случае все сечение бетона конструкции испытывает повышенные радиальные напряжения и соответственно в любой точке усиленной обоймой колонны бетон имеет повышенную прочность на сжатие.

В колоннах прямоугольного поперечного сечения с размерами сторон $b \times h$ (рис. 62) и с углами, закругленными радиусами r_c = 15–25 мм, часть бетона не испытывает эффекта усиления и только в части площади поперечного сечения образуется ядро бетона, испытывающего повышенные радиальные напряжения. Неусиленные области бетона ограничены арками с углом наклона 45° к грани колонны (см. рис. 25). Эффективность усиления квадратных и прямоугольных колонн примерно одинакова и составляет около 50% от усиления круглых колонн.

Полная площадь сечения бетона, не охваченного усилением, определяется из условия, что ее граница в силу арочного эффекта в теле колонны очерчена по параболе:

$$A_{bu} = \frac{b'^2 + h'^2}{3}. \qquad (89)$$

Площадь ядра бетона прямоугольной колонны, в котором действуют повышенные радиальные напряжения и в котором достигается максимальная эффективность усиления:

$$A_{ef'} = A_g - A_s - A_{bu} - (4-\pi)r_c^2 \ . \qquad (90)$$

Значения коэффициента β_f, зависящего от формы колонны, определяются по следующим зависимостям: для прямоугольной колонны $\beta_f = \frac{hA_{ef}}{b(A_g - A_s)}$; для квадратной колонны $\beta_f = \frac{A_{ef}}{A_g - A_s}$ и для эллиптической колонны $\beta_f = \left(\frac{b}{a}\right)^2$, где a – большая полуось эллипса, для круглых колонн $\beta_f = 1$. Из приведенных формул следует, что для всех остальных типов колонн $\beta_f < 1$ и, следовательно, эффективность охватывающего усиления меньше.

При частичном усилении железобетонной колонны по ее длине (рис. 26) из-за наличия усиленной и неусиленной областей эффективность усиления снижается, и следовательно, $\beta_l < 1$.

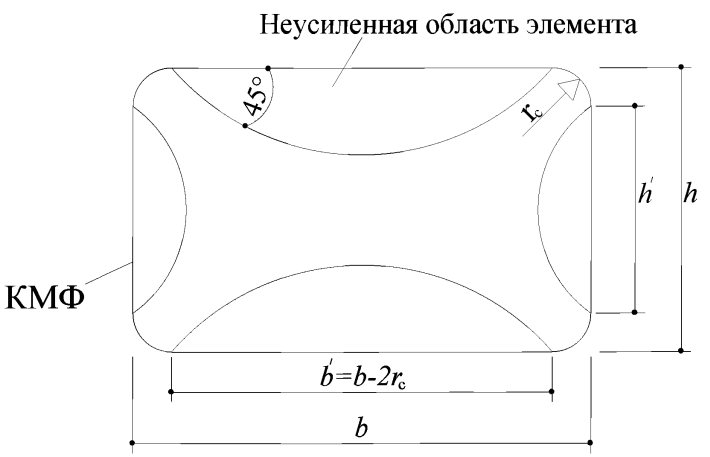


Рисунок 25 – Эффективная область усиления обоймами из КМФ прямоугольных железобетонных колонн: b и h – размеры сторон прямоугольной колонны; b' и h' – размеры частей колонн, не охваченных усилением

Величина коэффициента эффективности усиления рассчитывается из предпосылки, что эффективность усиления (наличие радиальных напряжений в бетоне) не достигается в полной мере на участке, где действует арочный эффект. Как показано на рис. 63, арочный эффект действует на участке между лентами усиления и имеет форму параболы с начальным углом наклона около 45°.

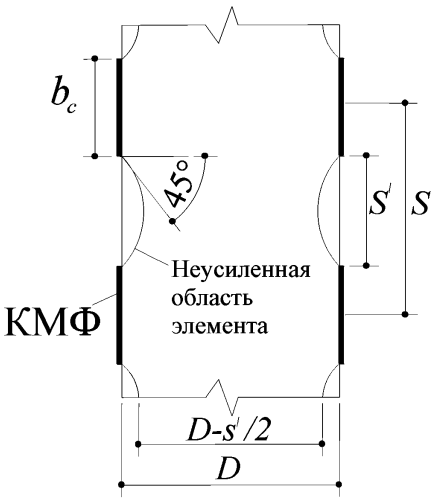


Рисунок 26 – Частичное усиление круглой колонны по ее длине полосами композиционного материала шириной b_c: s – расстояние между осями полос усиления КМФ; s' – расстояние между полосами усиления

Между двумя лентами усиления площадь эффективно усиленного ядра A_{ef} определяется по формуле:

$$A_{ef} = \frac{\pi}{4}\left(D - \frac{s'}{2}\right)^2, \tag{91}$$

где $s' = (s - b_c)$ – расстояние между лентами усиления.

Величина β_l определяется соотношением A_{ef}/A_b, где $A_b = (A_g - A_s)$ – площадь поперечного сечения конструкции за вычетом площади продольной арматуры A_s:

$$\beta_l = \frac{\left(1 - \frac{s'}{2D}\right)^2}{1 - \mu} \approx \left(1 - \frac{s'}{2D}\right)^2, \tag{92}$$

где μ – коэффициент армирования конструкции продольной стальной арматурой.

При применении для усиления колонн холстов, располагаемых по спирали к поверхности колонны, эффект усиления снижается и радиальные деформации бетона будут меньше. Величина растягивающих усилий в композиционном материале N_c принимается постоянной. Радиальные напряжения в бетоне по высоте колонны при устройстве обоймы по спирали :

$$\sigma_{r,h} = \frac{N_c}{b_c R}, \tag{93}$$

где R – кривизна спирали композиционного материала, определяемая по формуле

$$R \approx \frac{\kappa^2 + r^2}{r}, \tag{94}$$

здесь $\kappa = P/2\pi$ (P – шаг спирали, r – радиус колонны).

При охватывании композиционным материалом круглой железобетонной колонны боковое давление на единицу ее длины определяется по формуле:

$$\sigma_{r,c} = \frac{N_c}{b_c r}. \tag{95}$$

Коэффициент усиления β_l составит:

$$\beta_l = \frac{\sigma_{r,h}}{\sigma_{r,c}} = \frac{\pi D}{\pi D + P}, \tag{96}$$

т. е. чем больше шаг спирали, тем меньше эффективность усиления колонн обоймами.

Усиление обоймами из КМФ железобетонных колонн увеличивает их прочность на изгиб, что является дополнительным преимуществом. Поэтому при проектировании важно повысить эффективность усиления увеличением деформаций, которые может воспринять композиционный материал. А так как композиционные материалы хуже работают на сжатие, чем на растяжение, то в данном случае особенно важны требования к их жесткости. В противном случае возможен риск отслоения КМФ от поверхности бетона или разрушения анкеровки. Для круглых колонн вне зависимости от типа волокон и адгезива жесткость обоймы должна быть более 320 МПа.

При усилении обоймами колонн некруглой формы поперечного сечения радиальные напряжения будут различаться относительно короткой и длинной сторон. При расчетах используются как осредненные значения радиальных напряжений, так и их экстремальные значения:

- для прямоугольных колонн

$$\sigma_r = \frac{2R_{co}t_c}{\sqrt{b^2+h^2}};\ \ \sigma_{r,\max} = \frac{2R_{co}t_c}{h};\ \sigma_{r,\min} = \frac{2R_{co}t_c}{b}, \tag{97}$$

где h и b – соответственно короткая и длинная стороны прямоугольной колонны;

- для эллипсовидных колонн

$$\sigma_r = \frac{R_{co}t_c\left[1{,}5(a+b)-\sqrt{ab}\right]}{2ab}, \tag{98}$$

где a и b – соответственно большая и малая полуоси эллипса.

Кривая «напряжение – деформация» усиленного обоймой из композиционного материала бетона имеет нисходящую ветвь деформирования после достижения предельного состояния. В этом случае результирующая бокового давления от внешней обоймы будет невелика и поэтому прочность бетона после усиления R_{bo} в меньшей степени будет отличаться от прочности бетона до усиления R_b. В расчетном плане это обстоятельство учитывается следующим образом. Несущая способность центрально сжатой или с минимальным эксцентриситетом колонны после усиления обоймой из композиционного материала в общем случае:

$$N_y = \delta R_b A_{bu} + R_{bo}A_{ef} + R_s A_s. \tag{99}$$

Для колонн круглой формы поперечного сечения первый член этого уравнения отсутствует, так как вся площадь поперечного сечения бетона в обойме будет эффективно усилена. В колоннах же прямоугольной и квадратной форм поперечного сечения часть его усилена не будет. В неусиленной части прямоугольных и квадратных колонн прочность бетона на сжатие может изменяться в широких пределах – от расчетного сопротивления сжатию до величины остаточной прочности $R_{b,ost}= \delta R_b$. Значения коэффициента δ, характеризующего отношение остаточной прочности бетона к его прочности на сжатие, зависят от деформационных свойств самого бетона, наличия добавок в его составе, особенно

пластифицирующих, условий работы бетона в конструкции, агрессивного воздействия окружающей среды. Для предварительной оценки несущей способности усиленной конструкции можно с определенным запасом рекомендовать принимать $\delta = 0{,}2 - 0{,}3$, как для хрупких тел.

Предельные деформации бетона ε_{bo} при создании круглой обоймы из композиционных материалов можно определять по зависимостям:

на основе углерода

$$\frac{\varepsilon_{bo}}{\varepsilon_b} = 1{,}75 + 10\frac{\sigma_r}{R_b}, \tag{100}$$

на основе стекловолокон

$$\frac{\varepsilon_{bo}}{\varepsilon_b} = 1{,}75 + 22\frac{\sigma_r}{R_b}. \tag{101}$$

Другой возможной формой разрушения обойм из композиционных материалов является потеря сцепления между отдельными слоями из-за недостаточной длины их соединения. Этот вид разрушения является хрупким, что весьма нежелательно во время эксплуатации усиленной конструкции. Кроме того, возросшая нагрузка на колонну передается со стальной арматуры на бетон и вызывает появление в последнем микротрещин. Это в свою очередь уменьшает сцепление между арматурой и бетоном. Применение же обойм из композиционных материалов, особенно преднапряженных, повышает сцепление между сталью и бетоном. Однако из-за недостаточной длины соединения слоев КМФ в обойме в условиях повышенной нагрузки на колонну и развития трещин может произойти ее хрупкое разрушение.

Длина соединения для различных систем усиления и композиционных материалов должна указываться производителями. Общим правилом является то, что когда для усиления колонны применяются два или более слоев композиционного материала, то места соединения слоев должны располагаться на противоположных концах колонны. Минимальная длина соединения 200 мм.

Применение обоймы из композиционных материалов позволяет увеличить несущую способность колонн на действие поперечной силы. Сопротивление бетона и стальной арматуры рассчитывается согласно требованиям СП 63.13330.2012 [5].

Сопротивление на действие поперечной силы круглых обойм из КМФ определяется по формуле:

$$Q_c = (\pi/2)\, t_c\, d'\, E_c\ \varepsilon_{cp}, \qquad (102)$$

где d' – расстояние между внешним краем обоймы из КМФ и центром растянутой арматуры; $\varepsilon_{cp} \le 0{,}004$ – расчетная деформация КМФ.

Такое ограничение поперечной деформации связано с тем, что композиционные материалы имеют линейную диаграмму деформирования вплоть до разрушения и в данном случае ее значение адаптировано к деформированию внутренней стальной арматуры.

9 Технология производства работ

9.1 Технология внешнего армирования железобетонных конструкций с использованием композиционных материалов и контроль качества работ

Технология внешнего армирования железобетонных конструкций с использованием композиционных материалов и контроль качества работ приведены на рис. 27. Она включает:

- подготовку поверхности конструкции;
- заготовку холстов и ламинатов;
- приготовление адгезионного состава;
- приклеивание элементов внешнего армирования;
- нанесение защитного покрытия от воздействия внешней среды;
- контроль качества производства работ.

9.2 Подготовка основания под приклеивание

В случае необходимости выполнения ремонта основания бетона следует руководствоваться нормативными документами ГОСТ 32016-2012, ГОСТ 32017-2012, ГОСТ 32943-2014, ГОСТ 33762-2016 и ГОСТ Р 56378-2015 [25, 26, 27, 28, 29, 30].

Под основанием подразумевается поверхность бетона, на которую производится приклеивание элемента внешнего армирования (ламината или холста).

Основание должно отвечать определенным требованиям по плоскостности, наличию дефектов и прочности бетона.

Неровность поверхности не должна превышать 5 мм на базе 2 м или 1 мм на базе 0,3 м. Мелкие дефекты (сколы, раковины, углубления до 5 мм) устраняются с применением полимерцементных составов либо эпоксидных составов с наполнителем (молотым кварцевым песком).

Выравнивание значительных (более 25 $см^2$) участков поверхности производится с использованием полимерцементных ремонтных составов путем ручной шпатлевки.

Механические характеристики материала основания (бетона) должны соответствовать передаваемым усилиям, прилагаемым к промежуточному слою склеивания.

Поверхность должна быть очищена от краски, масла, жирных пятен, цементной пленки.

Очистка поверхности осуществляется путем пескоструйной обработки или обработки металлическими щетками с последующей высоконапорной промывкой водой (под давлением не менее 100 атм.).

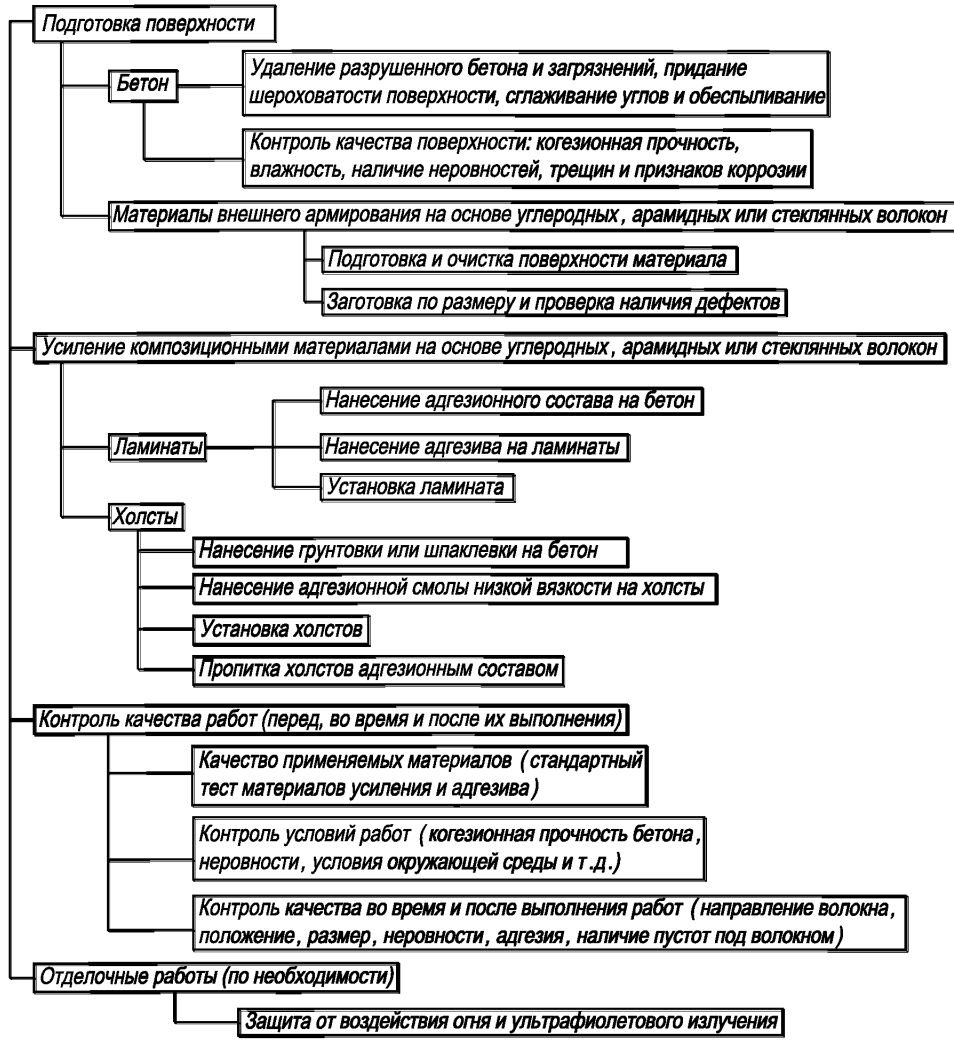


Рисунок 27 – Технологическая схема внешнего армирования железобетонных конструкций композиционными материалами [31]

В случае разрушения (отслоения) защитного слоя бетона в результате коррозии арматуры следует очистить обнаженную арматуру от продуктов коррозии, обработать ее преобразователем ржавчины и праймерным составом и после этого восстановить защитный слой бетона специальными ремонтными составами.

