

Руководство по проектированию и строительству наружных композитных стекловолоконных полимерных систем (FRP), предназначенных для повышения прочности бетонных конструкций. Составлено комитетом 440 Американского Института Бетона

*В серии **Emerging Technology Series (современные технологии)**, выпускаемой Американским Институтом Бетона, приводится описание новейших технологий и даются инструкции по их применению. В основе сведений и рекомендаций лежат результаты проведенных испытаний, технические отчеты, имеющийся опыт применения и мнение членов комитета. Уровень детализации информации и рекомендаций по применению новейших технологий может быть меньше, чем уровень проработки технологий, появившихся ранее. Ниже определены аспекты, требующие проведения дальнейших исследований. Представленная профессиональная информация ограничена рамками настоящего документа. Выводы необходимо основывать на надлежащем применении данной новейшей технологии.*

	Sami H. Rizkalla Председатель	John P. Busel Секретарь	
Charles E. Bakis	Ali Ganjehlou	Damian I. Kachlakev	Morris Schupack
P. №. Balaguru	Duane J. Gee	Vistasp M. Karbhari	David W. Scott
Craig A. Ballinger	T. Russell Gentry	Howard S. Kliger	Rajan Sen
Lawrence C. Bank	Arie Gerritse	James G. Korff	Mohsen A. Shahawy
Abdeljelil Belarbi	Karl Gillette	Michael W. Lee	Carol K. Shield
Brahim Benmokrane	William J. Gold*	Ibrahim Mahfouz	Khaled A. Soudki
Gregg J. Blaszak*	Charles H. Goodspeed, III	Henry N. Marsh, Jr.	Luc R. Taerwe
Gordon L. Brown, Jr.	Nabil F. Grace	Orange S. Marshall	Jay Thomas
Vicki L. Brown	Mark F. Green	Amir Mirmiran	Houssam A. Toutanji
Thomas I. Campbell	Mark E. Greenwood	Ayman S. Mosallam	Taketo Uomoto
Charles W. Dolan	Doug D. Gremel	Antoine E. Naaman	Miroslav Vadovic
Dat Duthinh	Michael S. Guglielmo	Antonio Nanni	David R. Vanderpool
Rami M. Elhassan	Issam E. Harik	Kenneth Neale	Milan Vatovec
Salem S. Faza	Mark P. Henderson	Edward F. O'Neil, III	Stephanie L. Walkup
Edward R. Fyfe	Bohdan N. Horeczko	Max L. Porter	David White
David M. Gale	Srinivasa L. Iyer		

*Сопредседатели комитета-разработчика настоящего документа.
Примечание: выражаем благодарность члену-корреспонденту комитета Полу Келли.

Композитные стекловолоконные полимерные системы (FRP-системы), предназначенные для повышения прочности бетонных конструкций, являются альтернативой таким традиционным технологиям, как обшивка стальными листами, увеличение поперечного сечения и применение наружных растяжек. В данных системах стекловолоконные композитные полимерные материалы (FRP) используются в качестве наружной облицовки конструкций. Подобные материалы имеют ряд преимуществ

Отчеты, практические рекомендации, комментарии и советы Американского Института Бетона предназначены для использования в ходе планирования, проектирования, изготовления и технического контроля конструкций. Настоящий документ рассчитан на специалистов, способных оценить его значимость, границы и рекомендации, а также для тех, кто осознает ответственность за использование представленной в нем информации. Американский Институт Бетона не несет ответственности за использование данных материалов, а также за убытки, возникающие ввиду такого использования.

Использование настоящего документа в качестве основания при составлении контрактов запрещено. Для включения пунктов настоящего документа в контрактную документацию их формулировки должны быть переработаны инженером или архитектором.

перед традиционными методами армирования: они обладают малой массой, довольно легко монтируются и не подвергаются воздействию коррозии. Из-за специфики характеристик материалов, поведения армированных элементов, а также различных аспектов применения подобных систем, необходимо следовать особым рекомендациям. Ниже представлены общие сведения по истории появления и применения систем FRP-систем, приведено описание уникальных характеристик композитного материала, а также даны рекомендации по проектированию, строительству и техническому контролю систем FRP, используемых для повышения прочности бетонных конструкций. В основе руководства лежит информация, полученная в ходе международных экспериментальных исследований, анализа и практического применения систем FRP, используемых для повышения прочности бетонных конструкций.

Ключевые слова: амидное волокно; мосты; здания; углеродное волокно; бетон; коррозия; ширина трещин; растрескивание; циклические нагрузки; прогибы; длина зоны анкеровки; стойкость к сейсмическим нагрузкам; усталость; стекловолоконные полимеры; изгиб; стекловолокно; срез; напряжения; расчет конструкций; расчет прочности; временные параметры; кручение

ACI 440.2R-02 вступает в силу 11, июля 2002 г.
Авторское право © 2002, Американский Институт бетона.

Все права защищены, включая права воспроизведения и использования в любой форме и любыми способами, включая копирование любым фотографическим процессом, или электронными или механическими приборами, печать, в письменной или устной форме или запись для последующего звукового или визуального воспроизведения, а также использования в любой системе накопления знаний или системе поиска или приборах, для чего необходимо получение письменного разрешения правообладателей.

СОДЕРЖАНИЕ

ЧАСТЬ 1—ОБЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ

ГЛАВА 1—ВВЕДЕНИЕ

- 1.1—Область применения и границы
- 1.2—Варианты применения и использования
- 1.3—Использование патентованных систем FRP
- 1.4—Определения и сокращения
- 1.5—Используемые обозначения

ГЛАВА 2—ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

- 2.1—История разработки FRP-систем
- 2.2—Доступные для коммерческого применения системы FRP с внешней связью

ЧАСТЬ 2—МАТЕРИАЛЫ

ГЛАВА 3—КОМПОНЕНТЫ И СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ FRP

- 3.1—Компоненты систем FRP
- 3.2—Физические свойства
- 3.3—Механические свойства и характеристики
- 3.4—Характер изменений материала во времени
- 3.5—Долговечность
- 3.6—Оценка пригодности систем FRP

ЧАСТЬ 3—СТРОИТЕЛЬНЫЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

ГЛАВА 4—ТРАНСПОРТИРОВКА, ХРАНЕНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ

- 4.1—Транспортировка
- 4.2—Хранение
- 4.3—Использование

ГЛАВА 5—МОНТАЖ

- 5.1—Компетентность подрядчика
- 5.2—Температура, влажность воздуха и поверхности
- 5.3—Оборудование
- 5.4—Подготовка и ремонт поверхности
- 5.5—Подготовка смол
- 5.6—Нанесение компонентов
- 5.7—Подгонка материала
- 5.8—Использование многослойных покрытий и перехлестов
- 5.9—Отверждение смол
- 5.10—Теплоизоляция

ГЛАВА 6—ТЕХНИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ, АНАЛИЗ И ПРИЕМКА

- 6.1—Технический контроль
- 6.2—Анализ и приемка

ГЛАВА 7—ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ И РЕМОНТ

- 7.1—Общая информация
- 7.2—Контроль и экспертиза
- 7.3—Ремонт FRP-системы
- 7.4—Ремонт поверхностного покрытия

ЧАСТЬ 4—ПРОЕКТНЫЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

ГЛАВА 8—ОБЩАЯ ОЦЕНКА ПРОЕКТА

- 8.1—Принцип проектирования
- 8.2—Пределы усиления

8.3—Выбор систем FRP

8.4—Конструкционные свойства материалов

ГЛАВА 9—УСИЛЕНИЕ ПРОЧНОСТИ НА ИЗГИБ

- 9.1—Общие условия
- 9.2—Номинальная прочность
- 9.3—Пластичность
- 9.4—Эксплуатационная надежность
- 9.5—Предельные значения разрушения при ползучести и усталостного напряжения
- 9.6—Приложение к отдельно усиленному участку прямоугольного сечения

ГЛАВА 10—УСИЛЕНИЕ ПРЕДЕЛА ПРОЧНОСТИ НА СДВИГ

- 10.1—Общие замечания
- 10.2—Схемы обертывания
- 10.3—Номинальный предел прочности на сдвиг
- 10.4—Воздействие системы FRP на предел прочности на сдвиг

ГЛАВА 11—ОСЕВОЕ СЖАТИЕ, НАПРЯЖЕНИЕ И ПОВЫШЕНИЕ ПЛАСТИЧНОСТИ

- 11.1—Осевое сжатие
- 11.2—Предел прочности на разрыв
- 11.3—Пластичность

ГЛАВА 12— ПОДРОБНЫЕ ДАННЫЕ АРМИРОВАНИЯ

- 12.1—Сцепление и расслаивание
- 12.2—Детализация перекрытий и соединений внахлест

ГЛАВА 13—ЧЕРТЕЖИ, СПЕЦИФИКАЦИИ И ПЕРЕДАЧА ДОКУМЕНТОВ НА РАССМОТРЕНИЕ

- 13.1—Технические требования
- 13.2—Чертежи и спецификации
- 13.3—Передача документов на рассмотрение

ЧАСТЬ 5—ПРИМЕРЫ РАСЧЕТОВ

ГЛАВА 14—ПРИМЕРЫ РАСЧЕТОВ

- 14.1—Расчет предела прочности на растяжение системы FRP
- 14.2—Расчет предела прочности на растяжение системы FRP
- 14.3—Усиление прочности на изгиб внутренней балки
- 14.4—Сдвигающее усилие, повышающее прочность внутренней Т-образной балки
- 14.5—Сдвигающее усилие, повышающее прочность наружной колонны

ГЛАВА 15—СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 15.1—Справочные стандарты и отчеты
- 15.2—Материалы, использованные при экспертизе
- 15.3—Прочая справочная литература

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ А—МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА УГЛЕРОДНЫХ, СТЕКЛЯННЫХ И АРАМИДНЫХ ВОЛОКОН

ПРИЛОЖЕНИЕ В—СПРАВКА КСАТЕЛЬНО СТАНДАРТНЫХ МЕТОДОВ ИСПЫТАНИЙ

**ПРИЛОЖЕНИЕ С—КАСАТЕЛЬНО НАПРАВЛЕНИЯ
ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ****ЧАСТЬ 1—ОБЩАЯ ИНФОРМАЦИЯ
ГЛАВА 1—ВВЕДЕНИЕ**

Традиционно для повышения расчетной нагрузки существующих бетонных конструкций, замедления скорости естественного разрушения и повышения пластичности используются стандартные материалы и такие способы строительства, как облицовка стальными листами, установка стальных или бетонных рубашек, закрепление наружных растяжек и т.д.

Альтернативой подобным технологиям и методикам является применение композитных материалов, в которых волокна скреплены эпоксидной смолой, - т. н. стекловолоконных полимеров или FRP. Ниже под FRP-системой подразумеваются все волокна и смолы, используемые для создания композитного ламинированного материала, любые смолы, применяемые для его крепления на бетонной поверхности, а также все составы, предназначенные для их защиты. Покрытия, выполняющие исключительно эстетическую функцию, не входят в объем FRP-систем.

Стекловолоконные армирующие материалы имеют малую массу, не подвержены коррозии и обладают высокой прочностью на растяжение. Кроме того, они выпускаются в различном исполнении - от промышленных ламинатов до сухих волоконных листов, предназначенных для обертывания конструкции перед нанесением полимерных смол. Относительно малая толщина готовых FRP-систем дает преимущество в случаях, где важную роль играет внешний вид конструкции или доступ к ней.

Растущий интерес к подобным системам повышения прочности и модернизации конструкций связан с множеством причин. Так например, несмотря на высокую стоимость композитного материала и связующих составов по сравнению с традиционной сталью или бетоном, зачастую затраты на оборудование и услуги специалистов по их монтажу ниже. Кроме того подобные системы могут использоваться в условиях с ограниченным доступом (например, на плитах, поверх которых проложен трубопровод или канал) где применение традиционных технологий затруднено.

В основе настоящего документа лежит информация, полученная в ходе международных исследований, аналитической работы и опытного применения армирующих систем FRP. Представленные в нем рекомендации довольно умеренны. Пункты, требующие дальнейшей проработки, выделены и сведены в **приложении С**.

1.1—Область применения и границы

Ниже представлены рекомендации по подбору, проектированию и монтажу наружных FRP-систем, предназначенных для повышения прочности бетонных конструкций. Кроме того, в документе содержится описание характеристик материала, конструкций, методик монтажа, контроля качества и технического обслуживания таких систем. Приведенные сведения помогут подобрать FRP-систему для повышения прочности и жесткости железобетонных балок, увеличения пластичности колонн и пр.

В основу документа легли результаты исследований, проведенных за последние 20 лет, а также аналитической работы, экспериментов и практического применения армирующих FRP-систем. Методики проектирования, составленные по имеющимся сведениям, приведены с

большим запасом. Следует, однако, отметить, что в большинстве случаев детальная проработка и проверка методик не проводились. Предполагается, что в дальнейшем методики будут переработаны, а их точность повысится. На сегодняшний день важно четко указать те аспекты, где требуются дальнейшие исследования.

Долговечность и долгосрочные характеристики армирующих систем прошли целый ряд проверок, и исследования до сих пор продолжаются. На настоящий момент результаты многолетних наблюдений отсутствуют, поэтому рассчитать срок службы армирующих систем можно лишь приблизительно. В приведенных методических указаниях такие параметры, как разрушение под воздействием окружающей среды и долговечность, учтены в виде понижающих коэффициентов для различных условий. Кроме того такие аспекты, как долговечная устойчивость и ползучесть, здесь представлены в виде ограничений по напряжениям. Данные ограничения и факторы взяты с определенным запасом. По мере появления новых сведений в расчеты будут вноситься соответствующие изменения, что позволит с более высокой точностью определить условия окружающей среды и нагружения. Помимо прочего необходимо провести дополнительные исследования взаимодействия данных условий. В случаях когда FRP-системы одновременно подвергаются воздействию экстремальных погодных условий и высоких напряжений, следует соблюдать осторожность.

Факторы, связанные с долговечностью FRP-систем не оказывают влияния на расчетный модуль упругости материала на растяжение. Данное утверждение верно при условии, что модуль упругости FRP на растяжение не подвергается негативному воздействию окружающей среды. При этом оно может не соблюдаться для некоторых волокнистых материалов, смол или их комбинаций. Подобные материалы не входят в объем текущей редакции настоящего документа.

До сих пор остается много вопросов, связанных с креплением FRP-систем на бетонное основание. При армировании против изгибов и срезов возможны различные виды нарушений адгезии, которые влияют на прочность элемента с установленной FRP-системой. Несмотря на то, что в настоящее время имеется большое количество информации по режимам подобных нарушений, необходимо разработать более точные методики расчета отслоений. В методиках расчета режимы нарушения адгезии учитываются в виде жестких ограничений по уровню напряжений в материале. Предполагается, что в ходе дальнейшей работы над методиками будут использоваться более точные способы расчета.

Ниже приведены рекомендации по подбору и монтажу FRP-систем, применение которых позволит избежать множества проблем с отслоением материала. Для достижения уровня прочности, соответствующего расчетам методики, особое значение имеет подготовка поверхности и стыков FRP-покрытия. Был проведен ряд исследований по различным вариантам крепления армирующих систем (механическим и не только). Следует признать, что из-за специфики композитных материалов и их хрупкости, крепление армирующих систем представляет определенную сложность, поэтому перед применением любая методика подлежит тщательной проверке.

Формулы расчета, представленные в документе, основаны на результатах исследований среднеразмерных элементов, в которых соблюдены необходимые пропорции. При этом стоит отметить, что армирующие системы могут быть эффективны и на других элементах, например, высоких балках, исследование которых не проводилось. Особую осторожность необходимо проявлять при армировании крупногабаритных элементов и участков конструкций, располагаемых в местах, которые подвержены деформациям. В настоящем документе приведены ограничения по размеру армируемых элементов, которые гарантируют необходимую прочность.

Сфера применения документа ограничена армирующими FRP-системами, которые предназначены для дополнительного усиления на растяжение. В настоящий момент не рекомендуется использовать подобные системы для армирования на сжатие. Несмотря на способность FRP выдерживать компрессионные нагрузки, существует целый ряд аспектов, которые необходимо учитывать при расчете сжатия. Так, например, если в материале присутствуют пустоты, существует вероятность продольной деформации волокон. Кроме того, при нарушении технологии крепления материала на бетонном основании сам материал может также подвергаться продольному изгибу. В дополнение ко всему, смещение волокон в полевых условиях может снизить стойкость материала к воздействию компрессионных нагрузок. В объем настоящего документа не входят вопросы строительства, контроля качества и технического обслуживания, связанные с применением материала в указанных целях. Также здесь не рассматриваются вопросы проектирования систем, предназначенных для подобного использования. Настоятельно не рекомендуется применять армирующие FRP-системы, описанные в документе, для повышения стойкости конструкций к компрессионным нагрузкам.

Конструкции, выполненные из бетонных блоков, кирпича или керамической плитки, а также кирпичные стены, в настоящем документе не рассматриваются. При этом, как показывают результаты исследований, применение FRP-систем для укрепления кирпичных стен возможно, а многие рекомендации, содержащиеся в документе, применимы и к ним (Triantafillou 1998b; Ehsani и др. 1997; Marshall и др. 1999)

1.2—Варианты применения и использования

Системы FRP (стекловолокно) могут использоваться для восстановления прочности изношенного конструктивного элемента, модификации или усиления исправного конструктивного элемента с целью возможности выдерживания нагрузок, возросших в связи с изменениями режима использования конструкции, или с целью устранения обнаруженных погрешностей проектирования или монтажа. Прежде чем выбирать тип системы FRP, инженер должен определить, насколько такая система пригодна для решения задачи усиления конструкции.

Для оценки пригодности системы FRP для конкретного применения инженер должен провести анализ условий эксплуатации существующей конструкции, предусматривающий определение имеющейся нагрузочной способности, выявление дефектов и причин их возникновения и оценку состояния бетонной подложки. Общая оценка

должна включать результаты тщательной проверки конструкции в процессе эксплуатации, анализ конструкторской или рабочей документации, а также расчет прочности конструкции в соответствии со стандартом ACI 364.1R. Имеющаяся строительно-техническая документация должна быть проанализирована, а именно: рабочие чертежи, проектные задания, техническая информация по объекту, отчеты по производственным испытаниям, документация на проведенные ремонтные работы и работы по регламентному техобслуживанию.

Инженер должен провести тщательное исследование существующей конструкции в условиях ее эксплуатации в соответствии со стандартом ACI 437R или другими используемыми для этих целей нормативами. Предел прочности бетона на поверхностях, где может быть установлена система FRP, должен быть определен в ходе испытания на прочность сцепления покрытия согласно стандарту ACI 503R. Кроме того, эксплуатационное исследование должно предусматривать проверку:

- Габаритных размеров конструктивных элементов.
- Местоположения, размеров и причин возникновения трещин и сколов.
- Местоположение и размеров участков коррозии на стальной арматуре.
- Количество и расположение стальной арматуры.
- Рабочую прочность бетона при сжатии.
- Прочность бетона, и в первую очередь защитного слоя бетона во всех местах, где система FRP должна быть связана с бетоном.

При определении нагрузочной способности существующей конструкции следует опираться на информацию, полученную в ходе эксплуатационного исследования, результаты анализа конструкторских расчетов и чертежей, а также на аналитические и иные пригодные для этого методы. При необходимости к процессу получения общей оценки конструкции могут быть использованы нагрузочные испытания и другие способы проверки.

Инженер должен изучить имеющуюся техническую документацию и проконсультироваться с производителями системы FRP, чтобы убедиться, что выбранная система FRP и система покрытия применима для данного случая.

1.2.1 Пределы упрочнения – Некоторые инженеры и производители систем в свое время рекомендовали ограничивать увеличение нагрузочной способности элемента конструкции, в котором использовалась система FRP. Суть в том, что потеря армирующего эффекта стекловолокна не должна приводить к полному разрушению элемента конструкции. Специальные указания, в том числе варианты комбинирования нагрузок для оценки целостности элемента конструкции после удаления системы FRP, представлены в Разделе 4.

Системы FRP, используемые для повышения прочности существующего элемента конструкции, должны разрабатываться в соответствии с содержанием Раздела 4, который содержит результаты всестороннего рассмотрения таких вопросов, как ограничения по нагрузке, траектории действия нагрузок, эффекты воздействия температуры и условий окружающей среды на системы FRP, расчеты нагрузок, а также эффект воздействия коррозии стальной арматуры на целостность системы.

1.2.3 Максимальная рабочая температура — Физические и механические свойства смолосодержащих компонентов систем FRP зависят от температурных воздействий и ухудшаются, когда температура превышает температуру их стеклования T_g . Температура T_g представляет собой среднее значение температурного диапазона, при превышении которого смола переходит из твердого и ломкого состояния в более мягкое и пластичное. Это изменение состояния отрицательно сказывается на свойствах отвержденных ламинатов.

Значение T_g является уникальным для каждой системы FRP и варьируется в пределах от 140 до 180 °F (от 60 до 82 °C) для существующих имеющихся на рынке систем FRP. Максимальная рабочая температура системы FRP не должна превышать соответствующее значение T_g .

Значение T_g для определенной системы FRP можно получить от производителя системы.

1.2.4 Минимальная прочность бетонного основания — Системы FRP работают на прочном бетоне. Их не рекомендуется применять для установки на элементы конструкции, содержащие корродированную стальную арматуру или поврежденный бетон, пока не будет произведен ремонт основания в соответствии с требованиями [пункта 5.4](#). До применения системы FRP рекомендуется оценить и рассмотреть наличие растрескиваний и повреждений бетона и коррозии стальной арматуры. К повреждениям бетона относятся следующие факторы: взаимодействие щелочей цемента с кремнеземом заполнителя в бетоне, задержки в формировании этtringита, карбоната, продольное растрескивание вокруг корродированной стальной арматуры и слоистое растрескивание в месте установки стальной арматуры.

Рекомендуется оценить состояние и прочность основания для определения его способности усиления элемента конструкции с помощью внешних компонентов усиления FRP. Сила сцепления между материалами для ремонтных работ и исходным бетоном должна соответствовать рекомендациям ACI 503R или Раздела 3.1 Руководства ICRI № 03733.

Имеющаяся прочность бетонного основания является важным параметром для компонентов, при установке которых большое значение имеет сила сцепления, а также характеристики гибкости и предел прочности на сдвиг. Основание должно обладать требуемой прочностью для формирования расчетных напряжений системы FRP через сцепление. Основание, включая все поверхности сцепления между ремонтируемыми зонами и исходным бетоном, должно иметь достаточный предел прочности на разрыв и сдвиг при прямом воздействии для переноса напряжения на систему FRP. Прочность на разрыв должна быть не менее 200 фунт/кв. дюйм (1,4 МПа), что указано при применении испытаний на адгезионную прочность методом отрыва, как в ACI 503R, так и в ASTM D 4541. Системы FRP не рекомендуется использовать в тех случаях, когда бетонное основание имеет расчетную прочность бетона при сжатии (f_c) менее 2500 фунт/кв. дюйм (17 МПа). Данное минимальное значение не оказывает влияния на контактные операции, такие как изоляция колонн, при выполнении которых обеспечивается тесный контакт между системой FRP и бетоном. Расчетные напряжения в системе FRP образуются за счет деформации или расши-

рения бетонной части при осуществлении контактных операций.

Применение систем FRP не останавливает начавшуюся коррозию имеющейся стальной арматуры. Если наличие коррозии стальных элементов очевидно, или если вследствие этого происходит повреждение бетонного основания, монтаж усиления FRP не рекомендуется без предварительной остановки продолжающейся коррозии и ремонта любых поврежденных участков основания.

1.3—Использование патентованных систем FRP

В настоящем документе приводятся четкие ссылки на имеющиеся на рынке патентованные системы FRP, состоящие из волокон и смол, соединенных особым образом и устанавливаемых по особой технологии. Данные системы были разработаны с учетом характеристик материалов и испытаний конструкций.

Соединения волокон и смол, которые не были протестированы, могут привести к получению свойств непредсказуемого диапазона, а также к возможной несовместимости материалов. Любая система FRP, возможность применения которой рассматривается, должна иметь надлежащий перечень результатов испытаний, подтверждающих соответствующие эксплуатационные характеристики всей системы в сходных сферах применения, включая технологию установки.

Рекомендуется использовать системы FRP, разработанные с учетом характеристик материалов и испытаний конструкций, включая подтвержденные документально патенты. Следует избегать применения соединений волокон и смол, которые не были протестированы. Полный перечень стандартов на проведение испытаний систем FRP разрабатывается несколькими организациями, в том числе ASTM, ACI, ICRI и организацией Intelligent Sensing for Innovative Structures (ISIS) (Интеллектуальное осуждение для инновационных структур). Стандарты, рекомендуемые этими организациями, приводятся в **Приложении В**.

1.4—Определения и сокращения

Приводимые далее определения раскрывают смысл терминов, имеющих отношение к стекловолокну, которые не являются общепринятыми в контексте практики армирования железобетона.

Данные определения характерны только для настоящего документа и не применимы в других документах АСІ.

AFRP – Полимер, армированный арамидным волокном.

Порция – Количество материала, смешиваемого одновременно или в ходе отдельного непрерывного процесса.

Связка – Химическая обработка беспорядочно расположенных волокон с целью придания целостности арматурным сеткам, пучкам стекловолокна и тканям.

Специальные связки применяются для обеспечения химической совместимости с различными смолами, используемыми для ламинирования.

Упрочнение критически важных элементов конструкции – Варианты применения систем FRP для упрочнения конструктивных элементов, которые закрепляются на бетонной подложке с помощью связывающих агентов; в качестве примеров таких критически важных элементов можно привести упрочнение балок и плит на изгиб и сдвиг.

Катализатор – Вещество, ускоряющее химическую реакцию и способствующее ее протеканию в условиях, менее жестких, чем необходимо, в случае если такие условия постоянно не поддерживаются в ходе реакции. См.

Активатор или **Отвердитель**.

CFR - Свод федеральных нормативных актов

CFRP - Полимер, армированный углеродным волокном (в том числе полимер, армированный графитовым волокном).

Смесь – Сочетание двух или более компонентов, отличающихся на макроуровне по форме или составу. Примечание: компоненты сохраняют свою идентичность; это означает, что они полностью не растворяются и не поглощаются друг другом, хотя действуют совместно. Как правило, компоненты могут быть физически идентифицированы и устанавливать взаимодействие между собой.

Бетонная подложка – Уложенный бетон или любые цементующие материалы, используемые для ремонта или замены уложенного бетона. Подложка может состоять только из уложенного бетона, из ремонтных материалов или в виде сочетания уложенного бетона и ремонтных материалов. Под подложкой также подразумевают поверхность, на которой закрепляется система FRP.

Сцепление критически важных элементов конструкции – Варианты применения систем FRP, которые используют постоянный непосредственный контакт между бетонной подложкой и системой. В общем случае применяется системы FRP, которые полностью обволакивают заготовку по периметру. В большинстве случаев для упрочнения критически важных участков сцепления используется система FRP закрепленная на бетоне для облегчения установки, но при этом в полной мере не используется связывающий агент. В качестве такого примера можно привести колонны с повышенной сейсмической устойчивостью.

Разрушение в условиях длительных нагрузок – Постепенное, зависящее от времени снижение предела прочности при непрерывной нагрузке, приводящее к разрушению заготовки.

Поперечная межмолекулярная связь – Химическая связь между молекулами полимера. Примечание: Увеличение числа поперечных межмолекулярных связей, приходящихся на каждую молекулу полимера, повышает прочность и константу упругости за счет снижения способности к пластической деформации.

Выдерживание систем FRP – Процесс, вызывающий необратимые изменения свойств термоотверждающейся смолы под воздействием химической реакции. Выдерживание обычно завершается добавлением отверждающих (полимеризирующих) веществ или активаторов при воздействии или без воздействия тепла и давления. Полное отверждение определяется моментом, когда смола достигает требуемых свойств. Незаконченное отверждение – это состояние, при котором требуемые свойства не были достигнуты.

Отверждающее вещество – Катализатор или активный наполнитель, который при добавлении к смоле вызывает ее полимеризацию. Также именуется отвердителем или активатором.

Нарушение сцепления – Разделение на границе между подложкой и адгезивным веществом.

Ухудшение – Снижение качества механических свойств материала.

Расслоение – Разделение вдоль плоскости, параллельной поверхности, как, например, отделение друг от друга слоев ламината из FRP. **Длина зоны передачи напряжений, FRP**- Расстояние действия связей, необходимое для передачи напряжения от бетона к стекловолокну с целью повышения прочности системы FRP. Длина зоны передачи напряжений является функцией прочности подложки и жесткости связанного стекловолокна.

Прочность, FRP – Способность материала противостоять воздействиям внешней среды, химическим реакциям, истиранию и прочим последствиям использования.

Стекло E – Сорт стекла, имеющий в своем составе кальциевый алюмоборосиликат, и содержание щелочи в котором доходит до 2,0%. Волокно, широко используемое в армированных полимерах.

Эпоксид - Термоотверждающийся полимер, являющийся продуктом реакции эпоксидной смолы и аминопластикового отвердителя (См. также **Эпоксидная смола**.)

Эпоксидная смола – Класс органических химически связывающих систем, используемых при подготовке специальных покрытий или адгезивов для бетона в качестве полимеррастворов и полимербетонов.

Ткань – Расположение волокон, скрепленных в двух направлениях. Ткань может быть тканной, нетканной, вязаной или стеганой. Многочисленные слои ткани могут быть прошиты между собой.

Структура ткани определяется специальным описанием волокон, их направлений и переплетений.

Волокно – Любой тонкий нитевидный натуральный или синтетический объект минерального или органического происхождения. Примечание: Этот термин обычно используется по отношению к материалам, длина которых не менее чем в 100 раз меньше их диаметра.

Арамидное волокно – Органическое волокно с высокоупорядоченной ориентацией, получаемое из полиамида, молекулы которого встраиваются в структуру бензолного кольца.

Углеродное волокно – Волокно, получаемое в результате воздействия инертной среды или нагрева органических исходных материалов, содержащих значительное количество углерода, например, вискозное волокно, полиакрилонитрил (PAN).

Стекловолокно – Волокно, вытягиваемое из расплава неорганического вещества и охлаждаемое без кристаллизации. К разновидностям стекловолокна можно отнести щелочестойкое (AF-стекло), универсальное (E-стекло) и высокопрочное (S-стекло).

Содержание волокон – Количество волокон в составе композитного материала.

Примечание: Данный показатель обычно выражается в процентных долях объема или массы композитного материала.

Волоконный пух – Короткие волоски, на которые рвутся сухие волоконные жгуты или нити в ходе обработки, которые рассеиваются в воздухе; обычно считается пылью, вызывающей аллергические реакции.

Стеклоткань – Композитный материал, содержащий стеклянные волокна в смоле.

Стекловолокно (FRP) – Общий термин для композитного материала, состоящего из полимерной матрицы, армированной тканью, сеткой, лентами и любыми другими волокнистыми структурами. См. **Смесь**.

Объемная концентрация волокон – Отношение объема волокон к объему смеси.

Весовая концентрация волокон – Отношение массы волокон к массе смеси.

Нить - см. **Волокно**.

Наполнитель – Относительно инерционное вещество, добавляемое к смоле для изменения ее свойств или для снижения стоимости или плотности. Иногда этот термин используется специально для обозначения твердых присадок. Также является добавкой.

Ингибиторы горения – Химические вещества, используемые для снижения склонности смолы к горению; могут добавляться к смоле или наноситься на поверхность стекловолокна.

Поток – Перемещение неотвержденной смолы под действие давления или силы тяжести.

FRP – Полимер, армированный волокном; ранее именовался «пластиком, армированным волокном».

GFRP – Полимер, армированный стекловолокном.

Стекловолокно – Отдельная нить, получаемая протягиванием или выдавливанием расплавленного стекла через мелкое отверстие. Непрерывная нить представляет отдельную стеклянную фибру большой или неопределенной длины. Штапельное волокно представляет собой стеклянную фибру относительно небольшой длины, как правило, не превышающей 17 дюймов (0,43 м), при этом длина определяется используемым процессом формирования или выдавливания нитей.

Температура стеклования (T_g) – Средняя точка температурного диапазона, в пределах которого аморфный материал (например, стекло или высокомолекулярный полимер) изменяется от (или до) хрупкого, стекловидного состояния до (или от) пластического состояния.

Решетка, FRP – Двухмерная (планарная) или трехмерная (пространственная) жесткая матрица взаимосвязанных стекловолоконных стержней, которые образуют непрерывную решетку, используемую для армирования бетона.

Решетка может изготавливаться с полностью соединенными стержнями или из механически соединенных отдельных стержней.

Отвердитель – 1) химическое вещество (содержащее определенные фторсиликаты или силикат натрия), добавляемое в бетонные перекрытия для снижения их износа и обсыпания; или 2) двухкомпонентный адгезив или покрытие, химикат, который вызывает затверждение смолы.

Пропитка – Используется в армированных волокном полимерах для насыщения волокон смолой.

Активатор – Источник свободных радикалов, которые представляют собой группу атомов, имеющих, по крайней мере, один свободный электрон. Источник используется для запуска процесса отверждения для ненасыщенного полиэфира и смол сложных виниловых эфиров. Наиболее известными источниками свободных радикалов являются перекиси.

См. **Катализатор**.

Плоскость раздела фаз – Граница или поверхность между двумя различными, физически различаемыми средами. На волокнах – это контактная поверхность между волокнами и покрытием/прокладкой.

Межслойный сдвиг – Напряжение сдвига, направленное на получение относительного смещения между двумя слоями в ламинате вдоль плоскости их раздела.

Ламинат – Один или несколько слоев волокна, связанных между собой в матрице затвердевшей смолы.

Укладка – Процесс помещения материала, армированного стекловолокном, в положение для формовки.