При устройстве обойм и хомутов из холстов в поперечном направлении конструкции на ее наружных углах необходимо выполнить фаски с катетом 1–2 см, либо галтель с радиусом 1–2 см, а на внутренних углах ремонтными смесями выполнить галтель радиусом не менее 20 см (рис. 28).

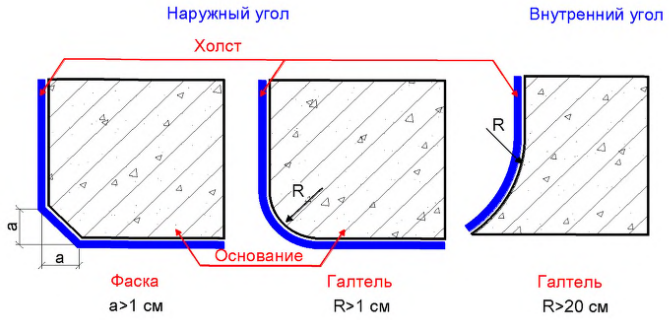


Рисунок 28 – Подготовка углов конструкции перед приклеиванием холстов

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.

9.3 Раскрой ламинатов и холстов

Раскрой ламинатов и холстов производится в соответствии с принятой проектом схемой приклеивания. Заготовки нарезаются по типоразмерам в количестве, необходимом для внешнего армирования одной конструкции.

Раскрой ламинатов и холстов осуществляется на гладком столе (верстаке), покрытом полиэтиленовой пленкой. Стол должен быть снабжен приспособлением для разматывания ламинатов и холстов с бобины. Для резки холстов следует использовать ножницы или острый нож, ламинаты нарезаются с помощью специальной нарезной машины, снабженной диском по металлу.

Нарезанные холсты сматываются в рулон, снабжаются этикеткой с указанием номера, размера и количества заготовок и помещаются в полиэтиленовый мешок.

Заготовки ламинатов перемещают к посту нанесения адгезионного состава.

9.4 Приготовление адгезионного состава

При приготовлении адгезионного состава для приклеивания холстов и ламинатов компоненты А (эпоксидная смола) и Б (отвердитель) смешиваются в соотношениях, определяемых техническими условиями.

Дозирование компонентов А и Б необходимо производить путем взвешивания на 5-ти килограммовых чашечных весах или по объему.

Приготовление адгезива производится в чистой металлической, фарфоровой, стеклянной или полиэтиленовой емкости объемом не менее 3 л 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.

9.5 Приклеивание холстов

Приклеивание холстов следует производить при помощи материалов на основе эпоксидных смол по ГОСТ 32943-2014 [27].

Перед нанесением на бетонное основание первого слоя адгезионного состава (праймерного слоя) поверхность основания должна быть продута сжатым воздухом.

Праймерный слой наносят на основание с целью пропитки поверхности и заполнения мелких неровностей. Состав наносится с помощью шпателя, кисти, валика с коротким ворсом.

Холсты должны всегда укладываться на слой адгезионного состава. Делается это путем постепенного размещения холста с одного края основания до другого. В процессе укладки необходимо следить, чтобы внешняя кромка холста была параллельна линии разметки на основании, либо кромке предыдущего холста.

Холсты должны укладываться без складок и без излишнего натяжения. После укладки осуществляется прикатка (прижатие) холста, в процессе которой происходит его пропитка. Прикатка осуществляется с помощью жесткого резинового валика от центра к краям строго в продольном направлении (вдоль волокон холста). После осуществления прикатки холст должен быть немного липким на ощупь, но без явно видимого покрытия адгезионным составом.

Перед укладкой второго слоя холста (при многослойной схеме внешнего армирования) на прикатанный первый слой холста наносится следующий слой эпоксидного связующего.

Укладка и прикатка второго и последующих слоев холста производится аналогичным образом. После укладки последнего слоя холста на его поверхность наносится финишный слой связующего.

Расход адгезионного состава при приклеивании элементов внешнего армирования зависит от качества поверхности конструкции, типа состава, температуры и влажности окружающей среды и указывается в проекте производства работ.

По специфике производства работ можно выделить три области приклеивания холстов:

- приклеивание на горизонтальные поверхности сверху (на поверхность пола);

- приклеивание на горизонтальные поверхности снизу (на поверхность потолка);

- приклеивание на вертикальные поверхности (стены, колонны и др.).

При приклеивании на горизонтальные поверхности сверху холст постепенно укладывается без натяжения от центра к краям, разглаживается руками и прикатывается валиком. Укладка осуществляется двумя квалифицированными рабочими.

Укладка каждого последующего слоя может начинаться сразу же после завершения прикатки предыдущего слоя. Технологических ограничений по количеству укладываемых слоев нет.

При приклеивании на горизонтальные поверхности снизу (потолок) холст прижимается (фиксируется) с одного конца и затем постепенно укладывается и прикатывается по всей длине. При этом холст можно предварительно нарезать (заготовить) на отрезки проектной длины, либо постепенно разматывать с бобины и обрезать по месту в процессе приклеивания. Прикатка холста осуществляется от центра к краям с целью предотвращения образования складок. Как правило, приклеивание холста на потолочную поверхность осуществляется двумя рабочими.

В зависимости от вязкости адгезионного состава (определяемой в значительной мере температурой окружающей среды), приклеивание холста производится непосредственно вслед за нанесением адгезива, либо после некоторой выдержки (не превышающей 20 мин.), за время которой его вязкость возрастает, обеспечивая тем самым фиксацию холста на потолочной поверхности (холст не отваливается после прикатки). Время выдержки определяется экспериментально путем пробного приклеивания. Продолжительность выдержки перед приклеиванием каждого последующего слоя определяется аналогичным образом.

При выполнении внешнего армирования на вертикальных поверхностях нанесение адгезионного состава на основание производится сверху вниз. Приклеивание поперечных относительно конструкции полос холста осуществляется путем фиксации (прижатия) холста в верхней части и постепенной укладки и разглаживания по высоте с последующей прикаткой.

Приклеивание продольных полос холста на вертикальные поверхности производится путем его фиксации в крайнем (левом или правом) положении с последующей укладкой и прикаткой по длине. Время выдержки перед приклеиванием каждого последующего слоя определяется таким же образом, как и при приклеивании на потолочные поверхности.

Выполнение многослойных элементов внешнего армирования на вертикальных поверхностях в продольном и поперечном направлениях («сетка») производится путем последовательного послойного приклеивания полос холста попеременно в двух направлениях.

Операции по приклеиванию холстов могут выполняться при температуре окружающей среды в диапазоне от 5 °С до 35 °С; при этом температура бетона основания должна быть выше 5 °С и выше температуры точки росы на 3 °С.

Эпоксидные адгезионные составы не следует наносить на замерзшие поверхности. В случаях, когда температура поверхности бетона ниже допустимого уровня, может иметь место недостаточное насыщение волокон и/или низкая степень отверждения смолы, что отрицательно скажется на работе системы внешнего армирования. Для повышения температуры основания могут быть использованы дополнительные локальные источники тепла.

Эпоксидные адгезионные составы не должны наноситься на мокрую поверхность. Открытая влага должна быть удалена (вытерта), поверхность продута сжатым воздухом.

Полное отверждение эпоксидных адгезионных составов в естественных условиях происходит в течение нескольких суток и в значительной мере зависит от температуры окружающей среды. Как правило, время отверждения должно составлять не менее 24 часов при температуре выше 20 °С и не менее 36 часов при температуре от 5 °С до 20 °С.

Для обеспечения безопасности (пожарной, защиты от вандализма) или по эстетическим соображениям элементы внешнего армирования на заключительной стадии работ могут быть дополнены различными покрытиями, совместимыми с эпоксидным связующим (красками на эпоксидной основе, полиуретановыми покрытиями, специальными огнеупорными составами). Для лучшего сцепления этих покрытий с элементом внешнего армирования поверхность последнего после укладки финишного слоя связующего присыпается тонким слоем сухого песка крупностью 0,5-1,5 мм.

9.6 Приклеивание ламинатов

Приклеивание ламинатов следует производить при помощи материалов на основе эпоксидных смол по ГОСТ 32943-2014 [27].

Ламинаты могут быть использованы для внешнего армирования путем приклеивания на поверхность конструкции либо путем установки полос ламината в предварительно подготовленные пазы.

При внешнем армировании подготовка основания производится так же, как и в случае приклеивания холстов.

Перед приклеиванием мерные заготовки ламината раскладываются на рабочем столе (верстаке) и тщательно протираются смоченной ацетоном ветошью. На подготовленную поверхность наносится тонкий (1–1,5 мм) слой адгезионного состава путем протягивания ламината через специальное устройство с дозатором. Аналогичный слой адгезионного состава толщиной 1 мм наносится на предварительно подготовленное и обеспыленное основание. Затем ламинат укладывается на основание (клей к клею) и прикатывается валиком так, чтобы вытеснить избыток воздуха. При этом образующийся избыток адгезионного состава убирается шпателем. В случае, если проектом внешнего армирования предусматривается установка усиливающего элемента из двух или нескольких слоев ламината, производится последовательное приклеивание необходимого количества слоев.

Внешняя сторона элемента внешнего армирования может быть покрыта защитными красками или полимерцементным раствором.

В случае установки ламината в пазы в соответствии со схемой армирования в конструкции выполняются штрабы шириной 3 мм и глубиной, равной ширине полос плюс 2 мм. Штрабы заполняются на 2/3 адгезионным составом, затем в них погружаются заготовки ламината. Избыток адгезионного состава удаляется шпателем.

9.7 Конструктивные особенности выполнения внешнего армирования из композиционных материалов

Конструкция элементов внешнего армирования (форма, размеры, количество слоев) назначается на основании расчетов и определяется проектом усиления.

Максимальное количество слоев холста или ламината ограничивается только расчетной силой сцепления с поверхностью основания.

Элемент внешнего армирования должен выходить за пределы расчетной площади усиления, образуя зону анкеровки. Длина зоны анкеровки назначается согласно разработанному проекту внешнего армирования и не может быть меньше 150 мм.

При многослойной конструкции элемента внешнего армирования последний выполняется в виде рессоры, чем обеспечивается постепенное включение отдельных слоев в работу.

С целью предотвращения нарушения анкеровки элементов внешнего армирования продольное армирование должно быть дополнено поперечным (установкой хомутов). Следует чередовать установку продольных слоев и хомутов таким образом, чтобы каждый последующий продольный слой был перехвачен хомутом.

При длине элементов внешнего армирования более 3-х метров в целях облегчения рабочего процесса укладки холсты можно укладывать отдельными отрезками, которые необходимо стыковать между собой по длине. При этом длина перехлеста должна составлять не менее 100 мм. Перехлест может осуществляться как на влажный слой адгезива, так и на уже отвердевший. В последнем случае зона перехлеста должна быть обработана наждачной бумагой и протерта смоченной ацетоном ветошью.

Перехлест выполняют вдоль холстов по направлению расположения армирующих волокон. В случае многослойной конструкции внешнего армирования стыковка должна осуществляться в разбежку по длине (в разных сечениях).

В балочных конструкциях для восприятия поперечной силы в приопорной зоне могут быть установлены вертикальные либо наклонные хомуты. Хомуты наклеиваются поверх продольного элемента усиления, чтобы обеспечить лучшую его анкеровку.

Вертикальные хомуты выполняются из одного отрезка холста. Заготовка наклеивается (фиксируется) по всей длине, а затем осуществляется прикатка ее от центра к краям (рис. 29).

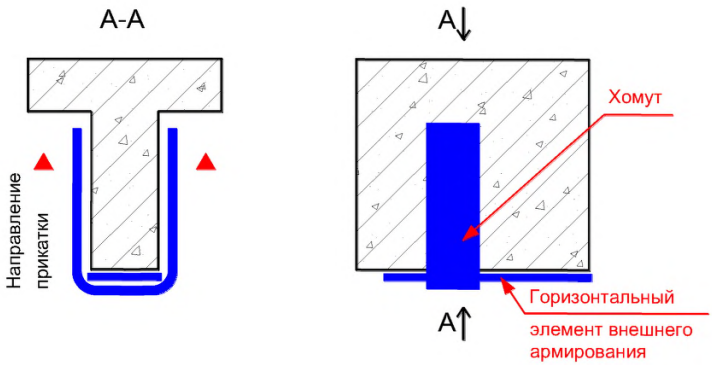


Рисунок 29 – Схема установки вертикальных хомутов в балочных конструкциях

Наклонные хомуты выполняются из двух отрезков холста, стыкуемых по нижней (потолочной) поверхности ребра. Вначале приклеивается одна половина, осуществляется ее прикатка, после чего производится приклеивание противоположной части (рис. 30). Перехлест наклонных хомутов осуществляется по низу, на всю их ширину.

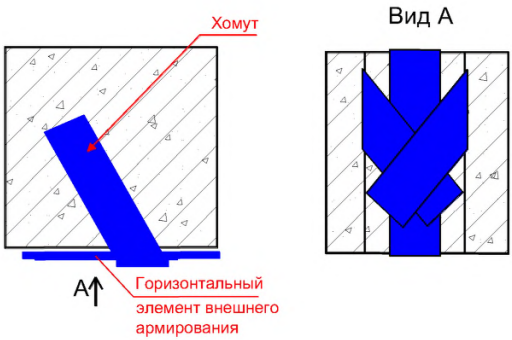


Рисунок 30 – Схема установки наклонных хомутов в балочных конструкциях

При усилении на изгиб балочных конструкций с целью улучшения условий анкеровки и предотвращения отслоения защитного слоя рекомендуется заведение холста на боковые поверхности ребра. В этом случае холст приклеивается на

боковую поверхность ребра, после чего заводится на нижнюю (потолочную) поверхность и противоположную боковую поверхность ребра (рис. 31).