Арматурная сетка – Волокнистый материал для армированного полимера, состоящий из хаотично ориентированных нарезанных нитей, коротких волокон (имеющих или не имеющих подложку) или длинных беспорядочно уложенных нитей, свободно сцепленных между собой связывающим веществом.

Матрица – В случае армированных волокном полимеров – материалы, которые служат для сцепления волокон между собой, переноса нагрузки на волокна и защиты их от воздействий окружающей среды и повреждений в ходе манипуляций с ними.

Мономер – Органическая молекула со сравнительно малым молекулярным весом, которая формирует твердый полимер в результате реакции с аналогичной молекулой или другими низкомолекулярными соединениями.

MSDS – Паспорт безопасности материала.

OSHA – Управление по технике безопасности и гигиене труда

PAN – Полиакрилонитрил, исходное волокно, используемое для получения углеродного волокна.

Фенопласт – Термоотверждающаяся смола, получаемая путем конденсации ароматических спиртов с альдегидом и особенно фенола с формальдегидом.

Деготь – Исходный материал на основе нефти или битума, используемый для получения углеродного волокна.

Пласт – Отдельный слой волокна или армирующей сетки; несколько спрессованных между пластов образуют ламинат.

Полиэстер – Один из представителей обширной группы синтетических смол, получаемых в результате реакции двухосновных кислот с двухатомными спиртами; обычно готовятся путем смешивания с мономером виниловой группы и катализатором свободных радикалов при комнатной температуре и используются в качестве связывающих агентов для полимеррастворов и полимербетонов, волоконных ламинатов (в основном стекла), адгезивов и т.п. Обычно именуется «ненасыщенным полиэфиром».

Полимер – Органическое соединение с высоким молекулярным весом, органическое или синтетическое, содержащее повторяющиеся звенья.

Полимеризация – Реакция, в ходе которой не менее двух молекул одного и того же вещества объединяются с формированием цепочек, содержащей одинаковые элементы в равных пропорциях, но имеющей более высокий молекулярный вес.

Полиуретан – Продукт реакции изоцианата с любой смесью, содержащей активную водородную группу; используется для получения плотных, устойчивых к истиранию покрытий.

Дополнительное отверждение, FRP – Дополнительная обработка при повышенной температуре, которая увеличивает степень отверждения полимера; при этом окончательные свойства ламината или полимера улучшаются.

Срок годности – Отрезок времени после приготовления, в течение которого жидкая или пластичная смесь должна быть использована.

Препрег – Волокнистый или волокнисто-листовой материал, содержащий смолу, которая заранее добавляется для получения требуемой для качественного склеивания консистенции. Многослойные структуры или препрег обычно выдерживаются при воздействии тепла и давления; это относится и к предварительно пропитанным волокнам и листам.

Пульпуризация – Непрерывный процесс получения соосно ориентированных волокнистых композиций. Процесс состоит в протягивании армированного волокном материала через ванну, где он пропитывается смолой, а затем через формовочный штамп, где смола окончательно отвердевает.

Смола – Полимерный материал, жесткий или полужесткий при комнатной температуре, у которого точка плавления или температура стеклования обычно превышает комнатную температуру.

Содержание смолы – Количество смолы в ламинате, выраженное в процентах от суммарной массы или суммарного объема.

Пучок – Определенное количество жгутов, лент, пряжей или концов волокон, собранных в параллельную связку с незначительным перекручиванием или без него.

Лист, FRP – Сухой, гибкий пласт, используемый при влажной укладке систем FRP. Однонаправленные листы FRP состоят из непрерывных волокон, уложенных в одном направлении и удерживаемых вместе в одной плоскости с образованием пласта конечной ширины и длины. Ткани также именуется листами. См. **Ткань, Пласт**.

Срок хранения – Отрезок времени, в течение которого упакованные материалы могут храниться при заданных условиях, оставаясь пригодными для использования.

Прокладка – Подготовка или покрытие поверхности нитей для улучшения сцепления нитей со смолой и для получения требуемых технологических и прочностных атрибутов.

Длительное напряжение – Напряжение, вызываемое продолжительными номинальными нагрузками, в том числе статическими нагрузками и постоянной составляющей динамической нагрузки.

Термореактивный материал – Смола, которая формируется с помощью звеньев полимеров сетчатой структуры. Примечание: Термореактивный материал не может быть расплавлен или переработан, поскольку полимерные звенья образуют трехмерную сетку.

Жгут – Нескрученная связка непрерывных нитей.

Виниловый эфир – Термоотверждающаяся смола, содержащая как виниловые, так и эфирные компоненты и отверждаемая с помощью дополнительной полимеризации, вызываемой образованием свободных радикалов. Виниловые эфиры используются в качестве связывающих агентов в волоконных ламинатах и адгезивах.

ВОС – Летучие органические вещества; любое соединение углерода, исключая окись углерода, углекислый газ,

металлосодержащие карбиды или углекислые соли, а также углекислый аммоний, которые принимают участие в атмосферных фотохимических реакциях типа истощения озонового слоя.

Объемная концентрация – Относительное содержание (0,0 – 1,0) компонента в соединении, измеренное в единицах объема, например, объемная концентрация волокон.

Влажная укладка – Способ изготовления ламинатного продукта путем использования жидкой смолы при установке по месту волокна или арматурной сетки.

Смачивание – Процесс покрытия или пропитки пучка, жгута или ткани, в которых все пустоты между лентами и нитями заполняются смолой; это и условие, при котором достигается подобное состояние.

Образцовая панель – Небольшой рабочий образец панели FRP, изготовленный на месте в неопасной зоне при условиях, сходных с условиями фактической конструкции. В дальнейшем панель может быть испытана для определения соответствия механических и физических свойств материала предполагаемым свойствам установленного стекловолоконного ламината.

Жгут – Сборка из скрученных нитей, волокон или лент, которая придает форму непрерывной нити, что пригодно для использования в тканых текстильных материалах.

1.5—Используемые обозначения

A_f = $n_t W_f$, площадь наружного участка, армированного стекловолокном, дюйм² (мм²)

A_{fv} = площадь участка поперечного армирования стекловолокном с зазорами, дюйм² (мм²)

A_g = общая площадь сечения, дюйм² (мм²)

A_s = площадь ненапрягаемой стальной арматуры, дюйм² (мм²)

A_{st} = общая площадь участка продольного армирования, дюйм² (мм²)

b = ширина прямоугольного поперечного сечения, дюйм² (мм²)

b_w = ширина захвата или диаметр кругового сечения, дюйм (мм)

c = расстояние от границы сверхжесткого волокна до нейтральной оси, дюйм (мм)

C_E = коэффициент ослабления воздействия окружающей среды

d = расстояние от границы сверхжесткого волокна до нейтральной оси, дюйм (мм)

d_f = глубина участка поперечного армирования стекловолокном, показанного на рис. 10.2, дюйм (мм)

E_c = модуль упругости бетона, фунт/кв. дюйм (МПа)

E_f = модуль упругости стекловолокна при растяжении, фунт/кв. дюйм (МПа)

E_s = модуль упругости стали, фунт/кв. дюйм (МПа)

f_c = сжимающее напряжение в бетоне, фунт/кв. дюйм (МПа)

f'_c = расчетная прочность бетона при сжатии, фунт/кв. дюйм (МПа)

$\sqrt{f'_c}$ = квадратный корень из расчетной прочности бетона при сжатии

f'_{cc} = относительная прочность ограниченного объема бетона при сжатии, фунт/кв. дюйм (МПа)

f_f = уровень напряжения в участке, армированном стекловолокном, фунт/кв. дюйм (МПа)

$f_{f,s}$ = уровень напряжения в FRP, вызванного моментом в зоне упругости элемента, фунт/кв. дюйм (МПа)

f_{fe} = эффективное напряжение в стекловолокне; уровень, достигаемый при поперечном разрушении, фунт/кв. дюйм (МПа)

f_{fu}^* = предел прочности при растяжении стекловолокна по данным производителя, фунт/кв. дюйм (МПа)

f_{fu} = расчетный предел прочности стекловолокна при растяжении, фунт/кв. дюйм (МПа)

\bar{f}_{fu} = среднее значение предела прочности стекловолокна, полученное по результатам 20 или более испытаний на растяжение согласно стандарту ASTM D 3039, фунт/кв. дюйм (МПа)

f_l = давление, ограничиваемое оболочкой стекловолокна, фунт/кв. дюйм (МПа)

f_s = напряжение в ненапряженной стальной арматуре, фунт/кв. дюйм (МПа)

$f_{s,s}$ = уровень напряжения в ненапряженной стальной арматуре при эксплуатационных нагрузках, фунт/кв. дюйм (МПа)

f_y = расчетное напряжение текучести ненапряженной стальной арматуры, фунт/кв. дюйм (МПа)

h = общая толщина элемента, дюйм (мм)

I_{cr} = момент инерции участка с трещиной, перешедшей в бетон, дюйм⁴ (мм⁴)

k = отношение глубины нейтральной к глубине армирования, измеренной с той же стороны нейтральной оси

k_f = жесткость на единицу ширины для каждого слоя армированного участка стекловолокна, фунт/дюйм (Н/мм); $k_f = E_f t_f$

k_1 = коэффициент модификации значения k_v с учетом прочности бетона

k_2 = коэффициент модификации значения k_v с учетом схемы обволакивания

L_e = активная длина зоны сцепления стекловолоконного ламината, дюйм (мм)

l_{df} = длина зоны передачи напряжений стекловолоконной системы, дюйм (мм)

M_{cr} = момент трещинообразования, дюйм-фунт (Н-мм)

M_n = номинальная величина момента, дюйм-фунт (Н-мм)

M_s = момент в зоне упругости элемента, дюйм-фунт (Н-мм)

M_u = расчетный момент в сечении, дюйм-фунт (Н-мм)

n = количество слоев армированного участка стекловолокна

P_{fu}^* = предел прочности на растяжение на единицу ширины для каждого слоя участка, армированного стекловолокном, фунт/дюйм (Н/мм); $P_{fu}^* = f_{fu}^* t_f$

\bar{P}_{fu} = среднее значение предела прочности на растяжение на единицу ширины для каждого слоя армированного участка, фунт/дюйм (Н/мм)

P_n = номинальная осевая нагрузка при заданном эксцентриситете, фунт (Н)

r = радиус краев квадратного или прямоугольного сечения, ограниченного стекловолокном, дюйм (мм)

R_n	= номинальная прочность элемента
$R_{n\theta}$	= номинальная прочность элемента, подверженно-го воздействию повышенных температур вследствие воздействия открытым огнем
S_{DL}	= статические нагрузки
S_f	= разрядка участка поперечного армирования стекловолокном, показанного на рис. 10.2, дюйм (мм)
S_{LL}	= динамические нагрузки
t_f	= номинальная толщина слоя участка, армированного стекловолокном, дюйм (мм)
T_g	= температура стеклования, °F (°C)
V_c	= номинальная прочность на сдвиг, обеспечиваемая бетоном со стальным гибким армированием, фунт (Н)
V_n	= номинальная прочность при сдвиге, фунт (Н)
V_s	= номинальная прочность при сдвиге, обеспечиваемая стальными скобами, фунт (Н)
V_f	= номинальная прочность при сдвиге, обеспечиваемая стекловолокнистыми скобами, фунт (Н)
W_f	= ширина армированных стекловолокном слоев, дюйм (мм)
α	= Угол наклона скоб или спиралей, градусы
α_L	= коэффициент продольного теплового расширения, дюйм/дюйм/°F (мм/мм/°C)
α_T	= коэффициент поперечного теплового расширения, дюйм/дюйм/°F (мм/мм/°C)
β_I	= отношение глубины эквивалентного прямоугольного блока напряжений к глубине нейтральной оси
ϵ_b	= уровень растяжения в бетонной подложке, создаваемого заданным изгибающим моментом (положительным), дюйм/дюйм (мм/мм)
ϵ_{bi}	= уровень растяжения в бетонной подложке в момент установки стекловолокна (при положительном изгибающем моменте), дюйм/дюйм (мм/мм)
ϵ_c	= уровень растяжения в бетоне, дюйм/дюйм (мм/мм)
ϵ_{cc}'	= максимальное используемое напряжение сжатия бетона, ограниченного стекловолокном, дюйм/дюйм (мм/мм)
ϵ_{cu}	= максимальное используемое напряжение сжатия бетона, дюйм/дюйм (мм/мм)
ϵ_f	= уровень сжатия на участке армирования стекловолокном, дюйм/дюйм (мм/мм)
ϵ_{fe}	= уровень эффективного сжатия на участке армирования стекловолокном; уровень сжатия, создаваемый при поперечном разрушении, дюйм/дюйм (мм/мм)
ϵ_{fu}	= расчетное сжатие при разрыве на участке армирования стекловолокном, дюйм/дюйм (мм/мм)
ϵ_{fu}	= среднее значение сжатия при разрыве на участке армирования стекловолокном, полученное по результатам 20 или более испытаний на растяжение согласно стандарту ASTM D 3039, фунт/кв. дюйм (МПа)
ϵ_{fu}^*	= предельное сжатие при разрыве на участке армирования стекловолокном, дюйм/дюйм (мм/мм)
ϵ_s	= уровень сжатия в ненапряженной стальной арматуре, дюйм/дюйм (мм/мм)
ϵ_{sy}	= сжатие, соответствующее предельному напряжению сдвига в ненапряженной стальной арматуре

ϕ	= коэффициент снижения прочности
γ	= множитель величины f_c' для определения интенсивности распределения напряжений в эквивалентном прямоугольнике для бетона
κ_a	= коэффициент эффективности для участка армирования стекловолокном (зависит от геометрии сечения)
κ_m	= зависящий от связывающего вещества коэффициент для изгиба
κ_v	= зависящий от связывающего вещества коэффициент для сдвига
P_f	= коэффициент армирования стекловолокном
P_g	= отношение площади продольной стальной арматуры к площади поперечного сечения элемента, работающего на сжатие
P_s	= коэффициент ненапрягаемой арматуры
σ	= стандартное отклонение
Ψ_f	= дополнительный коэффициент снижения прочности стекловолокна

ГЛАВА 2—ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Начало использования систем FRP для усиления и модификации действующих бетонных конструкций относится к середине 80-х годов прошлого века. Количество строительных объектов, на которых используются системы FRP, резко выросло за последнее время. Еще 10 лет назад в мире было всего несколько таких объектов, тогда как сейчас их насчитывается несколько тысяч (Bakis et al. 2002). В число конструктивных элементов, для усиления которых применяются системы FRP с внешней связью, входят балки, плиты, колонны, стены, связи и соединения, вентиляционные и дымовые трубы, своды, купола, туннели, шахты, трубы и фермы. Системы FRP с внешней связью также используются для усиления кладки, деревянных, стальных и чугунных конструкций. Предложение по усилению бетонных конструкций с использованием технологии армирования с внешней связью не является чем-то новым. Системы FRP с внешней связью разрабатывались в качестве альтернативы традиционным методам внешнего армирования, таким как устройство связей с использованием стальных листов, заключение колонн в стальную или бетонную оболочку. Первые разработки систем FRP с внешней связью, предназначенных для модификации бетонных конструкций, были осуществлены в 1980-е годы в Европе и Японии.

2.1—История разработки FRP-систем

В Европе системы FRP получили развитие в качестве альтернативы применению стального листа. Метод соединения стального листа с помощью эпоксидной смолы с зонами механических напряжений бетонных конструктивных элементов продемонстрировал свою жизнеспособность в плане повышения прочности этих элементов на изгиб (Fleming and King 1967). Данный метод во всем мире используется для усиления мостовых сооружений и зданий.

Поскольку стальной лист может подвергаться коррозии, что ведет к ухудшению его связи с бетоном, а также из-за того, что его установка отличается трудоемкостью, исследователи рассматривают FRP-материалы в качестве альтернативы стали. Уже в 1978 году сообщалось о проведении в Германии экспериментов по использованию FRP-

материалов для модификации бетонных конструкций (Wolf and Miessler 1989). Исследования в Швейцарии привели к первому опыту применения систем FRP с внешней связью для повышения прочности на изгиб мостовых железобетонных сооружений (Meier 1987; Rostasy 1987).

В 80-х годах прошлого века в Японии системы FRP впервые использовались для обеспечения дополнительной сейсмостойчивости железобетонных колонн (Fardis and Khalili 1981; Katsumata et al. 1987). В этой стране значительное увеличение применения систем FRP имело место после землетрясения Хего-кэн Намбу в 1995 году (Nanni 1995).

В Соединенных Штатах интерес к армированию бетонных конструкций с помощью волокон стал проявляться уже в 30-е годы прошлого века. Практические же разработки и исследования в области применения таких материалов для модификации бетонных конструкций начались в 80-е годы по инициативе Национального Научного Фонда (NSF) и Федерального Управления Шоссейных Дорог (FHWA). Результатом данных исследований было строительство множества объектов, сооружение которых происходило в различных условиях окружающей среды. Описание предыдущих исследований и примеров практического применения систем FRP для восстановления и усиления строительных конструкций можно найти в ACI 440R-96 и материалах конференции (Japan Concrete Institute 1997; Neale 2000; Dolan et al. 1999; Sheheta et al. 1999; Saadatmanesh and Ehsani 1998; Benmokrane and Rahman 1998; Neale and Labossière 1997; Hassan and Rizkalla 2002).

В Европе, Японии, Канаде и США постоянно разрабатываются новые правила и стандарты для систем FRP с внешней связью. За последние 10 лет Японское общество инженеров-строителей (JSCE), Институт бетона Японии (JCI) и Научно-исследовательский институт железных дорог (RTRI) опубликовали ряд документов, касающихся применения FRP-материалов в бетонных конструкциях.

В Европе Рабочей группой 9.3 Международной Федерации по Изучению Строительного Бетона (FIB) недавно был опубликован бюллетень с конструкторскими нормативами по применению FRP с внешней связью для армирования железобетонных конструкций (FIB 2001).

Канадская Ассоциация по Стандартизации и сеть ISIS активно участвуют в разработке нормативных документов, касающихся использования систем FRP. В 2000 году канадские Нормы и правила конструирования автодорожных мостов были дополнены Главой 16, “Фибробетон” (CSA S806-02), а Ассоциация по Стандартизации Канады (CSA) недавно одобрила свод стандартов “Проектирование и сооружение элементов строительных конструкций с использованием полимеров, усиленных волокнами (FRP)” (CSA S806-02).

В Соединенных Штатах критерии оценивания систем FRP становятся доступными для применения в строительной индустрии (ACI25 1997; CALTRANS 1996; Hawkins et al. 1998).

2.2—Доступные для коммерческого применения системы FRP с внешней связью

Существует несколько разновидностей систем FRP, включая системы с влажной укладкой и готовые (с предварительным отверждением) системы. Все виды систем

FRP можно классифицировать по тому, как производится их доставка к месту установки и собственно установка. Выбор системы FRP и ее разновидности осуществляется с учетом приемлемости способа передачи конструкционной нагрузки и простоты и удобства применения. Ниже перечислены наиболее распространенные системы FRP, пригодные для использования с целью усиления конструктивных элементов:

2.2.1 Системы с влажной укладкой — Системы влажной укладкой состоят из сухих полимерных листов или ткани с одинаковой или различной ориентацией волокон, которые пропитываются смолой на месте установки. Пропиточная смола вместе с совместимыми с ней грунтовкой и шпатлевкой, используются для приклеивания листов FRP к бетонной поверхности. Пропитывание и отверждение элементов таких систем осуществляется непосредственно на месте установки и, в этом, смысле они напоминают монолитный бетон. Ниже приведены три наиболее распространенных разновидности систем с влажной укладкой:

1. Сухой полимерный лист с одинаковой ориентацией волокон, в котором волокна располагаются по преимуществу в одной плоскости;
2. Сухой полимерный лист или ткань с различной ориентацией волокон, в которых волокна расположены не менее чем в двух плоскостях; и
3. Сухой волоконный жгут, обматываемый по поверхности бетонной конструкции или крепящийся к ней иным механическим способом. В процессе обматывания жгут пропитывается смолой.

2.2.2 Системы с предварительной пропиткой (Препрег) — Системы FRP с предварительной пропиткой состоят из полимерных листов с одинаковой или различной ориентацией волокон, которые пропитываются смолой (без отверждения) на заводе-изготовителе. Приклеивание элементов таких систем к бетонной поверхности осуществляется с использованием или без дополнительного количества смолы, в зависимости от особенностей применяемой системы. Пропитывание элементов таких систем как и в случае систем с влажной укладкой осуществляется до их поступления к месту установки, а отверждение непосредственно на месте. Для отверждения таких систем обычно требуется дополнительный нагрев. По поводу условий и сроков хранения, способов и особенностей процесса отверждения систем с предварительной пропиткой следует обращаться к производителям таких систем. Ниже приведены три наиболее распространенных разновидности систем FRP с предварительной пропиткой:

1. Предварительно пропитанный полимерный лист с одинаковой ориентацией волокон, в котором волокна располагаются по преимуществу в одной плоскости;
2. Предварительно пропитанный полимерный лист или ткань с различной ориентацией волокон, в которых волокна расположены не менее чем в двух плоскостях; и
3. Предварительно пропитанный волоконный жгут, обматываемый по поверхности бетонной конструкции или крепящийся к ней иным механическим способом.

2.2.3 Готовые системы (с предварительным отверждением) — Существует множество различных видов готовых композиционных систем FRP, которые постав-

ляются к месту установки в готовом к употреблению виде. Для соединения готового профиля с бетонной поверхностью обычно используется адгезив вместе с соответствующим грунтовочным и шпатлевочным материалом. За инструкциями по поводу установки данных систем следует обращаться к производителю. Готовые системы FRP аналогичны системам из монолитного бетона. Ниже приведены три наиболее распространенных разновидности готовых систем FRP:

1. Готовый ламинированный полимерный лист с одинаковой ориентацией волокон, обычно поставляемый к месту установки в виде крупногабаритного плоского профиля или тонких лентообразных полос, намотанных на барабан;

2. Готовая полимерная сетка с различной ориентацией волокон, обычно поставляемая к месту установки в намотанном на барабан виде;

3. Готовая полимерная обшивка, обычно поставляемая к месту установки в форме продольно разрезанных сегментов. На строительной площадке производится раскрытие таких сегментов и их установка поверх колонн и других элементов конструкций; несколько слоев такого покрытия соединяют с бетонной поверхностью, а также друг с другом, что обеспечивает сейсмоустойчивость конструкции.

2.2.4 Другие системы FRP — Другие разновидности систем FRP не рассматриваются в настоящем документе. К ним относится жесткая стержневая полимерная арматура и гибкие полимерные пряди и канаты (Saadatmanesh and Tannous 1999a; Dolan 1999; Fukuyama 1999; ACI 440R-96 и ACI 440.1R-01).

ЧАСТЬ 2—МАТЕРИАЛЫ

ГЛАВА 3—КОМПОНЕНТЫ И СВОЙСТВА МАТЕРИАЛОВ FRP

Описываемые в настоящей главе физические и механические свойства FRP-материалов объясняют особенности поведения и характеристики систем FRP, влияющие на их применение в бетонных конструкциях. Здесь же обсуждается воздействие таких факторов, как история и продолжительность нагружения, температура и влажность на свойства FRP.

Существует множество различных видов систем усиления конструкций с использованием FRP (системы с влажной укладкой, с предварительным пропитыванием (препреги), готовые с предварительным отверждением). При определении характеристик FRP-материала играют роль такие факторы, как объем и вид волокон, тип смолы, ориентация волокон, размерный эффект и контроль качества в процессе изготовления. Материальные характеристики, описанные в настоящей главе, носят общий характер и не относятся ко всем имеющимся на рынке продуктам. Ряд организаций, среди них Американское общество по испытанию материалов (ASTM), Американский институт бетона (ACI) и канадская исследовательская сеть ISIS (Интеллектуальные системы контроля инновационных конструкций) разрабатывают стандартные методы проведения испытаний, предназначенные для определения характеристик FRP-продуктов. Между тем, инженеров-строителей призывают всякий раз обращаться за кон-

сультациями к производителям систем FRP для получения сведений о характеристиках определенных продуктов и их применимости.

3.1—Компоненты систем FRP

Компоненты, входящие в состав доступных для коммерческого применения систем восстановления с использованием FRP, включая смолы, грунтовочные и шпатлевочные материалы, пропиточные вещества, адгезивы и волокна, предназначенные для усиления элементов бетонных конструкций, разрабатываются на основе материальных и прочностных испытаний.

3.1.1 Смолы — С системами FRP используется широкая гамма полимерных смол, включая грунтовки, шпатлевочные материалы, пропиточные вещества и адгезивы. Были разработаны рецепты широко распространенных смол, включая эпоксидные, винилэфирные и полиэфирные, применительно к различным условиям окружающей среды.

Таблица 3.1 — Типичные значения плотности FRP-материалов, фунт/куб.фут (г/см³)

Сталь	GFRP*	CFRP**	AFRP***
490 (7.9)	75 до 130 (1.2 до 2.1)	90 до 100 (1.5 до 1.6)	75 до 90 (1.2 до 1.5)

Таблица 3.2 — Типичные коэффициенты теплового расширения FRP-материалов*

Ориентация волокон	Коэффициент теплового расширения, $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{F}$ ($\times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$)		
	GFRP	CFRP	AFRP
Продольная, α_L	3.3 до 5.6 (6 до 10)	-0.6 до 0 (-1 до 0)	-3.3 до -1.1 (-6 до -2)
Поперечная, α_T	10.4 до 12.6 (19 до 23)	12 до 27 (22 до 50)	33 до 44 (60 до 80)

*Типичные значения объемной доли волокна в диапазоне от 0,5 до 0,7.

* GFRP — полимер, армированный стекловолокном (ПАСВ)

** CFRP — полимер, армированный углеродными волокнами

***AFRP — полимер, армированный арамидным волокном

Производители систем FRP используют смолы со следующими характеристиками:

- Совместимость и сцепление с бетонной подложкой;
- Совместимость и сцепление с композиционными системами FRP;
- Устойчивость к воздействию внешних факторов, к которым относятся, помимо всего прочего, влажность, морская вода, экстремальные температуры и химические вещества, обычно воздействующие на распалубленную бетонную поверхность;
- Заполняющая способность;
- Удобоукладываемость;
- Соответствие срока годности материала возможности его применения;
- Совместимость и сцепление с армирующим волокном; и
- Наличие механических свойств, соответствующих свойствам композиционного FRP-материала.

3.1.1.1 Грунтовка — Грунтовка используется для насыщения бетонной поверхности, чтобы обеспечить лучшую адгезионную связь с пропиточной смолой или адгезивом.

3.1.1.2 Шпатлевочные смеси — Шпатлевки используются для заполнения раковин на поверхности бетонной основы, например, каверн, чтобы получить ровную поверхность, обеспечивающую требуемую связь с системой FRP. Заполнение раковин шпатлевкой позволяет предупредить образование пузырей в процессе затвердевания пропиточной смолы.

3.1.1.3 Пропиточная смола — Пропиточная смола используется для пропитывания армирующих волокон, их закрепления и формирования такой траектории действия сдвигающей нагрузки, которая обеспечивает эффективную передачу нагрузки между волокнами. Пропиточная смола также служит в качестве связующего материала для систем с влажной укладкой, обеспечивая траекторию действия сдвигающей нагрузки между предварительно загрунтованной поверхностью бетонной подложки и системой FRP.

3.1.1.4 Адгезивы — Адгезивы используются для обеспечения связи между системами FRP, состоящими из готового ламинированного полимерного листа, и бетонной подложкой. Адгезив обеспечивает требуемую траекторию действия сдвигающей нагрузки между бетонной подложкой и армирующим ламинированным материалом системы FRP. Также адгезивы применяются для связывания слоев ламинированных систем FRP друг с другом.

3.1.1.5 Защитные покрытия — Защитное покрытие используется для предохранения армирующей системы FRP, связанной с бетонным основанием, от неблагоприятных внешних воздействий. Такое покрытие обычно наносится на наружную поверхность системы FRP после отверждения адгезива или пропиточной смолы.

3.1.2 Волокна — Наиболее широко в качестве армирующего материала в системах FRP применяется непрерывное стеклянное, арамидное и углеродное волокно. Волокна придают системам FRP прочность и жесткость. В Приложении А приведены стандартные значения прочности волокон на растяжение. Более подробное описание волокон можно найти в ACI 440R.

3.2—Физические свойства

3.2.1 Плотность — Плотность FRP-материалов располагается в диапазоне от 75 до 130 фунтов/куб.фут (от 1,2 до 2,1 г/см³), что в 4 - 6 раз меньше плотности стали (Таблица 3.1). Меньшая плотность материала способствует снижению транспортных расходов, сокращению дополнительной статической нагрузки на конструкцию и облегчает обращение с материалами на строительной площадке.

3.2.2 Коэффициент теплового расширения — FRP-материалы с одинаковой ориентацией волокон, продольной или поперечной, имеют разный коэффициент теплового расширения в зависимости от вида волокна, типа смолы и величины объемной доли волокон. В Таблице 3.2 приведены коэффициенты продольного и поперечного теплового расширения для стандартных FRP-материалов с одинаковой ориентацией волокна. Обратите внимание, что отрицательный коэффициент теплового расширения указывает на то, что данный материал сжимается при повышении температуры и расширяется при ее понижении. Для справки, коэффициент теплового расширения бетона колеблется в диапазоне от 4×10^{-6} до $6 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{F}$

(7×10^{-6} до $11 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$), при этом считается, что бетон является изотропным материалом (Mindess and Young 1981). Коэффициент изотропного теплового расширения стали составляет $6,5 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{F}$ ($11,7 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$). Описание факторов, влияющих на тепловое расширение материалов, которые следует учитывать при проектировании, можно найти в Разделе 8.3.1.

3.2.3 Воздействие высоких температур — За пределами диапазона значений T_g величина модуля упругости полимера значительно уменьшается вследствие изменения его молекулярной структуры. Значение T_g зависит от типа смолы, но, как правило, находится в диапазоне 140 - 180 °F (60 - 82 °C). В композиционном FRP-материале волокна, обладающие лучшими термическими свойствами в сравнении со смолой, в состоянии выдерживать некоторую нагрузку в продольном направлении, пока не будет достигнут установленный для них температурный порог. Данное явление имеет место при температурах близких к 1800 °F (1000 °C) для стекловолокна и 350 °F (175 °C) для арамидных волокон. Углеродные волокна способны выдерживать температуры более 500 °F (275 °C). Однако из-за ухудшения передачи усилия между волокнами вследствие их сцепления со смолой способность всей композиционной структуры к растяжению сокращается. Результаты испытаний показывают, что температура 480 °F (250 °C), значительно превышающая температуру T_g смолы более чем на 20%, понижает способность материалов GFRP и CFRP к растяжению (Kumahara et al. 1993). При низких температурах значительно снижаются другие характеристики, связанные с передачей сдвигающей нагрузки через смолу, например, прочность на изгиб (Wang and Evans 1995).

В критических с точки зрения обеспечения связей областях применения систем FRP крайне важное значение для поддержания сцепления между FRP и бетонной подложкой имеют свойства полимера в местах сцепления волокон с бетоном. При этом при температурах близких к T_g механические свойства полимера значительно понижаются, и он начинает утрачивать способность передавать механические напряжения от бетона на волокно.

3.3—Механические свойства и характеристики

3.3.1 Работа на растяжение — При нагружении путем простого растяжения FRP-материалы не проявляют каких-либо пластических свойств (текучести) до разрыва. Работа на растяжение FRP-материалов, состоящих из однородных волокон, характеризуется линейной зависимостью между напряжением ниже предела упругости и упругой деформацией до момента разрушения, которое является внезапным и может иметь катастрофические последствия.

Прочность и жесткость на растяжение, которыми обладает FRP-материал, зависят от ряда факторов. Поскольку в FRP-материале волокна являются главным элементом, обладающим способностью переносить нагрузку, способность FRP-материала к растяжению определяется, прежде всего, типом, ориентацией и количеством волокон. Так как тип и свойства волокон, а также способ применения материала имеют первостепенное значение, характеристики той или иной системы FRP иногда определяются на основе площади-нетто волокон. В других же

случаях расчет ведется на основе площади-брутто ламинированного материала.

Площадь-брутто ламинированного материала системы FRP рассчитывается с использованием общей площади поперечного сечения системы FRP в «твердом» состоянии, включая все волокна и смолу. Площадь-брутто ламината обычно используется для определения свойств готового ламинированного материала (с предварительным отверждением), толщина которого является величиной постоянной, и соотношение между площадью волокон и толщиной смолы в котором поддается контролю.

Расчет площади-нетто волокон системы FRP производится с использованием известной площади волокна, пренебрегая общей шириной и толщиной системы в «твердом» состоянии, т.е. исключая размеры смолы. Площадь-нетто волокон обычно используется для определения свойств системы с влажной укладкой, в которой используется готовый полимерный лист, усиленный волокнами, и смолы, применяемые на месте установки. Система с влажной укладкой позволяет контролировать содержание волокон, расход же смолы не поддается контролю.

Система, свойства которой определяются с использованием площади-брутто ламинированного материала, отличается большей относительной толщиной и более низкими относительными значениями прочности и модуля упругости, тогда как система, свойства которой определяются с использованием площади-нетто волокон, характеризуется меньшей относительной толщиной и более высокой относительной прочностью и модулем упругости. Независимо от того, что берется за основу при расчетах, значения прочности (f_{ju} , A_f) и жесткости ($A_f E_f$) под нагрузкой остаются величиной постоянной. (В 5-ой части описывается порядок расчета характеристик системы FRP двумя способами: с использованием площади-брутто ламинированного материала и площади-нетто волокон.) Характеристики, рассчитываемые по площади-нетто волокон, не совпадают с характеристиками волокон без покрытия. С точки зрения ее свойств систему FRP можно определить как композит, учитывая не только материальные характеристики отдельных волокон, но также эффективность взаимодействия в системе волокно-смола, структуру материала и метод формирования композиционного материала. Механические свойства всех систем FRP, независимо от их формы, должны основываться на испытаниях образцов ламинированного материала с известным содержанием волокна.