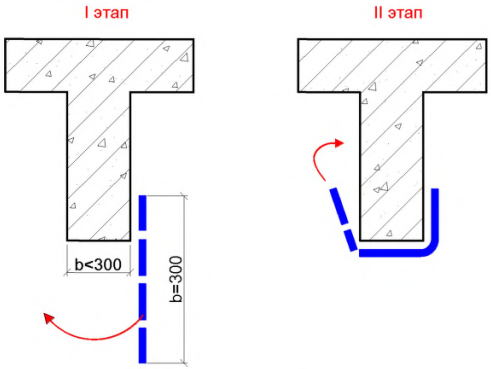


Рисунок 31 – Внешнее армирование балочных конструкций. Схема приклеивания холстов на ребро

Для конструкций, эксплуатируемых в условиях переменной влажности, элементы внешнего армирования должны быть выполнены таким образом, чтобы обеспечить возможность миграции паров влаги из тела бетона. В противном случае может быть нарушено сцепление между элементом внешнего армирования и основанием (отрыв элемента). Как правило, в плитных конструкциях с наружной гидроизоляцией возможно приклеивание отдельных полос с промежутками между ними. Сплошное приклеивание элементов внешнего армирования по всей плоскости плиты не допускается. Площадь свободной от элементов поверхности конструкции должна составлять не менее 50% ее общей площади. Однако в случае коробчатых сечений, когда возможна миграция паров внутрь короба, может быть выполнено сплошное приклеивание элементов внешнего армирования по нижней поверхности плиты (рис. 32).

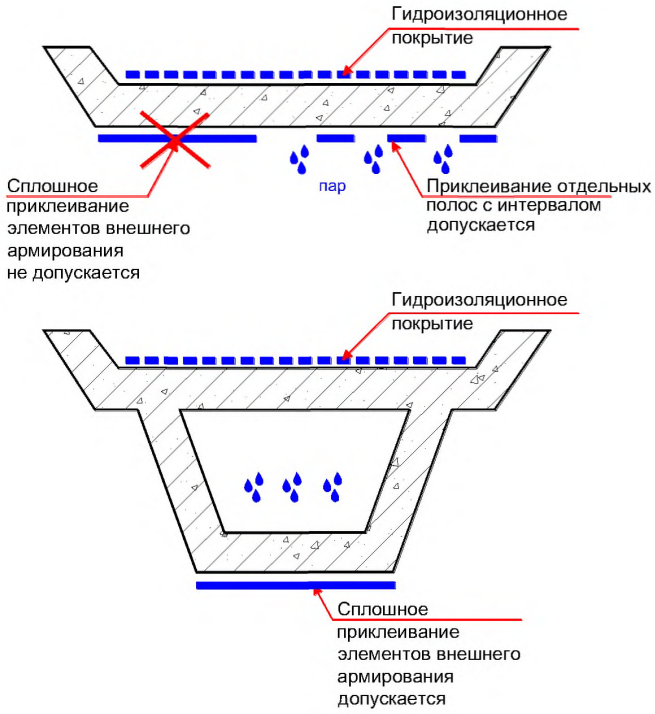


Рисунок 32 – Схемы приклеивания элементов внешнего армирования для обеспечения паропроницаемости

В случае внешнего армирования конструкций, эксплуатируемых в условиях постоянной влажности (внутри помещения), может осуществляться приклеивание холстов и ламинатов по всей поверхности основания (плит перекрытий, колонн).

В случае использования для внешнего армирования однонаправленных и двунаправленных сеток из высокопрочных волокон подготовка основания производится также, как и в случае приклеивания холстов. Присоединение активных сеток следует осуществлять при использовании полимерцементной матрицы и растворов полимеров.

Перед установкой сетки подвергаются обработке в низковязком адгезионном составе. Делается это с целью предотвращения взаимного смещения волокон в жгутах при деформации конструкций в процессе нагружения. Сетка пропускается через емкость с низковязким адгезивом и на выходе отжимается с помощью специальных валков. После этого для лучшего сцепления с минеральным

связующим поверхность сетки присыпается тонким слоем сухого мелкого песка. В процессе полимеризации адгезива происходит скрепление волокон в жгуте, подобно тому, как это имеет место в ламинатах.

В случае необходимости анкеровки концевых участков ламинатов осуществляется установка арматуры в заранее пробуренные отверстия и монтаж прижимных пластин. Последовательность выполнения работ по анкеровке ламинатов: подготовка отверстия бурением, выдалбливанием или гидроструйной обработкой, установка арматурного стержня и замоноличивание специальным составом на минеральной или полимерной основах. После устройства выпусков арматурных стержней осуществляется установка анкерных пластин при помощи гаек и шайб. Добавление арматуры, закрепляемой в заранее сформированных каналах, требует тщательной подготовки отверстия и максимальная степень заполнения его раствором на минеральной или полимерной основе. Данный метод ремонта также может применяется совместно с добавлением или заменой замоноличенных или наружных арматурных стержней и с добавлением бетона или раствора.

10 Контроль качества и приемка выполненных работ

10.1 Общие положения

При производстве работ по внешнему армированию железобетонных конструкций композиционными материалами следует соблюдать требования настоящего свода правил.

Соблюдение положений настоящего свода правил обеспечивается входным, операционным и приемочным контролем.

10.2 Методы контроля и испытаний однонаправленных холстов, ламинатов и адгезионных составов

Физико-механические свойства однонаправленных холстов оцениваются по свойствам однонаправленного композита, изготовленного из соответствующих материалов.

Для определения прочностных характеристик однонаправленного композита проводят следующие испытания:

- определение прочности на разрыв;
- определение модуля упругости;
- определение относительного удлинения при разрыве.

Механические характеристики однонаправленных композитов определяются путем испытания образцов в соответствии с ГОСТ 25.601-80 «Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей» [14].

Изготовление образцов для испытаний производится из материалов тех же партий, что и используемых при изготовлении элементов внешнего армирования на производстве. При этом количество слоев холста в образцах должно соответствовать количеству слоев в элементах внешнего армирования.

Для композитов холодного отверждения, создаваемых непосредственно на строительном объекте из однонаправленных холстов путем их пропитки и

приклеивания специальными эпоксидными составами, принимается условная расчетная площадь поперечного сечения образцов для испытания. Она определяется как сумма поперечного сечения армирующих волокон в плотном теле и поперечного сечения полимерной матрицы при 60% содержании волокон в пластике. При этом плотность армирующего материала принимается по данным производителя.

Условная расчетная площадь поперечного сечения образца определяется выражением:

$$A = t_f \cdot n \cdot b, \tag{103}$$

где t_f – толщина монослоя; n – количество слоев; b – ширина образца.

Толщина монослоя t_f определяется выражением:

$$t_f = \frac{\gamma_{\text{пов}}}{\gamma_{\text{уд}} \cdot K_{\text{н}}}, \tag{104}$$

где $\gamma_{\text{пов}}$ – поверхностная плотность холста (вес 1 м^2); $\gamma_{\text{уд}}$ – плотность армирующего материала по данным производителя; $K_{\text{н}}$ – коэффициент наполнения пластика волокном, принимаемый равным 0,6.

Механические характеристики многослойных пластиков определяются путем испытания образцов с соответствующим количеством слоев холста.

Прочностные характеристики однонаправленных ламинатов принимаются по данным изготовителя.

Адгезию клея (адгезионного состава) к бетонной поверхности определяют аналогично прочности сцепления мастик с основанием по ГОСТ 26589-94 [16].

Для этого непосредственно на конструкции рядом с элементом внешнего армирования с использованием адгезионных составов той же партии наклеивают отрывные элементы, выполненные в виде круглых пластин диаметром 25 мм. После полимеризации адгезионного состава производят отрыв пластин с фиксацией максимальной величины усилия отрыва и характера разрушения.

Прочность сцепления с основанием (адгезию) $R_{\text{сц}}$ вычисляют по формуле:

$$R_{\text{сц}} = \frac{P}{S}, \tag{105}$$

где P – максимальное усилие отрыва, кгс; S – площадь отрывного элемента, см^2.

Контроль качества выполнения работ по добавление арматуры для анкеровки ламинатов, закрепляемой в заранее сформированных или пробуренных каналах, должен осуществляться путем испытания на выдергивающее усилия арматуры по ГОСТ 56731-2015.

10.3 Входной контроль

Входной контроль распространяется на все используемые при производстве работ материалы в соответствии с техническими условиями на каждый из них и производится руководствуясь положениями [12]. Приемку холстов, ламинатов и компонентов для приготовления адгезионного состава осуществляет отдел контроля качества предприятия, выполняющего производство работ по внешнему армированию.

Приемку холстов и ламинатов производят партиями, каждая из которых состоит из определенного количества материала одного типа, одной марки и одного способа производства, оформленных одним документом о качестве.

Приемку компонентов для приготовления адгезионного состава также производят партиями. Партией считается адгезионный состав одной марки, изготовленный по одному технологическому режиму и одной рецептуре в течение смены, суток или непрерывного многосуточного технологического процесса.

Каждая партия должна сопровождаться документом о качестве, который содержит:

- наименование предприятия-изготовителя;
- дату оформления документа о качестве;
- номер партии;
- наименование продукции;
- количество рулонов в партии для холстов и катушек для лент ламинатов;
- результаты испытаний физико-механических свойств;
- штамп и подпись отдела контроля качества предприятия-изготовителя.

Входной контроль поставляемых материалов осуществляется путем проверки маркировок, целостности тары, внешнего вида (для холстов и ламинатов), а также

наличия сертификатов на данные материалы. Входному контролю подлежит 100% поступающих материалов.

Геометрические размеры ламинатов (ширина и толщина) проверяют в соответствии с требованиями ГОСТ 26433.1 [15] с применением измерительных инструментов необходимой точности.

Размеры холстов проверяют по ГОСТ 29104.1 и ГОСТ 29104.2 [19, 20].

Цвет материала и наличие дефектов проверяются в партии ламинатов в соответствии с требованиями ГОСТ 24105 [11], а в партии холстов – визуально.

Транспортирование и хранение ламинатов должно осуществляться в соответствии с требованиями ГОСТ 25388 [13] со следующим дополнением: лента ламината должна храниться в упакованном виде при температуре от –30 °С до +50 °С и относительной влажности не более 85%.

Транспортирование холстов осуществляется в соответствии с требованиями ГОСТ 7000-80 [22]. Хранение холстов осуществляется в упакованном виде на стеллажах в складских помещениях, исключающих попадание прямых солнечных лучей, при температуре от –30 °С до +50 °С и относительной влажности не более 80%.

Транспортирование компонентов для приготовления адгезионных составов может производиться всеми видами транспорта. Хранение осуществляется в складских помещениях в герметичных емкостях при температуре свыше +5 °С в условиях, обеспечивающих защиту от воздействия влаги и прямых солнечных лучей.

10.4 Операционный контроль

Перед приклеиванием холстов и ламинатов должны быть проведены контрольные испытания используемых материалов в соответствии с требованиями, изложенными в разделе 9.2. Испытания проводятся в лаборатории предприятия, осуществляющего производство работ по внешнему армированию.

Внешний вид поверхности бетона основания (отсутствие загрязнений, масляных пятен и др.) оценивается визуально, плоскостность – с помощью

металлической линейки, а величина неровности – с помощью щупа в соответствии с [17].

Прочность бетона основания оценивается путем простукивания его молотком, либо другим неразрушающим методом.

В процессе приготовления адгезионного состава контролируются:

- точность взвешивания компонентов А и Б на чашечных весах (±10 г), либо объемного дозирования в мерных сосудах;

- однородность массы адгезива после перемешивания;

- отсутствие посторонних включений и сгустков (визуально).

При нанесении адгезионного состава на поверхность бетона визуально, а также по весовому и объемному расходу контролируются толщина и равномерность слоя, отсутствие непокрытых участков.

При укладке и пропитке адгезионным составом холстов визуально, а также по расходу (весовому и объемному) контролируются толщина и равномерность слоя, отсутствие непропитанных участков, складок, ориентация волокон. Отклонение волокон от принятой проектом ориентации не должно превышать 5 градусов.

В процессе приклеивания контролируется температура окружающей среды, влажность, температура на поверхности бетона и продолжительность отверждения.

10.5 Приемочный контроль

После отверждения адгезионного состава осуществляется визуальный контроль с целью выявления отслоений холста от поверхности и других дефектов, оговоренных в технических требованиях на ремонтные работы.

Контроль внутренних дефектов (непроклеенных мест, расслоений между волокнами) осуществляется методом акустического зондирования, легким простукиванием поверхности элемента усиления молотком, либо другим методом неразрушающего контроля. При этом учитываются размер расслоений, их расположение и количество относительно общей площади элемента усиления.

При приклеивании холстов допускается наличие расслоений между волокнами площадью менее 15 $см^2$ каждое, а общее количество таких мест не должно превышать 10 на 1 $м^2$ внешнего армирования.

Расслоения площадью более 15 $см^2$ должны быть отремонтированы путем вырезания дефектных участков и установки заплатки с таким же количеством слоев.

Результаты входного, операционного и приемочного контроля заносятся в сопроводительную документацию производства работ.

10.6 Приемка выполненных работ

Приемка выполненных работ по внешнему армированию железобетонных конструкций осуществляется комиссией из уполномоченных представителей организации-производителя работ, проектной организации, генподрядчика и заказчика.

Производитель работ представляет комиссии надлежащим образом оформленную исполнительную документацию, включающую:

- сертификаты соответствия и санитарно-эпидемиологические заключения на используемые материалы;

- акты скрытых работ (подготовка поверхности конструкции, приклеивание элементов внешнего армирования);

- акты испытаний контрольных образцов использованных материалов (холстов, ламинатов, адгезионных составов).

По результатам освидетельствования и рассмотрения исполнительной документации оформляется акт приемки выполненных работ.

11 Техника безопасности при производстве работ

При производстве работ по внешнему армированию железобетонных конструкций необходимо выполнять требования техники безопасности в соответствии со СНиП 12-03-2001 и СНиП 12-04-2002 [3, 4].

При внешнем армировании несущих конструкций покрытий и перекрытий необходимо осуществлять их монтажное усиление с целью исключения дополнительных прогибов конструкции в процессе выполнения работ. Конструкция усиления в каждом случае решается индивидуально.

Все процессы, связанные с приготовлением адгезионного состава, необходимо производить в хорошо проветриваемом помещении или на открытом воздухе.

При приготовлении адгезионного состава на открытом воздухе рабочие должны находиться с наветренной стороны.

В зоне, где производится приготовление адгезионного состава, запрещается принимать пищу, курить и пользоваться открытым огнем.

При выполнении работ по приклеиванию композиционных материалов следует исключить контакт адгезионного состава с кожей, слизистыми, а также попадания в рот.

Работы с адгезионными составами следует производить в специальной одежде с применением средств индивидуальной защиты. Для защиты кожных покровов рук рекомендуется применять две пары перчаток: хлопчатобумажные и поверх них резиновые.

При попадании адгезионного состава или его составляющих на кожу необходимо сразу же промыть её теплой водой. Рекомендуется наносить защитный крем на открытые участки тела.

К работе с адгезионными составами, холстами и ламинатами допускаются лица, прошедшие медицинский осмотр, и получившие допуск к работам по медицинским показаниям. Все работающие должны пройти вводный инструктаж на

рабочем месте по порядку выполнения и безопасному ведению работ. Отметка о прохождении инструктажа заносится в специальный журнал.

Работы на высоте более 1,3 м должны выполняться с подвесных либо стоечных подмостей, люлек или других приспособлений, обеспечивающих безопасное выполнение работ.

Подключение электрических инструментов и оборудования к источнику питания должно выполняться аттестованным электриком.

Опасная зона работы оборудования и механизмов устанавливается согласно нормам и снабжается щитами и надписями установленного образца. Нахождение посторонних лиц в зоне производства работ не допускается.

Во время натяжения ламинатов стоять по оси прикладываемого усилия за домкратом запрещается.

В темное время суток рабочая площадка должна иметь достаточную освещенность для ведения работ.

12 Охрана окружающей среды

Материалы для внешнего армирования железобетонных конструкций (холсты, ламинаты, адгезионные составы и их компоненты) не представляют опасности для окружающей среды, не содержат токсичных веществ и вредных примесей, причиняющих вред человеку и окружающей среде.

Запрещается сливать использованный растворитель в водоемы, а неиспользованные адгезионные составы утилизировать до их полного отверждения. Их запрещается закапывать или сжигать. После отверждения адгезионные составы утилизируются как пластмассы.

Производственные сточные воды, содержащие цементный раствор, масла и т.п. должны быть пропущены через грязеотстойники, маслоуловители, биофильтры с целью очистки от вредных примесей.

Приложение А

Основные буквенные обозначения

Внешние нагрузки и воздействия и усилия от них в поперечном сечении элемента:

M – изгибающий момент;

M_{crc} – момент трещинообразования усиливаемой конструкции

M_o – изгибающий момент перед усилением конструкции;

M_s – несущая способность изгибаемого железобетонного элемента;

Q_b – поперечное усилие, воспринимаемое бетоном;

Q_c – поперечное усилие, воспринимаемое композиционным материалом;

Q_{sw} – поперечное усилие, воспринимаемое хомутами;

γ_{cp} – вес единицы площади холстового КМ или вес только волокон, г/м^2.

Прочностные характеристики материалов:

R – кубиковая прочность бетона на сжатие;

R_b, $R_{b,\ ser}$ – расчетные сопротивления бетона осевому сжатию для предельных состояний соответственно первой и второй групп;

R_{bt}, $R_{bt,\ ser}$ – расчетные сопротивления бетона осевому растяжению для предельных состояний соответственно первой и второй групп;

R_{bo} – расчетное сопротивление сжатию бетона, усиленного обоймой из КМ;

R_c – расчетная прочность на растяжение композиционного материала;

R_{cn} – прочность на растяжение композиционного материала по данным фирм-производителей;

R_f – прочность на растяжение фибры (волокон) композиционного материала;

R_m – прочность на растяжение отверждающей полимерной матрицы;

R_{ou} – расчетная прочность на растяжение обоймы из композиционного материала;

R_s, $R_{s,\ ser}$ – расчетные сопротивления стальной арматуры растяжению для предельных состояний соответственно первой и второй групп;

R_{sc} – расчетное сопротивление стальной арматуры сжатию для предельных состояний первой группы;

f_{bd} – расчетная прочность сцепления между композиционным материалом и бетоном.

Деформационные характеристики:

E_b – начальный модуль упругости бетона при сжатии и растяжении;

E_c – расчетный модуль упругости композиционного материала;

E_{cn} – модуль упругости композиционного материала по данным фирм-производителей;

E_f – модуль упругости фибры (волокон) композиционного материала;

E_m – модуль упругости отверждающей полимерной матрицы;

E_o – модуль упругости обоймы из композиционных материалов;

E_p – модуль деформации бетона после усиления его обоймой из КМ перед разрушением;

E_s – модуль упругости стальной арматуры;

G_a – модуль сдвига адгезива;

G_b – модуль сдвига бетона

ε_{ba} – осевая деформация бетона, усиленного обоймой из КМ;

ε_{bau} – предельная осевая деформация бетона, усиленного обоймой из КМ;

ε_{bo} – деформация сжатия бетона при его максимальной прочности на сжатие R_{bo} после усиления обоймой из КМ;

ε_{bto} – максимальная деформация крайне растянутого волокна бетона перед усилением;

ε_{bu} – предельная деформация сжатия бетона;

ε'_{bu} – предельная деформация сжатия бетона после усиления обоймой из КМ;

ε_c – деформация растяжения композиционного материала;

ε_{cd} – расчетная проектная деформация растяжения композиционного материала;

ε_{cn} – предельная деформация растяжения композиционного материала по данным фирм-производителей;

ε_o – тангенциальная деформация обоймы из КМ;

ε_{ou} – предельная тангенциальная деформация обоймы из КМ;

ε_r – радиальные деформации;

ε_s – деформация растяжения стальной арматуры;

ε'_s – деформация сжатия стальной арматуры.

Напряжения, действующие в сечении элемента:

σ_c – расчетные растягивающие напряжения в КМ;

σ_{ck} – растягивающие напряжения в КМ на конце композиционного материала;

σ_{ck1} – растягивающие напряжения в КМ в средней части усиливаемой конструкции;

σ_o – напряжения в обойме из композиционного материала;

σ_{ou} – предельные напряжения в обойме из композиционного материала;

σ_r – радиальные напряжения в конструкции, вызываемые обоймой из КМ;

σ_{ru} – максимальные радиальные напряжения, вызываемые обоймой из КМ;

σ_s – напряжения в стальной арматуре растянутой зоны;

$\sigma`_s$ – напряжения в стальной арматуре сжатой зоны;

$\tau_{b,e}$ – напряжение сдвига на границе раздела между адгезивом и бетоном;

τ_m - среднее напряжение сдвига ;

Nc – удельное сцепление композиционного материала с бетоном.

Геометрические характеристики:

b – ширина прямоугольного сечения; ширина ребра таврового и двутаврового сечений; ширина одной из сторон прямоугольной колонны;

b_c – ширина ленты композиционного материала;

d – ширина стороны прямоугольной колонны; номинальный диаметр стержней арматурной стали;

d_o – диаметр обоймы из композиционного материала;

h – высота прямоугольного, таврового и двутаврового сечений;

h_{co} – рабочая высота таврового сечения при его усилении КМ по боковым поверхностям ребер;

h'_f – высота полки таврового сечения в сжатой зоне;

a, a' – расстояния от равнодействующей усилий в продольной растянутой и сжатой стальной арматуре до ближайшей грани сечения;

a_{crc} – ширина раскрытия трещин;

a_L – расстояние от опоры до верхней границы крайней к опоре наклонной трещины;

l_{crc} – расстояние между трещинами в растянутой зоне бетона;

l_e – оптимальная длина участка композиционного материала со сцеплением;

$h_o = h - a$ – рабочая высота сечения;

r – радиус колонны;

s – расстояние между осями лент усиления КМ;

s' – расстояние между лентами усиления КМ;

t – теоретическая толщина одного слоя холстового композиционного материала;

t_a – толщина адгезива;

t_c – толщина ленты композиционного материала;

t_o – толщина обоймы из композиционного материала;

$A = A_g - (A_s + A'_s)$ – площадь всего бетона в поперечном сечении элемента;

A_b – площадь сечения сжатой зоны бетона;

A_{bt} – площадь сечения растянутой зоны бетона;

A_{bu} – полная площадь сечения бетона, неохваченного усилением обоймой;

A_c – площадь сечения композиционного материала;

A_{oe} – площадь эффективно усиленного бетонного ядра при усилении колонн;

$A_g = b \times h$ – полная площадь сечения прямоугольного элемента;

A_f – площадь поперечного сечения волокон;

A_{red} – площадь приведенного сечения элемента;

A_s, A'_s – площади сечения ненапрягаемой арматуры соответственно растянутой и сжатой;

D – диаметр колонны;

L – расчетный пролет конструкции усиления;

S_{red} – статический момент приведенного сечения элемента относительно его центра тяжести;

I_{red} – момент инерции приведенного сечения элемента относительно его центра тяжести;

M_{crc} – момент, воспринимаемый сечением нормальным к продольной оси элемента при образовании трещин.

Коэффициенты и соотношения:

$\alpha = E_s/E_b$ – отношение модулей упругости стальной арматуры и бетона;

$\beta = E_c/E_b$ – отношение модулей упругости КМ и бетона;

γ_{bc} – коэффициент надежности по бетону при его работе на сжатие;

γ_{bt} – коэффициент надежности по бетону при его работе на растяжение;

γ_c – коэффициент надежности по композиционному материалу;

γ_{c1} – коэффициент, учитывающий сцепление между композиционным материалом и бетоном;

γ_{c2} – коэффициент, учитывающий тип волокна в композиционном материале и условия его эксплуатации;

γ_{ce} – коэффициент надежности по материалу для модуля упругости КМ;

γ_{mn} – коэффициент надежности по способу нанесения КМ;

γ_{cm} – коэффициент надежности по композиционному материалу;

k_b – геометрический коэффициент, зависящий от ширины усиливаемой конструкции;

k_{id} – коэффициент ($\geq$ 1), учитывающий напряжение сдвига и нормальные напряжения вблизи концевых участков анкеровки;

μ – коэффициент армирования конструкции стальной арматурой;

μ_o – коэффициент армирования круглой колонны обоймой из композиционного материала;

μ_s – коэффициент армирования бетона стальной арматурой;

χ – понижающий коэффициент, зависящий от применяемой схемы усиления на поперечную силу;

η_i – коэффициент условий работы композиционного материала;

V_f – объемное соотношение в композиционном материале волокон;

V_m – объемное соотношение в композиционном материале волокон.

Приложение Б

Пример расчета изгибаемой железобетонной конструкции

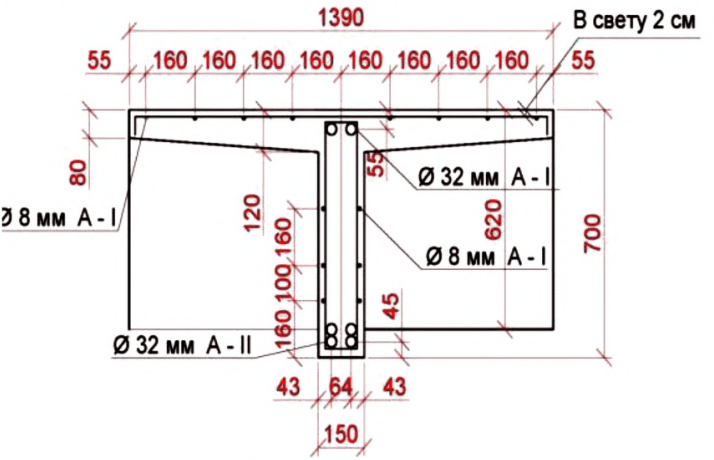


Рисунок Б.1 – Армирование балки

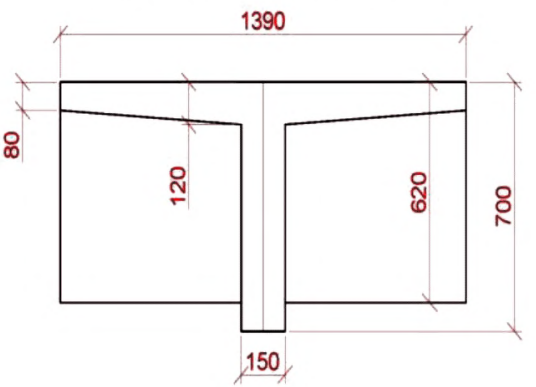


Рисунок Б.2 – Опалубочный чертеж балки

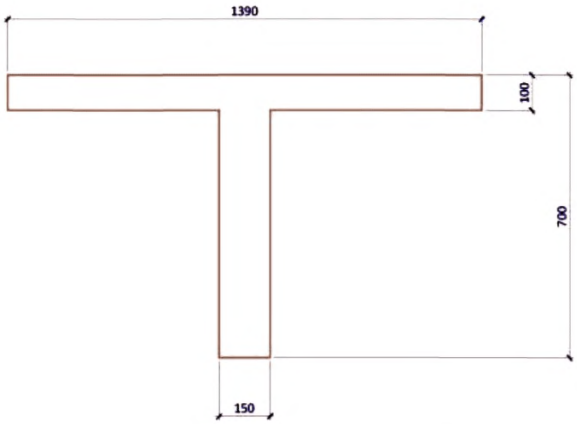


Рисунок Б.3 – Расчетное сечение балки

Выполним поверочный расчет для 56 балки пролетом 7,5 м.

Исходные данные:

Площадь арматуры:

- площадь ненапрягаемой арматуры S:

$A_s = 32{,}2$ см^2 = 32,2 / 10000 = 0,00322 м^2;

- площадь ненапрягаемой арматуры S':

$A'_s = 16{,}1$ см^2 = 16,1 / 10000 = 0,00161 м^2.

Арматура:

(класс и диаметр арматуры A_s – А300; диаметром 32 мм; класс и диаметр арматуры A'_s – А240; диаметром 32 мм; сооружение – автодорожное):

- диаметр ненапрягаемой арматуры S: $d_s = 3{,}2$ см = 3,2/100 = 0,032 м;

- диаметр ненапрягаемой арматуры S': $d'_s = 3{,}2$ см = 3,2/100 = 0,032 м;

- количество стержней ненапрягаемой арматуры S в сечении: $n_s = 4$;

- количество стержней ненапрягаемой арматуры S' в сечении: $n'_s = 2$;

Климатические данные:

(Московская область; Москва):

- средняя температура воздуха наиболее холодной пятидневки $t_e = -28$ °С;

- средняя относительная влажность воздуха наиболее жаркого месяца $f_e = 54$.

Защитный слой:

- расстояние от центра тяжести растянутой арматуры до грани элемента

a_s = 6,1 см = 6,1 / 100 = 0,061 м;

- расстояние от центра тяжести сжатой арматуры до грани элемента

a'_s = 5,5 см = 5,5 / 100 = 0,055 м.

Предварительное напряжение:

- разность между температурой нагреваемой арматуры и неподвижных упоров Δt = 65 °С.

Размеры элемента:

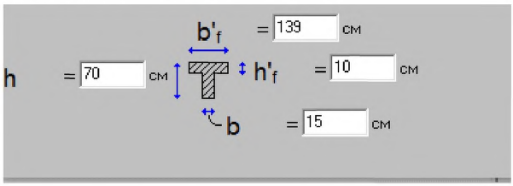
- пролет элемента l = 840 см = 840/100 = 8,4 м.

Усилия:

- изгибающий момент (от всех нагрузок; относительно нейтральной оси)

M = 48,16222 тс м = 48,16222 / 101,97162123 = 0,47231 МН·м.

Размеры в сечении:



- высота сечения h = 70 см = 70/100 = 0,7 м;

- ширина ребра таврового или двутаврового сечения

b = 15 см = 15/100 = 0,15 м;

- высота полки в сжатой зоне h'_f = 10 см = 10/100 = 0,1 м;

- ширина полки в сжатой зоне b'_f = 139 см = 139/100 = 1,39 м.