В Приложении А приведены свойства при растяжении для некоторых имеющих коммерческое применение систем усиления FRP. За данными о свойствах при растяжении для определенной системы FRP следует, однако, обращаться непосредственно к производителю данной системы. Производители систем должны предоставлять данные о предельной прочности материала при растяжении, которая в настоящем руководстве определяется как средняя прочность на растяжение испытательных образцов материала минус трехкратное стандартное отклонение σ , т.е. по формуле $f_{ju} = f_{ju} - 3\sigma$, а также о предельной деформации разрыва ($\epsilon_{f_u}^* = \epsilon_{ju} - 3\sigma$). Определяемая по приведенной формуле, в основе которой лежат статистические данные, предельная прочность при растяжении с

вероятностью 99,87% гарантирует, что указанные значения будут превышены (Mutsuyoshi et al. 1990). Согласно стандарту ASTM D 3039 модуль Юнга рассчитывается как модуль по хорде между точками 0.003 и 0.006 на кривой "напряжение-деформация". Для определения предельной прочности при растяжении требуется проведение повторных испытаний с использованием не менее чем двадцати образцов материала. Производитель должен дать описание метода, использовавшегося для определения свойств материала при растяжении, включая количество проведенных испытаний, средние значения и стандартное отклонение.

3.3.2 Работа на сжатие — Вследствие недостаточности проведенных испытаний, которые могли бы подтвердить возможность использования систем FRP с внешней связью в качестве арматуры, работающей на сжатие, указанные системы нельзя применять в данной функции. Хотя системы FRP с внешней связью и не рекомендуются использовать там, где требуется выдерживать сжимающие нагрузки, в следующем разделе будет дана полная характеристика FRP-материалов.

Испытания образцов ламинированного FRP-материала, используемого для восстановительных работ по бетону, показали, что его прочность на сжатие ниже прочности на растяжение (Wu 1990). При продольном сжатии встречаются следующие виды разрушений ламинированных FRP-материалов: поперечный разрыв, локальное выпучивание волокон, разрушение при сдвиге. Характер разрушения зависит от вида волокна, объемной доли волокон и типа смолы. Прочность на сжатие полимерных материалов типа GFRP, CFRP и AFRP составляет, соответственно, 55, 78 и 20% их прочности на растяжение (Wu 1990). Как правило, материалы с более высоким пределом прочности при растяжении отличаются большей прочностью на сжатие, это, однако, не относится к AFRP, в котором волокна в процессе сжатия при относительно низком механическом напряжении ведут себя нелинейным образом.

Модуль упругости FRP-материалов при сжатии обычно ниже их же модуля упругости при растяжении. В результате испытания образцов, содержащих от 55 до 60% объемной доли непрерывного стекловолокна (тип E), при использовании в качестве связующего материала винилэфирной или изофталевой полиэфирной смолы, были получены значения модуля упругости при сжатии для данных материалов в диапазоне от 5000 до 7000 килофунтов на кв. дюйм (от 34 000 до 48 000 МПа) (Wu 1990). Согласно отчетам об испытаниях модуль упругости при сжатии составляет приблизительно 80% для GFRP, 85% для CFRP и 100% для AFRP от величины соответствующего модуля упругости при растяжении для того же самого материала (Ehsani 1993).

3.4—Характер изменений материала во времени

3.4.1 Разрушение при ползучести — Испытывающие постоянную нагрузку FRP-материалы могут подвергаться внезапному разрушению после выработки своего рабочего ресурса (предел выносливости). Этот тип разрушения называется разрушением при ползучести. По мере того как увеличивается отношение постоянного растягивающего напряжения к пределу длительной прочности ламинированного FRP-материала его предел выносливости пони-

жается. Предел выносливости также снижается при неблагоприятных внешних условиях, к которым относятся высокая температура, ультрафиолетовое излучение, высокая щелочность, чередование сухих и влажных циклов и циклов замораживания и оттаивания.

Вообще, наименее подвержено разрушению при ползучести углеводородное волокно; арамидные волокна обладают средним уровнем чувствительности, а стекловолокно является в этом плане наиболее чувствительным. Для проведения испытаний на разрушение при ползучести использовались стержни из FRP-материала диаметром 0,25 дюйма (6 мм), усиленные стеклянным, арамидным и углеводородным волокном. Испытания проводились под разной нагрузкой при комнатной температуре. Результаты показали, что существует линейная зависимость между длительной прочностью и логарифмом времени для нагрузки любого уровня. Методом экстраполяции было установлено, что при периоде эксплуатации в 500 000 часов (примерно 50 лет) отношение уровня механического напряжения при разрушении в результате ползучести к начальной предельной прочности для полимерных стержней из GFRP, AFRP и CFRP составляет, соответственно, 0,3, 0,47 и 0,91 (Yamaguchi et al. 1997). Похожие значения приводятся и другим автором (Malvar 1998).

Рекомендации по предельным уровням постоянного механического напряжения, направленные на предупреждение разрушения при ползучести, приводятся в разделе настоящего руководства, посвященном проектированию. Если величина постоянного механического напряжения в FRP-материале ниже предельных уровней разрушающего напряжения при ползучести, прочность FRP хватает для того, чтобы выдерживать непостоянные нагрузки.

3.4.2 Усталость — За последние 30 лет был получен значительный массив данных по усталостным характеристикам и расчетам долговечности отдельных FRP-материалов (National Research Council 1991). В течение большей части этого времени основным объектом исследования являлись авиационно-космические материалы. Несмотря на различия в качестве и совместимости авиационно-космических и промышленных FRP-материалов, можно сделать некоторые общие выводы об усталостных характеристиках данных материалов. Если специально не оговорено иное, рассматриваемые ниже случаи относятся к материалу с одинаковой ориентацией волокон, объемная доля которых составляет порядка 60%, на который воздействуют циклические синусоидальные растягивающие нагрузки:

- с периодичностью, недостаточной для того, чтобы вызвать саморазогревание;
- при проведении испытаний в лабораторных условиях;
- с коэффициентом асимметрии (отношение минимального приложенного напряжения к максимальному), равном 0,1; и
- в направлении, параллельном главной ориентации волокон.

При проведении испытаний в условиях, при которых повышается температура и увеличивается содержание влаги в FRP-материалах, усталостные характеристики материалов, зависящие от условий окружающей среды, как правило, ухудшаются.

Из всех FRP-материалов композиционного типа, используемых на объектах инфраструктуры, CFRP в наименьшей степени подвержены усталостному разрушению. Для полимерных материалов, армированных стекловолокном (CFRP), характерен предел усталости, составляющий от 60 до 70% начальной предельной прочности при статической нагрузке. На графике зависимости амплитуды напряжения от логарифма числа циклов до разрушения (кривая S-N) для CFRP-материалов скат кривой обычно составляет 5% от начальной предельной прочности при статической нагрузке на декаду логарифмической шкалы. При миллионе циклов нагрузки усталостная прочность обычно составляет 60-70% начальной предельной прочности при статической нагрузке, и на нее практически не влияют такие факторы, как содержание влаги и температура бетонных конструкций, если только свойства смолы и характеристики материала в местах сцепления волокон со смолой не подверглись существенному ухудшению под воздействием внешних условий.

При лабораторных испытаниях с моделированием условий окружающей среды (Mandell and Meier 1983) для отдельных стеклянных волокон был характерен отложенный разрыв, вызванный коррозией под напряжением, причиной которой, в свою очередь, было образование поверхностных дефектов из-за наличия едва заметного количества влаги. Когда при формировании FRP-материала композиционного типа в связующий материал закладывается большое количество стеклянных волокон, можно наблюдать эффект потери примерно 10% начальной прочности (при статической нагрузке) на декаду логарифмической шкалы, который вызван усталостью материала при растяжении под статической нагрузкой (Mandell 1982). Считается, что это усталостное явление вызвано взаимодействием волокон друг с другом и не зависит от механизма коррозии при механическом напряжении, описанного для отдельных волокон. Как правило, точно определить предел усталости не представляется возможным. Значительное влияние на усталостные характеристики стекловолокна могут оказывать внешние факторы из-за чувствительности последнего к воздействию влаги, щелочи и кислых растворов.

По всей видимости, арамидные волокна, о долговечности которых собрано значительное количество данных, обладают достаточно высокими усталостными характеристиками. Если пренебречь в этой связи довольно низкой долговечностью всех арамидных волокон при сжатии, то можно сделать вывод, что пропитанные арамидоволоконные пряди демонстрируют превосходные усталостные свойства при повторных растягивающих нагрузках. Снижение прочностных характеристик составляет порядка 5-6% на декаду логарифмической шкалы (Royslance and Royslance 1981). Несмотря на то, что точный предел выносливости для AFRP не определен, есть данные, что предварительно напряженная AFRP-арматура имеет предел выносливости в диапазоне 54 – 73% предельной прочности на растяжение при двух миллионах циклах нагрузки (Odagiri et al. 1997). На основе полученных данных Одагири предложил, чтобы максимальное механическое напряжение устанавливалось на уровне 54 - 73% прочности на растяжение. Поскольку кривая зависимости между приложенным напряжением и логарифмом преде-

ла выносливости для AFRP напоминает график зависимости амплитуды механического напряжения от логарифма числа циклов, отдельные волокна, очевидно, разрушаются в результате разрыва при ползучести в условиях ограниченной деформации. Для AFRP-арматуры промышленного назначения действие данного механизма сокращения срока эксплуатации ускоряется за счет воздействия влаги и повышенной температуры (Roylance and Roylance 1981; Rostasy 1997).

3.5—Долговечность

Под влиянием определенных внешних факторов, таких как температура, влажность, воздействие химических веществ, у многих систем FRP наблюдается ухудшение механических свойств. На степень ухудшения механических свойств влияет воздействие окружающей среды, продолжительность такого воздействия, тип и состав смолы, вид волокна и метод отверждения смолы. Более подробно эти факторы рассматриваются в [Разделе 8.3](#). Свойства материала при растяжении, о которых сообщает производитель, основываются на результатах испытаний, проводимых в лабораторных условиях, и не отражают эффекта воздействия окружающей среды. Для того чтобы учесть фактор предполагаемых внешних условий эксплуатации, под воздействием которых система FRP может находиться в течение срока службы, в [Разделе 8.4](#) приводится порядок корректировки указанных свойств.

3.6—Оценка пригодности систем FRP

Оценка пригодности системы FRP для ее использования на строительном объекте производится на основе данных лабораторных испытаний компонентов FRP и состоящих из них ламинированных материалов, результатов прочностных испытаний для соответствующей области применения и данных по долговечности материала с учетом предполагаемых условий окружающей среды. Результаты испытаний, предоставляемые производителем системы FRP и указывающие, что предлагаемая система удовлетворяет всем расчетным механическим и физическим требованиям, включая прочность на растяжение, долговечность, сопротивление ползучести, сцепление с основой и температура T_g , следует учитывать, но не применять в качестве единственного критерия при оценке пригодности системы.

Возможность применения композиционных систем FRP, не прошедших испытаний в полном объеме, вообще не рассматривается. Механические свойства систем FRP определяются путем испытаний готового ламината, при этом процесс испытаний должен носить репрезентативный характер с точки зрения условий последующей эксплуатации. Проверку механических свойств следует осуществлять в общем соответствии с процедурами, описанными в [Приложении В](#). Допускается изменение стандартных процедур испытаний, если требуется смоделировать процесс установки системы в полевых условиях.

Для измерения повторяемости и надежности критических характеристик материала предлагаемые системы оценки пригодности должны предусматривать проведение лабораторных испытаний в достаточном объеме. Рекомендуется проводить испытания на FRP-материалах из разных партий. Для оценки рабочих характеристик си-

стемы с целью того или иного ее конкретного применения можно проводить независимые прочностные испытания.

ЧАСТЬ 3—СТРОИТЕЛЬНЫЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

ГЛАВА 4—ТРАНСПОРТИРОВКА, ХРАНЕНИЕ И ПРИМЕНЕНИЕ

4.1—Транспортировка

Упаковка и транспортировка FRP-систем должны производиться в соответствии с требованиями всех применимых государственных и местных нормативных документов и стандартов. Упаковка, маркировка и перевозка термоотверждающихся смол регулируется нормативом CFR 49. В соответствии законом «Об опасных материалах» многие вещества подпадают под категорию агрессивных, пожароопасных или ядовитых и представлены в подпункте С (CFR 49).

4.2—Хранение

4.2.1 Условия хранения. Для сохранения технических характеристик и обеспечения безопасности хранения компонентов FRP-систем должно производиться в соответствии с рекомендациями изготовителя. Некоторые составы, такие как отвердители, катализаторы, растворители и пр., представляют опасность, поэтому при их хранении необходимо следовать рекомендациями изготовителя и стандартов OSHA. Катализаторы и инициаторы (обычно пероксиды) следует хранить отдельно.

4.2.2 Срок годности при хранении Характеристики неприготовленных смоляных составов могут меняться с течением времени, а также в зависимости от уровня влажности и температуры. Условия хранения могут влиять на реакционную способность как самих смесей, так и конечных изделий. Срок годности, в течение которого характеристики составов на основе смол соответствуют или превосходят заявленные параметры, устанавливается изготовителем. Использование компонентов с истекшим сроком годности, следами разрушений или загрязнений, не рекомендуется. Компоненты FRP-систем, непригодные для дальнейшего применения, должны утилизироваться в соответствии с инструкциями изготовителя, а также применимых местных и государственных нормативных документов.

4.3—Использование

4.3.1 Паспорта безопасности материала. Паспорта безопасности материала (MSDS) на все составляющие и компоненты FRP-систем необходимо получить у изготовителя и хранить на месте проведения работ.

4.3.2 Источники информации. Подробную информацию по применению и потенциальным рискам, возникающим при работе с компонентами FRP-систем, можно найти в источниках информации, таких как отчеты ACI и ICRI, внутренней документации и рекомендациях компании, рекомендациях OSHA и прочих официальных информационных документах. Общие рекомендации по безопасному применению эпоксидных составов приведены в стандарте ACI 503R.

4.3.3 Общие риски при применении. Под термоотверждающимися смолами в общем подразумеваются изделия, которые включают в себя ненасыщенные полиэстеры,

виниловые эфиры, эпоксидные и полиуретановые смолы. Как правило, с ними используются отвердители, пероксидные инициаторы, изоцианаты, пластификаторы и присадки. При работе с термоотверждающимися смолами и их составляющими необходимо соблюдать меры предосторожности. Среди прочих общих рисков, с которыми можно столкнуться при применении таких составов, можно выделить следующее:

- раздражение кожи, ожоги, сыпь и зуд;
- повышение чувствительности кожи, аллергические реакции, похожие на отравление ядовитым сумачом, контакт со стекловатой или прочими аллергенами;
- попадание органических паров растворителей и мономеров в легкие;
- при определенной концентрации в смеси с воздухом вещества могут образовывать взрывоопасные и пожароопасные составы, которые воспламеняются под действием тепла, открытого пламени, искр, статических разрядов, сигаретного пепла и пр.;
- экзотермические реакции смесей веществ могут приводить к возгораниям и травмам; и
- раздражения, вызываемые пылью, которая образуется при шлифовке и обработке затвердевших FRP-систем (для получения подробной информации по возможным рискам обратитесь к документации изготовителя).

В виду того что термоотверждающиеся смолы и сопутствующие компоненты имеют сложный состав, при работе с данными материалами необходимо ознакомиться с информацией, которая дана на ярлыках и в паспортах безопасности. Маркировка опасных веществ, включая термоотверждающиеся смолы, регламентируется частью 1500 стандарта CFR 16. Рекомендации по классификации и мерам предосторожности при работе с данными веществами приведены в стандарте ANSI Z-129.1.

4.3.4 Средства индивидуальной защиты. При работе с волокнистыми материалами и смолами рекомендуется использовать одноразовые комбинезоны и перчатки. Также следует использовать резиновые или полиэтиленовые перчатки, которые после применения утилизируются. Перчатки должны быть изготовлены из материалов, не подверженных влиянию смол или растворителей.

Работы со смолами и растворителями рекомендуется проводить в защитных очках или маске. В случае если на рабочем месте в воздухе присутствуют частицы волокна, пыль или пары органического происхождения, а также при смешивании или нанесении смол рекомендуется использовать средства защиты органов дыхания, такие как маски или респираторы, если на то есть указание изготовителя FRP-системы.

4.3.5 Организация рабочего места. Место проведения работ должно иметь надлежащую вентиляцию. Поверхности рекомендуется накрыть и защитить от попадания смолы. Во избежание повреждений к хранению и применению каждого компонента FRP-системы предъявляются различные требования. Для получения рекомендаций свяжитесь с изготовителем веществ. При смешивании составов некоторые системы могут представлять опасность.

Для получения инструкций по смешиванию составов, а также паспортов безопасности на материалы, в которых указаны возможные риски, обратитесь к документации

изготовителя. При отверждении смеси, содержащие смолы, выделяют тепло, что в свою очередь ускоряет течение реакции. В емкостях с подготовленным составом могут происходить неконтролируемые реакции с выделением дыма, огня или кипением, поэтому такие емкости не следует оставлять без присмотра.

4.3.6 Очистка и утилизация. Для удаления остатков вещества могут потребоваться растворители, которые представляют пожарную опасность, поэтому рекомендуется принять необходимые меры предосторожности. В свободной продаже имеются негорючие растворители. Все отходы следует собрать в емкости и утилизировать в соответствии с требованиями контролирующих природоохранных органов.

ГЛАВА 5—МОНТАЖ

Методики монтажа FRP-систем разрабатываются изготовителями и зачастую отличаются от системы к системе. Кроме того, методики монтажа могут отличаться в зависимости от типа и состояния конструкции. Ниже приведены общие рекомендации по установке FRP-систем. Монтаж FRP-систем рекомендуется доверять подрядчикам, прошедшим обучение в соответствии с методиками установки, которые разработаны изготовителем. Отклонения от инструкций изготовителя FRP-системы без одобрения изготовителя не допускаются.

5.1—Компетентность подрядчика

Подрядчики, производящие монтаж FRP-систем, должны иметь подтверждение компетентности в подготовке поверхностей и нанесении FRP-систем. Таким подтверждением может служить сертификат о прохождении соответствующего обучения, документация, подтверждающая выполнение подобных работ подрядчиком, или пробная подготовка участков с последующим монтажом FRP-системы на поверхность конструкции. Изготовитель FRP-системы или его официальный представитель должны провести обучение сотрудников подрядной организации, осуществляющей монтаж системы, а также проверить их компетентность.

5.2—Температура, влажность воздуха и поверхности

Температура, относительная влажность воздуха и влажность поверхности при проведении монтажных работ могут оказывать влияние на рабочие характеристики FRP-систем. Среди прочего перед монтажом и в его процессе необходимо следить за такими параметрами, как температура поверхности бетона, температура и относительная влажность воздуха, а также точка росы.

Нанесение грунтовок, смоляных пропиток и клеящих составов на холодные или промерзшие поверхности запрещено. Понижение температуры поверхности бетона до минимальной отметки, указанной изготовителем FRP-системы, приводит к нарушению пропитки волокон и отверждения компонентов состава, что негативно сказывается на целостности системы. Для повышения температуры окружающей среды и поверхности при монтаже рекомендуется использовать дополнительный источник тепла. Источник тепла должен быть чистым, чтобы не

загрязнять поверхность бетона или неотвердевшую систему FRP.

Нанесение смол и клеевых составов на влажные поверхности допускается только при условии, если данные вещества разработаны специально для применения на влажных поверхностях. Не рекомендуется наносить FRP-системы на бетонные поверхности, проницаемые для паров. Пар, который проникает в неотвердевшую смолу с бетонной поверхности, образует пузырьки, которые ухудшают связь между FRP-системой и бетонной подложкой.

5.3—Оборудование

В комплект каждой FRP-системы входит специальное оборудование, предназначенное для нанесения материалов. Сюда могут входить пропиточные агрегаты, распылители, подъемные устройства и манипуляторы, а также намоточные машины. Все оборудование необходимо содержать в хорошем техническом состоянии и следить за его чистотой. Специалисты подрядчика должны пройти обучение эксплуатации данного оборудования. При выполнении работ необходимо подобрать и использовать надлежащие средства индивидуальной защиты, такие как перчатки, маску, защитные очки и комбинезон. Оборудование и расходные материалы должны поставляться в количестве, достаточном для выполнения проекта и обеспечения качества.

5.4—Подготовка и ремонт поверхности

Поведение бетонных конструкций, упрочненных или восстановленных при помощи FRP-систем, во многом зависит от состояния бетонной подложки, подлежащей ее подготовке и ремонту. Нарушения, допущенные при подготовке поверхности, могут привести к ослаблению связи и расслоению FRP-систем до того, как достигнута расчетная нагрузка. Общие рекомендации, приведенные в данном разделе, применимы ко всем наружным FRP-системам. Специальные рекомендации для отдельных FRP-систем необходимо получить у изготовителя. Работы по подготовке поверхности могут вызывать неудобства для обитателей здания, иметь повышенный уровень шума и приводить к образованию пыли.

5.4.1 Ремонт бетонной подложки. Перед началом подготовки бетонной поверхности необходимо устранить все проблемные участки покрытия и подложки, которые могут негативно сказаться на целостности FRP-системы. В стандартах ACI 546R и ICRI 03730 даны подробные инструкции по подготовке и ремонту бетонных поверхностей. Отремонтированные участки бетонных конструкций должны отвечать требованиям проектных чертежей и технических условий проекта. Перед началом работ необходимо проконсультироваться с изготовителем FRP-системы по вопросам совместимости материалов, применяемых в ходе ремонта подложки, с системой.

5.4.1.1 Коррозионное разрушение. Наружные FRP-системы не рекомендуется наносить на бетонную подложку конструкций, где имеется подозрение на наличие арматуры, поврежденной коррозией. Расширяющее усилие, возникающее при коррозии, очень сложно рассчитать. Оно может негативно сказываться на прочности наружной системы FRP, поэтому до начала ее нанесения

необходимо провести анализ причин возникновения коррозии и коррозионного разрушения и отремонтировать поврежденные участки.

5.4.1.2 Заливка трещин. Некоторые изготовители FRP-систем сообщают, что движение трещин шириной от 0.3 мм может привести к ухудшению характеристик FRP-систем, вызывать расслоение и разрушение волокон. Таким образом, трещины шириной свыше 0.3 мм рекомендуется залить эпоксидной смолой под давлением согласно требованиям ACI 224.1R. Во избежание развития коррозии на существующей стальной арматуре небольшие трещины, подверженные воздействию агрессивной среды, также рекомендуется залить смолой или герметиком. Информация по ширине трещин для различных условий эксплуатации приведена в стандарте ACI 224R.

5.4.2 Подготовка поверхности. Требования, предъявляемые к подготовке поверхности, зависят от условий применения FRP-системы. Такие условия можно разделить на две группы: в первом случае важнейшее значение имеет прочность связи, а во втором - контакт. Прочность связи между FRP-системой и бетонной поверхностью важна при упрочнении балок, колонн, плит или стен и для повышения их стойкости к срезу и изгибающим нагрузкам. В таких случаях, как, например, защита колонн наибольшее значение имеет плотность контакта между FRP-системой и бетоном. Здесь не требуется высокая прочность связи между FRP-системой и бетонной подложкой, хотя, иногда она необходима для облегчения монтажа.

5.4.4.1 Условия применения, в которых наибольшее значение имеет прочность связи. Подготовка поверхности в таких условиях должна вестись в соответствии с рекомендациями стандартов ACI 546R и ICRI 03730. Исходная поверхность или отремонтированные участки, на которые накладываются материалы, не должны иметь следов незакрепленного или некачественного материала. Перед нанесением материала на углы элементов прямоугольного сечения, такие углы необходимо скруглить до минимального радиуса 13 мм, что позволит защитить систему от образования локальных напряжений и полостей между материалом и бетонным основанием. Грубую поверхность углов необходимо сгладить при помощи шпательки. Характеристики систем могут зависеть от имеющихся в конструкции монолитных деталей, вогнутых поверхностей, входящих углов и пр., которые необходимо учитывать. Перед началом монтажных работ все мешающие элементы необходимо устранить. Для поддержания должной прочности связи между материалом и бетонной подложкой входящие углы и вогнутые полости могут потребовать более детальной проработки. При подготовке поверхности рекомендуется использовать абразивные или водоструйные системы. Следы цементного молока, пыли, грязи, смазки, отвердителей, покрытий и прочих веществ, которые могут нарушить связь материала с бетоном, рекомендуется удалить. Поры и прочие небольшие отверстия при шлифовке поверхности необходимо открыть. По завершению шлифовки поверхность необходимо очистить и обеспечить защиту от попадания загрязнений до момента установки FRP-системы.

Подготовленная бетонная поверхность должна как минимум отвечать требованиям класса CSP 3 в соответствии со стандартом подготовки бетонных поверхностей ICRI.

В случае если требуется более агрессивная обработка, необходимо проконсультироваться с изготовителем FRP-системы. Точечные несоответствия поверхности, включая следы от опалубки, не должны превышать 1 мм или допуски, определенные изготовителем FRP-системы. Локальные несоответствия рекомендуется удалить до абразивной или водяной обработки при помощи шлифовальной машины. Для сглаживания микродефектов рекомендуется использовать замазку на эпоксидной основе. Полости и поры рекомендуется удалить при помощи эпоксидной замазки.

Перед нанесением упрочняющего покрытия все поверхности необходимо просушить в соответствии с рекомендациями изготовителя FRP-систем. Вода, попавшая в поры, может замедлить проникновение смолы и ослабить механическую связь. Оценку содержания влаги рекомендуется проводить в соответствии с требованиями стандарта ACI 503.4.

5.4.2.2 Условия применения, в которых наибольшее значение имеет площадь контакта—При облицовке бетонных элементов конструкции подготовка поверхности должна обеспечивать непрерывный и плотный контакт с подложки с материалом. Обертываемые поверхности должны как минимум быть плоскими или выпуклыми, что обеспечит необходимую нагрузку на FRP-систему. Крупные поверхностные полости рекомендуется устранить при помощи замазки, совместимой с основным бетонным материалом.

Вещества, обладающие низкой компрессионной прочностью и малым модулем упругости (например, штукатурка), могут снизить эффективность FRP-системы, поэтому их рекомендуется удалить.

5.5—Подготовка смол

Подготовка смол производится в соответствии с инструкцией изготовителя FRP-системы. Все компоненты состава рекомендуется подогреть до необходимой температуры и смешивать в нужной пропорции до образования однородной массы. Компоненты обычно окрашены в различные цвета, поэтому состав считается подготовленным, когда он приобретает однородный цвет.

Составы рекомендуется смешивать в течение рекомендованного времени, после чего их необходимо проверить на равномерность цвета. Рекомендации по размеру партий, соотношениям веществ, методикам подготовки и времени смешивания предоставляются изготовителем.

Для подготовки составов используются электрические миксеры или специальные агрегаты. При необходимости допускается смешивание вручную. Рекомендуется подготавливать составы небольшими партиями, позволяющими использовать их до истечения срока хранения. Применение подготовленных составов с истекшим сроком хранения не рекомендуется, поскольку такие составы имеют высокую вязкость, которая продолжает увеличиваться, что негативно сказывается на их способности проникать в поверхность и насыщать волокна.

5.6—Нанесение компонентов

Нанесение некоторых смол может сопровождаться выделением дыма. При подборе FRP-систем рекомендуется учитывать воздействие на окружающую среду, выделе-

ние летучих органических веществ и токсичность материалов.

5.6.1 Грунтовки и шпатлевки. Если имеется подобная необходимость, грунтовки рекомендуется нанести на все бетонные поверхности, на которые устанавливается FRP-система. Грунтовка равномерно наносится на подготовленную поверхность в количестве, рекомендованном изготовителем. По завершению грунтования поверхность необходимо защитить от попадания пыли, влаги и прочих загрязняющих веществ до момента установки FRP-системы.

При нанесении шпатлевки и грунтовании необходимо руководствоваться рекомендациями FRP-системы. Шпатлевка, совместимая с покрытием, (обычно - это густая эпоксидная паста) используется только для заполнения полостей и устранения небольших дефектов перед нанесением прочих материалов. После того как шпатлевка затвердела, острые кромки и следы от шпателя необходимо зашлифовать.

Перед нанесением пропиточной смолы или клеевого состава грунтовка и шпатлевка должны отвердеть в соответствии с рекомендациями изготовителя FRP-системы. После полного отвердевания шпатлевки и грунтовки и перед нанесением клеевого состава или пропиточной смолы может потребоваться дополнительная подготовка поверхности. Рекомендации по подготовке поверхности необходимо получить у изготовителя FRP-системы.

5.6.2 Системы с влажной укладкой. Установка подобных систем обычно производится с использованием сухого листового материала и пропиточной смолы. При монтаже необходимо следовать рекомендациям изготовителя. Пропиточная смола равномерно наносится на все поверхности, подготовленные для установки материала. Перед укладкой на бетонную поверхность сам материал также можно пропитать смолой при помощи специального агрегата.

Материал рекомендуется аккуратно погрузить в подготовленную пропиточную смолу в соответствии с рекомендациями изготовителя FRP-системы. До того, как смола «схватилась», рекомендуется удалить воздух, попавший между слоями материала, при помощи валика. Количество смолы должно быть достаточным для обеспечения полной пропитки волокон.

Последующие слои смолы и материала накладываются до того, как предыдущий слой смолы полностью отвердеет. В противном случае может потребоваться дополнительная промежуточная подготовка слоев при помощи шлифовки или растворителя, наносимого в соответствии с рекомендациями изготовителя системы.

5.6.3 Системы, рассчитанные на машинную укладку. В таких системах используются заранее пропитанные или сухие жгуты. Пропитка жгутов производится заблаговременно, после чего они доставляются на площадку в виде бобин с подготовленным материалом. Сухой жгут пропитывается на месте при помощи обмоточной машины.

Обмоточные машины в основном используются для автоматического обертывания бетонных колонн. Укладка жгутов производится либо горизонтально, либо под определенным углом. Агрегат устанавливается вокруг колонны и автоматически оборачивает жгут по ее периметру, поднимаясь и опускаясь.

По завершению установки материалу необходимо отвердеть при повышенной температуре. Обычно нагревательный элемент устанавливается вокруг колонны и обеспечивает температурный режим в соответствии с рекомендациями изготовителя. Для обеспечения высокого уровня качества ведется строгий контроль температуры. Полученный кокон из FRP не имеет швов, поскольку намотка жгута производится непрерывно. Рекомендации изготовителя FRP-систем должны применяться вне зависимости от типа устанавливаемой системы.

5.6.4 Системы с предварительным отверждением. Подобные системы (полосы, обечайки и пр.) монтируются при помощи клеевых составов, которые равномерно распределяются по заранее подготовленным участкам, за исключением тех зон, где крепление FRP-системы на бетонную подложку не обязательно.

Поверхность отвержденного ламината не должна иметь разрывов. Подготовка и очистка ламината производится в соответствии с рекомендациями изготовителя. Установка отвержденных листов или обечайек производится на смоченную клеевым составом поверхность согласно инструкции изготовителя. До того как смола схватилась, рекомендуется удалить воздух, попавший между слоями материала, при помощи валика. Клеевой состав наносится в соответствии с рекомендациями изготовителя FRP-системы в количестве, обеспечивающем полное скрепление последующих слоев.

5.6.5 Защитные покрытия. Совместимые с FRP-системой покрытия наносятся в соответствии с рекомендациями изготовителя. Использовать растворители для предварительной очистки поверхности не рекомендуется из-за возможного разрушения полимерных смол. Защитные покрытия, содержащие растворители, перед нанесением должны получить одобрение изготовителя системы.

Для обеспечения надлежащей эффективности покрытия подлежат регулярному осмотру и обслуживанию.

5.7—Подгонка материала

Рекомендуется определиться с направлением слоев материала и последовательностью наложения слоев. Отклонения в углах наложения материала даже на 5 градусов от требуемого для совмещения волокон могут существенно снизить прочностные характеристики. Отклонения от заданного направления слоев допустимы только по согласованию с инженером.

При работе с листовым или рулонным материалом необходимо соблюдать прямое расположение и нужное направление волокон. Обо всех перегибах и неровностях материала следует сообщить инженеру.

5.8—Использование многослойных покрытий и перехлестов

Использование нескольких слоев материала допускается при условии, если все слои полностью пропитаны смолой, прочность смолы на сдвиг достаточна для распределения нагрузки между слоями, а прочность сцепление материала и бетона надежно. При обработке длинных участков поверхности для обеспечения непрерывности распределения нагрузок несколько листов или рулонов материала могут устанавливаться внахлест. Нахлесты рекомендуется располагать в шахматном порядке, если

отсутствуют иные указания инженера. Параметры нахлеста, включая длину, рекомендуется подбирать на основании результатов опытов, а также рекомендаций производителя. Некоторые FRP-системы обладают специфическими характеристиками и не предполагают использования многослойных конструкций и нахлестов. Подробные рекомендации по использованию нахлестов приведены в Главе 12.

5.9—Отверждение смол

Данный процесс зависит от температуры и времени. Для полного отверждения смол, рассчитанных на застывание при комнатной температуре, может потребоваться несколько дней. Колебания температур, равно как установка систем при высоких и низких температурах, могут ускорить или замедлить процесс. В зависимости от предполагаемых условий изготовитель FRP-систем может предложить несколько марок смол.

Системы, в которых используются смолы с высокотемпературным отверждением, необходимо нагревать и выдерживать в течение заданного времени. Полное отверждение системы на заданном объекте может достигаться при различных сочетаниях температуры и длительности выдержки.

Отверждение смол должно проходить в соответствии с рекомендациями изготовителя. Внесение изменений в состав смол в полевых условиях недопустимо.

Перед нанесением последующих слоев материала необходимо проверить состояние уже установленного слоя. При обнаружении дефектов затвердевания монтаж последующих слоев запрещен.