Характеристики ненапрягаемой арматуры:

- нормативное сопротивление растяжению ненапрягаемой арматуры

R_{sn} = 295 МПа;

- расчетное сопротивление растяжению ненапрягаемой арматуры

R_s = 265 МПа;

- модуль упругости ненапрягаемой арматуры E_s = 206000 Мпа.

Результаты расчета.

1) Определение расчетных характеристик бетона.

Класс бетона – В30.

Проектный класс бетона по прочности на сжатие: В = 30.

Элемент – не является блоком облицовки опор на реках с ледоходом.

Арматура – ненапрягаемая.

Элемент – конструкция пролетных строений.

В > = 30 (100% от предельного значения) – условие выполнено .

2) Продолжение расчета по п. 7.24.

Расчетное сопротивление бетона сжатию принимается по табл. 7.6 :

R_b = 15,5 МПа.

Расчетное сопротивление бетона растяжению принимается по табл. 7.6:

R_{bt} = 1,1 МПа.

Расчетное сопротивление бетона на сжатие при расчете по предельным состояниям второй группы принимается по табл. 7.6: $R_{b,\,ser}$ = 22 МПа.

Сопротивление бетона осевому растяжению при расчете предварительно напряженных элементов по образованию трещин принимается по табл. 7.6 в зависимости от B: $R_{bt,\,ser}$ = 1,8 МПа.

Расчетное сопротивление бетона на скалывание при изгибе принимается по табл. 7.6: $R_{b,\,sh}$ = 2,9 МПа.

Бетонирование – в горизонтальном положении.

Элемент работает – при отсутствии водонасыщения бетона.

3) Определение модуля упругости бетона.

Модуль упругости бетона принимается по табл. 7.11: E_b = 32500 МПа.

Бетон – естественного твердения.

Попеременное замораживание и оттаивание бетона – имеется.

Модуль упругости бетона: $E_b = 0{,}9 \cdot E_b = 0{,}9 \cdot 32500 = 29250$ МПа.

4) Продолжение расчета по п. 7.24

Расчетное сопротивление бетона на сжатие для расчета по предотвращению образования продольных трещин на стадии эксплуатации принимается по табл. 7.6: $R_{b,\,mc2}$ = 14,6 МПа.

5) Уточнение расчетных сопротивлений растяжению арматурной стали на стадии создания предварительного напряжения или монтажа.

Коэффициент условия работы: $m_a = 1$.

R_p не корректируется ($m_a = 1$).

6) Определение коэффициента условий работы m_{all}.

R_p не корректируется ($m_{all} = 1$).

7) Назначение прочности сжатой арматуры.

Расчетное сопротивление сжатию ненапрягаемой арматуры:

$R_{sc} = R_s = 265$ МПа.

Действие нагрузки – продолжительное.

Нормативное сопротивление ненапрягаемой арматуры сжатию:

$R_{sc,\,ser} = R_{sn} = 295$ МПа.

8) Определение характеристик приведенного сечения

Коэффициент:

$\propto_s = E_s/E_b = 206000/29250 = 7{,}04274.(1)$

Арматура в сжатой зоне – имеется.

Сечение – тавровое с полкой в сжатой зоне.

Ширина консольного свеса полки, принимаемая в расчет:

$b'_{fk} = (b'_f - b\,)/2 = (1{,}39 - 0{,}15)/2 = 0{,}62$ м.(2)

Т. к. $h'_f = 0{,}1$ м $> = 0{,}1h = 0{,}1 \cdot 0{,}7 = 0{,}07$ м и $b'_{fk} = 0{,}62$ м $> 6h'_f = 6 \cdot 0{,}1 = 0{,}6$ м.

Ширина консольного свеса полки, принимаемая в расчет:

$b'_{fk} = 6h'_f = 6 \cdot 0{,}1 = 0{,}6$ м. (3)

Ширина полки, принимаемая в расчет:

$b'_f = b + 2b'_{fk} = 0{,}15 + 2 \cdot 0{,}6 = 1{,}35$ м. (4)

Площадь бетона:

$A_b = b \cdot (h - h'_f) + b'_f \cdot h'_f - A'_s - A_s = 0{,}15 \cdot (0{,}7 - 0{,}1) + 1{,}35 \cdot 0{,}1 - 0{,}00161 -$
$- 0{,}00322 = 0{,}22017$ м^2. (5)

Площадь приведенного сечения:

$A_{red} = (a_s)\,(A_s + A'_s) + A_s = (7{,}04274) \cdot (0{,}00322 + 0{,}00161) + 0{,}22017 =$
$= 0{,}25419$ м^2. (6)

Статический момент приведенного сечения:

$S_{red} = (a_s - 1)\,(A_s \cdot a_s + A'_s\,(h - a'_s)) + b\,(h - h'_f)\,2/2 + b'_f\ h'_f\,(h - h'_f/2) =$

$= (7{,}04274 - 1) \cdot (0{,}00322 \cdot 0{,}061 + 0{,}00161 \cdot (0{,}7 - 0{,}055)) + 0{,}15 \cdot (0{,}7 - 0{,}1)\ 2/2 +$

$+ 1{,}35 \times 0{,}1 \cdot (0{,}7 - 0{,}1/2) = 0{,}12221$ м^3. (7)

$y_0 = S_{red}/A_{red} = 0{,}12221/0{,}25419 = 0{,}48078$ м. (8)

Расстояние от центра тяжести приведенного сечения до центра тяжести арматуры A_s:

$y_s = y_0 - a_s = 0{,}48078 - 0{,}061 = 0{,}41978$ м. (9)

Расстояние от центра тяжести приведенного сечения до центра тяжести арматуры A'_s:

$y'_s = h - a_s - a'_s - y_s = 0{,}7 - 0{,}061 - 0{,}055 - 0{,}41978 = 0{,}16422$ м. (10)

Момент инерции сечения арматуры относительно центра тяжести сечения элемента:

$I_s = A_s\,y_s^2 + A'_s\,y'^2_s = 0{,}00322 \cdot 0{,}41978\ 2 + 0{,}00161 \cdot 0{,}16422\ \ 2 = 0{,}00061$м^4. (11)

Момент инерции бетона:

$I_b = b\,(h - h'_f)\ 3/12 + b\,(h - h'_f)\,((h - h'_f)/2 - y_s - a_s)\ 2 + b'f\ h'f\ 3/12 + b'\,f\ h'f\,(h -$

$- h'f/2 - y_s - a$s) $2 = 0{,}15 \cdot (0{,}7 - 0{,}1) \cdot 3/12 + 0{,}15 \cdot (0{,}7 - 0{,}1) \cdot ((0{,}7 - 0{,}1)/2 -$ $0{,}41978 -$

$- 0{,}061)\ 2 + 1{,}35 \cdot 0{,}1\ 3/12 + 1{,}35 \cdot 0{,}1 \cdot (0{,}7 - 0{,}1/2 - 0{,}41978 - 0{,}061)\ 2 =$

$= 0{,}00962$ м^4. (12)

Момент инерции приведенного сечения бетона:

$I_{red} = (a_s - 1)\,I_s + I_b = (7{,}04274 - 1) \cdot 0{,}00061 + 0{,}00962 = 0{,}01331$ м^4. (13)

Момент сопротивления приведенного сечения:

$W_{red} = I_{red}/(y_s + a_s) = 0{,}01331/(0{,}41978 + 0{,}061) = 0{,}02768$ м^3. (14)

9) Продолжение расчета по п. 7.14.

Рабочая высота сечения по ненапрягаемой арматуре:

$h_{01} = h - a_s = 0{,}7 - 0{,}061 = 0{,}639$ м. (15)

Рабочая высота сечения:

$h_0 = h_{01} = 0{,}639$ м.

Расстояние от равнодействующей усилий в арматуре S до грани сечения:

$a = a_s = 0{,}061$ м.

Расстояние от равнодействующей усилий в арматуре S' до грани сечения:

$a' = a'_s = 0{,}055$ м.

10) Расчет изгибаемых элементов таврового или двутаврового сечения (в начале расчета рассмотрим предположение: граница сжатой зоны проходит в полке).

11) Определяем положение границы сжатой зоны.

Т. к. $R_s A_s = 265 \cdot 0{,}00322 = 0{,}8533$ МН $< = R_b b'_f h'_f + R_{sc} A'_s = 15{,}5 \cdot 1{,}35 \times$ $\times 0{,}1 + 265 \cdot 0{,}00161 = 2{,}51915$ МН. (16)

Граница сжатой зоны проходит в полке.

Высота сжатой зоны бетона:

$x = (R_s A_s - R_{sc} A'_s)/(R_b b'_f) = (265 \cdot 0{,}00322 - 265 \cdot 0{,}00161)/(15{,}5 \cdot 1{,}35) =$ $= 0{,}02039$ м. (17)

12) Определение коэффициента условий работы ma6.

Продолжение расчета по п. 7.63.

Высота сжатой зоны бетона:

$x = (R_s A_s - R_{sc} A'_s)/(R_b b'_f) =$

$= (265 \cdot 0{,}00322 - 265 \cdot 0{,}00161)/(15{,}5 \cdot 1{,}35) = 0{,}02039$ м. (18)

Т. к. $x = 0{,}02039$ м $< 2a'_s = 2 \cdot 0{,}055 = 0{,}11$ м:

Высота сжатой зоны без учета сжатой арматуры:

$x_1 = R_s A_s/(R_b b'_f) = 0{,}04078$. (19)

Т. к. $x_1 = 0{,}04078$ м $< 2a'_s = 2 \cdot 0{,}055 = 0{,}11$ м.

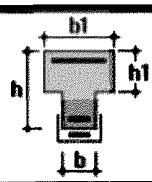
Сжатая арматура при этом не учитывается согласно п. 7.60.

$\dot{M} = R_b b'_f x_1 (h_0 - 0{,}5x_1) = 15{,}5 \cdot 1{,}35 \cdot 0{,}04078 \cdot (0{,}639 - 0{,}5 \cdot 0{,}04078) =$ $= 0{,}52787$ МН м. (20)

Для того, чтобы оценить эффект от усиления железобетонной тавровой балки, введем 5% коррозии и сделаем расчет и сравнение несущей способности.

Результаты были выполнены в программном комплексе «Эспри» и представлены на рисунке Б.4.

Исходные данные



Размеры сечения, мм
b=150, h=700,
b1=1390, h1=100,
b2=0, h2=0;

Бетон и арматура				
Арматура	Класс	Диаметр,мм	Количество	Привязка,мм
Верхняя	A300	32	2	55
Нижняя	A300	32	4	61

Класс бетона	Eb, МПа	Rb, МПа	Rb,ser, МПа	Rbt,ser, МПа
B30	34500	15.3	22	1.75
Коэф.условий работы бетона	0.9			

Композитный материал	
толщина, мм	1.4
ширина, мм	100
количество слоев	10
тип арматуры	Sika® CarboDur® H
модуль упругости,МПа	300000
прочность на растяжение,МПа	1400
деформация при разрыве,%	0.68
коэф.условий работы для ФАП	0.85

Расчетные усилия			
N,kH	M,kH*м	M0,kH*м	Q,kH
0	535	528	0
Коэф.надежности по нагрузке			1

Результаты расчета

Площадь приведенного сечения,мм2	Ared=269148
Момент инерции приведенного сечения,мм4	Ired=2.57689e+010
Момент сопротивления приведенного сечения,мм3	Wred=5.57453e+007
Центр масс сечения до усиления,мм	Y0=462.262
Площадь бетона,мм2	229000
Площадь нижней арматуры,мм2	3216.99
Площадь верхней арматуры,мм2	1608.5
Площадь композита ,мм2	1400
Предельный момент, kH*м	Mult=561.762
Момент при образовании трещин, kH*м	Mcrc=97.5543
Ширина раскрытия трещин,мм	acrc=0.18336

Рисунок Б.4

Результат расчета приведен в таблице Б1.

Таблица Б1 – Результат расчета по определению несущей способности железобетонной балки

Усиливаемая балка	Несущая способность до усиления, кН	Несущая способность после усиления, кН	Коэффициент усиления
56, пролет 7,5 м	527,870	561,762	1,06

Приложение В

Пример расчета железобетонных колонн

Исходные данные: монолитная железобетонная колонна с площадью поперечного сечения 1600 см^2, высотой Н = 5 м. Для железобетонной части конструкции принят бетона класса по прочности на сжатие В30. Удельный вес бетона. Расчетное сопротивление бетона класса В30 по прочности на растяжение R_{bt}=1,1МПа, на сжатие R_b=15,5МПа. Система внешнего армирования углепластиком- холст из композиционного материала на основе углеродных волокон производства S&P с характеристиками, приведенными в таблице В1 ; эпоксидная смола Рекс Эпокси-Резин с характеристиками, приведенными в таблице В2.

Таблица В1 – Технические характеристики холстового материала S&P

Наименование	Единица измерения	Значение
Ширина	мм	300
Толщина	мм	0,176
Плотность углеволокна	г/см^3	1,7
Прочность на растяжение	МПа	3800
Модуль упругости при растяжении	МПа	240000
Удлинение при разрыве	%	1,55

Таблица В2 – - Технические эпоксидной смолы Рекс Эпокси Резин

Наименование	Единица измерения	Значение
Плотность	кг/л	1,1
Пропорция смешивания компонентов по массе		1,5 : 1 (смола : отвердитель)
Удлинение при нагревании	м/мK^o	$70 \cdot 10^6$
Прочность на растяжение через 7 суток	МПа	35
Температура стеклования	°С	52
Относительное удлинение при разрыве	%	8–10

Пример расчета квадратной колонны, усиленной по всей высоте углеволокном.

Данный пример расчета следует применять к следующим схемам усиления:

- общее обертывание композитным материалом для однорядных опор стоичного типа;

- общее обертывание материалом опор-стенок;

- общее обертывание массивно-столбчатых опор;

- общее обертывание однорядной стоечной опоры со встроенным ригелем.

В колоннах квадратного поперечного сечения часть бетона не испытывает усиления, и только в части площади поперечного сечения образуется ядро бетона, испытывающего повышенные радиальные напряжения. Неусиленные области бетона ограничены арками с углом наклона 45° к грани колонны (рис. В1).

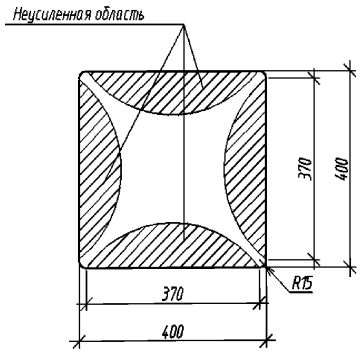


Рисунок В1 – Эффективная область усиления квадратной колонны полностью обернутой композиционными материалами

Несущая способность колонны до ремонта и усиления определяется по результатам диагностических исследований по определению фактических размеров всей конструкции и составляющих ее элементов, а также прочностных свойств существующего бетона и арматуры с учетом их фактического износа:

$$N = N_b + N_s \tag{22}$$

$$N = \varphi \cdot \eta \cdot R_b \cdot (A_g - A_s) + R_s \cdot A_s, \tag{23}$$

где η – коэффициент условия работы ($\eta = 1$ при h > 200 мм); φ – коэффициент,учитывающий гибкость и характер армирования($\varphi = 0{,}9$); R_b – расчетное значение сопротивления бетона сжатию; R_s – расчетная прочность стержневой арматуры растяжению; A_g – площадь сечения колонны, включая площадь бетона и арматуры; $A_g = 400 \cdot 400 = 1600000 \text{мм}^2$; A_s – площадь сечения стержневой арматуры.