5.10—Теплоизоляция

Неблагоприятные температурные условия, атмосферные осадки, пыль или грязь, солнечные лучи, высокая влажность и пр. могут привести к повреждению FRP-системы в ходе установки и вызвать нарушения в отверждении смол. В ходе монтажа и до полного высыхания смол рекомендуется использовать временные средства защиты, такие как палатки или полиэтиленовые экраны. Временные опоры (если они установлены) снимаются только после того, как FRP-система полностью отвердела, после чего вся нагрузка может быть передана на обработанный элемент. В случае если при монтаже FRP-системы обнаружено повреждение, необходимо сообщить о дефекте инженеру и получить рекомендации изготовителя системы.

ГЛАВА 6—ТЕХНИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ, АНАЛИЗ И ПРИЕМКА

Требования по контролю и обеспечению качества (QA/QC) являются обязательными для изготовителей FRP-систем, подрядчиков, осуществляющих их монтаж, а также всех лиц, участвующих в проекте. Программы контроля качества должны быть всеобъемлющими и включать в себя все аспекты проекта по усилению конструкций. Уровень контроля качества, объем работ по испытаниям, контролю и регистрации данных зависят от масштаба и сложности проекта.

В объем работ по обеспечению качества входит ряд проверок и опытов, целью которых является официальное

подтверждение надлежащего качества смонтированной системы. В технические условия по проекту необходимо включить требование о предоставлении плана обеспечения качества на монтаж и отвердевание всех материалов FRP-системы. План должен содержать пункты, посвященные индивидуальной защите, нанесению и контролю FRP-системы, расположению и размещению мест склейки, условиям отвердевания, средствам, применяемым для просушки поверхности, контрольным пробам, очистке и предоставляемой документации, которая перечислена в **Разделе 13.3.**

6.1—Технический контроль

FRP-системы и все выполняемые работы подлежат контролю в соответствии с требованиями нормативно-технической документации. Если такие требования отсутствуют, контроль проводится силами аттестованного инженера или инспектора или под их надзором. Инспектирующий персонал должен иметь опыт работы с FRP-системами и их монтажом. Аттестованный инспектор производит проверку соответствия системы проектным чертежам и техническим условиям. В ходе монтажа FRP-системы проводятся ежедневные проверки, включающие в себя следующее:

- регистрация даты и времени установки;
- регистрация температуры окружающей среды, относительной влажности и общих метеопараметров;
- фиксация температуры поверхности бетона;
- регистрация содержания влаги на поверхности согласно ACI 503.4;
- описание методик подготовки поверхности и получаемого профиля согласно стандарту ICRI;
- качественное описание чистоты поверхности;
- информация о типе вспомогательного источника тепла (при его наличии);
- данные по ширине трещин, не прошедших эпоксидную обработку;
- номера партий материала или ламината, приблизительное расположение партии на конструкции
- номер партии, соотношения в смеси, время подготовки смеси, качественное описание внешнего вида всех полученных смол, включая грунтовки, шпатлевки, наполнители, клеящие составы и покрытия, подготовленные за сутки;
- результаты наблюдения процесса отвердевания смол;
- соответствие методикам монтажа;
- результаты испытания покрытия на прочность: прочность сцепления, режимы отказа и местоположение;
- характеристики FRP-системы, полученные по результатам полевых испытаний панелей или образцов (по применимости);
- данные по расположению и размеру расслоений или пустот; и
- общая информация по ходу выполнения работ.

Инспектор должен предоставить проектировщику или владельцу результаты контроля и образцы. Документацию и образцы рекомендуется сохранять в течение не менее 10 лет с момента установки или в течение срока, указанного проектировщиком. Подрядчик, осуществляющий монтажные работы, должен производить отбор

проб смесей и регистрировать местоположение каждой партии.

6.2—Анализ и приемка

Анализ FRP-систем и их приемка/отбраковка производятся на основании их соответствия или несоответствия проектным чертежам и техническим условиям. FRP-системы проверяются по следующим показателям: характеристики материала, установка в рамках указанных допусков, наличие расслоений, твердость смол, сцепление с подложкой. Кроме того, необходимо оценить монтажные допуски, включая направление волокон, толщину отвердевшего материала, направление слоев, ширину и расстояние, радиусы углов, длину нахлестов.

Для оценки качества установленной FRP-системы используются образцы панелей и испытания на прочность. При проверке поведения упрочненного элемента дополнительно может применяться испытание под нагрузкой (Nanni и Gold 1998).

6.2.1 Материалы. До начала проекта поставщик FRP-системы обязан предоставить сертификат, где указаны свойства материала, а также дать описание всех применяемых материалов. При высокой сложности проекта могут потребоваться дополнительные испытания материала. Поставляемый материал FRP-систем проходит проверки на прочность при растяжении, ИК-спектральный анализ, проверку на T_g , время гелеобразования и срок хранения, а также сопротивление клеящего слоя на сдвиг. Обычно подобные испытания проводятся на образцах в лабораторных условиях в соответствии с планом контроля качества. Проверка срока хранения и твердости смолы при отвердевании производятся на месте.

Материалы, не отвечающие минимальным требованиям, указанным проектировщиком, подлежат отбраковке.

Для анализа прочности системы на растяжение и модуля упругости, прочности стыков, твердости и T_g системы FRP, установленной и затвердевшей на месте, могут использоваться контрольные образцы, которые выполняются по тем же методикам, что и основная система. В ходе монтажа системы рекомендуется изготовить плоские панели заданной толщины и размеров в соответствии с заранее оговоренным планом отбора проб. Отвердевшие на площадке панели отправляются в лабораторию для проведения испытаний. Рекомендуется сохранять испытательные образцы или своевременно предоставлять их в аккредитованную лабораторию для проведения проверки на прочность, твердость и T_g . Прочность и модуль упругости материалов FRP-систем определяются в соответствии с требованиями стандартов ASTM D 3039 и ISIS (1998). Необходимо определить перечень параметров, оцениваемых в ходе испытания. Интервал проведения испытаний определяется проектировщиком, который также может вносить изменения.

Использование некоторых FRP-систем, рассчитанных, к примеру, на предварительную обработку смолой или машинную установку, не позволяет изготовить плоские образцы малого размера. В таких случаях проектировщик вправе изменить требования и провести проверку панелей или образцов, которые предоставляются изготовителем. Для анализа прочности на разрыв и расчета модуля упругости, а также вычисления прочности стыков FRP-

материалов допускаются испытания на разрыв кольцевых образцов, изготовленных на месте (ISIS 1998).

В ходе монтажа в соответствии с планом отбора проб рекомендуется подготовить небольшие пробирки со смешанным составом, которые применяются для определения степени готовности материала (см. [Раздел 6.2.4](#)).

6.2.2 Направление волокон. Направление волокон или жгута проверяются в ходе визуального осмотра. В системах, рассчитанных на установку мокрым наложением, необходимо провести анализ складок, т.е. местных дефектов, отличающихся по направлению от общего полотна и проявляющихся в виде складок или перегибов.

Обо всех отклонениях в направлении волокна или ламината свыше 5 градусов от указанного в проектных чертежах (порядка 80мм/м) необходимо сообщить проектировщику, который принимает решение о принятии или отбраковке.

6.2.3 Расслоения. Отвердевшую FRP-систему необходимо проверить на наличие расслоений или пузырьков воздуха между слоями или между покрытием и бетонной подложкой. Применяемые методики контроля должны обеспечивать регистрацию дефектов площадью от 1300 мм². Для выявления расслоений могут использоваться такие методики, как акустическое зондирование, УЗК и термография.

Необходимо провести анализ влияния расслоений и прочих дефектов на структурную целостность и долговечность FRP-системы. При анализе следует принимать во внимание размеры расслоения, его местоположения, а также количество относительно общей площади нанесения.

Ниже приведены общие критерии приемки для систем, рассчитанных на установку методом влажной укладки:

- Допускается наличие небольших расслоений площадью менее 1300мм² каждое при условии, если общая площадь расслоения не превышает 5% от площади покрытия, а на 1м² покрытия приходится не более 10 подобных дефектов 22
- Значительные расслоения площадью свыше 16000мм² могут негативно сказаться на работе установленной FRP-системы и подлежат селективному ремонту. В ходе ремонта дефектный участок вырезается и закрывается заплатой, толщин которой соответствует толщине основного слоя; и
- Для устранения расслоений площадью менее 16000мм² допускается выполнение ремонта при помощи заливки смолой или установки заплат в зависимости от количества или размеров расслоений, а также их расположения.

При работе с предварительно пропитанными FRP-системами анализ расслоений и их ремонт производится в соответствии с указаниями проектировщика. По завершению ремонта проводится повторная проверка, в ходе которой оценивается качество ремонта.

6.2.4 Отверждение смол. Проверка относительного отверждения смол проводится в лабораторных условиях, где контрольные образцы материала или пробы смолы анализируются в соответствии с требованиями стандарта ASTM D 3418. Относительное отверждение смол на площадке проверяется визуальным осмотром и проверкой поверхности контрольных образцов на липкость и твер-

дость. Требования по отверждению смол, применяемых в FRP-системе, необходимо получить у изготовителя. При работе с системами с предварительной обработкой смолой необходимо провести измерение твердости и сцепления в соответствии с рекомендациями изготовителя.

6.2.5 Прочность сцепления. При установке систем в условиях, где критическое значение имеет прочность сцепления, рекомендуется провести проверку склеенного материала на растяжение с использованием методик, которые даны в стандартах ACI 503R, ASTM D 4541 или ISIS (1998). Необходимо также определить частоту отбора проб. Прочность сцепления на разрыв не должна быть ниже 200 фунтов на кв. дюйм (1.4 МПа). При этом при проверке отрыв должен происходить с нарушением бетонной подложки. Обо всех разрывах между FRP-системой и бетоном, разрывах слоев и низких показаниях прочности необходимо сообщить проектировщику, который обязан провести проверку и принять решение о возможной отбраковке.

6.2.6 Толщина отвержденного материала. Для проверки толщины слоев и их количества используются пробы (по типу керн) диаметром порядка 13 мм. Анализ производится в виде осмотра. Для подтверждения толщины ламината и количества слоев также могут применяться образцы, предназначенные для проверки сцепления. Необходимо также определить частоту отбора проб. Не рекомендуется брать образцы в зоне нахлеста или на участках, подверженных воздействию высоких напряжений. Для улучшения внешнего вида отверстия, из которых берутся пробы, рекомендуется заполнить ремонтным составом или шпатлевкой, изготовленной из FRP-системы и зашлифовать. При необходимости также на участок, заполненный смолой и зашлифованный, накладывается заплата длиной от 1000 до 200 мм. Заплата устанавливается сразу после отбора пробы FRP в соответствии с инструкциями изготовителя

ГЛАВА 7—ТЕХНИЧЕСКОЕ ОБСЛУЖИВАНИЕ И РЕМОНТ

7.1—Общая информация

Подобно любым иным системам, используемым для упрочнения или модернизации бетонных конструкций, FRP-система подлежит регулярному осмотру и проверке характеристик, которые проводятся заказчиком. Перед началом ремонтных работ или обслуживания необходимо определить и устранить причины повреждений или неисправностей, выявленных в ходе планового осмотра.

7.2—Контроль и экспертиза

7.2.1 Общий контроль. В ходе визуального контроля проводится проверка на изменение цвета, дефекты сцепления, отслоения, вспучивания, растрескивание, прогибы, следы арматурной коррозии и прочие дефекты. Акустическое зондирование, термография и ультразвуковой контроль позволяют выявить прогрессирующее расслоение.

7.2.2 Испытание. В объем испытаний включается проверка на прочность ([Раздел 6.2.5](#)) или традиционные испытания под нагрузкой.

7.2.3 Экспертиза. Результаты испытаний и наблюдений используются для анализа повреждений и расчета

прочности системы. По результатам экспертизы могут быть выпущены рекомендации по устранению выявленных дефектов, а также профилактике их повторного появления.

7.3—Ремонт FRP-системы

Способ ремонта FRP-системы зависит от причин возникновения повреждений, типа материала, формы и уровня повреждения. Перед началом ремонта необходимо выявить и устранить причины повреждения.

Локальные дефекты, включая местное растрескивание материала и абразивные повреждения, влияющие на прочность материала, необходимо устранить. Для устранения локальных дефектов используются заплатки, которые наклеиваются поверх поврежденного участка. Характеристики заплат (толщина, направление слоев) должны соответствовать характеристикам основного материала FRP-системы. Установка заплат производится согласно инструкциям изготовителя. Для заделки локальных повреждений используется эпоксидная смола. При масштабных дефектах (отслоениях больших участков) поврежденный участок необходимо вырезать, бетонную поверхность подготовить повторно и заменить участок ламината.

7.4—Ремонт поверхностного покрытия

Перед заменой защитного поверхностного покрытия рекомендуется провести осмотр ламината на наличие дефектов или повреждений. Замена защитного слоя производится с применением технологии, одобренной изготовителем.

ЧАСТЬ 4—ПРОЕКТНЫЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

ГЛАВА 8—ОБЩАЯ ОЦЕНКА ПРОЕКТА

В настоящей главе представлены общие проектные рекомендации, основанные на традиционных принципах проектирования состава железобетона, изложенных в требованиях ACI 318-99, и знаниях удельных механических характеристик усиления FRP.

Для обеспечения сопротивления растягивающим силам при сохранении совместности деформации между FRP и бетонной подложкой рекомендуется разработка систем FRP для армирования конструктивных элементов. При этом не следует полагать, что применение системы FRP сможет противостоять силам сжатия. Тем не менее, на работающей на растяжение арматуре FRP допускается сжатие, возникающее при изменениях момента сопротивления или схем нагрузки. При этом рекомендуется не учитывать сопротивление сжатию самой системы FRP.

8.1—Принцип проектирования

Данные проектные рекомендации основаны на принципах предельных состояний. Этот подход устанавливает допустимые уровни безопасности против возникновения как предельных состояний работоспособности (чрезмерные смещения, растрескивание), так и полных предельных состояний (повреждение, разрушение при напряжении, усталость). При оценке номинальной прочности конструктивного элемента рекомендуется производить анализ возможных состояний повреждений и последую-

щих деформаций и напряжений каждого материала. Для оценки эксплуатационной надежности конструктивного элемента могут использоваться такие конструкторские принципы, как расчёт железобетонных конструкций по допускаемым напряжениям и метод приведенных сечений.

Разработку систем FRP для армирования конструктивных элементов рекомендуется производить в соответствии с требованиями, предъявляемыми к прочности и эксплуатационной надежности, и с использованием коэффициентов нагрузки, указанных в ACI 318-99. Кроме того, следует также использовать коэффициенты концентрации напряжений, приводимые в ACI 318-99. В настоящем руководстве мы рекомендуем использовать дополнительные коэффициенты концентрации напряжений для расчета усиления FRP, что позволит получить более подробные данные о системах FRP, которые известны гораздо меньше по сравнению с железобетоном и предварительно напряженным бетоном. При возникновении сомнений относительно данных о прочности имеющихся материалов или состоянии бетонной подложки, которые не рассматриваются в настоящем руководстве, инженер может применить традиционные коэффициенты концентрации напряжений.

Для проектирования систем FRP для сейсмостойких конструкций может потребоваться использование методики проектирования нагрузок (разработанной Полеем и Пристли в 1992 г.), в которой применяется предположение о том, что конструкция должна работать с полной нагрузкой и обеспечивать сопротивление конструктивных элементов соответствующим напряжениям при сдвиге. Разработка систем FRP, особенно при использовании для колонн, рекомендуется для обеспечения сейсмостойкости за счет рассеяния энергии и сопротивления смещению на уровне базовых значений, определенных нормативными документами. Если заказчик не устанавливает какие-либо дополнительные требования по рабочим характеристикам, основной целью сейсмостойкого проектирования является обеспечение безопасности жизни людей. При этом допускается определенная степень повреждений конструкций для обеспечения рассеяния энергии. Следовательно, после воздействия сейсмической волны может потребоваться ремонт или замена некоторой части модифицированных элементов конструкции. Входить в поврежденное землетрясением здание, особенно во время или после следующих за землетрясением пожаров, рекомендуется с большой осторожностью.

8.2—Пределы усиления

Определение разумно допустимых пределов усиления рекомендуется проводить с большой тщательностью. Эти пределы применяются в обязательном порядке для защиты конструкции от разрушения в том случае, если происходит нарушение сцепления или иные повреждения системы FRP вследствие пожара, актов вандализма или других причин. Некоторые проектировщики и производители данных систем рекомендуют использовать элементы конструкции достаточной прочности, способные выдерживать нагрузки определенного уровня, если подобные конструкции не имеют усиления FRP. При использовании рассматриваемого принципа проектирова-

ния, в случае повреждения системы FRP конструкция будет способна выдерживать нагрузки разумно допустимого уровня и не разрушаться. Комитет рекомендует обеспечивать такую прочность существующих конструкций, которая была бы достаточной для выдерживания нагрузки такого уровня, который определяется с помощью **Уравнения (8-1)**.

$$(\phi Rn)_{\text{существ.}} \geq (1,2S_{DL} + 0,85S_{LL})_{\text{новая}} \quad (8-1)$$

Более подробно предельные значения для конструкций, которым присваивается определенный класс огнестойкости, приводятся в **пункте 8.2.1**.

8.2.1 Предел огнестойкости конструкций — Уровень прочности, который можно обеспечить за счет внешней FRP-системы зачастую ограничивается требованиями действующих норм по применению конструкций определенного класса огнестойкости. Полимерные смолы, используемые для влажной укладки и систем FRP с препрегом, а также полимерные клеящие пасты, применяемые в предварительно отвержденных системах FRP утрачивают конструктивную целостность при температурах, превышающих температуру стеклования T_g полимера. Хотя температура стеклования и может изменяться в зависимости от химического состава полимера, типичный температурный диапазон для смол и клеящих составов, применяемых на месте, составляет от 140 до 180 °F (60 – 82 °C). С учетом высоких температур, возникающих при пожаре, и низкой температуроустойчивости системы FRP, последняя не сможет выдержать воздействие пламени в течение существенно ощутимого времени. Более того, зачастую нельзя выполнить такую изоляцию системы FRP, которая смогла бы существенно увеличить ее огнестойкость, поскольку слой подобной изоляции был бы намного больше того, который можно было бы реально установить.

Хотя сама система FRP имеет низкий предел огнестойкости, при ее установке в существующую бетонную конструкцию предел огнестойкости может повышаться до приемлемого уровня. Это происходит исключительно благодаря высокой огнестойкости бетонной конструкции. При анализе огнестойкости бетонной конструкции с усилением FRP важно учитывать то, что прочность традиционных железобетонных конструкций также несколько уменьшается при воздействии высоких температур, возникающих при пожаре. При снижении предела текучести арматурной стали уменьшается также и предел прочности на сжатие бетона. В результате полное сопротивление железобетонных конструкций воздействиям нагрузки понижается. Этот принцип используется в ACI 216R для определения метода расчета предела огнестойкости бетонных конструкций. В ACI 216R приводятся предельные значения, обеспечивающие надлежащий уровень безопасности для предотвращения полного разрушения конструкции при пожаре.

Если использовать принципы, установленные в ACI 216R, для железобетонных конструкций с усилением FRP, предельные значения усиления могут применяться для гарантии того, что усиленная конструкция при пожаре не обрушится. Можно рассчитать сопротивление конструкции эффектам нагрузки с учетом уменьшенной прочности

стали и бетона и без учета прочности усиления FRP. Затем данное сопротивление можно сравнить с заданной нагрузкой на элемент конструкции. Это необходимо для обеспечения гарантии того, что конструкция не обрушится под эксплуатационными нагрузками и воздействием высоких температур.

Если в элементе конструкции применяется усиление FRP, то его фактический предел огнестойкости должен удовлетворять условиям **Уравнения (8-2)**. Значения эффектов нагрузки S_{DL} и S_{LL} рекомендуется определять с учетом действующих требований по нагрузке на конструкцию. Если система FRP предназначается для обеспечения большей несущей способности конструкции, необходимой, например, при увеличении переменной нагрузки, эффекты нагрузки следует рассчитывать с учетом данных более высоких нагрузок.

$$(Rn)_{\text{факт.}} \geq S_{DL} + S_{LL} \quad (8-2)$$

Номинальное сопротивление элемента конструкции при воздействии высоких температур $R_{n\phi}$ может быть рассчитано с учетом указаний, приводимых в ACI 216R. Данное сопротивление рекомендуется рассчитывать по времени требуемого предела огнестойкости конструкции, например, два часа. При этом следует игнорировать сопротивление системы FRP. Кроме того, если система FRP предназначена для компенсации потери прочности, которая происходит, например, при износе, такая потеря должна отражаться в сопротивлении.

Предел огнестойкости материалов FRP можно увеличить с помощью определенных полимеров или методов противопожарной защиты. Несмотря на то, что эти методы, как правило, непрактичны, они могут стать более эффективными в будущем. Если при испытаниях подобных методов подтверждается повышение пределов огнестойкости системы FRP до степени их соответствия классу огнестойкости строительной конструкции, условия, применяемые в **Уравнении (8-2)**, могут быть изменены так, чтобы они могли отражать уровень обеспечиваемой защиты. Однако при испытаниях данных систем рекомендуется использовать конечные критерии, определяемые путем изменения температуры полимера до температуры стеклования. То есть предел огнестойкости FRP-системы следует устанавливать на определенное время, необходимое для того, чтобы смолы, входящие в состав полимера или клеящих веществ в системе FRP, могли достигнуть температуры стеклования при нагревании. В стандарте ASTM E 119 приводятся указания по характеристикам нагрева (температура и продолжительности), применяемого для подобных испытаний.

8.2.2 Полная прочность конструкции – Несмотря на то, что системы FRP эффективны для усиления прочности элементов на изгиб и на сдвиг и обеспечения дополнительных ограничений, они могут не влиять на другие характеристики, такие как срез при пробивке и несущая способность оснований. Важно убедиться в том, что все элементы конструкции способны выдерживать ожидаемое повышение нагрузок, относящихся к усиленным элементам.

Рекомендуется провести дополнительную проверку на элементе конструкции, армированном с использованием

FRP, чтобы проверить, действительно ли в условиях перегрузки усиленный элемент будет больше разрушаться при сгибании, чем при сдвиге.

8.2.3 Сейсмостойкие конструкции – В большинстве исследований в сфере усиления сейсмостойких конструкций рассматривались проблемы усиления колонн. Системы FRP устанавливаются в колоннах с целью увеличения прочности на сжатие бетона, уменьшения требуемой длины сращивания и повышения предела прочности на сдвиг (Пристли и др., 1996 г.). Доступная информация по усилению каркасов зданий в сейсмических зонах весьма ограничена. В главе 11 приводятся ограничения по использованию FRP для увеличения предела прочности на сдвиг и на изгиб сейсмостойких конструкций.

При усилении балок или полов в каркасах зданий в сейсмических зонах 3 и 4 уровня риска рекомендуется проверить прочность и устойчивость балок/полов и колонн с целью убедиться в том, что формирование пластического шарнира происходит вне колонны и соединения (Мосаллам и др., 2000 г.).

8.3—Выбор систем FRP

8.3.1 Экологические оценки – Условия окружающей среды оказывают большое влияние на смолы и волокна различных систем FRP. Механические свойства (например, предел прочности на растяжение, деформация и модуль упругости) некоторых систем FRP ухудшаются под воздействием определенных условий окружающей среды, таких как наличие щелочей, соленой воды, химических реагентов, ультрафиолетового излучения, высоких температур, повышенной влажности, попеременного замораживания и размораживания. При проектировании следует учитывать ухудшение свойств используемых материалов в соответствии с **пунктом 8.4.**

При выборе системы FRP инженерам следует учитывать ее изученное поведение в предполагаемых условиях эксплуатации. Ниже приводятся некоторые важные экологические замечания, касающиеся основных свойств некоторых систем. Более подробную информацию можно получить у производителя систем FRP.

- **Щелочность/кислотность:** Эффективность работы системы FRP в щелочной или кислотной среде в течение длительного времени зависит от материала основы и армирующего волокна. Сухое, непропитанное, неизолированное или незащищенное углеродное волокно является стойким как к щелочным, так и к кислотным средам, в то время как характеристики неизолированного стекловолокна при длительной эксплуатации в подобных средах могут ухудшаться. Тем не менее, правильно нанесенная смоляная основа она должна изолировать и предохранять волокно от воздействия щелочной/кислотной среды и замедлять разрушение. Выбранная система FRP должна иметь смоляную основу, стойкую к воздействию щелочных и кислотных сред. В сырых местах с высоким содержанием щелочей и высокой относительной влажностью предпочтительны системы с углеродным, а не со стекловолокном.
- **Тепловое расширение:** Характеристики теплового расширения FRP-систем могут отличаться от аналогичных свойств бетона. Кроме того, свойства теплово-

го расширения волокна и компонентов полимера системы FRP могут варьироваться. Углеродное волокно имеет коэффициент теплового расширения близкий к нулю, а стекловолокно – близкий к коэффициенту теплового расширения бетона. Полимеры, используемые в системах усиления FRP, как правило, имеют коэффициенты теплового расширения примерно в пять раз больше аналогичных характеристик бетона. Расчет перепадов напряжения, вызванных тепловым воздействием, осложняется изменениями направления волокон, их объемной доли (отношения объема волокон к объему волокон и смол в FRP) и толщины клеящих слоев. Однако опыт показывает (Мотавалли и др., 1993 г.; Соудки и Грин, 1997 г.; Грин и др., 1998 г.), что перепады теплового расширения не влияют на связь, если диапазон изменений температуры незначителен, например, $\pm 50^\circ\text{F}$ ($\pm 28^\circ\text{C}$).

Таблица 8.1 – Экологический коэффициент уменьшения для различных систем FRP и сред

Условия среды воздействия	Тип волокна и смолы	Экологический коэффициент уменьшения C_E
Внутреннее расположение	Углерод/эпоксидная смола	0,95
	Стекло/эпоксидная смола	0,75
	Арамид/эпоксидная смола	0,85
Внешнее расположение (мосты, пирсы и открытые автостоянки)	Углерод/эпоксидная смола	0,85
	Стекло/эпоксидная смола	0,65
	Арамид/эпоксидная смола	0,75
Агрессивная среда (химические заводы и очистные сооружения)	Углерод/эпоксидная смола	0,85
	Стекло/эпоксидная смола	0,50
	Арамид/эпоксидная смола	0,70

- **Удельная электропроводность:** GFRP и AFRP – эффективные электрические изоляторы, а CFRP – проводник. Чтобы не допустить потенциальной электрохимической коррозии стальных элементов, углеродсодержащие материалы FRP не должны ступать в непосредственный контакт со сталью.

8.3.2 Условия нагружения – Условия нагружения специфически воздействуют на различные волокна систем FRP. При выборе системы FRP инженерам следует учитывать ее изученное поведение в предполагаемых условиях эксплуатации.

Ниже приводятся некоторые важные замечания, касающиеся условий нагружения в зависимости от характеристик, присущих отдельным системам. Более подробную информацию можно получить у производителей материалов.

- **Допуски по ударным воздействиям:** Системы AFRP и GFRP имеют лучшие допуски по ударным воздействиям по сравнению с системами CFRP; и
- **Разрушение при ползучести и усталость:** Системы CFRP имеют высокий уровень сопротивления разрушению при ползучести в случае длительной нагрузки и усталостного разрушения в условиях циклического нагружения. Системы GFRP являются более чувствительными к обоим видам нагружения.

8.3.3 Долговечность – Срок службы систем FRP являет-

ся предметом постоянных исследований (Штекель и др., 1999 г.). Рекомендуется выбирать системы FRP, по которым были проведены испытания на долговечность с учетом условий эксплуатации. Испытания на долговечность могут включать в себя испытания циклическими изменениями температуры и влажности, погружение в щелочные растворы, циклическое замораживание-размораживание и воздействие ультрафиолетовым излучением.

Любую систему FRP, которая полностью или частично покрывает площадь сечения бетонной конструкции, рекомендуется протестировать на воздействия различных внешних условий, включая замораживание/размораживание, коррозию стальных элементов, общие реакции на вещества, содержащие щелочи и кремний, удерживание воды, сопротивление парам и конденсацию влажных паров (Соудки и Грин, 1997 г.; Кристенсен и др., 1996 г.; Тутанджи, 1999 г.). Многие системы FRP образуют влагонепроницаемый слой на поверхности бетона. Там где предполагается образование конденсата, рекомендуется предусмотреть соответствующие средства удаления влаги из бетонной конструкции.

8.3.4 Выбор защитного покрытия – Для защиты установленной системы FRP от воздействия определенных внешних условий на нее может наноситься покрытие. Толщину и тип покрытия рекомендуется определять с учетом требований: сложного ремонта; сопротивления внешним факторам, таким как влажность, соленая вода, предельные температуры, огонь, ударное воздействие и ультрафиолетовое излучение; сопротивления условиям конкретного объекта; и устойчивости к актам вандализма. Покрытия предназначены для замедления ухудшения механических характеристик систем FRP. Рекомендуется периодически осматривать покрытия и производить их ремонт для поддержания их эффективности.

Внешние покрытия или покрытия загущенной смолой волокон могут предохранить их от ударов или истирания. В зонах, подверженных сильным динамическим воздействиям, или на участках интенсивного движения транспорта может потребоваться дополнительная защита. В местах, где предполагается незначительное ударное воздействие или истирание, для защиты обычно используются покрытия раствором из портландцемента и полимерные покрытия.

8.4—Конструкционные свойства материалов

Если не указано иное, в свойствах материалов, о которых сообщают производители, таких как предел прочности на разрыв, как правило, не учитываются длительные внешние воздействия. Поэтому подобные характеристики должны рассматриваться как исходные. Поскольку при длительном воздействии различных внешних факторов механические характеристики прочности на растяжение и на разрыв и усталостная стойкость ламинатов FRP могут ухудшаться, значения свойств материалов, определяемые по расчетным формулам, следует уменьшать с учетом воздействий внешних факторов.

С помощью уравнений (8-3) ÷ (8-5) рассчитываются механические характеристики прочности на растяжение, которые рекомендуется использовать во всех расчетных формулах. Пределы прочности на растяжение рекомендуется рассчитывать с применением экологических коэф-

фициентов уменьшения, приводимых в Таб. 8.1 для соответствующего типа волокон и внешних условий.

$$f_{fu} = C_E f_{fu}^* \quad (8-3)$$

Аналогичным образом рекомендуется уменьшать так же расчетные значения деформации при разрыве с учетом внешних условий.

$$\varepsilon_{fu} = C_E \varepsilon_{fu}^* \quad (8-4)$$

Поскольку материалы FRP являются до разрушения линейно-упругими, модуль упругости можно рассчитать по закону Гука. Выражение модуля упругости, приводимое в уравнении (8-5), подтверждает то, что, как правило, внешние условия не оказывают на него воздействия. Модуль, указанный в данном уравнении, будет соответствовать исходному значению, сообщаемому производителем.

$$E_f = \frac{f_{fu}}{\varepsilon_{fu}} \quad (8-5)$$

Составляющие материалы, волокна и смолы системы FRP воздействуют на ее долговечность и сопротивление внешним воздействиям. Коэффициенты экологического уменьшения, приводимые в Таб. 8.1, являются оценками с запасом, определенными на основании относительной долговечности каждого типа волокон. Поскольку в результате исследований получают новые данные, которые становятся доступными, данные значения будут уточняться. Однако методика использования этих коэффициентов останется неизменной. Данные испытаний на долговечность систем FRP с защитными покрытиями и без них можно получить от производителя рассматриваемой системы FRP.

Как показано в Таб. 8.1, если система FRP находится в относительно благоприятных внешних условиях, таких как закрытое помещение, коэффициент уменьшения приближается к единице. Если система FRP находится в агрессивной среде, где предполагается длительное воздействие высокой влажности, циклическое замораживание-размораживание, наличие соленой воды или щелочей, следует использовать более низкий коэффициент уменьшения. Коэффициент уменьшения может отражать использование защитного покрытия, если при проведении испытаний доказано, что покрытие снижает воздействие внешних факторов и сохраняется в течение срока службы системы FRP.

ГЛАВА 9—УСИЛЕНИЕ ПРОЧНОСТИ НА ИЗГИБ

Установка усиления FRP на поверхность натяжения элемента бетонной конструкции, работающего на изгиб, волокнами, направленными вдоль элемента, обеспечит увеличение сопротивления изгибу. Было документально подтверждено увеличение полного сопротивления изгибу от 10 до 160 % (Мейер и Кайзер, 1991 г.; Ричи и др., 1991 г.; Шариф и др., 1994 г.). Однако, принимая во внимание пластичность и пределы эксплуатационной надежности материалов, более логично было бы говорить об

увеличениях прочности на 5 - 40 %.

В данной главе не рассматриваются системы FRP, используемые для увеличения прочности на изгиб элементов в предполагаемых областях пластического шарнира упругих сейсмостойких несущих конструкций. При проектировании подобных конструкций, если таковые используются, рекомендуется исследовать поведение усиленной несущей конструкции с учетом того, что усиленные секции имеют очень низкие характеристики вращения и изгиба. В данном случае следует провести исследования воздействия перемены циклических нагрузок на усиление FRP.

9.1—Общие условия

В данной главе рассматриваются указания по расчету прочности на изгиб при установке продольного усиления FRP на поверхность натяжения железобетонной конструкции, а также приводится конкретный пример применения рассматриваемых принципов к существующим прямоугольным секциям, усиливаемым в зоне натяжения с ненапрягаемой арматурой. Рассматриваемые здесь общие принципы могут, тем не менее, применяться и к конструкциям непрямоугольной формы (тавровые и угловые элементы) и элементам со сжатой арматурой. Для предварительно напряженных элементов для оценки действия усиления FRP применительно к деформационному состоянию в преднапряженной конструкции рекомендуется использовать условие совместимости деформаций. Следует также учитывать дополнительные режимы разрушения, зависящие от разрыва напрягаемых арматурных элементов.

9.1.1 Исходные предпосылки – При расчете сопротивления изгибу секции, на внешней поверхности которой установлено усиление FRP, применяются следующие исходные предпосылки:

- в проектных расчетах используются фактические размеры, внутреннее расположение арматуры и свойства материалов существующего усиливаемого элемента;
- напряжения в усилении и бетоне прямо пропорциональны расстоянию от нейтральной оси, то есть, плоское сечение до нагружения остается плоским после нагружения;
- не существует никакого относительного проскальзывания между внешним усилением FRP и бетоном;
- деформацией сдвига в пределах клейкого слоя пренебрегают, так как этот слой очень тонкий и незначительно варьируется по толщине;
- максимально используемая деформация сжатия в бетоне составляет 0,003;
- пределом прочности на растяжение бетона пренебрегают; и
- усиление FRP имеет линейную зависимость между напряжениями и деформацией к разрыву.

Следует отметить: несмотря на то, что некоторые из этих допущений необходимы для упрощения расчетов, они точно не отражают фактическое основное поведение усиления FRP для элементов, работающих на изгиб. Например, предположим, что в клейком слое возникает деформация сдвига, вызывающая относительное проскальзывание между усилением FRP и бетонной подложкой. Тем не менее, неточность допущений не будет значительно воздействовать на рассчитываемое сопротивление

изгибу конструкции с усилением FRP. Дополнительный коэффициент концентрации напряжений (приводимый в [пункте 9.2](#)) традиционно компенсирует любые подобные отклонения.

9.1.2 Предел прочности на сдвиг по сечению – При использовании усиления FRP для увеличения прочности на изгиб элемента конструкции, важно проверить и убедиться в том, что элемент будет выдерживать сдвигающие усилия, ассоциируемые с увеличенным сопротивлением изгибу. Следует учитывать также возможность разрушения элемента конструкции при сдвиге. Для этого необходимо сравнить расчетные и требуемые значения прочности на сдвиг. При необходимости в дополнительной прочности на сдвиг могут использоваться ламинаты FRP, устанавливаемые поперек сечения, которые обеспечат сопротивление сдвигающим усилиям, как описано в [главе 10](#).

9.1.3 Напряжения существующей бетонной подложки – Пока не будут сняты все нагрузки на элемент конструкции, включая его собственный вес и любые силы предварительного напряжения перед установкой FRP, бетонная подложка, на которую устанавливается система, будет подвергаться напряжениям. Данные напряжения следует рассматривать как исходные и исключать из напряжений в FRP (Ардуини и Нанни, 1997 г.; Нанни и др., 1998 г.). Исходный уровень напряжения на напрягаемой бетонной подложке ϵ_{bt} можно рассчитать путем проведения испытаний на упругость существующего элемента с учетом всех нагрузок, которые будут воздействовать на элемент, во время установки системы FRP. При проведении испытаний на упругость существующего элемента рекомендуется учитывать свойства треснувшей секции.

9.2—Номинальная прочность

В соответствии с принципом расчетной прочности расчетная прочность на изгиб элемента конструкции должна превышать требуемое значение момента прочности согласно [уравнению \(9-1\)](#). Расчетная прочность на изгиб ϕM_n равняется значению номинальной прочности элемента, умноженному на коэффициент концентрации напряжений, а требуемое значение момента прочности M_u – значению воздействия нагрузки, равному сумме нагрузок с общим членом (например, $\alpha_{DL}M_{DL} + \alpha_{LL}M_{LL} + \dots$). Настоящим руководством рекомендуется рассчитывать требуемое значение момента прочности с учетом коэффициентов нагрузки в соответствии с требованиями ACI 318-99. Кроме того, рекомендуется использовать коэффициенты концентрации напряжений ϕ согласно ACI 318-99 с дополнительным коэффициентом концентрации напряжений 0,85, относимым только к увеличению сопротивления изгибу за счет усиления FRP ($\psi_f = 0,85$). Пример использования дополнительного коэффициента концентрации напряжений приводится в [уравнении \(9-2\)](#). Этот дополнительный коэффициент концентрации напряжений применяется в связи с меньшей надежностью системы FRP по сравнению с прочностью внутренней арматуры железобетона.

$$\phi M_n \geq M_u \quad (9-1)$$

Номинальная прочность на изгиб элемента бетонной конструкции с установленным усилением FRP может

быть рассчитана на основании совместимости напряжений, равновесия внутренних сил и контроля режимов разрушения.

9.2.1 Режимы разрушения – Прочность на изгиб сечения зависит от контроля режима разрушения. Для участков с усилением FRP рекомендуется проанализировать следующие режимы разрушения при изгибе (ГангаРао и Виджей, 1998 г.):

- разрушение сжатого бетона до деформации арматуры;
- деформация напряженной арматуры перед разрушением ламината FRP;
- деформация напряженной арматуры перед разрушением бетона;
- расслоение защитного слоя бетона под действием сдвига/напряжения; и
- отслаивание FRP от бетонной подложки (отслаивание FRP).

Предполагается, что разрушение бетона происходит, если деформация сжатия в бетоне достигает своего максимально применимого значения ($\epsilon_c = \epsilon_{cu} = 0,003$). Разрушение ламината FRP предположительно происходит, если напряжение в FRP достигает расчетного значения деформации при разрыве ($\epsilon_f = \epsilon_{fu}$) до того, как бетон достигает максимально применимого значения деформации.

Расслоение защитного слоя или отслаивание FRP может происходить, если бетонная подложка не выдерживает напряжений в FRP. Чтобы предотвратить отслаивание ламината FRP, уровень деформации в ламинате следует ограничить. В [уравнении \(9-2\)](#) приводится способ расчета коэффициента κ_m , зависящего от соединения.

$$\kappa_m = \begin{cases} \frac{1}{60\epsilon_{fu}} \left(1 - \frac{nE_f t_f}{2\,000\,000}\right) \leq 0,90 & \text{для } nE_f t_f \leq 1\,000\,000 \\ \frac{1}{60\epsilon_{fu}} \left(\frac{500\,000}{nE_f t_f}\right) \leq 0,90 & \text{для } nE_f t_f > 1\,000\,000 \end{cases} \quad (9-2) \text{ США}$$

$$\kappa_m = \begin{cases} \frac{1}{60\epsilon_{fu}} \left(1 - \frac{nE_f t_f}{360\,000}\right) \leq 0,90 & \text{для } nE_f t_f \leq 180\,000 \\ \frac{1}{60\epsilon_{fu}} \left(\frac{90\,000}{nE_f t_f}\right) \leq 0,90 & \text{для } nE_f t_f > 180\,000 \end{cases} \quad (9-2) \text{ СИ}$$

Показатель κ_m , рассчитываемый с помощью [уравнения \(9-2\)](#) – это коэффициент, не превышающий 0,90. Для получения значения ограничения деформации для предотвращения отслаивания значение деформации при разрыве ламината FRP умножается на данный коэффициент. Переменная n , используемая в данном уравнении, представляет собой количество слоев усиления FRP, работающего на изгиб, в том месте вдоль элемента конструкции, где рассчитывается моментальная прочность. Данный показатель подтверждает, что более склонны к расслаиванию ламинаты с большей жесткостью. Таким образом, по мере увеличения жесткости ламината требования по ограничению деформации становятся более жесткими. Для ламинатов с приведенной жесткостью $nE_f t_f$ больше 1 000 000 фунт/дюйм (180 000 Н/мм) κ_m ограничивает напряжение в ламинате в соответствии с уровнем деформации. При этом производится ограничение верхнего

предела полного напряжения, которое может возникать в ламинате FRP, независимо от количества. Ширина ламината FRP не учитывается при расчетах приведенной жесткости $nE_f t_f$, поскольку увеличение ширины FRP приводит к соответствующему увеличению площади сцепления.

При расчете коэффициента κ_m используются только общепризнанные принципы и на опыт инженеров, занимающихся проектированием систем FRP со сцеплением с бетоном. В результате дальнейших исследований механических характеристик сцепления FRP систем, работающих на изгиб, должны появиться более точные методы предсказания расслаивания с соответствующим уточнением [уравнения \(9-2\)](#). При дальнейшей разработке уравнения, возможно, будет учитываться не только жесткость ламината, но и жесткость элемента конструкции, с которым ламинат входит в сцепление. А пока для ограничения деформации FRP и предотвращения расслаивания комитет рекомендует использовать [уравнение \(9-2\)](#).

9.2.2 Уровень деформации в усилении FRP – Уровень деформации в усилении FRP важно определить в состоянии предельного сопротивления. Поскольку материалы FRP до разрушения являются линейно упругими, уровень деформации в FRP будет определять уровень напряжения, возникающего в FRP. Максимальный уровень деформации, который может возникать в усилении FRP, будет зависеть от уровня деформации в FRP в момент разрушения бетона, в момент разрушения FRP или в момент расцепления FRP от бетонной подложки. Данный максимальный или эффективный уровень деформации в усилении FRP в состоянии предельного сопротивления можно рассчитать с помощью [уравнения \(9-3\)](#).

$$\epsilon_{fe} = \epsilon_{cu} \left(\frac{h-c}{c}\right) - \epsilon_{bi} \leq \kappa_m \epsilon_{fu} \quad (9-3)$$

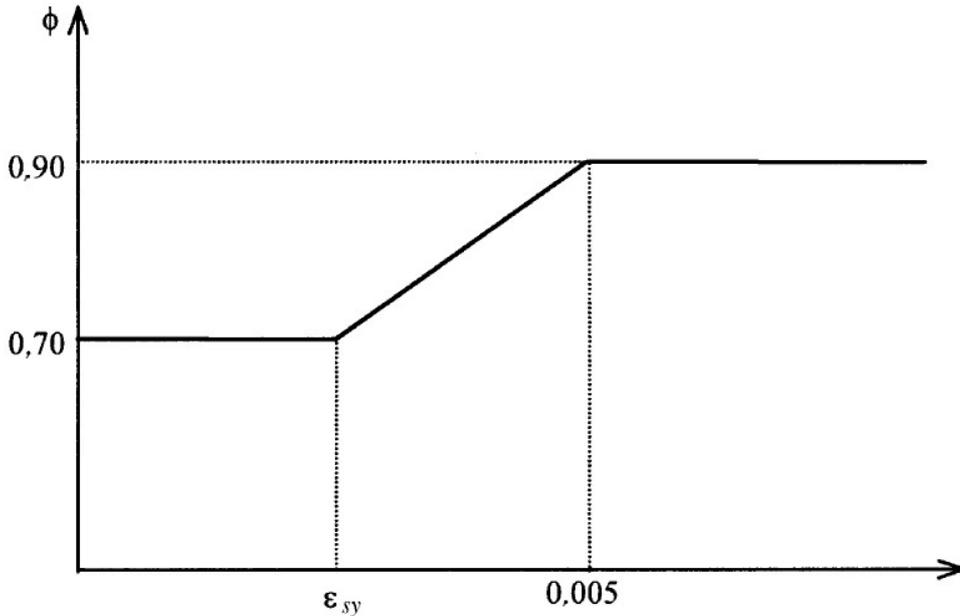
где ϵ_{bi} – исходный уровень напряжения на напрягаемой бетонной подложке (см. [пункт 9.1.3](#)).

9.2.3 Уровень напряжения в усилении FRP – Уровень действительного напряжения в усилении FRP – это максимальный уровень напряжения, которое может возникнуть в усилении FRP перед разрушением при изгибе сечения. Этот уровень действительного напряжения может быть рассчитан на основании степени деформации в FRP при идеальном поведении при упругом нагружении.

$$f_{fe} = E_f \epsilon_{fe} \quad (9-4)$$

9.3—Пластичность

При использовании усиления FRP с внешним сцеплением для увеличения прочности на изгиб пластичность исходного элемента конструкции понижается. В некоторых случаях потерей пластичности можно пренебречь. Однако следует обратить внимание на сечения, которые претерпевают существенную потерю пластичности. Для поддержания достаточной степени пластичности рекомендуется проверять уровень деформации в стали в состоянии предельного сопротивления. Надлежащая степень пластичности обеспечивается тогда, когда деформация стали в точке разрушения бетона или FRP, включая расслаивание или отслаивание, составляет не менее 0,005



Предельное состояние напряжения стали

Рис. 9.1– Графическое представление коэффициента концентрации напряжений как функции пластичности.

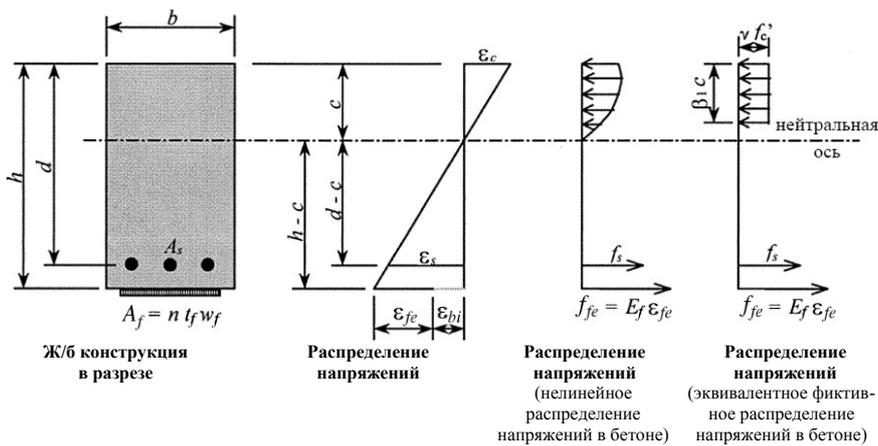


Рис. 9.2 – Распределение внутренних деформаций и напряжений в элементе прямоугольного сечения, работающем на изгиб, в предельном состоянии.

согласно определению участка с контролируемым напряжением (см. главу 2 ACI 318-99).

Подход, применяемый в настоящем руководстве, основан на принципах, изложенных в Приложении В ACI 318-99, где участок с низкой пластичностью рекомендуется компенсировать большим запасом прочности, который получается за счет применения коэффициента концентрации напряжений, равного 0,70 для ломких участков, и 0,90 для пластичных.

Таким образом, следует использовать коэффициент концентрации напряжений, рассчитываемый с помощью уравнения (9-5), где ϵ_s – деформация стали в состоянии предельного сопротивления.

$$\phi = \begin{cases} 0,90 & \text{для } \epsilon_s \geq 0,005 \\ 0,70 + \frac{0,20(\epsilon_s - \epsilon_{sy})}{-0,005 \epsilon_{sy}} & \text{для } \epsilon_{sy} < \epsilon_s < 0,005 \\ 0,70 & \text{для } \epsilon_s \leq \epsilon_{sy} \end{cases} \quad (9-5)$$

В данном уравнении коэффициент концентрации напряжений составляет 0,90 для пластичных участков и 0,70 для ломких, где сталь не поддается текучести. Кроме того, обеспечивается линейный переход данного коэффициента между двумя указанными предельными состояниями (рис. 9.1).

9.4—Эксплуатационная надежность

Эксплуатационная надежность элемента конструкции (отклонения, ширина трещин) под рабочими нагрузками должна удовлетворять действующим требованиям ACI 318-99. Воздействие внешнего усиления FRP на эксплуатационную надежность можно оценить с помощью анализа преобразованного участка.

Чтобы избежать неупругих деформаций железобетонных элементов с внешним усилением FRP, следует предотвращать пластическую деформацию существующей внутренней арматуры железобетона под рабочими

нагрузками. Напряжение в стали под рабочей нагрузкой должно быть ограничено 80 % от предела текучести (см. уравнение (9-6)).

$$f_{s,s} \leq 0,80f_y \quad (9-6)$$

9.5—Предельные значения разрушения при ползучести и усталостного напряжения

Для недопущения разрушения при ползучести усиления FRP под воздействием длительных напряжений или разрушения вследствие циклических напряжений и усталости усиления FRP рекомендуется проверять уровни напряжений в усилении FRP в подобном напряженном состоянии. Поскольку эти уровни напряжения будут в пределах упругой зоны элемента конструкции, их значения можно рассчитать на основании анализа упругости.

В пункте 3.4 приводилось описание феномена разрушения при ползучести и усталостные характеристики материала FRP, а также анализ противодействия его воздействию со стороны волокон различных типов. Как указано в пункте 3.4.1, анализ показал, что стекловолокно, арамид и углеродное волокно могут выдержать напряжения в 0,30, 0,47 и 0,91 от их пределов прочности соответственно, прежде чем произойдет разрушение при ползучести (Ямагучи и др., 1997 г.). Чтобы избежать разрушения элемента с усилением FRP вследствие разрушения при ползучести и усталости FRP, к усилению FRP следует применять предельные напряжения, возникающие в подобных условиях. Уровень напряжения в усилении FRP можно рассчитать с помощью анализа упругости и момента приложенных сил на основании суммы всех длительных нагрузок (статические нагрузки и выдержанная часть динамической нагрузки) плюс максимальный момент, возникающий в цикле нагружения (при расчёте на усталостную прочность) (рис. 9.2). Для обеспечения безопасности следует ограничить длительное напряжение в соответствии с уравнением (9-7). Значения безопасного и циклического напряжений приводятся в Таб. 9.1. Данные значения рассчитаны с учетом пределов напряжений, упомянутых выше в пункте 3.4.1 с установленным запасом прочности 1/0,60.

$$\text{Длительное плюс циклическое предельное напряжение} \geq ff_{s,s} \quad (9-7)$$

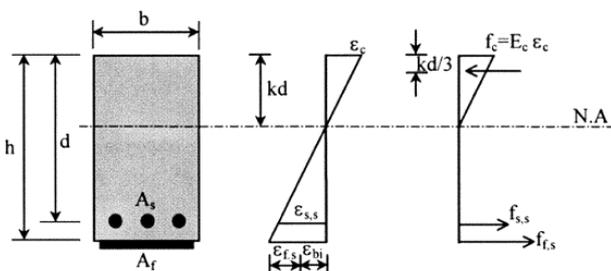


Рис. 9.3 – Распределение упругих деформаций и напряжений.

Таблица 9.1 – Длительное плюс циклическое предельное напряжение при рабочей нагрузке в усилении FRP

Тип напряжения	Тип волокна		
	Стекловолокно FRP	Арамид FRP	Углеродное FRP
Длительное плюс циклическое предельное напряжение	0,20 f_{fu}	0,30 f_{fu}	0,55 f_{fu}

9.6—Приложение к отдельно усиленному участку прямоугольного сечения

Для разъяснения принципов, представленных в данной главе, здесь описывается их применение к отдельно усиленному участку прямоугольного сечения (ненапрягаемому).

9.6.1 Предел прочности – На Рис. 9.2 показано распределение внутренних деформаций и напряжений в элементе прямоугольного сечения, работающем на изгиб, в предельном состоянии.

Методика вычислений, используемая для расчета предела прочности, должна удовлетворить совместности деформаций и равновесию сил и учитывать режим управления разрушениями. Для соблюдения этих условий можно разработать несколько методик вычислений. Описываемая здесь методика вычислений является одной из методик, в которых применяется метод проб и ошибок.

Метод проб и ошибок заключается в выборе предполагаемого расстояния до нейтральной оси (c), расчете уровня деформации в каждом материале с использованием совместности деформаций, вычислении соответствующего уровня напряжения в каждом материале и проверке равновесия внутренних сил. Если внутренние равнодействующие силы не уравновешиваются, расстояние до нейтральной оси необходимо изменить и повторить процедуру.

Для любого принятого расстояния до нейтральной оси c , уровень деформации в усилении FRP может быть вычислен с помощью уравнения (9-3), приводимого в пункте 9.2.2 и повторяемого ниже для удобства. Это уравнение учитывает режим управления разрушением для принятого расстояния до нейтральной оси. Если в уравнении определяющим является первый показатель, разрушение бетона оказывает воздействие на разрушение при изгибе. Если определяющим является второй показатель, воздействие на разрушение при изгибе оказывает разрушение FRP (разрыв или отслаивание).

$$\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{cu} \left(\frac{h-c}{c} \right) - \varepsilon_{bi} \leq \kappa_m \varepsilon_{fu} \quad (9-3)$$

Уровень действительного напряжения в усилении FRP может быть рассчитан из уровня деформации в FRP при условии идеального поведения при упругом напряжении.

$$f_{fe} = E_f \varepsilon_{fe} \quad (9-4)$$

Уровень деформации в ненапрягаемой арматуре, основанный на уровне деформации в усилении FRP, может быть выведен из уравнения (9-8) с учетом совместности деформаций.

$$\varepsilon_s = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bi}) \left(\frac{d-c}{h-c} \right) \quad (9-8)$$

Напряжение в стали выводится из уровня деформации

в стали при условии идеального поведения при упругом напряжении.

$$f_s = E_s \varepsilon_s \leq f_y \quad (9-9)$$

Если уровень деформаций и напряжения в FRP и арматуре для принятого расстояния до нейтральной оси был определен, равновесие внутренних сил можно проверить с помощью уравнения (9-10).

$$c = \frac{A_s f_s + A_f f_{fe}}{\gamma f'_c \beta_1 b} \quad (9-10)$$

Показатели γ и β_1 в уравнении (9-10) определяют прямоугольный блок напряжения в бетоне, эквивалентного фактическому нелинейному распространению напряжения. Если разрушение бетона является режимом управления разрушением (до или после текучести стали), γ и β_1 могут приниматься как значения, ассоциируемые с блоком напряжения Уитни ($\gamma = 0,85$ и β_1 в соответствии с пунктом 10.2.7.3 ACI 318-99). В случае разрушения FRP расслаивания покрытия или сбоя в управлении отслаиванием FRP блок напряжения Уитни дает достаточно точные результаты. Можно использовать более точный блок напряжения для фактического уровня деформации, возникшей в бетоне в состоянии предельного сопротивления. Кроме того, можно также применять методы, учитывающие нелинейное распределение напряжений в бетоне.

Фактическое расстояние до нейтральной оси c рассчитывается при одновременном удовлетворении условий уравнений (9-3), (9-4), (9-8), (9-9) и (9-10). Таким образом, устанавливается равновесие внутренних сил и совместность деформации.

Номинальное сопротивление изгибу сечения с внешним усилением FRP может быть вычислено с помощью уравнения (9-11). Дополнительный коэффициент понижения ψ_f применяется к прочности на изгиб усиления FRP. Рекомендуется использовать коэффициент $\psi_f = 0,85$.

$$M_n = A_s f_s \left(d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) + \psi_f A_f f_{fe} \left(h - \frac{\beta_1 c}{2} \right) \quad (9-11)$$

9.6.2 Напряжение в стали под рабочими нагрузками — Уровень напряжения в арматуре можно рассчитать на основании анализа упругости усиленного участка железобетонной конструкции, как указано в уравнении (9-12).

$$f_{s,s} = \frac{\left[M_s + \varepsilon_{bi} A_f E_f \left(h - \frac{kd}{3} \right) \right] (d - kd) E_s}{A_s E_s \left(d - \frac{kd}{3} \right) (d - kd) + A_f E_f \left(h - \frac{kd}{3} \right) (h - kd)} \quad (9-12)$$

На Рис. 9.3 показано распространение деформации и напряжения в участке железобетонной конструкции. Аналогично традиционному железобетону расстояние до нейтральной оси при рабочем kd может быть рассчитано с помощью статического момента площадей преобразованного сечения. Преобразованную площадь FRP можно вычислить умножением площади FRP на отношение между модулями упругости FRP к бетону. Хотя этот метод игнорирует различие в исходном уровне деформации FRP, исходный уровень деформации не оказывает слиш-

ком большого влияния на расстояние до нейтральной оси в области упругих деформаций элемента конструкции.

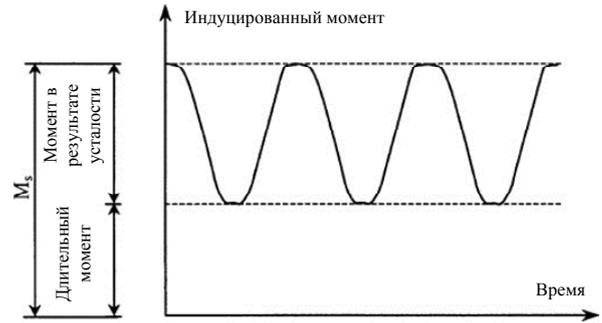


Рис. 9.4 — Иллюстрация уровня применяемого момента, используемого для проверки пределов напряжения в усилении FRP.

Напряжение в стали под рабочими нагрузками, рассчитываемое с помощью уравнения (9-12), следует сравнивать с пределами, описанными в пункте 9.4.

9.6.3 Напряжение в FRP под рабочими нагрузками — Уровень напряжения в усилении FRP может быть рассчитан с помощью уравнения (9-13) как сумма всех длительных нагрузок (статические нагрузки и выдержанная часть динамической нагрузки) плюс максимальный момент, возникающий в цикле усталостной нагрузки, как показано на рис. 9.4. Уравнение (9-13) отражает уровень напряжения в усилении FRP с применяемым моментом в области упругих деформаций элемента.

$$f_{f,s} = f_{s,s} \left(\frac{E_f}{E_s} \right) \frac{h - kd}{d - kd} - \varepsilon_{bi} E_f \quad (9-13)$$

Напряжение в FRP под рабочими нагрузками, рассчитываемое с помощью уравнения (9-13), следует сравнивать с пределами, описанными в пункте 9.5.

ГЛАВА 10—УСИЛЕНИЕ ПРЕДЕЛА ПРОЧНОСТИ НА СДВИГ

Как было показано, системы FRP увеличивают сопротивление сдвигу существующих бетонных балок и колонн при полной или частичной установке вокруг элементов конструкции (Мальвар и др., 1995 г.; Чахес и др., 1995 г.; Норрис и др., 1997 г.; Качлакев и Маккерри, 2000 г.). Установка волокон поперек оси элемента или перпендикулярно потенциальным трещинам сдвига эффективно обеспечивает дополнительное сопротивление сдвигу (Са-то и др., 1996 г.). Увеличение предела прочности на сдвиг может также приводить к разрушениям при изгибе, которые относительно более пластичны по природе по сравнению с разрушениями при сдвиге.

10.1—Общие замечания

В данной главе приводятся указания по расчету эффекта увеличения предела прочности на сдвиг путем дополнительного поперечного армирования FRP железобетонной балки или колонны. Дополнительное сопротивление сдвигу, которое может обеспечиваться системой FRP, основано на многих факторах, включая геометрию балки или колонны, схему оборачивания и прочность существующего бетона, но должно всегда ограничиваться в соответствии с условиями, изложенными в главе 8.



Рис. 10.1 – Типичные схемы обертывания для увеличения предела прочности на сдвиг с помощью ламинатов FRP.

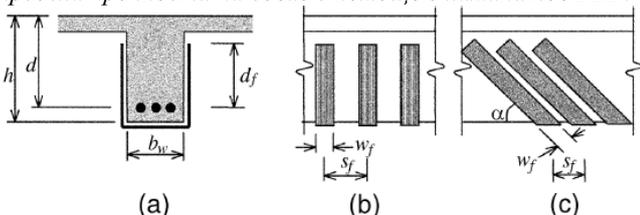


Рис. 10.2 – Иллюстрация размерных переменных, используемых в расчетах увеличения предела прочности на сдвиг для ремонта, модификации или усиления с помощью ламинатов FRP.

Увеличение предела прочности на сдвиг с помощью внешних FRP может обеспечиваться в местах установки предполагаемых пластических шарниров, инверсии напряжения и для улучшения поведения элементов, работающих на изгиб с учетом предела текучести в сейсмостойких конструкциях только при полном обертывании участка. Для внешнего усиления FRP в форме отдельных полос расстояние между их центрами не должно превышать сумму $d/4$ плюс ширина полосы.

10.2—Схемы обертывания

На Рис. 10.1 приводятся три типа схем обертывания FRP, используемых для увеличения сопротивления сдвигу призматических, прямоугольных балок или колонн. Полное обертывание системы FRP вокруг участка со всех четырех сторон является самой эффективной схемой обертывания и обычно используется для колонн, где обычно имеется доступ ко всем четырём сторонам колонны. Для балок, где цельная плита делает непрактичным полное оборачивание элемента, сопротивление сдвигу может быть увеличено за счет обертывания системы FRP с трех сторон элемента (U-образное обертывание) или подсоединения к его двум сторонам.

Хотя, как показала практика, все три метода улучшили сопротивление сдвигу, полное обертывание сечения является самым эффективным. После него идет трехстороннее U-образное обертывание. Присоединение к двум сторонам балки – наименее эффективная схема.

Во всех схемах обертывания система FRP может быть установлена непрерывно вдоль длины пролета элемента или в виде отдельных полос. Как рассматривалось в пункте 8.3.3, следует уделить внимание использованию непрерывного усиления FRP, которое полностью закрывает элемент и может предотвратить миграцию влаги.

10.3—Номинальный предел прочности на сдвиг

Номинальный предел прочности на сдвиг бетонного элемента, усиленного системой FRP, должен превышать

заданный предел (уравнение (10-1)). Заданное сопротивление сдвигу бетонного элемента с усилением FRP следует рассчитывать с применением коэффициентов нагрузки в соответствии с ACI 318-99. Сопротивление сдвигу следует рассчитывать с применением коэффициента концентрации напряжений ϕ в соответствии с требованиями ACI 318-99.

Таблица 10.1—Рекомендуемые дополнительные коэффициенты концентрации напряжений для поперечного армирования FRP

$\psi_f = 0,95$	Полностью обернутые элементы
$\psi_f = 0,85$	Элементы, обернутые с трех сторон или с подсоединением к двум сторонам

$$\phi V_n \geq V_u \quad (10-1)$$

Номинальное сопротивление сдвигу бетонного элемента с усилением FRP может быть рассчитано с учетом значения сопротивления усиления FRP, значений сопротивления арматуры (хомуты, связи или спирали) и бетона (уравнение (10-2)). Дополнительный коэффициент понижения ψ_f применяется к сопротивлению системы FRP.

$$\phi V_n = \phi (V_c + V_s + \psi_f V_f) \quad (10-2)$$

Предлагается применение дополнительного коэффициента понижения ψ_f к значению сопротивления сдвигу усиления FRP. Для поперечной арматуры, работающей на срез и зависящей от типа сцепления, рекомендуется дополнительный коэффициент понижения 0,85. Для арматуры, работающей на срез зависящей от типа контакта, рекомендуется дополнительный коэффициент понижения 0,95. Данные рекомендации приводятся в Таб. 10.1.

10.4—Воздействие системы FRP на предел прочности на сдвиг

На Рис. 10.2 показаны размерные переменные, используемые в расчетах сопротивления сдвигу для ламинатов FRP. Воздействие системы FRP на сопротивление сдвигу элемента зависит от направления волокон и принятой схемы растрескивания (Халифа и др., 1998 г.). Сопротивление сдвигу, которое обеспечивает усиление FRP, может быть определено путем расчета силы, возникающей в результате действия напряжения при растяжении в FRP через предполагаемую трещину. Воздействие поперечного армирования системы FRP определяется по уравнению (10-3).

$$V_f = \frac{A_{fv} f_{fe} (\sin \alpha + \cos \alpha) d_f}{s_f} \quad (10-3)$$

где

$$A_{fv} = 2nt_f w_f \quad (10-4)$$

Напряжение растяжения в поперечном армировании FRP в предельном состоянии прямо пропорционально уровню деформации, которая может возникать в поперечном армировании FRP в предельном состоянии.

$$f_{fe} = \epsilon_{fe} E_f \quad (10-5)$$

10.4.1 Эффективная деформация в ламинатах FRP –

Эффективная деформация – это максимальная деформация, которая может возникнуть в системе FRP на стадии предельной нагрузки и управляется режимом разрушения системы FRP и усиленного железобетонного элемента. Инженерам рекомендуется рассматривать все возможные режимы разрушения и использовать эффективную деформацию, характерную для критического режима разрушения. В следующих ниже пунктах приводятся указания по расчету данной эффективной деформации для ламинатов FRP различных конфигураций, используемых для усиления сопротивления сдвигу железобетонных конструкций.

10.4.1.1 Полностью обернутые элементы — Для железобетонных колонн и элементов балок, полностью обернутых системой FRP, потеря общего сцепления с бетоном, как показала практика, происходит, когда напряжение на волокна меньше соответствующего предельного значения. Чтобы устранить этот режим разрушения, значение максимальной деформации, используемое при проектировании, следует ограничить 0,4 % для элементов, которые могут быть полностью обернуты системой FRP (уравнение [10-6 (а)]).

$$\epsilon_{fe} = 0.004 \leq 0.75\epsilon_{fu} \quad (10-6(a))$$

(для полного обертывания вокруг поперечного сечения элемента)

Это ограничение деформации основано на результатах испытаний (Пристли и др., 1996 г.) и опыте работы. Не следует применять более высокие значения деформации для элементов, для повышения сопротивления сдвигу которых устанавливаются системы FRP.