Подставляя соответствующие числовые значения, получаем:

$$N = 1 \cdot 0{,}9 \cdot 15{,}5 \cdot 160000 = 2232000 \text{ Н} = 2{,}232 \text{ МН}.$$

Несущая способность центрально сжатой колонны после усиления обоймой из композиционного материала определяется по формуле:

$$N_y = \delta R_b A_{bu} + R_{bo} A_{ef} + R_s A_s,$$

где δ – коэффициент, характеризующий отношение остаточной прочности бетона к его прочности на сжатие, зависит от деформационных свойств самого бетона, наличия добавок в его составе, особенно пластифицирующих, условий работы бетона в конструкции, агрессивного воздействия окружающей среды. Для предварительной оценки несущей способности усиленной конструкции можно с определенным запасом рекомендовать принимать δ= 0,2 – 0,3, как для хрупких тел; R_b – расчетное значение сопротивления бетона сжатию ($R_b = 15{,}5$ МПа); A_{bu} – полная площадь сечения бетона, не охваченного усилием;

$$A_{bu} = \frac{b'^2 + h'^2}{3} = \frac{370^2 + 370}{3} = 91266 \text{ мм}^2, \quad (24)$$

$$b` = h` = b - 2r_c = 400 - 2 \cdot 15 = 370 \text{мм}^2, \quad (25)$$

$r_c = 15$ мм – радиус закругления; b', h' – размеры частей колонн, не охваченных усилением; R_{bo} – прочность бетона после усиления:

$$R_{bo} = R_b + \beta_{ef} \beta_f \beta_l \sigma_r, \quad (26)$$

β_{ef} – коэффициент эффективности охватывающего усиления (β_{ef}=2); β_f – коэффициент, учитывающий форму колонны.

Для квадратной колонны значение коэффициента β_f определяется по следующей зависимости:

$$\beta_f = \frac{A_{ef}}{(A_g - A_s)}, \quad (27)$$

A_{ef} – площадь эффективно усиленного ядра бетона квадратной колонны;

$$A_{ef} = A_g - A_s - A_{bu} - (4 - \pi) r_c^2, \quad (28)$$

$$A_{ef} = A_g - A_s - A_{bu} - (4 - \pi) \cdot r_c^2 = 160000 - 0 - 91266 - (4 - 3{,}14) \cdot 15^2 = 68540{,}5 \text{ мм}^2$$

$$\beta_f = \frac{68540{,}5}{160000} = 0{,}428;$$

σ_r – радиальное напряжение. Для квадратной колонны:

$$\sigma_r = \frac{2 \cdot R_{co} \cdot t_c}{\sqrt{b^2+h^2}}, \quad (29)$$

R_{co} – расчетное сопротивление растяжению обоймы из композиционного материала.

$$R_{co} = R_f \cdot V_f + R_m \cdot V_m, \quad (30)$$

R_f – нормативная прочность на растяжение композита; V_f – объемное соотношение в композите волокон ($V_f = 0{,}3$); R_m – прочность на растяжение отверждающего полимера; V_m – объемное соотношение в полимере волокон ($V_m = 0{,}7$).

Объемное соотношение $V_f + V_m = 0{,}3 + 0{,}7 = 1$ соблюдено.

Определим нормативное значение сопротивления растяжению композиционного материала R_f:

$$R_f = R_{cf} \cdot \gamma_{c1} \cdot \gamma_{c2} \cdot \gamma_{c3}, \quad (31)$$

где γ_{c1}коэффициент, учитывающий сцепление между композиционным материалом и бетоном.

Т. к. $n \cdot E_c \cdot t_c$=1·240000·0.234=56160<180000, то γ_{c1} определяем по следующей формуле:

$$\gamma_{c1} = \frac{1}{60 \cdot \varepsilon_{cd}} \cdot \left(1 - \frac{n \cdot E_c \cdot t_c}{360000}\right) \leq 0{,}9; \quad (32)$$

ε_{cd} – расчетная деформация композиционного материала

$$\varepsilon_{cd} = \varepsilon_{cf} \cdot \gamma_{c2} \cdot \gamma_{c3} = 0{,}0155 \cdot 0{,}85 \cdot 0{,}85 = 0{,}011, \quad (33)$$

$$\gamma_{c1} = \frac{1}{60 \cdot \varepsilon_{cd}} \cdot \left(1 - \frac{n \cdot E_c \cdot t_c}{360000}\right) = \frac{1}{60 \cdot 0.011} \cdot \left(1 - \frac{1 \cdot 240000 \cdot 0{,}234}{360000}\right) = 1{,}28$$

Т. к. условие $1{,}34 \leq 0{,}9$ не соблюдено, принимаем значение $\gamma_{c1} = 0{,}9$,

$$R_f = 3800 \cdot 0{,}9 \cdot 0{,}85 \cdot 0{,}85 = 2470{,}95 \text{ Мпа}.$$

Расчетное сопротивление растяжению. обоймы будет равно:

$$R_{co} = 2470{,}95 \cdot 0{,}3 + 35 \cdot 0{,}7 = 765{,}785 \text{ МПа}.$$

Радиальное напряжение:

$$\sigma_r = \frac{2 \cdot 765{,}785 \cdot 0{,}234}{\sqrt{400^2+400^2}} = 0{,}6335 \text{ МПа}.$$

Прочность бетона после усиления будет равна:

$$R_{bo} = 15{,}5 + 2 \cdot 0{,}429 \cdot 1 \cdot 0{,}6335 = 16{,}043 \text{ МПа}.$$

Таким образом, несущая способность центрально-сжатой квадратной колонны обернутой полностью композиционным материалом равна:

$$N_y = 0{,}9 \cdot 15{,}5 \cdot 91266 + 16{,}043 \cdot 68477{,}5 = 2371445{,}23\text{Н} = 2{,}37\,\text{МН}.$$

Пример расчета круглой колонны, усиленной по всей длине углеволокном.

Рассмотрим круглую железобетонную колонну с теми же геометрическими характеристиками, что и квадратную.

Данный пример расчета следует применять к следующим схемам усиления:

- общее обертывание композитным материалом для однорядных опор стоечного типа;

- общее обертывание массивно-столбчатых опор;

- общее обертывание однорядной стоечной опоры со встроенным ригелем.

Площадь сечения круглой колонны, включая площадь бетона и арматуры принимаем такую же:

$$A_g = 160000\text{мм}^2,$$

соответственно $D = 451{,}2\text{мм} \approx 450$ мм.

Несущая способность колонны до ремонта и усиления определяется по результатам диагностических исследований по определению фактических размеров всей конструкции и составляющих ее элементов, а прочностных свойств существующего бетона и арматуры с учетом их фактического износа:

$$N = \varphi \eta R_b (A_g - A_s) + R_s \cdot A_s\,,$$

где η – коэффициент условия работы ($\eta = 1$ при $h > 200$ мм); φ – коэффициент, учитывающий гибкость и характер армирования ($\varphi = 0{,}9$); R_b – расчетное значение сопротивления бетона сжатию; R_s – расчетная прочность стержневой арматуры растяжению; A_g – площадь сечения колонны, включая площадь бетона и арматуры:

$$A_g = 3{,}14 \cdot 450^2 \approx 160000\ \text{мм}^2;$$

A_s – площадь сечения стержневой арматуры.

Подставляя соответствующие числовые значения, получаем:

$$N = 1 \cdot 0{,}9 \cdot 15{,}5 \cdot 160000 = 2232000\text{Н} = 2{,}232\text{МН}.$$

В случае круглой колонны все сечение бетона испытывает повышенные радиальные напряжения, и соответственно в любой точке усиленной обоймы колонны бетон имеет повышенную прочность на сжатие. Поэтому вся площадь бетонной колонны эффективно усилена ($A_{ef} = A_g = 160000\text{мм}^2$).

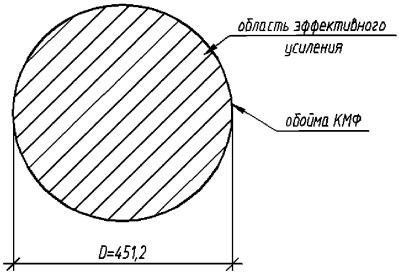


Рисунок В2 – Эффективная область усиления круглой колонны, полностью обернутой композиционными материалами

Таким образом, несущая способность колонны будет определяться по формуле:

$$N_y = R_{bo} A_{ef} + R_s A_s,$$

где R_{bo} – прочность бетона после усиления:

$$R_{bo} = R_b + \beta_{ef} \cdot \beta_f \cdot \beta_l \cdot \sigma_r,$$

β_{ef} – коэффициент эффективности охватывающего усиления (β_{ef}=2); β_f – коэффициент, учитывающий форму колонны (β_f=1 для круглой колонны); σ_r – радиальное напряжение. Для круглой колонны:

$$\sigma_r = \frac{2 \cdot R_{co} \cdot t_c}{D}; \quad (34)$$

R_{co} – расчетное сопротивление растяжению обоймы из композиционного материала;

$$R_{co} = R_f \cdot V_f + R_m \cdot V_m,$$

R_f – нормативная прочность на растяжение композита; V_f – объемное соотношение в композите волокон ($V_f = 0{,}3$); R_m – прочность на растяжение отверждающего полимера; V_m – объемное соотношение в полимере волокон ($V_m = 0{,}7$).

Объемное соотношение $V_f + V_m = 0{,}3 + 0{,}7 = 1$ соблюдено.

Определим нормативное значение сопротивления растяжению композиционного материала R_f:

$$R_f = R_{cf} \cdot \gamma_{c1} \cdot \gamma_{c2} \cdot \gamma_{c3},$$

где γ_{c1} – коэффициент, учитывающий сцепление между композиционным материалом и бетоном.

Т. к. $n \cdot E_c \cdot t_c$=1 ·240000 ·0,234 = 56160 < 180000, то γ_{c1} определяем по следующей формуле:

$$\gamma_{c1} = \frac{1}{60 \cdot \varepsilon_{cd}} \cdot \left(1 - \frac{n \cdot E_c \cdot t_c}{360000}\right) \leq 0{,}9;$$

ε_{cd} – расчетная деформация композиционного материала:

$$\varepsilon_{cd} = \varepsilon_{cf} \cdot \gamma_{c2} \cdot \gamma_{c3} = 0{,}0155 \cdot 0{,}85 \cdot 0{,}85 = 0{,}011,$$

$$\gamma_{c1} = \frac{1}{60 \cdot \varepsilon_{cd}} \cdot \left(1 - \frac{n \cdot E_c \cdot t_c}{360000}\right) = \frac{1}{60 \cdot 0.011} \cdot \left(1 - \frac{1 \cdot 240000 \cdot 0{,}234}{360000}\right) = 1{,}28.$$

Т. к. условие $1{,}34 \leq 0{,}9$ не соблюдено, принимаем значение $\gamma_{c1} = 0{,}9$:

$$R_f = 3800 \cdot 0{,}9 \cdot 0{,}85 \cdot 0{,}85 = 2470{,}95 \text{ МПа}.$$

Расчетное сопротивление растяжению обоймы будет равно:

$$R_{co} = 2470{,}95 \cdot 0{,}3 + 35 \cdot 0{,}7 = 765{,}785 \text{ МПа}.$$

Радиальное напряжение:

$$\sigma_r = \frac{2 \cdot 765{,}785 \cdot 0{,}234}{450} = 0{,}796 \text{ МПа}.$$

Прочность бетона после усиления будет равна:

$$R_{bo} = 15{,}5 + 2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 0{,}796 = 17{,}092 \text{ МПа}.$$

Таким образом, несущая способность центрально-сжатой квадратной колонны обернутой полностью композиционным материалом равна:

$$Ny = 17{,}092 \cdot 160000 = 2734848 \text{ Н} = 2{,}73 \text{ МН}.$$

Пример расчета прямоугольной колонны, усиленной по всей длине углеволокном.

Данный пример расчета следует применять к схеме усиления по общему обертыванию одностолбчатой опоры с ригелем.

В колоннах прямоугольного поперечного сечения часть бетона не испытывает усиления, и только в части площади поперечного сечения образуется ядро бетона, испытывающего повышенные радиальные напряжения. Неусиленные области бетона ограничены арками с углом наклона 45° к грани колонны (рис. В3).

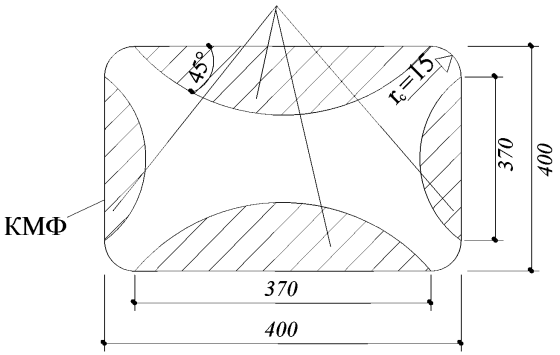


Рисунок В3 – Прямоугольная колонна обернутая по всей длине углеволокном

Несущая способность колонны до ремонта и усиления определяется по результатам диагностических исследований по определению фактических размеров всей конструкции и составляющих ее элементов, а также прочностных свойств существующего бетона и арматуры с учетом их фактического износа:

$$N = N_b + N_s;$$

$$N = \varphi \eta R_b (A_g - A_s) + R_s \cdot A_s ,$$

где η – коэффициент условия работы ($\eta = 1$ при $h > 200$ мм); φ – коэффициент, учитывающий гибкость и характер армирования ($\varphi = 0{,}9$); R_b – расчетное значение сопротивления бетона сжатию; R_s – расчетная прочность стержневой арматуры растяжению; A_g – площадь сечения колонны, включая площадь бетона и арматуры;

$$A_g = 500 \cdot 400 = 200000 \text{мм}^2;$$

A_s – площадь сечения стержневой арматуры.

Подставляя соответствующие числовые значения, получаем:

$$N = 0{,}9 \cdot 15{,}5 \cdot 200000 = 2790000 \text{ Н} = 2{,}79 \text{ МН}.$$

Несущая способность центрально сжатой колонны после усиления обоймой из композиционного материала определяется по формуле:

$$N_y = \delta R_b A_{bu} + R_{bo} A_{ef} + R_s A_s ,$$

где δ – коэффициент, характеризующий отношение остаточной прочности бетона к его прочности на сжатие, зависит от деформационных свойств самого бетона,

наличия добавок в его составе, особенно пластифицирующих, условий работы бетона в конструкции, агрессивного воздействия окружающей среды. Для предварительной оценки несущей способности усиленной конструкции можно с определенным запасом рекомендовать принимать δ= 0,2 – 0,3, как для хрупких тел; R_b – расчетное значение сопротивления бетона сжатию ($R_b = 15{,}5$ МПа); A_{bu} – полная площадь сечения бетона, не охваченного усилием;

$$A_{bu} = \frac{b'^2+h'^2}{3} = \frac{470^2+370^2}{3} = 73880 \text{ мм}^2;$$

$$b' = b - 2r_c = 500 - 2 \cdot 15 = 470 \text{ мм};$$

$$h' = h - 2r_c = 400 - 2 \cdot 15 = 370 \text{ мм};$$

$r_c = 15$ мм – радиус закругления; b', h' – размеры частей колонн, не охваченных усилением; R_{bo} – прочность бетона после усиления:

$$R_{bo} = R_b + \beta_{ef} \cdot \beta_f \cdot \beta_l \cdot \sigma_r,$$

β_{ef} – коэффициент эффективности охватывающего усиления (β_{ef}=2); β_f – коэффициент, учитывающий форму колонны.

Для прямоугольной колонны значение коэффициента β_f определяется по следующей зависимости:

$$\beta_f = \frac{A_{ef}}{(A_g - A_s)},$$

A_{ef} – площадь эффективно усиленного ядра бетона прямоугольной колонны;

$$A_{ef} = A_g - A_s - A_{bu} - (4-\pi) \cdot r_c^2,$$

$$A_{ef} = A_g - A_s - A_{bu} - (4-\pi) \cdot r_c^2 = 200000 - 0 - 73880 - (4 - 3{,}14) \cdot 15^2 = 125926{,}5 \text{ мм}^2$$

$$\beta_f = \frac{125926{,}5}{200000} = 0{,}63;$$

σ_r – радиальное напряжение. Для прямоугольной колонны:

$$\sigma_r = \frac{2 \cdot R_{co} \cdot t_c}{\sqrt{b^2+h^2}},$$

R_{co} – расчетное сопротивление растяжению обоймы из композиционного материала:

$$R_{co} = R_f \cdot V_f + R_m \cdot V_m;$$

R_f-нормативная прочность на растяжение композита; V_f – объемное соотношение в композите волокон ($V_f = 0{,}3$); R_m – прочность на растяжение отверждающего полимера; V_m – объемное соотношение в полимере волокон ($V_m = 0{,}7$)

Объемное соотношение $V_f + V_m = 0{,}3 + 0{,}7 = 1$ соблюдено.

Определим нормативное значение сопротивления растяжению композиционного материала R_f:

$$R_f = R_{cf} \cdot \gamma_{c1} \cdot \gamma_{c2} \cdot \gamma_{c3},$$

где γ_{c1} – коэффициент, учитывающий сцепление между композиционным материалом и бетоном.

Т. к. $n \cdot E_c \cdot t_c$=1·240000·0.234=56160<180000,то γ_{c1} определяем по следующей формуле:

$$\gamma_{c1} = \frac{1}{60 \cdot \varepsilon_{cd}} \cdot \left(1 - \frac{n \cdot E_c \cdot t_c}{360000}\right) \leq 0{,}9;$$

ε_{cd} – расчетная деформация композиционного материала:

$$\varepsilon_{cd} = \varepsilon_{cf} \cdot \gamma_{c2} \cdot \gamma_{c3} = 0{,}0155 \cdot 0{,}85 \cdot 0{,}85 = 0{,}011;$$

$$\gamma_{c1} = \frac{1}{60 \cdot \varepsilon_{cd}} \cdot \left(1 - \frac{n \cdot E_c \cdot t_c}{360000}\right) = \frac{1}{60 \cdot 0{,}011} \cdot \left(1 - \frac{1 \cdot 240000 \cdot 0{,}234}{360000}\right) = 1{,}28.$$

Т. к. условие $1{,}34 \leq 0{,}9$ не соблюдено, принимаем значение $\gamma_{c1} = 0{,}9$:

$$R_f = 3800 \cdot 0{,}9 \cdot 0{,}85 \cdot 0{,}85 = 2470{,}95\text{МПа}.$$

Расчетное сопротивление растяжению обоймы будет равно:

$$R_{co} = 2470{,}95 \cdot 0{,}3 + 35 \cdot 0{,}7 = 765{,}785\text{МПа}.$$

Радиальное напряжение:

$$\sigma_r = \frac{2 \cdot 765{,}785 \cdot 0{,}234}{\sqrt{500^2 + 400^2}} = 0{,}56 \text{ МПа}.$$

Прочность бетона после усиления будет равна:

$$R_{bo} = 15{,}5 + 2 \cdot 0{,}63 \cdot 1 \cdot 0{,}56 = 16{,}21 \text{ МПа}.$$

Таким образом, несущая способность центрально-сжатой квадратной колонны, обернутой полностью композиционным материалом, равна:

$$N_y = 0{,}9 \cdot 15{,}5 \cdot 73880 + 16{,}21 \cdot 125962{,}5 = 3072478{,}125 \text{ Н} = 3{,}07 \text{ МН}.$$

Пример расчета квадратной колонны, усиленной композиционным материалом шириной 300 мм с шагом 450 мм.

Данный пример расчета следует применять к следующим схемам усиления:

- обертывание композитным материалом для однорядных опор стоечного типа;

- обертывание материалом опор-стенок;
- обертывание массивно-столбчатых опор;
- обертывание однорядной стоечной опоры со встроенным ригелем.

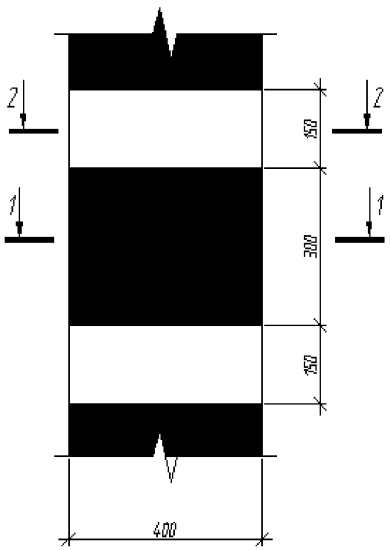


Рисунок В4 – Схема внешнего армирования квадратной колонны

Сечение колонны по обойме (1-1) представлено на рисунке. Неусиленные области бетона ограничены арками с углом наклона 45° к грани колонны.

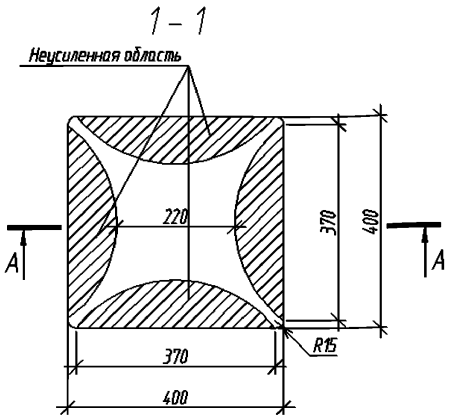


Рисунок В5 – Сечение колонны 1-1

При частичном усилении колонны по ее длине эффективность усиления не достигается в полной мере на участке, где действует арочный эффект. Арочный эффект действует на участке между обручами усиления и имеет форму параболы с начальным углом наклона около 45° (рисунок В6).

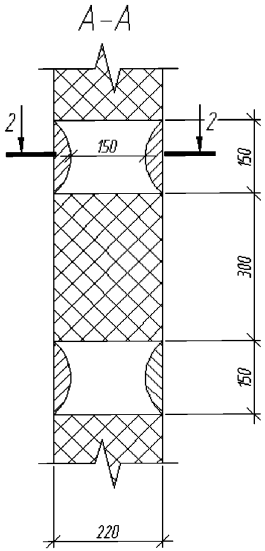


Рисунок В6 – Схема распределения областей бетона по длине квадратной колонны усиленной с определенным шагом

В итоге получается, что при усилении квадратной колонны композиционными материалами шириной 300 мм и расстоянием между ними 50 мм, эффективная область усиления будет иметь вид, представленный на рисунке В7.

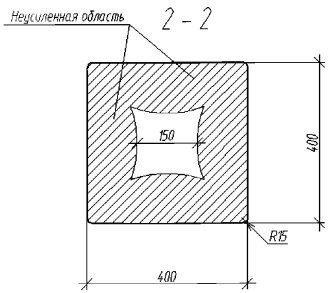


Рисунок В7 – Эффективная область квадратной колонны усиленной композиционными материалами с определенным шагом

Несущая способность колонны до ремонта и усиления определяется по результатам диагностических исследований по определению фактических размеров всей конструкции и составляющих ее элементов, а также прочностных свойств существующего бетона и арматуры с учетом их фактического износа:

$$N = N_b + N_s;$$

$$N = \varphi \eta R_b (A_g - A_s) + R_s \cdot A_s ,$$

где η – коэффициент условия работы ($\eta = 1$ при $h > 200$ мм); φ – коэффициент,учитывающий гибкость и характер армирования($\varphi = 0{,}9$); R_b – расчетное значение сопротивления бетона сжатию; R_s – расчетная прочность стержневой арматуры растяжению; A_g – площадь сечения колонны, включая площадь бетона и арматуры:

$$A_g = 400 \cdot 400 = 160000 \text{мм}^2;$$

A_s – площадь сечения стержневой арматуры.

Подставляя соответствующие числовые значения, получаем:

$$N = 0{,}9 \cdot 15{,}5 \cdot 160000 = 22320000 \text{ Н} = 2{,}232 \text{ МН}.$$

Несущая способность центрально сжатой колонны после усиления обоймой из композиционного материала определяется по формуле:

$$N_y = \delta R_b A_{bu} + R_{bo} A_{ef} + R_s A_s ,$$

где δ – коэффициент, характеризующий отношение остаточной прочности бетона к его прочности на сжатие, зависит от деформационных свойств самого бетона, наличия добавок в его составе, особенно пластифицирующих, условий работы бетона в конструкции, агрессивного воздействия окружающей среды. Для предварительной оценки несущей способности усиленной конструкции можно с определенным запасом рекомендовать принимать δ= 0,2 – 0,3, как для хрупких тел; R_b – расчетное значение сопротивления бетона сжатию ($R_b = 15{,}5$ МПа);A_{bu} – полная площадь сечения бетона, не охваченного усилием;

$$A_{bu} = A_g - A_{ef};$$

где A_{ef} – площадь эффективно усиленного ядра бетона квадратной колонны;

$$A_{ef} = 251{,}8 \text{ см}^2 = 25180 \text{мм}^2.$$

Тогда $A_{bu} = 160000 - 25180 = 134820 \text{ мм}^2$.

R_{bo} – прочность бетона после усиления:

$$R_{bo} = R_b + \beta_{ef} \cdot \beta_f \cdot \beta_l \cdot \sigma_r,$$

β_{ef}-коэффициент эффективности охватывающего усиления (β_{ef}=2); β_f – коэффициент, учитывающий форму колонны.

Для квадратной колонны значение коэффициента β_f определяется по следующей зависимости:

$$\beta_f = \frac{A_{ef}}{(A_g - A_s)} = \frac{25180}{160000} = 0{,}157;$$

β_f – коэффициент, учитывающий сплошность усиления колонны по ее длине:

$$\beta_l = \frac{A_{ef}}{A_g} = \frac{25180}{160000} = 0{,}157;$$

σ_r – радиальное напряжение. Для квадратной колонны:

$$\sigma_r = \frac{2 \cdot R_{co} \cdot t_c}{\sqrt{b^2 + h^2}};$$

R_{co} – расчетное сопротивление растяжению обоймы из композиционного материала:

$$R_{co} = R_f \cdot V_f + R_m \cdot V_m;$$

R_f – нормативная прочность на растяжение композита; V_f – объемное соотношение в композите волокон ($V_f = 0{,}3$); R_m – прочность на растяжение отверждающего полимера; V_m – объемное соотношение в полимере волокон ($V_m = 0{,}7$).

Объемное соотношение $V_f + V_m = 0{,}3 + 0{,}7 = 1$ соблюдено.

Определим нормативное значение сопротивления растяжению композиционного материала R_f:

$$R_f = R_{cf} \cdot \gamma_{c1} \cdot \gamma_{c2} \cdot \gamma_{c3},$$

где γ_{c1} – коэффициент, учитывающий сцепление между композиционным материалом и бетоном.

Т. к. $n \cdot E_c \cdot t_c$=1$\cdot$ 240000 $\cdot$ 0,234 = 56160 < 180000, то γ_{c1} определяем по следующей формуле:

$$\gamma_{c1} = \frac{1}{60 \cdot \varepsilon_{cd}} \cdot \left(1 - \frac{n \cdot E_c \cdot t_c}{360000}\right) \leq 0{,}9;$$

ε_{cd} – расчетная деформация композиционного материала:

$$\varepsilon_{cd} = \varepsilon_{cf} \cdot \gamma_{c2} \cdot \gamma_{c3} = 0{,}0155 \cdot 0{,}85 \cdot 0{,}85 = 0{,}011;$$

$$\gamma_{c1} = \frac{1}{60 \cdot \varepsilon_{cd}} \cdot \left(1 - \frac{n \cdot E_c \cdot t_c}{360000}\right) = \frac{1}{60 \cdot 0{,}011} \cdot \left(1 - \frac{1 \cdot 240000 \cdot 0{,}234}{360000}\right) = 1{,}28.$$

Т. к. условие $1{,}34 \leq 0.9$ не соблюдено, принимаем значение $\gamma_{c1} = 0{,}9$:

$$R_f = 3800 \cdot 0{,}9 \cdot 0{,}85 \cdot 0{,}85 = 2470{,}95 \text{ МПа}.$$

Расчетное сопротивление растяжению обоймы будет равно:

$$R_{co} = 2470{,}95 \cdot 0{,}3 + 35 \cdot 0{,}7 = 765{,}785 \text{ МПа}.$$

Радиальное напряжение:

$$\sigma_r = \frac{2 \cdot 765{,}785 \cdot 0{,}234}{\sqrt{400^2 + 400^2}} = 0{,}63 \text{ МПа}.$$

Прочность бетона после усиления будет равна:

$$R_{bo} = 15{,}5 + 2 \cdot 0{,}16 \cdot 0{,}16 \cdot 0{,}63 = 15{,}55 \text{ МПа}.$$

Таким образом, несущая способность центрально-сжатой квадратной колонны обернутой полностью композиционным материалом равна:

$$N_y = 0{,}9 \cdot 15{,}5 \cdot 134820 + 15{,}55 \cdot 25180 = 227288{,}125 \text{ Н} = 2{,}27 \text{ МН}.$$

Пример расчета круглой колонны, усиленной композиционным материалом шириной 200 мм с шагом 300 мм.

Рассмотрим круглую железобетонную колонну с теми же геометрическими характеристиками, что и квадратную.

Данный пример расчета следует применять к следующим схемам усиления:

- обертывание композитным материалом для однорядных опор стоечного типа;

- обертывание массивно-столбчатых опор;

- обертывание однорядной стоечной опоры со встроенным ригелем.

Несущая способность колонны до ремонта и усиления определяется по результатам диагностических исследований по определению фактических размеров всей конструкции и составляющих ее элементов, а также прочностных свойств существующего бетона и арматуры с учетом их фактического износа:

$$N = \varphi \eta R_b (A_g - A_s) + R_s \cdot A_s ,$$

где η – коэффициент условия работы ($\eta = 1$ при $h > 200$ мм); φ – коэффициент, учитывающий гибкость и характер армирования ($\varphi = 0{,}9$); R_b – расчетное значение сопротивления бетона сжатию; R_s – расчетная прочность стержневой арматуры растяжению; A_g – площадь сечения колонны, включая площадь бетона и арматуры:

$$A_g = 3{,}14 \cdot 450^2 \approx 160000 \text{ мм}^2;$$

A_s – площадь сечения стержневой арматуры.