10.4.1.2 U-образное обертывание или установка полос с двух сторон – Системы FRP, которые не полностью закрывают элемент (двух- и трехстороннее обертывание), как показала практика, отслаиваются от бетона перед потерей общего сцепления с бетоном. Поэтому необходим анализ напряжений сцепления для определения применимости этих систем и уровня эффективной деформации, который может быть достигнут (Триантафиллоу, 1998 г.). Эффективная деформация рассчитывается с помощью коэффициента понижения сцепления k_v , применимого к сдвигу.

$$\epsilon_{fe} = k_v \epsilon_{fu} \leq 0,004 \quad (10-6(b))$$

(для двух- и трехстороннего обертывания)

Коэффициент понижения сцепления – это функция прочности бетона, типа используемой схемы обертывания и жесткости ламината. Коэффициент понижения сцепления может быть рассчитан с помощью уравнений (10-7) ÷ (10-10) (Халифа и др., 1998 г.).

$$k_v = \frac{k_1 k_2 L_e}{468 \epsilon_{fu}} \leq 0.75 \quad (10-7) \text{ США}$$

$$k_v = \frac{k_1 k_2 L_e}{11,900 \epsilon_{fu}} \leq 0.75 \quad (10-7) \text{ СИ}$$

Активная длина зоны сцепления L_e – это длина, по ко-

торой распространяется большая часть напряжения сцепления. Она рассчитывается с помощью уравнения (10-8).

$$L_e = \frac{2500}{(n l_f E_f)^{0.58}} \quad (10-8) \text{ США}$$

$$L_e = \frac{23,300}{(n l_f E_f)^{0.58}} \quad (10-8) \text{ СИ}$$

Коэффициент понижения сцепления также зависит от двух коэффициентов изменения, k_1 и k_2 , которые отвечают за прочность бетона и тип используемой схемы обертывания, соответственно. Расчет этих коэффициентов изменения производится с помощью уравнений (10-9) и (10-10).

$$k_1 = \left(\frac{f'_c}{4000} \right)^{2/3} \quad (10-9) \text{ США}$$

$$k_1 = \left(\frac{f'_c}{27} \right)^{2/3} \quad (10-9) \text{ СИ}$$



Рис. 10.3 – Сравнение экспериментальных результатов с результатами, полученными при использовании рассматриваемой методики проектирования.

$$k_2 = \begin{cases} \frac{d_f - L_e}{d_f} & \text{для U-образного обертывания} \\ \frac{d_f - 2L_e}{d_f} & \text{для двусторонней установки} \end{cases} \quad (10-10)$$

Методика расчета k_v была утверждена для элементов конструкций в областях с высоким уровнем сдвига и низким моментом, таких как нагруженные свободно опирающиеся балки. Хотя методика не была подтверждена для усиления сопротивления сдвигу, в областях, подвергаемых общим высоким нагрузкам на сдвиг и изгиб, или в областях, где вертикальная стенка находится, в основном,

в состоянии сжатия (области отрицательного момента), предлагается использование достаточно жесткого значения k_v .

Методики проектирования, упоминаемые в настоящем документе, были разработаны путем объединения аналитических и эмпирических результатов. На Рис. 10.3 приводится сравнение проектной методики с результатами многих исследователей (Халифа и др., 1998 г.).

В конечных точках может использоваться механическая анкеровка для обеспечения больших растягивающих нагрузок (Халифа и др., 1999 г.). Эффективность таких механических анкерочных крепежей наряду с уровнем растягивающего напряжения, которое они могут обеспечить, должна быть обоснована на основании физических испытаний. Однако эффективная деформация в ламинатах FRP ни в коем случае не должна превышать 0,004.

10.4.2 Интервалы – Устанавливаемые на определенном расстоянии друг от друга полосы FRP, используемые для усиления сопротивления сдвигу, следует рассматривать на предмет оценки их воздействия на сопротивление сдвигу. Интервалы должны соответствовать пределам, установленным ACI 318-99 для внутренней стальной арматуры, работающей на срез. Расстояние между полосами FRP определяется как расстояние между средними линиями полос. Использование отдельных хомутов FRP для усиления сопротивления сдвигу (Хатчинсон и др., 1998 г.) должны подтверждаться испытаниями на прочность.

10.4.3 Пределы армирования – Под полным армированием, работающим на срез, следует принимать сумму воздействия поперечно расположенной FRP и стальной арматуры, также работающей на срез. Полное армирование, работающее на срез, должно ограничиваться, основываясь на критериях, приводимых только для стали в ACI 318-99 п. 11.5.6.9. Это предельное значение рассчитывается с помощью уравнения (10-11).

$$V_s + V_f \leq 8 \sqrt{f'_c} b_w d \quad (10-11) \text{ США}$$

$$V_s + V_f \leq 0.66 \sqrt{f'_c} b_w d \quad (10-11) \text{ СИ}$$

ГЛАВА 11—ОСЕВОЕ СЖАТИЕ, НАПРЯЖЕНИЕ И ПОВЫШЕНИЕ ПЛАСТИЧНОСТИ

Полное обертывание систем FRP вокруг определенных типов элементов, работающих на сжатие, обеспечит удержание этих элементов, что приведет к повышению сопротивления осевому сжатию. Сцепление систем FRP с бетонными элементами также может увеличить прочность на осевое растяжение.

Удержание обертыванием (обжатие) используется также для увеличения пластичности элементов, подвергнутых объединенным продольным и изгибающим напряжениям.

11.1—Осевое сжатие

Системы FRP могут использоваться для увеличения силы осевого сжатия бетонного элемента путем обжатия с помощью кожуха FRP (Нанни и Брэдфорд, 1995 г., Тутанджи, 1999 г.). Обжатие бетонного элемента производится расположением волокон поперек продольной оси

элемента. При таком направлении кольцевые волокна работают аналогично традиционной спиральной или связывающей стальной арматуре. Любым действием продольно расположенных волокон на силу осевого сжатия бетонного элемента следует пренебречь.

Обжатие приводит к увеличению фактической прочности бетона и максимальной деформации сжатия бетона (Сибл и др., 1997 г.). Кожухи FRP обеспечивают пассивное обжатие элемента, работающего на сжатие, оставаясь ненапряженными до расслоения и растрескивания обернутого элемента. Поэтому очень важно обеспечить тесный контакт между кожухом FRP и бетонным элементом.

Осевая прочность на сжатие не тонкого бетонного элемента нормального веса, обернутого в кожух FRP, может быть рассчитана на основании прочности обжатого бетона (уравнение (11-1)). Для несейсмостойких конструкций увеличение осевого сжатия должно быть ограничено в соответствии с пунктом 11.1.2. Вертикальное смещение, расслоение участка, растрескивание и ограничения деформации в кожухе FRP могут также ограничить дополнительную прочность на сжатие, которая может обеспечиваться кожухом FRP. Осевую нагрузку на бетонном элементе с усилением FRP следует рассчитывать с применением коэффициентов нагрузки в соответствии с ACI 318-99, а силу осевого сжатия – коэффициентов концентрации напряжений ϕ для спиральных и связанных элементов в соответствии с требованиями ACI 318-99.

Для ненапряженных элементов с существующей спиральной арматурой:

$$\phi P_n = 0.85 \phi [0.85 \psi_f f'_c (A_g - A_{st}) + f_y A_{st}] \quad (11-1(a))$$

Для ненапряженных элементов с существующей соединительной арматурой:

$$\phi P_n = 0.80 \phi [0.85 \psi_f f'_c (A_g - A_{st}) + f_y A_{st}] \quad (11-1(b))$$

Рекомендуется использовать дополнительный коэффициент понижения $\psi_f = 0,95$. Очевидная прочность обжатого бетона круглого элемента в кожухе FRP, обеспечивающем давление обжатия f'_i , может рассчитываться с помощью уравнения (11-2) (Мандер и др., 1988 г.), первоначально разработанного для обжатия, обеспечиваемого стальными кожухами.

$$f'_{cc} = f'_c \left[2.25 \sqrt{1 + 7.9 \frac{f'_i}{f'_c}} - 2 \frac{f'_i}{f'_c} - 1.25 \right] \quad (11-2)$$

Поскольку уравнение (11-2) было первоначально разработано для сжатия стальными кожухами, важно отметить, что в данной модели первоначально рассматривалось постоянное давление обжатия, соответствующее пределу текучести стали. Это уравнение, как показала практика, применимо к бетону с обжатием FRP (Спозльстра и Монти, 1999 г.). Однако давление обжатия должно рассматриваться как линейно переменное, поэтому увеличение напряжения в кожухе FRP приводит к прямо пропорциональному увеличению давления обжатия. Чтобы определить полное механическое поведение бетона с обжатием FRP, деформация сжатия в бетоне (продольная деформация) должна

быть связана с деформацией, возникающей в кожухе FRP (поперечная деформация). Деформация в кожухе FRP может использоваться для того, чтобы определить давление обжатия и последующее увеличение сжимающего усилия в бетоне. Более простой подход может использоваться для определения пикового значения напряжения или прочности обжатого бетона. Прочность обжатого бетона может быть рассчитана с помощью уравнения (11-2) с применением значения давления обжатия, определяемого по уравнению (11-3), которое является результатом максимальной эффективной деформации, которая может быть достигнута в кожухе FRP.

$$f_l = \frac{\kappa_a \rho_f f_{fe}}{2} = \frac{\kappa_a \rho_f \varepsilon_{fe} E_f}{2} \quad (11-3)$$

Если элемент подвергается объединенному сжатию и сдвигу, эффективную деформацию в кожухе FRP следует ограничить на основании критериев, приводимых в уравнении (11-4).

$$\varepsilon_{fe} = 0,004 \leq 0,75 \varepsilon_{fu} \quad (11-4)$$

11.1.1 Круглые сечения – Кожухи FRP являются наиболее эффективными при обжатии круглых элементов. Система FRP обеспечивает однородное по окружности давление обжатия для радиального расширения элемента, работающего на сжатие, когда волокна направлены перпендикулярно продольной оси элемента. Давление обжатия, обеспечиваемое кожухом FRP, установленным вокруг круглого элемента с диаметром h , может быть рассчитано с использованием коэффициента усиления с помощью уравнения (11-5).

$$\rho_f = \frac{4n t_f}{h} \quad (11-5)$$

Коэффициент полезного действия κ_a для круглых сечений можно принять равным 1,0.

11.1.2 Некруглые сечения – Испытания показали, что обжатие квадратных и прямоугольных элементов кожухами FRP может вызвать предельное увеличение прочности элемента при осевом сжатии. При наличии многих неизвестных факторов применения обжатия для данного типа конструкций, в настоящее время какие-либо рекомендации по использованию FRP отсутствуют. Любые случаи применения данного вида обжатия должны тщательно исследоваться и оцениваться. Ни в коем случае нельзя полагаться на то, что кожухи FRP с продольно расположенными волокнами выдержат сжатие.

11.1.3 Замечания по эксплуатационной надежности – При уровнях нагрузки, близких к максимальным, может происходить повреждение бетона в форме существенного растрескивания в радиальном направлении. Кожух FRP ограничивает повреждения и сохраняет структурную целостность колонны. Однако при применении рабочей нагрузки следует избегать подобных повреждений. Таким образом, кожух FRP будет действовать только во время перегрузок, которые являются временными по своей природе.

Чтобы гарантировать то, что радиальное растрескива-

ние не будет происходить под рабочими нагрузками, продольная деформация бетона должна оставаться ниже его деформации растрескивания на уровнях рабочей нагрузки. Это соответствует ограничению напряжения в бетоне до $0,65f'_c$. Кроме того, напряжение в стальной арматуре должно оставаться ниже $0,60f_y$ для предотвращения пластической деформации под устойчивыми или циклическими нагрузками. При сохранении указанного напряжения в бетоне в рабочих пределах напряжение в кожухе FRP будет относительно низким. Кожух подвергается существенным напряжениям только тогда, когда поперечное деформирование бетона становится выше напряжения растрескивания, и коэффициент поперечного расширения становится большим. Поскольку кожухи FRP обеспечивают пассивное обжатие, напряжение при рабочей нагрузке в кожухе FRP никогда не должно превышать предел разрушающего напряжения при ползучести.

Кроме того, должны изучаться осевые деформации под рабочими нагрузками для оценки их воздействия на рабочие характеристики конструкционного элемента.

11.2—Предел прочности на разрыв

Системы FRP могут использоваться для обеспечения бетонному элементу дополнительного предела прочности на разрыв. Вследствие линейно-упругой природы материалов FRP, воздействие системы FRP на растяжение непосредственно связано с ее уровнем деформации и рассчитывается по закону Гука.

Уровень растяжения, обеспечиваемый FRP, ограничивается проектным пределом прочности на растяжение FRP и способностью передавать напряжения на бетонную подложку через сцепление (Нанни и др., 1997 г.). Эффективная деформация в FRP может быть определена на основании критериев, приводимых для увеличения сопротивления сдвигу в уравнениях с (10-6) до (10-9). Значение k_1 в уравнении (10-7) может приниматься равным 1,0. Должна обеспечиваться минимальная длина зоны сцепления арматуры с бетоном $2L_e$ (где L_e - активная длина зоны сцепления арматуры с бетоном, определенная ранее в уравнении (10-8)) для получения подобного уровня деформации.

11.3—Пластичность

Увеличенная пластичность сечения следует из способности развить большие деформации сжатия в бетоне перед разрушением при сжатии (Сибл и др., 1997 г.). Кожух FRP может также служить для задержания продольного изгиба продольной арматуры железобетона при сжатии, и зажимать соединения внахлест перекрытия продольной арматуры железобетона.

Для сейсмостойких конструкций кожухи FRP должны разрабатываться для обеспечения напряжения обжатия, достаточного для развития деформации сжатия в бетоне, связанных с характеристиками смещения. Максимально допустимая деформация сжатия в бетоне для круглых железобетонных элементов с обжатием FRP может рассчитываться при помощи уравнения (11-6) (Мандер и др., 1988 г.).

$$\varepsilon'_{cc} = \frac{1.71(5f'_{cc} - 4f'_c)}{E_c} \quad (11-6)$$

Силы сдвига должны также быть оценены в соответ-

ствии с **главой 10** для предотвращения разрушения при сдвиге хрупкого бетона в соответствии с ACI 318-99.

11.3.1 Круглые элементы — Максимальная используемая деформация сжатия для круглого элемента с обжатием FRP может рассчитываться с помощью **уравнения (11-6)**, а f_{cc}' с помощью **уравнений (11-2) ÷ (11-5)** и $\kappa_a = 1,0$.

11.3.2 Некруглые элементы — Обжатие квадратных и прямоугольных элементов, не эффективное для увеличения осевой прочности, эффективно при улучшении пластичности элементов, работающих на сжатие. Максимальная используемая деформация сжатия для квадратных или прямоугольных элементов со сжатием FRP может рассчитываться с помощью **уравнения (11-6)**, а f_{cc}' с помощью **уравнений (11-2) ÷ (11-4)**. Коэффициент усиления для прямоугольных сечений может рассчитываться с помощью **уравнения (11-7)**.

$$\rho_f = \frac{2n_t r (b + h)}{bh} \quad (11-7)$$

Коэффициент эффективности для квадратных и прямоугольных сечений следует рассчитывать на основании геометрии, соотношения размеров и конфигурации арматуры железобетона. Для расчета данного коэффициента эффективности может использоваться **уравнение (11-8)** (Рестрепо и ДеВино, 1996 г.), где r — радиус краев сечения в соответствии с общими указаниями, приводимыми в **главе 12**.

$$\kappa_a = 1 - \frac{(b - 2r)^2 + (h - 2r)^2}{3bh(1 - \rho_g)} \quad (11-8)$$

Эффектом обжатия кожухов FRP предположительно следует пренебречь для прямоугольных сечений с соотношением размеров b/h более 1,5, или при внешних размерах b или h более 36 дюймов (900 мм), если в результате испытания его эффективность не доказана.

ГЛАВА 12— ПОДРОБНЫЕ ДАННЫЕ АРМИРОВАНИЯ

В настоящей главе приводятся указания по детализации усиления FRP с внешним сцеплением. Детализация будет, как правило, зависеть от геометрии конструкции, надежности и качества бетонной подложки и уровней нагрузок, которые должны выдерживать листы или ламинаты FRP. Многих связанных со сцеплением случаев разрушения можно избежать, если соблюдать данные общие указания по детализации листов или ламинатов FRP:

- не делать повороты внутри углов;
- обеспечить радиус поворота листа вокруг внешних углов минимум 1/2 дюйма (13 мм); и
- обеспечить достаточное перекрытие при сращивании слоев FRP.

12.1—Сцепление и расслаивание

Фактическое распространение напряжения сцепления в ламинате FRP усложняется растрескиванием бетона подложки. Общее упругое распространение межповерхностного напряжения сдвига и нормального напряжения вдоль ламината FRP, сцепленного с не потрескавшимся бетоном,

показано на **Рис. 12.1**. Нормальное напряжение является нормальным относительно плоскости ламината FRP.

Для системы FRP, установленной согласно **части 3** настоящего руководства, слабым звеном в поверхности раздела между бетоном и FRP является бетон. Надежность и предел прочности на растяжение бетонной подложки ограничивают полную действие сцепленной системы FRP.

12.1.1 Отслаивание FRP — Отслаивание должным образом установленного ламината FRP может происходить из-за недостаточной площади сцепления ламината FRP с бетонной подложкой. Бетон не может выдерживать межповерхностные напряжения сдвига и нормального напряжения, и ламинат FRP отслаивается от основания с прикрепленным к нему относительно тонким слоем бетона.

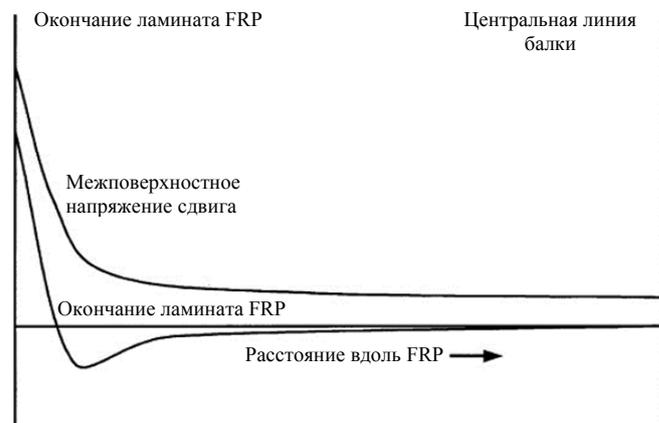


Рис. 12.1—Принципы распределения межповерхностного напряжения сдвига и нормального напряжения вдоль сцепленного ламината FRP (Робертс и Хаджи-Каземи, 1989 г.; Малек и др., 1998 г.).

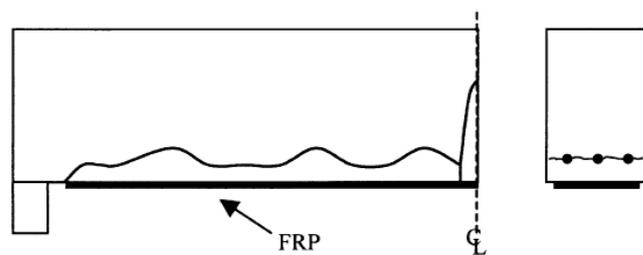
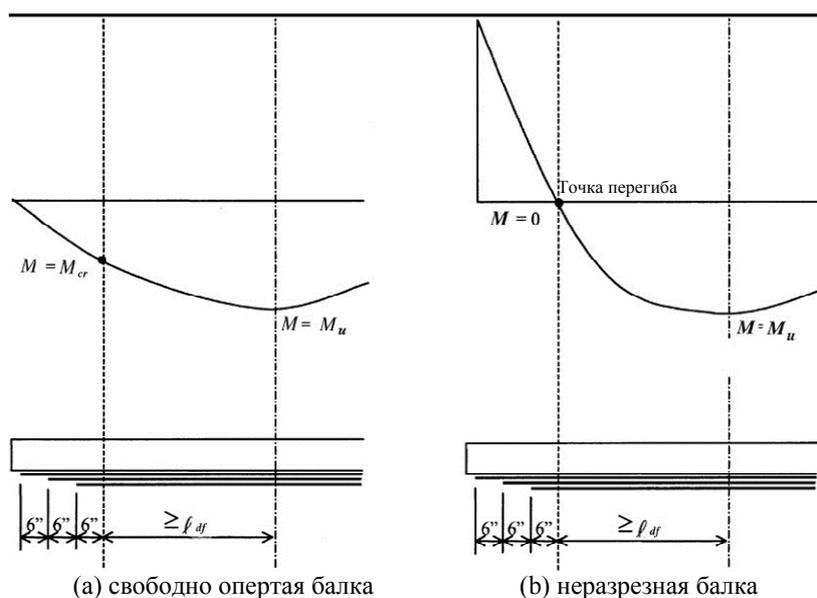


Рис. 12.2—Расслаивание, вызываемое разрушением при напряжении защитного слоя бетона

Межповерхностную площадь сцепления следует рассчитывать на основании горизонтального сдвига и предела прочности на растяжение бетонного основания. Поскольку межповерхностные слои или межповерхностное сцепление являются хрупкими, рекомендуется использовать коэффициент понижения прочности сцепления 0,50. Доступны аналитические методы расчета напряжения сцепления (Блашко и др., 1998 г.; Броненс и Ван Джемерт, 1997 г.; Маеда и др., 1997 г.).

Механические анкерные крепления могут быть эффективными для увеличения передачи напряжения (Халифа и др., 1999 г.). Рабочие характеристики любой системы ан-



(а) свободно опертая балка
 (б) неразрезная балка
 Рис. 12.3 —Графическое представление указаний для допустимых конечных точек трехслойного ламината FRP

кернаго крепления рекомендуется подтвердить результатами испытаний.

12.1.2 Расслаивание защитного слоя бетона - Расслаивание защитного слоя бетона может также происходить в результате воздействия нормальных напряжений, возникающих в сцепленном ламинате FRP. При расслаивании данного типа существующая внутренняя арматура, по существу, действует как инструмент разрыва сцепления в горизонтальной плоскости, и ослабленная область бетонного массива отделяется от остальной части балки (которая может быть усилена, если в существующем элементе использовалась покрытая эпоксидной смолой арматура). Результат - полное отслаивание защитного слоя бетона на уровне растянутой арматуры от остальной части элемента конструкции (рис. 12.2).

Режим отслаивания защитного слоя бетона частично зависит от уровня напряжения в конечной точке ламината FRP. Вместо более подробного анализа, для предотвращения разрушения данного типа могут использоваться следующие общие указания для локализации точек отсечения для ламината FRP:

- Для свободно опертых балок слои должны накладываться на расстояние большее расстояния d за точкой перекрытия, соответствующей точке растрескивания M_{cr} под факторными нагрузками. Кроме того, если факторная сдвигающая сила в конечной точке больше на $2/3$ сопротивления сдвигу бетона ($V_u > 0,67V_c$), должны использоваться ламинаты FRP с поперечным усилением, чтобы предотвратить отслаивание защитной поверхности бетона.
- При установке на неразрезные балки однослойный ламинат FRP должен заходить на расстояние не менее $d/2$ или 6 дюймов (150 мм) за точку перегиба (точка нулевого момента, возникающего в результате факторных нагрузок). При установке многослойных ламинатов концы слоев должны быть сужены. Наиболее удаленный слой должен заходить на расстояние не ме-

нее 6 дюймов (150 мм) за точку перегиба. Каждый последующий слой должен заходить на расстояние не менее 6 дюймов (150 мм) за точку перегиба. Например, если требуется трехслойный ламинат, слой, непосредственно контактирующий с бетонной подложкой, должен заходить на расстояние не менее 18 дюймов (460 мм) за точку перегиба (Рис. 12.3). Данные указания применяются для областей положительного и отрицательного момента.

12.2—Детализация перекрытий и соединений внахлест

Соединения внахлест ламинатов FRP следует выполнять только в соответствии с чертежами, спецификациями или указаниями инженера согласно рекомендациям производителя систем.

Волокна FRP-систем должны быть непрерывными и установлены в направлении самых больших растягивающих сил. Непрерывность волокон может быть сохранена соединением внахлест. Для FRP-систем соединение внахлест должно выполняться перекрытием волокон по длине. Требуемое перекрытие или длина перекрытия зависит от предела прочности на растяжение, толщины материалов FRP и прочности сцепления между смежными слоями ламинатов FRP. Необходимо обеспечить достаточное перекрытие таким образом, чтобы ламинат FRP разрушался до того, как произойдет отслаивание перекрытых слоев ламината FRP. Требуемое перекрытие для систем FRP должно обеспечиваться производителем материалов и подтверждаться испытаниями независимо от производителя.

Системы FRP с кожухом, используемые для элементов колонн, должны обеспечивать достаточную область для отладки в местах соединений внахлест, швов и конечных точек для того, чтобы в случае избыточных напряжений происходило разрушение кожуха FRP, а не сращиваемых участков.

Для однонаправленных ламинатов FRP необходимы

соединения внахлест только в направлении волокон. Соединения внахлест не должны выполняться перпендикулярно волокнам. Ламинаты FRP, состоящие из нескольких однонаправленных листов, установленных больше чем в одном направлении, или разнонаправленные ткани требуют соединения внахлест больше, чем в одном направлении, для поддержания неразрывности волокон и общей прочности ламината.

ГЛАВА 13—ЧЕРТЕЖИ, СПЕЦИФИКАЦИИ И ПЕРЕДАЧА ДОКУМЕНТОВ НА РАССМОТРЕНИЕ

13.1—Технические требования

Несмотря на то, что федеральных, областных и местных норм и правил по проектированию FRP-систем с внешним сцеплением не существует, на выбор, проектирование и установку систем FRP могут повлиять другие требования действующих нормативных документов. Например, требования нормативных актов, связанные с пожаробезопасностью или питьевой водой, могут повлиять на выбор покрытий, используемых с системой FRP. Все проектные работы рекомендуется выполнять под руководством авторизованного инженера, знакомого со свойствами и сферами применения FRP-систем.

13.2—Чертежи и спецификации

Инженеру рекомендуется документально оформить расчеты, обобщающие предположения и параметры, использованные для проектирования систем FRP, а также подготовить рабочие чертежи и проектные спецификации. В чертежах и спецификациях рекомендуется изложить, как минимум, следующую информацию, относящуюся непосредственно к внешним FRP-системам:

- FRP-система, которая будет использоваться;
- место установки системы FRP относительно существующей конструкции;
- размеры и направление каждого слоя;
- количество слоев и последовательность установки;
- место соединений внахлест и длина перекрытия;
- общие примечания с перечнем расчетных нагрузок и допустимых деформаций в ламинатах FRP;
- свойства материалов ламинатов FRP и бетонной подложки;
- требования к подготовке бетонной поверхности, включая подготовку углов и максимальные ограничения по отклонениям;
- методы установки, включая ограничения по температуре и влажности поверхности, а также ограничения по времени между нанесением последующих слоев;
- процедуры выдерживания систем FRP;
- защитные покрытия и уплотнители, если таковые требуются;
- указания по транспортировке, хранению, обработке и срокам годности;
- контроль качества и методы проверки, включая критерии приемки; и
- в случае необходимости оперативные испытания нагрузок установленной FRP-системы.

13.3—Передача документов на рассмотрение

В соответствии с требованиями спецификаций производитель систем FRP, подрядная монтажная организация,

контролирующий орган, если таковой необходим, и все привлеченные к реализации проекта лица должны представить информацию о продукции и документы, подтверждающие их полномочия и опыт, инженеру на рассмотрение.

13.3.1 Производитель FRP-систем – От производителя систем FRP требуется представить на рассмотрение следующие документы:

- перечни технических характеристик продукции с указанием физических, механических и химических свойств FRP-системы и всех ее составляющих материалов;
- механические свойства при растяжении системы FRP, в том числе способ сообщения свойств (чистое волокно или сборный ламинат), примененные методы тестирования и основные статистические данные, использованные для определения свойств;
- инструкции по установке, инструкции по техническому обслуживанию и общие рекомендации по каждому материалу, который будет использоваться; методы установки должны включать в себя требования по подготовке поверхности;
- паспорта безопасности (MSDS) для всех материалов, которые должны использоваться;
- методика контроля качества для отслеживания материалов системы FRP и их сертификации;
- экспериментальные данные по износостойкости FRP-системы в предполагаемых средах использования;
- отчеты об испытаниях на прочность для предлагаемых сфер применения; и
- ссылочные проекты.

13.3.2 Подрядная организация, выполняющая установку систем FRP – От подрядной монтажной организации систем FRP требуется представить на рассмотрение следующие документы:

- документы от производителя о том, что персонал подрядной монтажной организации прошел обучение по установке предлагаемой системы FRP;
- проектные ссылки, включая установки, аналогичные предлагаемой; например, для установки в верхнем положении подрядчику рекомендуется представить список предыдущих работ, в ходе которых производилась установка предлагаемой системы FRP в верхнем положении;
- доказательства компетентности по подготовке поверхности; и
- методы контроля качества, включая оперативный журнал или бланки проверок, используемые подрядчиком.

13.3.3 Контролирующий орган – При привлечении независимого контролирующего органа ему рекомендуется представить на рассмотрение следующие документы:

- список инспекторов, которые будут привлекаться к проекту, и их квалификационные данные;
- образцы бланков проверок; и
- перечень предыдущих проектов, контролировавшихся инспектором.

ЧАСТЬ 5—ПРИМЕРЫ РАСЧЕТОВ

ГЛАВА 14—ПРИМЕРЫ РАСЧЕТОВ

14.1—Расчет предела прочности на растяжение системы FRP

В настоящем разделе приводится пример расчетов свойств материала на площади из чистых волокон против свойств, полученных при анализе сборного ламината. Как указано в пункте 3.3.1, могут применяться оба метода определения свойств материала. Важно, однако, чтобы в любых проектных расчетах обязательно использовались свойства материалов, основанные только на одном из этих двух методов (например, если толщина сборного ламината используется в каком-либо вычислении, прочность, рассчитанная по площади сборного ламината также должна использоваться в расчетах). Испытательная панель изготавливается от двух слоев углеродистого волокна/системы FRP с однонаправленными волокнами, соединенными эпоксидной смолой, с помощью технологии влажной скрутки. С учетом известного состава волокон этой системы FRP, площадь чистого волокна составляет 0,0065 дюйма с шириной слоя 2 дюйма. После отвердевания системы из панели вырезаются пять пробных образцов шириной 2 дюйма (5,08 см). Пробные вырезанные образцы проверяются под натяжением на разрыв в соответствии со стандартом ASTM D 3039. Результаты испытаний на разрыв приводятся в Таб. 14.1.

Таб. 14.1—Результаты испытаний на разрыв системы FRP

Идент. № образца	Ширина		Измеренная толщина		Измеренная разрывная нагрузка	
	дюйм	мм	дюйм	мм	ки/с	кН
T-1	2	50,8	0,055	1,397	17,8	79,2
T-2	2	50,8	0,062	1,575	16,4	72,9
T-3	2	50,8	0,069	1,753	16,7	74,3
T-4	2	50,8	0,053	1,346	16,7	74,3
T-5	2	50,8	0,061	1,549	17,4	77,4
Среднее значение	2	50,8	0,060	1,524	17,0	75,6

Расчеты свойств чистой площади волокна		Расчеты свойств площади сборного ламината	
Рассчитать A_f с использованием известной толщины слоя чистого волокна: $A_f = ntfwf$	$A_f = (2) \left(0.0065 \frac{\text{in.}^2}{\text{in.}} \right) (2 \text{ in.})$ $= 0.026 \text{ in.}^2$	Рассчитать A_f с использованием среднего измеренного значения толщины ламината: $A_f = tfwf$	$A_f = (0.060 \text{ in.})(2 \text{ in.}) = 0.120 \text{ in.}^2$
	$A_f = (2) \left(0.1651 \frac{\text{mm}^2}{\text{mm}} \right) (50.8 \text{ mm})$ $= 16.774 \text{ mm}^2$		$A_f = (1.524 \text{ mm})(50.8 \text{ mm})$ $= 77.419 \text{ mm}^2$
Рассчитать среднее значение прочности на разрыв системы FRP на основании чистой площади волокна: сред. изм. разр. нагрузка $\bar{f}_{fu} = \frac{\text{-----}}{A_f}$	$\bar{f}_{fu} = \frac{17 \text{ kips}}{0.026 \text{ in.}^2} = 650 \text{ ksi}$	Рассчитать среднее значение прочности на разрыв системы FRP на основании площади сборного ламината: сред. изм. разр. нагрузка $\bar{f}_{fu} = \frac{\text{-----}}{A_f}$	$\bar{f}_{fu} = \frac{17 \text{ kips}}{0.120 \text{ in.}^2} = 140 \text{ ksi}$
	$\bar{f}_{fu} = \frac{75.62 \text{ kN}}{16.774 \text{ mm}^2} = 4.508 \text{ kN/mm}^2$		$\bar{f}_{fu} = \frac{75.62 \text{ kN}}{77.419 \text{ mm}^2} = 0.997 \text{ kN/mm}^2$
Рассчитать среднее значение прочности на разрыв системы FRP на единицу ширины на основании чистой площади волокна: $\bar{p}_{fu} = \frac{\bar{f}_{fu} A_f}{w_f}$	$\bar{p}_{fu} = \frac{(650 \text{ ksi})(0.026 \text{ in.}^2)}{2 \text{ in.}}$ $= 8.4 \text{ kips/in.}$	Рассчитать среднее значение прочности на разрыв системы FRP на единицу ширины на основании площади сборного ламината: $\bar{p}_{fu} = \frac{\bar{f}_{fu} A_f}{w_f}$	$\bar{p}_{fu} = \frac{(140 \text{ ksi})(0.120 \text{ in.}^2)}{2 \text{ in.}}$ $= 8.4 \text{ kips/in.}$
	$\bar{p}_{fu} = \frac{\left(4.508 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2} \right) (16.774 \text{ mm}^2)}{50.8 \text{ mm}}$ $= 1.49 \text{ kN/mm}$		$\bar{p}_{fu} = \frac{\left(0.997 \frac{\text{kN}}{\text{mm}^2} \right) (77.419 \text{ mm}^2)}{50.8 \text{ mm}}$ $= 1.49 \text{ kN/mm}$

14.2—Расчет предела прочности на растяжение системы FRP

Инженер рассматривает две системы FRP усиления элемента железобетонной конструкции и получает механические свойства от соответствующих производителей. Система А состоит из сухих листов с углеродными волокнами, уложенными в одном направлении, укладываемыми с помощью технологии влажной скрутки. Система В состоит из предварительно отвердевшего ламината из углеродного волокна/эпоксидной смолы, сцепляемого с бетонной поверхностью с помощью эпоксидной смолы. Выдержки из перечней технических характеристик, представленные производителем систем FRP, приводятся в Таб. 14.2. После рассмотрения перечней технических характеристик материалов, высланных производителем систем FRP, инженер сравнивает пределы прочности на растяжение этих двух систем.

Таблица 14.2—Свойства материалов и описание двух типов системы FRP

Система А (выдержки из листка данных)	Система В (выдержки из листка данных)
<p>Тип системы: сухой лист с однонаправленными волокнами</p> <p>Тип волокна: высокопрочный углерод</p> <p>Полимерная смола: эпоксидная</p> <p>Система А установлена методом влажной скрутки, при которой сухие листы из углеродных волокон пропитываются и склеиваются эпоксидной смолой на месте.</p>	<p>Тип системы: предварительно отвержденный ламинат с однонаправленными волокнами</p> <p>Тип волокна: высокопрочный углерод</p> <p>Полимерная смола: эпоксидная</p> <p>Предварительно отвержденные ламинаты системы В установлены на бетонную подложку эпоксидной клеевой пастой для системы В.</p>
Механические свойства ^{*†‡}	Механические свойства ^{*†}
$t_f = 0,013$ дюйма (0,330 мм)	$t_f = 0,050$ дюйма (1,270 мм)
$f^* = 550$ кг/кв. дюйм (3792 Н/мм ²)	$f^* = 380$ кг/кв. дюйм (2620 Н/мм ²)
$\epsilon^* = 1.7\%$	$\epsilon^* = 1.7\%$
$E_f = 33\,000$ кг/кв. дюйм (227 527 Н/мм ²)	$E_f = 22,000$ кг/кв. дюйм (151,724 Н/мм ²)
<p>Примечания по системе А:</p> <p>*Объявленные свойства определялись на 20 или более образцах в соответствии с ASTM D 3039.</p> <p>†Объявленные свойства были статистически отрегулированы путем вычитания трех отклонений от стандарта из среднего значения напряжения при растяжении и разрыве.</p> <p>‡Толщина определялась по площади чистого волокна по одному слою системы FRP. Смола исключается. Фактическая установленная толщина отвержденного FRP составляет от 0,060 до 0,070 дюйма на слой.</p>	<p>Примечания по системе В:</p> <p>*Объявленные свойства определялись на 20 или более образцах в соответствии с ASTM D 3039.</p> <p>†Объявленные свойства были статистически отрегулированы путем вычитания трех отклонений от стандарта из среднего значения напряжения при растяжении и разрыве.</p>

Поскольку в перечнях технических характеристик для обеих систем сообщается о свойствах, основанных на статистических данных, можно непосредственно сравнить предел прочности и модуль на растяжение обеих систем. Результаты расчетов приводятся ниже:

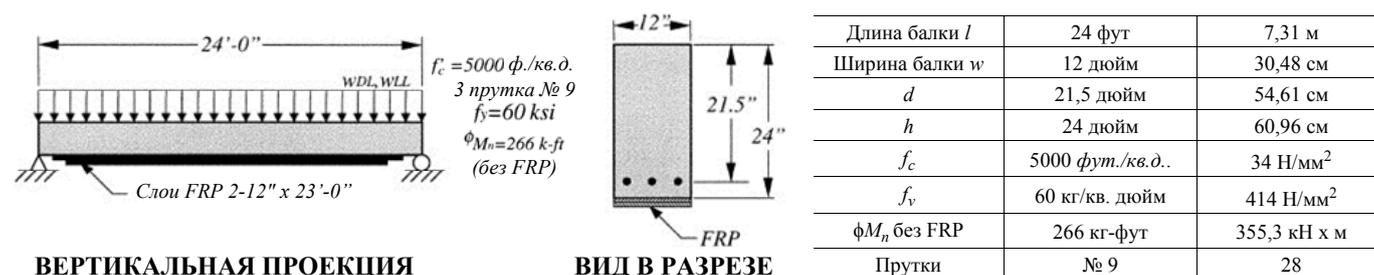
Метод	Расчеты в дюймах и фунтах	Расчеты в ед. изм. СИ
<p>Шаг 1А—Рассчитать предел прочности на растяжение по единице ширины Системы А</p> $P_{fu}^* = f_{fu}^* t_f$	$P_{fu}^* = (550 \text{ ksi})(0.013 \text{ in.}) = 7.15 \text{ kips/in.}$	$P_{fu}^* = (3.79 \text{ kN/mm}^2)(0.330 \text{ mm}) = 1.25 \text{ kN/mm}$
<p>Шаг 1В—Рассчитать предел прочности на растяжение по единице ширины Системы В</p> $P_{fu}^* = f_{fu}^* t_f$	$P_{fu}^* = (380 \text{ ksi})(0.050 \text{ in.}) = 19 \text{ kips/in.}$	$P_{fu}^* = (2.62 \text{ kN/mm}^2)(1.27 \text{ mm}) = 3.33 \text{ kN/mm}$
<p>Шаг 2А—Рассчитать модуль на растяжение по единице ширины Системы А</p> $k_f = E_f t_f$	$k_f = (33,000 \text{ ksi})(0.013 \text{ in.}) = 429 \text{ kips/in.}$	$k_f = (227.5 \text{ kN/mm}^2)(0.330 \text{ mm}) = 75.13 \text{ kN/mm}$
<p>Шаг 2В—Рассчитать модуль на растяжение по единице ширины Системы В</p> $k_f = E_f t_f$	$k_f = (22,000 \text{ ksi})(0.050 \text{ in.}) = 1100 \text{ kips/in.}$	$k_f = (151.7 \text{ kN/mm}^2)(1.27 \text{ mm}) = 192.63 \text{ kN/mm}$
<p>Шаг 3—Сравнить две системы</p> <p>Сравнить значения предела прочности на растяжение:</p> $\frac{P_{fu}^* (\text{Система В})}{P_{fu}^* (\text{Система А})}$	$\frac{P_{fu}^* (\text{Система В})}{P_{fu}^* (\text{Система А})} = \frac{19 \text{ kips/in.}}{7.5 \text{ kips/in.}} = 2.66$ <p>три слоя Системы А необходимы для каждого слоя Системы В для обеспечения эквивалентного предела прочности на растяжение</p>	$\frac{P_{fu}^* (\text{Система В})}{P_{fu}^* (\text{Система А})} = \frac{3.33 \text{ kN/mm}}{75.13 \text{ kN/mm}} = 2.66$ <p>три слоя Системы А необходимы для каждого слоя Системы В для обеспечения эквивалентного предела прочности на растяжение</p>
<p>Сравнить жесткость:</p> $\frac{k_f (\text{Система А})}{k_f (\text{Система В})}$	$\frac{k_f (\text{Система В})}{k_f (\text{Система А})} = \frac{1100 \text{ kips/in.}}{429 \text{ kips/in.}} = 2.56$ <p>три слоя Системы А необходимы для каждого слоя Системы В для обеспечения эквивалентной жесткости</p>	$\frac{k_f (\text{Система А})}{k_f (\text{Система В})} = \frac{192.63 \text{ kN/mm}}{75.13 \text{ kN/mm}} = 2.56$ <p>три слоя Системы А необходимы для каждого слоя Системы В для обеспечения эквивалентной жесткости</p>

Поскольку все методики проектирования, приведенные в настоящем документе, ограничивают деформацию материала FRP, полный предел прочности материала не используется и не должен быть основой для сравнения двух систем материалов. При рассмотрении различных материалов систем FRP для определенной сферы применения, системы FRP следует сравнивать только по эквивалентной жесткости. Кроме того, у каждой рассматриваемой системы FRP должна быть способность вызывать уровень деформации, ассоциируемый с эффективным уровнем деформации, требуемым в данной сфере применения, без разрыва, $\epsilon_{fu} > \epsilon_{fe}$.

Во многих случаях возможно изменять ширину полосы FRP обратно пропорционально количеству слоев (используйте полосы большей ширины для систем с меньшими толщинами и, наоборот). В таких случаях эквивалентные расчеты жесткости, как правило, не будут приводить к эквивалентному воздействию на прочность элемента. В целом, более тонкие (с низким ntf) и более широкие (с высоким wf) системы FRP обеспечивают более высокий уровень прочности элемента вследствие более низких напряжений сцепления. Точный паритет, однако, может быть найден только при выполнении полных расчетов (согласно процедурам, описанным в главах 9, 10, и 11 настоящего руководства) для каждой системы.

14.3—Усиление прочности на изгиб внутренней балки

Свободно опертая бетонная балка, усиленная тремя прутками № 9 (Рис. 14.1), установлена в пустом складском помещении и подвергается 50%-ому увеличению динамической несущей нагрузке. Анализ существующей балки показывает, что она имеет достаточный запас прочности, чтобы выдерживать новое заданное сопротивление сдвигу и отвечает требованиям эксплуатационной надежности по контролю за отклонениями и растрескиваниями. Однако ее сопротивление изгибу является недостаточным с учетом увеличенной динамической нагрузки.



ВЕРТИКАЛЬНАЯ ПРОЕКЦИЯ

ВИД В РАЗРЕЗЕ

Рис. 14.1—Схематическое представление идеальной свободно опертой балки с внешним усилением FRP.

В Табл. 14.3 приводятся сводные данные по существующим и новым нагрузкам и соответствующим моментам в середине пролета балки.

Таблица 14.3—Нагрузки и соответствующие моменты

Нагрузка/момент	Существующие нагрузки		Ожидаемые нагрузки	
	1,00 кг/фут	14 Н/мм	1,00 кг/фут	14 Н/мм
Статические нагрузки w_{DL}	1,00 кг/фут	14 Н/мм	1,00 кг/фут	14 Н/мм
Динамическая нагрузка w_{LL}	1,20 кг/фут	17 Н/мм	1,80 кг/фут	26 Н/мм
Нефакторные нагрузки ($w_{DL} + w_{LL}$)	2,20 кг/фут	32,1 Н/мм	2,80 кг/фут	40,9 Н/мм
Предельная нагрузка без армирования ($1,2w_{DL} + 0,85w_{LL}$)	нет данных	нет данных	2,73 кг/фут	39,8 Н/мм
Факторные нагрузки ($1,4w_{DL} + 1,7w_{LL}$)	3,44 кг/фут	50,2 Н/мм	4,46 кг/фут	65,1 Н/мм
Момент статической нагрузки M_{DL}	72 кг-фут	96,2 кН-м	72 кг-фут	96,2 кН-м
Момент динамической нагрузки M_{LL}	86 кг-фут	114,9 кН-м	130 кг-фут	173,6 кН-м
Момент рабочей нагрузки M_s	158 кг-фут	211,1 кН-м	202 кг-фут	269,8 кН-м
Предельный момент без армирования ($1,2M_{DL} + 0,85M_{LL}$)	нет данных	нет данных	197 кг-фут	263,2 кН-м
Факторный момент M_u	248 кг-фут	331,3 кН-м	321 кг-фут	428,8 кН-м

Предлагается усилить существующую железобетонную балку системой FRP, описанной в Таб. 14.4. В частности, на нижнюю поверхность балки должны быть установлены два слоя шириной 12 дюймов (25,4 мм) и длиной 23,0 фута (7 м) с помощью технологии влажной скрутки.

Таб. 14.4—Свойства системы FRP, заявленные производителем

Толщина на слой t_f	0,040 дюйм	1,016 мм
Предел прочности на разрыв f_{fu}^*	90 кг/кв. дюйм	0,62 кН/мм ²
Деформация при разрыве ϵ_{fu}^*	0,017 дюйм/дюйм	0,017 мм/мм
Модуль упругости ламинатов FRP E_f	5360 ksi	37 кН/мм ²

По результатам проверки уровень усиления достаточен, поскольку он действительно удовлетворяет критериям предельного усиления, рассчитываемого с помощью уравнения (8-1). Таким образом, существующая сила момента (ϕM_n) без FRP = 266 кг-фут (355 кН-м) больше, чем в случае неармированной балки ($1,2M_{DL} + 0,85M_{LL}$) новый = 197 кг-фут (263 кН-м). Проектные расчеты, использованные для проверки данной конфигурации, приводятся ниже.

Процедура	Расчеты в британской системе единиц	Расчеты в метрической системе единиц СИ
<p>Шаг 1 – Расчет характеристик конструктивных материалов системы FRP</p> <p>Балка располагается во внутреннем пространстве, планируется использовать материал CFRP. Поэтому согласно таблице 8.1, предлагается использовать коэффициент ослабления воздействия окружающей среды, равный 0,95.</p> $f_{fu} = C_E f_{fu}^*$ $\varepsilon_{fu} = C_E \varepsilon_{fu}^*$	$f_{fu} = (0.95)(90 \text{ ksi}) = 85 \text{ ksi}$ $\varepsilon_{fu} = (0.95)(0.017 \text{ in./in.}) = 0.0162 \text{ in./in.}$	$f_{fu} = (0.95)(620.53 \text{ N/mm}^2) = 589.5 \text{ N/mm}^2$ $\varepsilon_{fu} = (0.95)(0.017 \text{ mm/mm}) = 0.0162 \text{ mm/mm}$
<p>Шаг 2 – Предварительные расчеты</p> <p>Характеристики бетона:</p> <p>β_1 из стандарта АСІ 318-99, раздел 10.2.7.3</p> $E_c = 57,000 \sqrt{f'_c}$ <p>Характеристики используемой стальной арматуры:</p> $\rho_s \equiv \frac{A_s}{bd}$ <p>Характеристики наружных FRP-систем:</p> $A_f = n t_f w_f$ $\rho_f = \frac{A_f}{bd}$	$\beta_1 = 1.05 - 0.05 \frac{f'_c}{1000} = 0.80$ $E_c = 57,000 \sqrt{5000} \text{ psi} = 4,030,000 \text{ psi}$ $A_s = 3(1.00 \text{ in.}^2) = 3.00 \text{ in.}^2$ $\rho_s = \frac{3.00 \text{ in.}^2}{(12 \text{ in.})(21.5 \text{ in.})} = 0.00116$ $A_f = (2 \text{ plies})(0.040 \text{ in./ply})(12 \text{ in.}) = 0.96 \text{ in.}^2$ $\rho_f = \frac{0.96 \text{ in.}^2}{(12 \text{ in.})(21.5 \text{ in.})} = 0.00372$	$\beta_1 = 1.09 - 0.08 f'_c (\text{N/mm}^2) = 0.81$ $E_c = 57,000 \sqrt{34.47 \text{ N/mm}^2} = 334,672 \text{ N/mm}^2$ $A_s = 3(615.7 \text{ mm}^2) = 1935.48 \text{ mm}^2$ $\rho_s = \frac{1935.48 \text{ mm}^2}{(304.8 \text{ mm})(546.1 \text{ mm})} = 0.00116$ $A_f = (2 \text{ plies})(1.016 \text{ mm/ply})(304.8 \text{ mm}) = 619.35 \text{ mm}^2$ $\rho_f = \frac{619.35 \text{ mm}^2}{(304.8 \text{ mm})(546.1 \text{ mm})} = 0.00372$
<p>Шаг 3 – Определение существующего натяжения на потолке</p> <p>Существующее натяжение вычисляется в предположении, что балка треснула, и единственные нагрузки, воздействующие на балку в момент установки FRP, являются статическими нагрузками. Анализ треснувшей секции установленной балки дает следующие значения: $k = 0,334$ и $I_{cr} = 5905 \text{ дюйм}^4 = 2451 \times 10^6 \text{ мм}^4$</p> $\varepsilon_{bi} = \frac{M_{DL}(h - kd)}{I_{cr} E_c}$	$\varepsilon_{bi} = \frac{(864 \text{ k} \cdot \text{in.})[24 \text{ in.} - (0.334)(21.5 \text{ in.})]}{(5905 \text{ in.}^4)(4030 \text{ ksi})}$ $\varepsilon_{bi} = 0.00061$	$\varepsilon_{bi} = \frac{(97,632 \text{ kN} \cdot \text{mm})[609.6 \text{ mm} - (0.334)(546.1 \text{ mm})]}{(2451 \cdot 10^6 \text{ mm}^4)(28 \text{ kN/mm}^2)}$ $\varepsilon_{bi} = 0.00061$
<p>Шаг 4 – Определение зависящего от связывающего вещества коэффициента системы FRP</p> <p>Безразмерный зависящий от связывающего вещества коэффициент для изгиба κ_m вычисляется с использованием уравнения (9-2)</p> <p>Сравните значение $nE_f t_f$ с 1.000.000</p> <p>Поэтому</p> $\kappa_m = \frac{1}{60 \varepsilon_{fu}} \left(1 - \frac{nE_f t_f}{2,000,000} \right) \leq 0.90$	$(2)(5,360,000 \text{ psi})(0.040 \text{ in.}) = 428,8000 < 1,000,000$ $\kappa_m = \frac{1}{60(0.0162)} \left[1 - \frac{(2)(5,360,000 \text{ psi})(0.040 \text{ in.})}{2,000,000} \right]$ $\kappa_m = 0.82 < 0.9$	$(2)(37 \text{ kN/mm}^2)(1.016 \text{ mm}) = 75,184 < 175,336$ $\kappa_m = \frac{1}{60(0.0162)} \left[1 - \frac{(2)(37 \text{ kN/mm}^2)(1.016 \text{ mm})}{175,336} \right]$ $\kappa_m = 0.588 < 0.6$
<p>Шаг 5 – Оценка величины c – глубины нейтральной оси</p> <p>Приемлемая начальная оценка величины c составляет $0,20d$. Величина c корректируется после проверки равновесия.</p> $c = 0.20d$	$c = (0.20)(21.5 \text{ in.}) = 4.30 \text{ in.}$	$c = (0.20)(546.1 \text{ mm}) = 109.2 \text{ mm}$

Процедура	Расчеты в британской системе единиц	Расчеты в метрической системе единиц СИ
<p>Шаг 6 – Определение уровня эффективного натяжения в бетоне, армированном FRP Уровень эффективного натяжения в FRP может быть определен с помощью уравнения (9-3).</p> $\epsilon_{fe} = 0.003 \left(\frac{h-c}{c} \right) - \epsilon_{bi} \leq \kappa_m \epsilon_{fu}$ <p>Следует отметить, что для выбранной глубины нейтральной оси видом разрушения будет крошение бетона, поскольку определяющим в этом уравнении является первое выражение. Если определяющим в уравнении является второе (ограничивающее) выражение, то видом разрушения будет дефект FRP.</p>	$\epsilon_{fe} = 0.003 \left(\frac{24 - 4.3}{4.3} \right) - 0.00061 \leq 0.82 (0.0162)$ $\epsilon_{fe} = 0.0131 \leq 0.0133$	$\epsilon_{fe} = 0.003 \left(\frac{617.2 \text{ mm} - 109.2 \text{ mm}}{109.2 \text{ mm}} \right) - 0.00061$ $\leq 0.82 (0.0162)$ $\epsilon_{fe} = 0.0131 \leq 0.0133$
<p>Шаг 7 – Вычисление натяжения в используемой стальной арматуре Натяжение в стальной арматуре может быть рассчитано с использованием подобных треугольников согласно уравнению (9-8).</p> $\epsilon_s = (\epsilon_{fe} + \epsilon_{bi}) \left(\frac{d-c}{h-c} \right)$	$\epsilon_s = (0.0131 + 0.00061) \left(\frac{21.5 - 4.30}{24 - 4.30} \right) = 0.012$	$\epsilon_s = (0.0131 + 0.00061) \left(\frac{546.1 - 109.2}{609.6 - 109.2} \right) = 0.012$
<p>Шаг 8 – Вычисление уровня напряжения в стальной арматуре и FRP Значения напряжения вычисляются с помощью уравнений (9-9) и (9-4).</p> $f_s = E_s \epsilon_s \leq f_y$ $f_{fe} = E_f \epsilon_{fe}$	$f_s = (29,000 \text{ ksi})(0.012) \leq 60 \text{ ksi}$ $f_s = 348 \text{ ksi} \leq 60 \text{ ksi}$ $f_{fe} = (5360 \text{ ksi})(0.0131) = 70.2 \text{ ksi}$	$f_s = (200 \text{ kN/mm}^2)(0.012) \leq 0.14 \text{ kN/mm}^2$ $f_s = 2.4 \text{ kN/mm}^2 \leq 0.14 \text{ kN/mm}^2$ $f_{fe} = (37 \text{ kN/mm}^2)(0.0131) = 0.5 \text{ kN/mm}^2$
<p>Шаг 9 – Вычисление результирующих внутренних сил и проверка их равновесия Равновесие сил подтверждается путем проверки начальной оценки величины c с помощью уравнения (9-10). (Поскольку коэффициент g, определяющий крошения бетона как вид разрушения, принимается равным 0,85.)</p> $c = \frac{A_s f_s + A_f f_{fe}}{\gamma f_c' \beta_1 b}$	$c = \frac{(3.00 \text{ in.}^2)(60 \text{ ksi}) + (0.96 \text{ in.}^2)(70.2 \text{ ksi})}{(0.85)(5 \text{ ksi})(0.80)(12 \text{ in.})}$ $c = 6.06 \text{ in.} \approx 4.030 \text{ in. n.g.}$ <p>∴ Скорректируйте оценку величины c и повторяйте шаги 6–9, пока не будет достигнуто равновесие сил.</p>	$c = \frac{(1935.48 \text{ mm}^2)(413.7 \text{ N/mm}^2) + (619 \text{ mm}^2)(484 \text{ N/mm}^2)}{(0.85)(34.47 \text{ N/mm}^2)(0.81)(305 \text{ mm})}$ $c = 152 \text{ mm} \approx 109 \text{ in. n.g.}$ <p>∴ Скорректируйте оценку величины c и повторяйте шаги 6–9, пока не будет достигнуто равновесие сил.</p>
<p>Шаг 10 – Корректировка величины c для достижения равновесия сил Повторяйте шаги 6–9 с различными значениями c, пока не будет достигнуто равновесие. Результатами последней итерации являются $c = 5.58 \text{ in.}$; $\epsilon_s = 0.0086$; $f_s = f_y = 60 \text{ ksi}$; $\epsilon_{fe} = 0.0093$; and $f_{fe} = 49.8 \text{ ksi}$</p>	$c = \frac{(3.00 \text{ in.}^2)(60 \text{ ksi}) + (0.96 \text{ in.}^2)(49.8 \text{ ksi})}{(0.85)(5 \text{ ksi})(0.80)(12 \text{ in.})}$ $c = 5.58 \text{ in.} = 5.58 \text{ in.} \checkmark \text{ O.K.}$ <p>∴ значение c, выбранное для последней итерации, считается правильным.</p>	$c = \frac{(1935.48 \text{ mm}^2)(0.41 \text{ kN/mm}^2) + (619 \text{ mm}^2)(0.34 \text{ kN/mm}^2)}{(0.85)(0.03 \text{ kN/mm}^2)(0.81)(305 \text{ mm})}$ $c = \frac{(1935 \text{ mm}^2)(413.7 \text{ N/mm}^2) + (619 \text{ mm}^2)(343 \text{ N/mm}^2)}{(0.85)(34.47 \text{ N/mm}^2)(0.81)(305 \text{ mm})}$ $c = 142 \text{ mm} = 142 \text{ mm} \checkmark \text{ O.K.}$ <p>∴ значение c, выбранное для последней итерации, считается правильным.</p>
<p>Шаг 11 – Расчет проектного предела прочности сечения на изгиб Значение проектного предела прочности на изгиб вычисляется с помощью уравнения (9-11). Коэффициент дополнительного ослабления $\Psi_f = 0,85$ используется для учета воздействия системы FRP. Поскольку $\phi = 0,0086 > 0,005$, то используемый в уравнении (9-5) коэффициент снижения прочности f принимается равным 0,90.</p> $\phi M_n = \phi \left[A_s f_s \left(d - \frac{\beta_1 c}{2} \right) + \psi A_f f_{fe} \left(h - \frac{\beta_1 c}{2} \right) \right]$		

Процедура	Расчеты в британской системе единиц	Расчеты в метрической системе единиц СИ
	$\phi M_n = 0.90 \left[(3.00 \text{ in.}^2 (60 \text{ ksi})) \right.$ $\left. \left(21.5 \text{ in.} - \frac{(0.80)(5.58 \text{ in.})}{2} \right) + (0.85)(0.96 \text{ in.}^2) \right.$ $\left. (49.8 \text{ ksi}) \left(24 \text{ in.} - \frac{(0.80)(5.58 \text{ in.})}{2} \right) \right]$ $\phi M_n = 3920 \text{ k} \cdot \text{in.} = 326 \text{ k} \cdot \text{ft} \geq M_u = 321 \text{ k} \cdot \text{ft}$ <p>∴ усиленная секция способна выдерживать воздействие нового требуемого момента сил.</p>	$\phi M_n = 0.90 \left[(1935.48 \text{ mm}^2)(414 \text{ N/mm}^2) \right.$ $\left. \left(546 \text{ mm} - \frac{(0.81)(142 \text{ mm})}{2} \right) + (0.85)(546 \text{ mm}^2) \right]$ $(343 \text{ N/mm}^2) \left(607 \text{ mm} - \frac{(0.81)(142 \text{ mm})}{2} \right) \right]$ $\phi M_n = 435,329 \text{ N} \cdot \text{mm} = 435.3 \text{ N} \cdot \text{mm} \geq M_u = 428.7 \text{ N} \cdot \text{m}$ <p>∴ усиленная секция способна выдерживать воздействие нового требуемого момента сил.</p>
<p>Шаг 12 – Проверка рабочих напряжений в стальной арматуре и FRP Вычислите глубину упругости до нейтральной оси треснувшей балки путем добавления статического момента площадей преобразованного сечения. Расчет может быть следующим образом упрощен для прямоугольной балки без арматуры, работающей на сжатие:</p> $k = \sqrt{\left(\rho_s \frac{E_s}{E_c} + \rho_f \frac{E_f}{E_c} \right)^2 + 2 \left(\rho_s \frac{E_s}{E_c} + \rho_f \frac{E_f}{E_c} \right) \left(\frac{h}{d} \right)} - \left(\rho_s \frac{E_s}{E_c} + \rho_f \frac{E_f}{E_c} \right)$ <p>Вычислите уровень напряжения в стальной арматуре, используя уравнение (9-12), и убедитесь, что он ниже рекомендованного предела, определяемого уравнением (9-6).</p> $f_{s,s} = \frac{\left[M_s + \epsilon_{bi} A_f E_f \left(h - \frac{kd}{3} \right) \right] (d - kd) E_s}{A_s E_s \left(d - \frac{kd}{3} \right) (d - kd) + A_f E_f \left(h - \frac{kd}{3} \right) (h - kd)}$ $f_{s,s} \leq 0.80 f_y$	<p>* См. УРАВНЕНИЕ I (британская система) ниже.</p> $k = 0.343$ $kd = (0.343)(21.5 \text{ in.}) = 7.37 \text{ in.}$ <p>† См. УРАВНЕНИЕ II (британская система) ниже.</p> $f_{s,s} = 40.4 \text{ ksi} \leq (0.80)(60 \text{ ksi}) = 48 \text{ ksi}$ <p>∴ уровень напряжения в стальной арматуре находится в рекомендованных границах.</p>	<p>** См. УРАВНЕНИЕ I (система СИ) ниже.</p> $k = 0.343$ $kd = (0.343)(546.1 \text{ mm}) = 187.3 \text{ mm}$ <p>†† См. УРАВНЕНИЕ II (система СИ) ниже.</p> $f_{s,s} = 280 \text{ N/mm}^2 \leq (0.80)(410 \text{ N/mm}^2) = 330 \text{ N/mm}^2$ <p>∴ уровень напряжения в стальной арматуре находится в рекомендованных границах.</p>

* УРАВНЕНИЕ I (британская)

$$k = \sqrt{\left(0.0116 \left(\frac{29,000}{4030} \right) + 0.00372 \left(\frac{5360}{4030} \right) \right)^2 + 2 \left(0.0116 \left(\frac{29,000}{4030} \right) + 0.00372 \left(\frac{5360}{4030} \right) \right) \left(\frac{24 \text{ in.}}{21.5 \text{ in.}} \right)} - \left(0.0116 \left(\frac{29,000}{4030} \right) + 0.00372 \left(\frac{5360}{4030} \right) \right)$$

УРАВНЕНИЕ I (система СИ)

$$k = \sqrt{\left(0.0116 \left(\frac{200}{28} \right) + 0.00372 \left(\frac{37}{28} \right) \right)^2 + 2 \left(0.0116 \left(\frac{200}{28} \right) + 0.00372 \left(\frac{37}{28} \right) \right) \left(\frac{609.6 \text{ mm}}{546.1 \text{ mm}} \right)} - \left(0.0116 \left(\frac{200}{28} \right) + 0.00372 \left(\frac{37}{28} \right) \right)$$

† УРАВНЕНИЕ II (британская система)

$$f_{s,s} = \frac{\left[2424 \text{ k} \cdot \text{in.} + (0.00061)(0.96 \text{ in.}^2)(5360 \text{ ksi}) \left(24 \text{ in.} - \frac{7.37 \text{ in.}}{3} \right) \right] (21.5 \text{ in.} - 7.37 \text{ in.})(29,000 \text{ ksi})}{(3.00 \text{ in.}^2)(29,000 \text{ ksi}) \left(21.5 \text{ in.} - \frac{7.37 \text{ in.}}{3} \right) + (0.96 \text{ in.}^2)(5360 \text{ ksi}) \left(24 \text{ in.} - \frac{7.37 \text{ in.}}{3} \right) (24 \text{ in.} - 7.37 \text{ in.})}$$

†† УРАВНЕНИЕ I (система СИ)

$$f_{s,s} = \frac{\left[273,912 \text{ kN} \cdot \text{mm} + (0.00061)(619.35 \text{ mm}^2)(37 \text{ kN/mm}^2) \left(609.6 \text{ mm} - \frac{187.2 \text{ mm}}{3} \right) \right] (546.1 \text{ mm} - 187.2 \text{ mm})(200 \text{ kN/mm}^2)}{(1847 \text{ mm}^2)(200 \text{ kN/mm}^2) \left(546.1 \text{ mm} - \frac{187.2 \text{ mm}}{3} \right) + (619.35 \text{ mm}^2)(37 \text{ kN/mm}^2) \left(609.6 \text{ mm} - \frac{187.2 \text{ mm}}{3} \right) (609.6 \text{ mm} - 187.2 \text{ mm})}$$

Процедура	Расчеты в британской системе единиц	Расчеты в метрической системе единиц СИ
<p>Шаг 12 (продолжение) –</p> <p>Вычисление уровня напряжения в FRP, используя уравнение (9-13), и убедитесь, что он ниже рекомендованного предельного значения разрушающего напряжения при ползучести, указанного в Таб. 9.1. Предположите, что полная рабочая нагрузка является непрерывной.</p> $f_{f,s} = f_{s,s} \left(\frac{E_f}{E_s} \right) \left(\frac{h - kd}{d - kd} \right) - \epsilon_{bi} E_f$ <p>Предельное значение суммы непрерывно действующей и циклически прикладываемой нагрузки для углеродной системы FRP указан в Таб. 9.1:</p> <p>Предельное значение суммы непрерывно действующей и циклически прикладываемой нагрузки = $0.55f_{fi}$</p>	$f_{f,s} = 40.4 \text{ ksi} \left(\frac{5360 \text{ ksi}}{29,000 \text{ ksi}} \right) \left(\frac{24 \text{ in.} - 7.37 \text{ in.}}{21.5 \text{ in.} - 7.37 \text{ in.}} \right) - (0.00061)(5360 \text{ ksi})$ $f_{f,s} = 5.60 \text{ ksi} \leq (0.55)(85 \text{ ksi}) = 50 \text{ ksi}$ <p>∴ уровень напряжения в FRP находится в рекомендованных границах для суммы непрерывно действующей и циклически прикладываемой нагрузки.</p>	$f_{f,s} = 0.278 \text{ kN/mm}^2 \left(\frac{37 \text{ kN/mm}^2}{200 \text{ kN/mm}^2} \right) \left(\frac{609.6 \text{ mm} - 187.2 \text{ mm}}{546.1 \text{ mm} - 187.2 \text{ mm}} \right) - (0.00061)(371 \text{ kN/mm}^2)$ $f_{f,s} = 38.6 \text{ N/mm}^2 \leq (0.55)(586 \text{ N/mm}^2) = 322.3 \text{ N/mm}^2$ <p>∴ уровень напряжения в FRP находится в рекомендованных границах для суммы непрерывно действующей и циклически прикладываемой нагрузки.</p>

При проектировании конструкций, армируемых с использованием FRP, слой FRP должен заканчиваться на минимальном расстоянии d после точки, указанной на эпюре изгибающих моментов, отражающей процесс трещинообразования. Расчетное сдвигающее усилие в этой точке должно составлять 2/3 предела прочности бетона на сдвиг. Если сдвигающее усилие превышает 2/3 предела прочности бетона на сдвиг, то для предотвращения отслоения защитного слоя бетона рекомендуется использовать V-образные обмотки из FRP.

14.4—Сдвигающее усилие, повышающее прочность внутренней T-образной балки

На T-образную балку из армированного бетона ($f'_c = 3000$ фунт/кв. дюйм = $20,7 \text{ Н/мм}^2$), расположенную внутри офисного здания, накладываются повышенные прочностные требования при воздействии динамических нагрузок. Анализ состояния установленной балки показывает, что она сохраняет достаточную прочность на изгиб, однако ее предел прочности на сдвиг не позволяет ей выдерживать повышенную динамическую нагрузку. Согласно результатам анализа, номинальное значение обеспечиваемого бетоном предела прочности на сдвиг $V_c = 36,4$ кфунт = 162 кН , а номинальное значение обеспечиваемого стальной арматурой предела прочности на сдвиг $V_s = 19,6$ кфунт = $87,2 \text{ кН}$. Таким образом, расчетный предел прочности на сдвиг установленной балки $\phi V_n = 0,85 (36,4 \text{ кфунт} + 19,6 \text{ кфунт}) = 47,6 \text{ кфунт} = 211,7 \text{ кН}$. Расчетный предел требуемой прочности на сдвиг с учетом повышенной динамической нагрузки на расстоянии d от точки опоры $V_u = 60$ кфунт = $266,7 \text{ кН}$. На Рис. 14.2 представлена эпюра напряжений сдвига с указанием мест вдоль длины балки, где требуется повышение предела прочности на сдвиг.