Подставляя соответствующие числовые значения, получаем:

$$N = 1 \cdot 0{,}9 \cdot 15{,}5 \cdot 160000 = 2232000 \text{ Н} = 2{,}232 \text{ МН}.$$

При частичном усилении круглой колонны по ее длине эффективность усиления не достигается в полной мере на участке, где действует арочный эффект. Арочный эффект действует на участке между лентами и имеет форму параболы с начальным углом наклона около 45°.

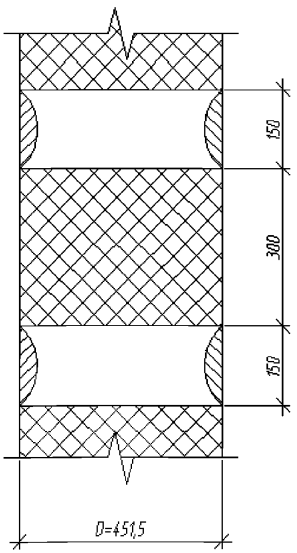


Рисунок В8 – Схема усиления круглой колонны

Таким образом, несущая способность колонны будет определяться по формуле:

$$N_y = \delta R_b A_{bu} + R_{bo} A_{ef} + R_s A_s,$$

где R_{bo} – прочность бетона после усиления:

$$R_{bo} = R_b + \beta_{ef} \cdot \beta_f \cdot \beta_l \cdot \sigma_r,$$

β_{ef} – коэффициент эффективности охватывающего усиления (β_{ef} = 2); β_f – коэффициент, учитывающий форму колонны (β_f = 1 для круглой колонны); β_l – коэффициент, учитывающий сплошность усиления колонны по ее длине:

$$\beta = (1 - \frac{s'}{2D})^2,$$

где $s' = s - b_c$ – расстояние между обручами армирования ($s' = 150$ *мм*); b_c – ширина полосы композиционного материала ($b_c = 300$ мм);

$$\beta_l = \left(1 - \frac{150}{2 \cdot 450}\right) = 0{,}69;$$

A_{ef} – площадь эффективно усиленного ядра бетона круглой колонны:

$$A_{ef} = \frac{\pi}{4}(D - \frac{s'}{2})^2,$$

где s – расстояние между осями полос армирования ($s = 450$ мм);

$$A_{ef} = \frac{3{,}14}{4}\left(450 - \frac{150}{2}\right)^2 = 110390{,}6 \text{мм}^2;$$

A_{bu} – площадь сечения бетона, не охваченного усилением:

$$A_{bu} = A_g - A_{ef} = 160000 - 110390{,}6 = 49609{,}4 \text{мм}^2$$

σ_r – радиальное напряжение. Для круглой колонны:

$$\sigma_r = \frac{2 \cdot R_{co} \cdot t_c}{D};$$

R_{co} – расчетное сопротивление растяжению обоймы из композиционного материала:

$$R_{co} = R_f \cdot V_f + R_m \cdot V_m,$$

R_f – нормативная прочность на растяжение композита; V_f – объемное соотношение в композите волокон ($V_f = 0{,}3$); R_m – прочность на растяжение отверждающего полимера; V_m – объемное соотношение в полимере волокон ($V_m = 0{,}7$).

Объемное соотношение $V_f + V_m = 0{,}3 + 0{,}7 = 1$ соблюдено.

Определим нормативное значение сопротивления растяжению композиционного материала R_f:

$$R_f = R_{cf} \cdot \gamma_{c1} \cdot \gamma_{c2} \cdot \gamma_{c3},$$

где γ_{c1} – коэффициент, учитывающий сцепление между композиционным материалом и бетоном.

Т. к. $n \cdot E_c \cdot t_c$ = 1 · 240000 · 0,234 = 56160 < 180000, то γ_{c1} определяем по следующей формуле:

$$\gamma_{c1} = \frac{1}{60 \cdot \varepsilon_{cd}} \cdot \left(1 - \frac{n \cdot E_c \cdot t_c}{360000}\right) \leq 0{,}9;$$

ε_{cd} – расчетная деформация композиционного материала:

$$\varepsilon_{cd} = \varepsilon_{cf} \cdot \gamma_{c2} \cdot \gamma_{c3} = 0{,}0155 \cdot 0{,}85 \cdot 0{,}85 = 0{,}011,$$

$$\gamma_{c1} = \frac{1}{60 \cdot \varepsilon_{cd}} \cdot \left(1 - \frac{n \cdot E_c \cdot t_c}{360000}\right) = \frac{1}{60 \cdot 0{,}011} \cdot \left(1 - \frac{1 \cdot 240000 \cdot 0{,}234}{360000}\right) = 1{,}28.$$

Т. к. условие $1{,}34 \leq 0{,}9$ не соблюдено, принимаем значение $\gamma_{c1} = 0{,}9$:

$$R_f = 3800 \cdot 0{,}9 \cdot 0{,}85 \cdot 0{,}85 = 2470{,}95 \text{ МПа}.$$

Расчетное сопротивление растяжению обоймы будет равно:

$$R_{co} = 2470{,}95 \cdot 0{,}3 + 35 \cdot 0{,}7 = 765{,}785 \text{ МПа}.$$

Радиальное напряжение:

$$\sigma_r = \frac{2 \cdot 765{,}785 \cdot 0{,}234}{450} = 0{,}796 \text{ МПа}.$$

Прочность бетона после усиления будет равна:

$$R_{bo} = 15{,}5 + 2 \cdot 1 \cdot 0{,}69 \cdot 0{,}796 = 16{,}6 \text{ МПа}.$$

Таким образом, несущая способность центрально-сжатой квадратной колонны обернутой полностью композиционным материалом равна:

$$N_y = 0{,}9 \cdot 15{,}5 \cdot 49609{,}4 + 16{,}6 \cdot 110390{,}6 = 2524535{,}09 \text{ Н} = 2{,}52 \text{ МН}.$$

Сведем результаты расчетов рассмотренных схем усиления в таблицу В3.

Таблица В3. Результаты расчетов усиления колонн композиционными материалами

Схема расположения	Схемы усиления	Форма поперечного сечения колонны	Несущая способность до усиления, кН	Несущая способность после усиления, кН	Коэффициент усиления $\frac{N_{ус}}{N}$
Полностью обернутая	- общее обертывание композитным материалом для однорядных опор стоечного типа; - общее обертывание материалом опор-стенок; - общее обертывание массивно-столбчатых опор; - общее обертывание однорядной стоечной опоры со встроенным ригелем	квадратная	2,232	2,38	1,06
	- общее обертывание композитным материалом для однорядных опор стоечного типа; - общее обертывание массивно-столбчатых опор; - общее обертывание однорядной стоечной опоры со встроенным ригелем	круглая	2,232	2,73	1,22
	- общее обертывание одностолбчатой опоры с ригелем	прямоугольная	2,79	3,07	1,1
Обернутая с определенным	- обертывание композитным материалом для однорядных опор	квадратная	2,27	2,27	1,02

шагом	стоечного типа; - обертывание материалом опор-стенок; - обертывание массивно-столбчатых опор; - бертывание однорядной стоечной опоры со встроенным ригелем				
	- обертывание композитным материалом для однорядных опор стоечного типа; - обертывание массивно-столбчатых опор; - обертывание однорядной стоечной опоры со встроенным ригелем	круглая	2,24	2,52	1,13

Приложение Г

Пример расчета свода железобетонного купола, усиленного сеткой на основе углеродных волокон

Исходные данные: купол свода представлен монолитной железобетонной конструкцией, воспринимающей следующие нагрузки.

Штукатурка 20мм = 0,0396т/м².

Гидроизоляция 4 слоя – 10 мм = 0,0176т/м².

Свод 80 мм.

Штукатурка 70 мм = 0,1386 т/м².

Всего: 0,0396 + 0,0176 + 0,1386 = 0,1958 т/м².

Грузовая площадь: 11,65 м².

Нагрузка от собственного веса кровли 0,12 т/м².

На одну площадку опирания размером 0,25 × 0,25 м ((11,65×0,12)/2)/(0,25×0,25) = 11,1840 т/м².

Полезная кратковременная на чердачное перекрытие (0,07×1,4) = = 0,0980 т/м². На одну пластинку 6,0891 т/м².

Снеговая нагрузка = 0,18т/м². На одну пластинку 16,7760 т/м².

Таблица Г1 – Значения действующих нагрузок на конструкцию купола

	Наименование нагрузки	Значение, yf=1	Коэфф. надежн. по нагр., y_f	Значение, y_f > 1	Примечание
1	Кровельный рулонный гидроизоляционный ковёр, 10мм, Y=1400кг/м³	14,00	1,30	18,20	кг/м²
2	Листы плоские асбестоцементные 10мм, Y=1800кг/м³	1,80	1,10	1,98	кг/м²
3	Утеплитель 200мм, Y=150кг/м³	30,00	1,30	39,00	кг/м²
4	Пароизоляция, 4мм, Y=1400кг/м³	5,60	1,30	7,28	кг/м²
5	Профиль Т153-120L-850-1.0-280	14,40	1,05	15,12	кг/м²
6	Итого:	65,80	1,22	81,58	кг/м²
7	Нормативная нагрузка на кровлю	50,00	1,30	65,00	кг/м²
8	Снеговая нагрузка	126,00	1,4286	180,00	кг/м²
9	Итого:	305,00	1,3531	412,70	кг/м²

Узловые нагрузки:

81,58×6 = 0,4895 т/м ×1,5 = 0,7342 т ×0,75 = 0,3671 т

81,58×4,5 = 0,3671 т/м ×1,5 = 0,5507 т ×0,75 = 0,2753 т

81,58×3,0 = 0,2447 т/м ×1,5 = 0,3671 т ×0,75 = 0,1836 т

81,58×2,25 = 0,1836 т/м ×1,5 = 0,2753 т ×0,75 = 0,1377 т

180,00×6 = 1,0800 т/м ×1,5 = 1,6200 т ×0,75 = 0,8100 т

180,00×4,5 = 0,8100 т/м ×1,5 = 1,2150 т ×0,75 = 0,6075 т

180,00×3,0 = 0,5400 т/м ×1,5 = 0,8100 т ×0,75 = 0,4050 т

180,00×2,25 = 0,4050 т/м ×1,5 = 0,6075 т ×0,75 = 0,3038 т

Купол усиливается сеткой на основе углеродных волокон со следующими характеристиками:

- упрочняющая сетка из углеродного волокна SGL C30 T050 EPY вес 600 г/м²;

- предел прочности на растяжение – 3.2 Гпа;

- модуль упругости – 229 Гпа;

- относительное удлинение – 1,25–1,6%.

Расчеты усиления производились на программном комплексе ЛИРА-САПР 2013.

Расчетная схема представлена на Г1.

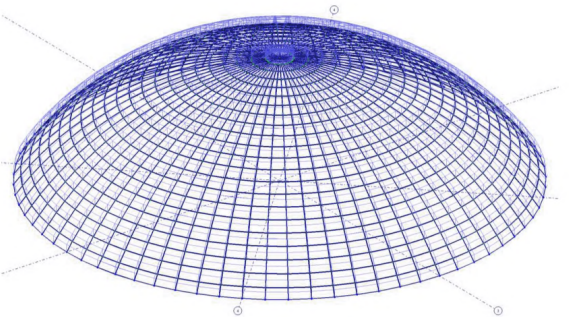


Рисунок Г1 – Расчетная схема конструкции свода купола, усиленного сеткой на основе углеродных волокон

Результаты расчетов по определению внутренних усилий представлены на рис Г2 – Г5.

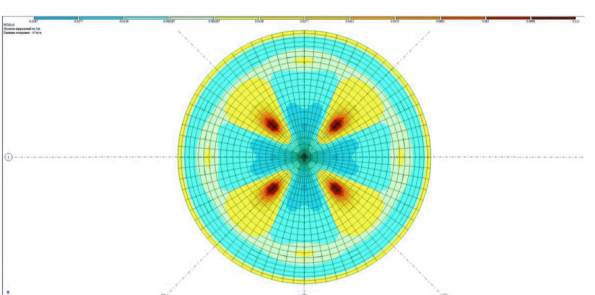


Рисунок Г2 – Мозаика напряжений M_x

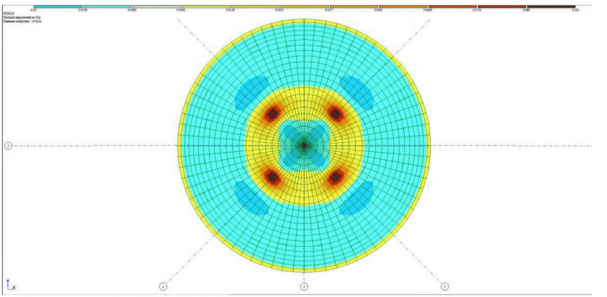


Рисунок Г3 – Мозаика напряжений M_y

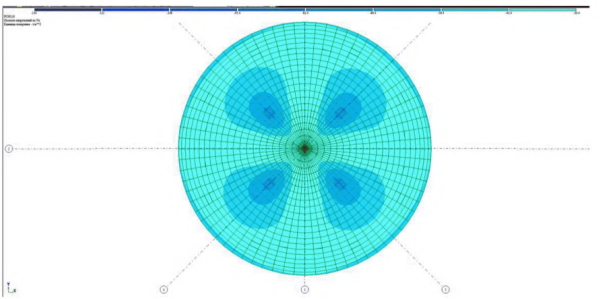


Рисунок Г4 – Мозаика напряжений N_x

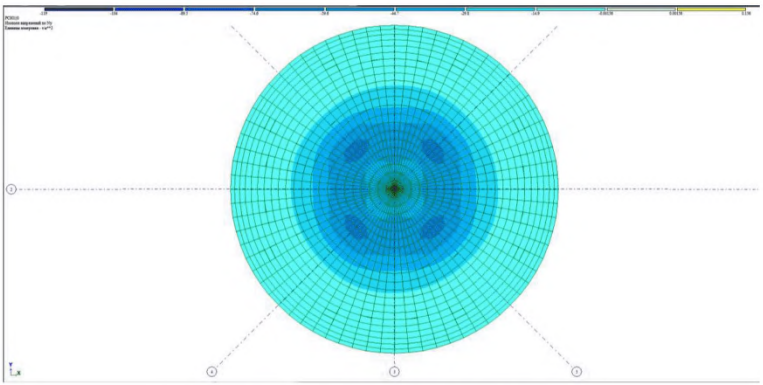


Рисунок Г5 – Мозаика напряжений N_y

Результаты моделирования показали, что после установки армирующей сетки плотностью 600 г/м^2 в нижней зоне значения напряжений снизились примерно в 3 раза.

Ключевые слова: внешнее армирование, композиционный материал, ремонт и усиление, ламинат, холст, железобетонные конструкции, адгезионный состав, система, проектирование, технология работ, качество, безопасность.

gost.e-ecolog.ru