Предложенный вариант дополнительного повышения предела прочности на сдвиг посредством FRP показан на Рис. 14.3, а полученные при этом характеристики представлены в Таб. 14.5. Каждая полоса FRP состоит из одного слоя ($n = 1$) гибкого углеродного листа, устанавливаемого путем влажной укладки. Характеристики системы FRP, представленные ее производителем, показаны в Таб. 14.6.



Рис. 14.2 Эпюра напряжений сдвига, показывающая зависимость существующей прочности от нагрузки. Армирование посредством FRP должно устранить нехватку прочности, показанную в виде затененной области.

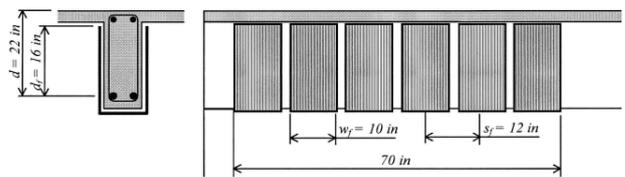


Рис. 14.3 Структура, обеспечивающая дополнительное повышение предела прочности на сдвиг посредством FRP

Таб. 14.5 Структура, обеспечивающая дополнительное повышение предела прочности на сдвиг посредством FRP

d	22 дюйма	55,88 см
d_f	16 дюймов	40,64 см
Ширина каждого листа, w_f	10 дюймов	25,4 см
Расстояние между листами, s_f	12 дюймов	30,48 см
Длина полосы FRP	70 дюймов	177,8 см

Таб. 14.6 Представленные производителем характеристики системы FRP

Толщина слоя, t_f	0,0065 дюйма	0,1651 мм
Предел прочности на растяжение, ϵ_{fu}^*	550.000 фунт/кв. дюйм	3792 Н/мм ²
Деформация при разрыве, g_f^*	0,017 дюйм/дюйм	0,017 мм/мм
Модуль упругости, E_f	33 000 000 фунт/кв. дюйм	227 527 Н/мм ²

Ниже приводятся расчеты, используемые при проектировании данной структуры.

Процедура	Расчеты в британской системе единиц	Расчеты в метрической системе единиц СИ
<p>Шаг 1 – Расчет характеристик конструктивных материалов</p> <p>Балка располагается в замкнутом и кондиционируемом пространстве, планируется использовать CFRP. Поэтому согласно Таб. 8.1, предлагается использовать коэффициент ослабления воздействия окружающей среды, равный 0,95.</p> $f_{fu} = C_E f_{fu}^*$ $\epsilon_{fu} = C_E \epsilon_{fu}^*$	$f_{fu} = (0.95)(550 \text{ ksi}) = 522.5 \text{ ksi}$ $\epsilon_{fu} = (0.95)(0.017) = 0.016$	$f_{fu} = (0.95)(3.79 \text{ kN/mm}^2) = 3.60 \text{ kN/mm}^2$ $\epsilon_{fu} = (0.95)(0.017) = 0.016$
<p>Шаг 2 – Вычисление уровня эффективного натяжения в бетоне, армированном FRP</p> <p>Эффективное натяжение в V-образных обмотках из FRP определяется с использованием коэффициента ослабления связей κ_v. Этот коэффициент может быть вычислен с помощью уравнений (10-7) - (10-10).</p> $L_e = \frac{2500}{(n t_f E_f)^{0.58}}$ $k_1 = \left(\frac{f_c'}{4000} \right)^{2/3}$ $k_2 = \left(\frac{d_f - L_e}{d_f} \right)$ $\kappa_v = \frac{k_1 k_2 L_e}{468 \epsilon_{fu}} \leq 0.75$ <p>После этого эффективное натяжение может быть рассчитано с помощью уравнения (10-6b) следующим образом:</p> $\epsilon_{fe} = \kappa_v \epsilon_{fu} \leq 0.004$	$L_e = \frac{2500}{[(1)(0.0065 \text{ in.})(33 \times 10^6 \text{ psi})]^{0.58}} = 2.0 \text{ in.}$ $k_1 = \left(\frac{3000 \text{ psi}}{4000} \right)^{2/3} = 0.82$ $k_2 = \left(\frac{16 \text{ in.} - 2.0 \text{ in.}}{16 \text{ in.}} \right) = 0.875$ $\kappa_v = \frac{(0.82)(0.875)(2 \text{ in.})}{468(0.016)} = 0.192 \leq 0.75$ $\epsilon_{fe} = 0.192(0.016) = 0.0031 \leq 0.004$	$L_e = \frac{416}{[(1)(0.1651 \text{ mm})(227.53 \text{ kN/mm}^2)]^{0.58}} = 50.8 \text{ mm}$ $k_1 = \left(\frac{20.68 \text{ kN/mm}^2}{254} \right)^{2/3} = 0.82$ $k_2 = \left(\frac{406.4 \text{ mm} - 50.8 \text{ mm}}{406.4 \text{ mm}} \right) = 0.875$ $\kappa_v = \frac{(0.82)(0.875)(50.8 \text{ mm})}{468(0.016)} = 0.192 \leq 0.75$ $\epsilon_{fe} = 0.192(0.016) = 0.0031 \leq 0.004$

Процедура	Расчеты в британской системе единиц	Расчеты в метрической системе единиц СИ
<p>Шаг 3 – Вычисление вклада армирующего FRP в значение предела прочности на сдвиг</p> <p>Площадь участка, армированного FRP, может быть вычислена следующим образом:</p> $A_{fv} = 2nt_f w_f$ <p>Эффективное напряжение в FRP может быть вычислено исходя из закона Гука.</p> $f_{fe} = \epsilon_{fe} E_f$ <p>После этого вклад FRP в изменение прочности на сдвиг может быть определен с помощью уравнения (10-3).</p> $V_f = \frac{A_{fv} f_{fe} (\sin \alpha + \cos \alpha) d_f}{s_f}$	$A_{fv} = 2(1)(0.0065 \text{ in.})(10 \text{ in.}) = 0.13 \text{ in.}^2$ $f_{fe} = (0.0031)(33,000 \text{ ksi}) = 102 \text{ ksi}$ $V_f = \frac{(0.13 \text{ in.}^2)(102 \text{ ksi})(1)(16 \text{ in.})}{(12 \text{ in.})}$ $V_f = 17.7 \text{ kips}$	$A_{fv} = 2(1)(0.1651 \text{ mm})(254 \text{ mm}) = 83.87 \text{ mm}^2$ $f_{fe} = (0.0031)(227.52 \text{ kN/mm}^2) = 0.703 \text{ kN/mm}^2$ $V_f = \frac{(83.87 \text{ mm}^2)(0.703 \text{ kN/mm}^2)(1)(406.4 \text{ mm})}{(304.8 \text{ mm})}$ $V_f = 78.73 \text{ kN}$
<p>Шаг 4 – Расчет предела прочности секции на сдвиг</p> <p>Проектное значение предела прочности на сдвиг может быть рассчитано с помощью уравнения (10-2) с $\Psi_f = 0,85$ для V-образных обмоток.</p> $\phi V_n = \phi(V_c + V_s + \Psi_f V_f)$	$\phi V_n = 0.85[36.4 + 19.6 + (0.85)(17.7)]$ $\phi V_n = 60.4 \text{ kips} > V_n = 60 \text{ kips}$ <p>∴ усиленная секция способна выдерживать воздействие требуемого предела прочности на сдвиг.</p>	$\phi V_n = 0.85[162 + 87.2 + (0.85)(78.73)]$ $\phi V_n = 268.7 \text{ kN} > V_n = 267 \text{ kN}$ <p>∴ усиленная секция способна выдерживать воздействие требуемого предела прочности на сдвиг.</p>

14.5—Сдвигающее усилие, повышающее прочность наружной колонны

Квадратная колонна сечением 24 x 24 дюйма требует увеличения предела прочности на сдвиг на 60 кфнт. Колонна располагается на открытой автостоянке и подвергается воздействию значительного перепада температуры и климатических условий. Окончательный вариант повышения прочности колонны с помощью FRP пока не выбран.

Для модификации конструкции колонны выбран вариант с полным ее покрытием слоем FRP на основе E-стекла/эпоксидной смолы. Характеристики системы FRP, представленные ее производителем, показаны в Таб. 14.7. Ниже приводятся проектные расчеты для необходимого количества полных обмоток.

Процедура	Расчеты в британской системе единиц	Расчеты в метрической системе единиц СИ
<p>Шаг 1 – Расчет характеристик конструкционных материалов</p> <p>Колонна располагается на открытом воздухе, планируется использовать материал CFRP. Поэтому согласно Таб. 8.1, предлагается использовать коэффициент ослабления воздействия окружающей среды, равный 0,65.</p> $f_{fu} = C_E f_{fu}^*$ $\epsilon_{fu} = C_E \epsilon_{fu}^*$	$f_{fu} = (0.65)(80 \text{ ksi}) = 52 \text{ ksi}$ $\epsilon_{fu} = (0.65)(0.020) = 0.013$	$f_{fu} = (0.65)(551.6 \text{ N/mm}^2) = 358.5 \text{ N/mm}^2$ $\epsilon_{fu} = (0.65)(0.020) = 0.013$
<p>Шаг 2 – Вычисление уровня эффективного натяжения в бетоне, армированном FRP</p> <p>Эффективное натяжение в полной обмотке FRP может быть определено из уравнения (10-6а):</p> $\epsilon_{fe} = 0.004 \leq 0.75 \epsilon_{fu}$	$\epsilon_{fe} = 0.004 \leq 0.75(0.013) = 0.010$ <p>∴ используйте эффективное натяжение $\epsilon_{fe} = 0,004$.</p>	$\epsilon_{fe} = 0.004 \leq 0.75(0.013) = 0.010$ <p>∴ используйте эффективное натяжение $\epsilon_{fe} = 0,004$.</p>

Процедура	Расчеты в британской системе единиц	Расчеты в метрической системе единиц СИ
<p>Шаг 3 – Определение требуемой площади армирования посредством FRP</p> <p>Требуемый вклад армирующего FRP в предел прочности на сдвиг может быть рассчитан с учетом необходимого повышения прочности, коэффициента снижения прочности на сдвиг и коэффициента частичного восстановления, равного 0,95 для полностью обмотанных секций.</p> $V_{f, reqd} = \frac{\Delta V_u}{\phi(\psi)}$ <p>Требуемая площадь FRP может быть определена путем преобразования уравнения (10-3). Значение требуемой площади выражается в пространственных единицах.</p> $A_{fv, reqd} = \frac{V_{f, reqd} s_f}{\epsilon_{fe} E_{fe} (\sin \alpha + \cos \alpha) d_f}$	$V_{f, reqd} = \frac{60 \text{ kips}}{0.85(0.95)} = 74.3 \text{ kips}$ $A_{fv, reqd} = \frac{(74.3 \text{ kips}) s_f}{(0.004)(4000 \text{ ksi})(1)(24 \text{ in.})} = 0.194 s_f$	$V_{f, reqd} = \frac{266.9 \text{ kN}}{0.85(0.95)} = 330.5 \text{ kN}$ $A_{fv, reqd} = \frac{(330.5 \text{ kN}) s_f}{(0.004)(27.6 \text{ kN/mm}^2)(1)(609.6 \text{ mm})} = 4.91 s_f$
<p>Шаг 4 – Определение количества слоев, ширины полос и расстояния между ними</p> <p>Количество слоев может быть определено, исходя из ширины полос и расстояния между ними, следующим образом:</p> $n = \frac{A_{fv, reqd}}{2 t_f w_f}$	$n = \frac{0.194 s_f}{2(0.051 \text{ in.}) w_f} = 1.90 \frac{s_f}{w_f}$ <p>∴ используйте два слоя ($n = 2$), непрерывно уложенных по всей высоте колонны ($s_f = w_f$).</p>	$n = \frac{4.91 s_f}{2(1.29 \text{ mm}) w_f} = 1.90 \frac{s_f}{w_f}$ <p>∴ используйте два слоя ($n = 2$), непрерывно уложенных по всей высоте колонны ($s_f = w_f$).</p>

Таб. 14.7 Представленные производителем характеристики системы FRP*

Толщина слоя, t_f	0,051 дюйма	1,29 мм
Гарантированный предел прочности на растяжение, f_{fu}^*	80 000 фунт/кв. дюйм	551,6 Н/мм ²
Гарантированное сжатие при разрыве, ϵ_{fu}	0,020 дюйм/дюйм	0,020 мм/мм
Модуль упругости, E_f	4 000 000 фунт/кв. дюйм	27 579 Н/мм ²

* Представленные характеристики даны для ламината.

ГЛАВА 15—СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

15.1—Справочные стандарты и отчеты

Приводимые ниже стандарты и отчеты даны в последних редакциях на момент подготовки настоящего документа. Поскольку эти документы достаточно часто обновляются, читателю рекомендуется обращаться в соответствующую финансирующую группу, если он желает ознакомиться с последней версией конкретного документа.

Американский институт бетона (ACI)

- 201.1R Инструкция по проведению обследования технического состояния используемого бетона
- 216R Инструкция по определению предела огнестойкости элементов бетонных конструкций
- 224R Контроль трещинообразования в бетонных конструкциях
- 224.1R Причина образования трещин в бетонных конструкциях, оценка состояния конструкций и ремонт
- 318-99 Строительные нормы и правила по конструкционному бетону и комментарии к ним
- 364.1R Инструкция по оценке состояния бетонных конструкций до проведения восстановительных работ
- 437R Оценка прочности существующих бетонных сооружений
- 440R-96 Сообщение о новейших методах использования стекловолокна для армирования бетонных конструкций
- 440.1R Инструкция по проектированию и изготовлению бетона, армированного стержнями из FRP
- 503R Использование эпоксидных смесей с бетоном
- 503.4 Стандартные технические условия выполнения ремонта бетона с использованием эпоксидного полимерраствора
- 546R Инструкция по ремонту бетонных конструкций

Американский национальный институт стандартов (ANSI)

- Z-129.1 Предупредительные обозначения опасных промышленно выпускаемых химикатов

Американское общество специалистов по испытаниям и материалам (ASTM)

- D 696 Метод испытаний по определению коэффициента теплового расширения пластиков в температурном диапазоне от -30°C до 30°C
- D 2240 Метод испытаний по определению твердости резинового покрытия – определение твердости по дюрометру
- D 2583 Метод испытаний по определению твердости жестких пластиков с помощью твердомера Баркола
- D 3039 Метод испытаний по определению прочности на растяжение волоконно-смоляных композитов
- D 3165 Метод испытаний по определению прочностных характеристик адгезивов при сдвиге под воздействием растягивающих нагрузок на соединенные внахлестку ламинированные слои.
- D 3418 Метод испытаний по определению температуры фазового перехода полимеров при проведении термического анализа (ДТА - дифференциально-термический анализ или ДСК - дифференциальная сканирующая калориметрия)
- D 3528 Метод испытаний по определению прочностных характеристик двойных выполненных внахлестку адгезивных соединений при сдвиге под воздействием растягивающих нагрузок
- D 4065 Способы определения динамических механических свойств пластиков и составление отчетности по ним
- D 4541 Метод испытаний по определению усилий по снятию покрытий с помощью портативного адгезиометра
- E 84 Метод испытаний по определению характеристик поверх-

ностного горения строительных материалов

- E 119 Стандартные методы испытаний по определению огнестойкости строительных конструкций и материалов

Канадская ассоциация стандартов (CSA)

CSA S806-02 Проектирование и конструирование строительных конструкций, использующих стекловолокно

Свод федеральных нормативных актов

- CFR 16, часть 1500 Опасные вещества и субстраты; нормативы по администрированию и обеспечению правовых санкций
- CFR 49, глава C Транспортировка

Международная конференция инспекторов зданий (ICBO)

AC125 Критерии приемки бетонных, армированных и неармированных каменных конструкций с использованием армированных волокон композитных систем

Международный институт ремонта бетона (ICRI)

- ICRI 03730 Инструкция по подготовке поверхностей при проведении ремонта бетона, разрушенного под воздействием коррозии стальной арматуры
- ICRI 03733 Инструкция по выбору и подготовке материалов для ремонта бетонных поверхностей

Международная федерация по железобетону

FIB 2001 Внешние системы FRP для железобетонных конструкций

Вышеназванные публикации могут быть получены в следующих организациях:

Американский институт бетона

P.O. Box 9094
Farmington Hills, MI 48333-9094

Американский национальный институт стандартов

11 West 42nd Street
New York, NY 10036

Американское общество специалистов по испытаниям и материалам
100 Barr Harbor Drive
West Conshohocken, PA 19428

Канадская ассоциация стандартов

178 Rexdale Blvd.
Toronto, ON
M9W 1R3 Canada

Свод федеральных нормативных актов

Государственная типография
732 N. Capitol St. N.W.
Washington, D.C. 20402

Международная конференция инспекторов зданий
5360 Workman Mill Road
Whittier, CA 90601-2298

Международный институт ремонта бетона

3166 S. River Road Suite 132
Des Plaines, IL 60018

Международная федерация по железобетону

Case Postale 88
CH-1015 Lausanne, Швейцария

15.2—Материалы, использованные при экспертизе

- Arduini, M., and Nanni, A., 1997, "Behavior of Pre-Cracked RC Beams Strengthened with Carbon FRP Sheets," *Journal of Composites in Construction*, V. 1, No. 2, pp. 63-70.
- Bakis, C. E.; Bank, L. C.; Brown, V. L.; Cosenza, E.; Davalos, J. F.; Lesko, J. J.; Machida, A.; Rizkalla, S. H.; and Triantifillou, T. C., 2002, "Fibre-Reinforced Polymer Composites for Construction-State-of-the-Art Review," *Journal of Composites in Construction*, V. 6, No. 2, pp. 73-87.
- Benmokrane, B., and Rahman, H., eds., 1998, *Durability of Fiber Reinforced Polymer (FRP) Composites for Construction*, University of Sherbrooke, Canada.
- Blaschko, M.; Niedermeier, R.; and Zilch, K., 1998, "Bond Failure Modes of Flexural Members Strengthened with FRP," *Proceedings of the Second International Conference on Composites in Infrastructure*, V. 1, Jan., Tucson, Ariz., pp. 315-327.
- Brosens, K., and Van Gemert, D., 1997, "Anchoring Stresses Between Concrete and Carbon Fibre Reinforced Laminates," *Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, Proceedings of the Third International Symposium*, V. 1, Oct., pp. 271-278.
- CALTRANS Division of Structures, 1996, *Prequalification Requirements for Alternative Column Casings for Seismic Retrofit (Composites)*, Section 10.1, California Department of Transportation.
- Chajes, M.; Januska, T.; Mertz, D.; Thomson, T.; and Finch, W., 1995, "Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using Externally Applied Composite Fabrics," *ACI Structural Journal*, V. 92, No. 3, May-June, pp. 295-303.
- Christensen, J. B.; Gilstrap, J. M.; and Dolan, C. W., 1996, "Composite Materials Reinforcement of Masonry Structures," *Journal of Architectural Engineering*, V. 2, No. 12, pp. 63-70.
- Dolan, C., 1999, "FRP Prestressing in the USA," *Concrete International*, V. 21, No. 10, Oct., pp. 29-32.
- Dolan, C. W.; Rizkalla, S.H.; and Nanni, A., eds, 1999, *Fourth International Symposium on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Reinforced Concrete Structures*, SP-188, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich.
- Ehsani, M. R., 1993, "Glass-Fiber Reinforcing Bars," *Alternative Materials for the Reinforcement and Prestressing of Concrete*, J.L. Clarke, Blackie Academic & Professional, London, England, pp. 35-54.
- Ehsani, M.; Saadatmanesh, H.; and Al-Saidy, A., 1997, "Shear Behavior of URM Retrofitted with FRP Overlays," *Journal of Composites for Construction*, V. 1, No. 1, pp. 17-25.
- Fardis, M. N., and Khalili, H., 1981, "Concrete Encased in Fiberglass Reinforced Plastic," *ACI JOURNAL*, 78(6), pp. 440-446.
- Fleming, C. J., and King, G. E. M., 1967, "The Development of Structural Adhesives for Three Original Uses in South Africa," *RILEM International Symposium, Synthetic Resins in Building Construction*, Paris, pp.75-92.
- Fukuyama, H., 1999, "FRP Composites in Japan," *Concrete International*, V. 21, No. 10, Oct., pp. 29-32.
- GangaRao, H. V. S., and Vijay, P. V., 1998, "Bending Behavior of Concrete Beams Wrapped with Carbon Fabric," *Journal of Structural Engineering*, V. 124, No. 1, pp. 3-10.
- Green, M.; Bisby, L.; Beaudoin, Y.; and Labossiere, P., 1998, "Effects of Freeze-Thaw Action on the Bond of FRP Sheets to Concrete," *Proceedings of the First International Conference on Durability of Composites for Construction*, Oct., Sherbrooke, Quebec, pp. 179-190.
- Hassan, T., and Rizkalla, S., 2002, "Flexural Strengthening of Prestressed Bridge Slabs with FRP Systems" *PCI Journal*, V. 47, No. 1, pp. 76-93.
- Hawkins, G. F.; Steckel, G. L.; Bauer, J. L.; and Sultan, M., 1998, "Qualification of Composites for Seismic Retrofit of Bridge Columns," *Proceedings of the First International Conference on Durability of Composites for Construction*, Aug., Sherbrooke, Quebec, pp. 25-36.
- Hutchinson, R.; Abdelrahman, A.; Rizkalla, S.; and Rihal, S., 1998, *Proceedings of the Second International Conference on Composites in Infrastructure*, V. 1, Tucson, Ariz., Jan., pp. 261-275.
- ISIS, 1998, *ISIS Standard Test Methods*, University of Manitoba, Winnipeg, Manitoba.
- Japan Concrete Institute (JCI), 1997, *Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, 1 and 2*, Tokyo, Japan.
- Jones, R.; Swamy, R. N.; and Charif, A., 1988, "Plate Separation and Anchorage of Reinforced Concrete Beams Strengthened by Epoxy-Bonded Steel Plates," *Structural Engineering*, 66(5), pp. 85-94.
- Kachlakev, D., and McCurry, D., 2000, "Testing of Full-Size Reinforced Concrete Beams Strengthened with FRP Composites: Experimental Results and Design Methods Verification," *Report No. FHWA-OR-00-19*, U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration.
- Katsumata, H.; Kobatake, Y.; and Takeda, T., 1987, "A Study on the Strengthening with Carbon Fiber for Earth-quake-Resistant Capacity of Existing Concrete Columns," *Proceedings from the Workshop on Repair and Retrofit of Existing Structures, U.S.-Japan Panel on Wind and Seismic Effects, U.S.-Japan Cooperative Program in Natural Resources*, Tsukuba, Japan, pp. 1816-1823.
- Khalifa, A.; Alkhrdaji, T.; Nanni, A.; and Lansburg, S., 1999, "Anchorage of Surface Mounted FRP Reinforcement," *Concrete International: Design and Construction*, V. 21, No. 10, Oct., pp. 49-54.
- Khalifa, A.; Gold, W.; Nanni, A.; and Abel-Aziz M., 1998, "Contribution of Externally Bonded FRP to the Shear Capacity of RC Flexural Members," *Journal of Composites in Construction*, V. 2, No. 4, pp. 195-203.
- Kumahara, S.; Masuda, Y.; and Tanano, Y., 1993, "Tensile Strength of Continuous Fiber Bar Under High Temperature," *International Symposium on Fiber-Reinforced Plastic Reinforcement for Concrete Structures*, SP-138, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., pp. 731-742.
- Maeda, T.; Asano, Y.; Sato, Y.; Ueda, T.; and Kakuta, Y., 1997, "A Study on Bond Mechanism of Carbon Fiber Sheet," *Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, Proceedings of the Third Symposium*, V. 1, Oct., pp. 279-286.
- Malek, A.; Saadatmanesh, H.; and Ehsani, M., 1998, "Prediction of Failure Load of R/C Beams Strengthened with FRP Plate Due to Stress Concentrations at the Plate End," *ACI Structural Journal*, V. 95, No. 1, Jan.-Feb., pp. 142-152.
- Malvar, L., 1998, "Durability of Composites in Reinforced Concrete," *Proceedings of the First International Conference on Durability of Composites for Construction*, Aug., Sherbrooke, Canada, pp. 361-372.
- Malvar, L.; Warren, G.; and Inaba, C., 1995, "Rehabilitation of Navy Pier Beams With Composite Sheets," *Second FRP International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures*, Aug., Gent, Belgium, pp. 533-540.
- Mandell, J. F., 1982, "Fatigue Behavior of Fibre-Resin Composites," *Developments in Reinforced Plastics*, V. 2, Applied Science Publishers, London, England, pp. 67-107.

- Mandell, J. F., and Meier, U., 1983, "Effects of Stress Ratio Frequency and Loading Time on the Tensile Fatigue of Glass-Reinforced Epoxy," *Long Term Behavior of Composites*, ASTM STP 813, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, Pa., pp. 55-77.
- Mander, J. B.; Priestley, M. J. N.; and Park, R., 1988, "Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete," *Journal of Structural Engineering*, V. 114, No. 8, pp. 1804-1826.
- Marshall, O. S.; Sweeney, S. C.; and Trovillion, J. C., 1999, "Seismic Rehabilitation of Unreinforced Masonry Walls," *Fourth International Symposium on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures*, SP-188, C. W. Dolan, S. H. Rizkalla, and A. Nanni, eds., American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., pp. 287-295.
- Meier, U., 1987, "Bridge Repair with High Performance Composite Materials," *Material und Technik*, V. 4, pp. 125-128 (in German).
- Meier, U., and Kaiser, H., 1991, "Strengthening of Structures with CFRP Laminates," *Advanced Composite Materials in Civil Engineering Structures*, ASCE Specialty Conference, pp. 224-232.
- Mindess, S., and Young, J., 1981, *Concrete*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 671 pp.
- Mosallam, A.; Chakrabarti, R.; Sim, S.; and Elasnadedy, H., 2000, "Seismic Response of Reinforced Concrete Moment Connections Repaired and Upgraded with FRP Composites," *Innovative Systems for Seismic Repair and Rehabilitation of Structures, Proceedings, SRRS2 Conference*, A. Mosallam, ed., Fullerton, Calif., Mar. 20-21, pp. 59-72.
- Motavalli, M.; Terrasi, G. P.; and Meier, U., 1993, "On the Behavior of Hybrid Aluminum/CFRP Box Beams at Low Temperatures," Swiss Federal Laboratories for Materials Testing and Research (EMPA), Switzerland.
- Mutsuyoshi, H.; Uehara, K.; and Machida, A., 1990, "Mechanical Properties and Design Method of Concrete Beams Reinforced with Carbon Fiber Reinforced Plastics," *Transaction of the Japan Concrete Institute*, V. 12, Japan Concrete Institute, Tokyo, Japan, pp. 231-238.
- Nanni, A., 1995, "Concrete Repair with Externally Bonded FRP Reinforcement," *Concrete International*, V. 17, No. 6, June, pp. 22-26.
- Nanni, A.; Bakis, C. E.; Boothby, T. E.; Lee, Y. J.; and Frigo, E. L., 1997, "Tensile Reinforcement by FRP Sheets Applied to RC," *9C/1-8, ICE 97 International Composites Exposition*, Jan., Nashville, Tenn., pp. 9C/1 to 8.
- Nanni, A., and Bradford, N., 1995, "FRP Jacketed Concrete Under Uniaxial Compression," *Construction and Building Materials*, V. 9, No. 2, pp. 115-124.
- Nanni, A.; Focacci, F.; and Cobb, C. A., 1998, "Proposed Procedure for the Design of RC Flexural Members Strengthened with FRP Sheets," *Proceedings, ICCI-98*, V. 1, Jan., Tucson, Ariz, pp. 187-201.
- Nanni, A., and Gold, W., 1998, "Strength Assessment of External FRP Reinforcement," *Concrete International*, V. 20, No. 6, June, pp. 39-42.
- National Research Council, 1991, "Life Prediction Methodologies for Composite Materials," *Committee on Life Prediction Methodologies for Composites, NMAB-460*, National Materials Advisory Board, Washington, D.C.
- Neale, K. W., 2000, "FRPs for Structural Rehabilitation: A Survey of Recent Progress," *Progress in Structural Engineering and Materials*, V. 2, No. 2, pp. 133-138.
- Neale, K. W., and Labossière, P., 1997, "State-of-the-Art Report on Retrofitting and Strengthening by Continuous Fi-
bre in Canada," *Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures*, V. 1, Japan Concrete Institute, Tokyo, Japan, pp. 25-39.
- Norris, T.; Saadatmanesh, H.; and Ehsani, M., 1997, "Shear and Flexural Strengthening of R/C Beams with Carbon Fiber Sheets," *Journal of Structural Engineering*, V. 123, No. 7, pp. 903-911.
- Odagiri, T.; Matsumoto, K.; and Nakai H., 1997, "Fatigue and Relaxation Characteristics of Continuous Aramid Fiber Reinforced Plastic Rods," *Third International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-3)*, V. 2, Japan Concrete Institute, Tokyo, Japan, pp. 227-234.
- Paulay, T., and Priestley, M., 1992, *Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings*, John Wiley & Sons, New York, N.Y., 744 pp.
- Priestley, M.; Seible, F.; and Calvi, G., 1996, *Seismic Design and Retrofit of Bridges*, John Wiley and Sons, New York, N.Y.
- Ritchie, P.; Thomas, D.; Lu, L.; and Conneley, G., 1991, "External Reinforcement of Concrete Beams Using Fiber Reinforced Plastics," *ACI Structural Journal*, V. 88, No. 4, July-Aug., pp. 490-500.
- Restrepo, J., and DeVino, B., 1996, "Enhancement of the Axial Load-Carrying Capacity of Reinforced Concrete Columns by Means of Fiber-glass Epoxy Jackets," *Proceedings of the Advanced Composite Materials in Bridges and Structures II*, Montreal, Quebec, pp. 547-553.
- Roberts, T. M., and Haji-Kazemi, H., 1989, "Theoretical Study of the Behavior of Reinforced Concrete Beams Strengthened by Externally Bonded Steel Plates," *Proceedings of the Institute of Civil Engineers*, Part 2, V. 87, No. 9344, pp. 39-55.
- Rostasy, F. S., 1987, "Bonding of Steel and GFRP Plates in the Area of Coupling Joints. Talbrucke Kattenbusch," *Research Report No. 3126/1429*, Federal Institute for Materials Testing, Braunschweig, Germany (in German).
- Rostasy, F. S., 1997, "On Durability of FRP in Aggressive Environments," *Third International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-3)*, V. 2, Japan Concrete Institute, Tokyo, Japan, pp. 107-114.
- Roylance, M., and Roylance, O., 1981, "Effect of Moisture on the Fatigue Resistance of an Aramid-Epoxy Composite," *Organic Coatings and Plastics Chemistry*, V. 45, American Chemical Society, Washington, D.C., pp. 784-788.
- Saadatmanesh, H., and Ehsani, M., ed., 1998, *Second International Conference on Composites in Infrastructure, ICCI*, V. 1 and 2, Tucson, Ariz., 1506 pp.
- Saadatmanesh, H., and Tannous, F., 1999a, "Relaxation, Creep, and Fatigue Behavior of Carbon Fiber Reinforced Plastic Tendons," *ACI Materials Journal*, V. 96, No. 2, Mar.-Apr., pp. 143-153.
- Sato, Y.; Ueda, T.; Kakuta, Y.; and Tanaka, T., 1996, "Shear Reinforcing Effect of Carbon Fiber Sheet Attached to Side of Reinforced Concrete Beams," *Advanced Composite Materials in Bridges and Structures*, M. M. El-Badry, ed., pp. 621-627.
- Seible, F.; Priestley, M. J. N.; Hegemier, G. A.; and Innamorato, D., 1997, "Seismic Retrofit of RC Columns with Continuous Carbon Fiber Jackets," *Journal of Composites for Construction*, No. 1, pp. 52-62.
- Sharif, A.; Al-Sulaimani, G.; Basunbul, I.; Baluch, M.; and Ghaleb, B., 1994, "Strengthening of Initially Loaded Reinforced Concrete Beams Using FRP Plates," *ACI Structural Journal*, V. 91, No. 2, Mar.-Apr., pp. 160-168.
- Sheheta, E.; Morphy, R.; and Rizkalla, S., 1999, *Fourth International Symposium on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement*

- for *Concrete Structures*, SP-188, C. W. Dolan, S. H. Rizkalla, and A. Nanni, eds., American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., pp. 157-167.
- Soudki, K. A., and Green, M. F., 1997, "Freeze-Thaw Response of CFRP Wrapped Concrete," *Concrete International*, V. 19, No. 8, Aug., pp. 64-67.
- Spoelstra, M. R., and Monti, G., 1999, "FRP-Confined Concrete Model," *Journal of Composites for Construction*, V. 3, No. 3, pp. 143-150.
- Steckel, G.; Hawkins, G.; and Bauer, J., 1999a, "Durability Issues for Composites in Infrastructure," *44th International SAMPE Symposium*, May, Long Beach, Calif., pp. 2194-2208.
- Steckel, G.; Hawkins, G.; and Bauer, J., 1999b, "Qualifications for Seismic Retrofitting of Bridge Columns Using Composites," V. 1, 2, and 3, *Aerospace Corporation Report ATR-99(7524)-2*.
- Toutanji, H., 1999, "Stress-Strain Characteristics of Concrete Columns Externally Confined with Advanced Fiber Composite Sheets," *ACI Materials Journal*, V. 96, No. 3, May-June, pp. 397-404.
- Triantafillou, T. C., 1998a, "Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using Epoxy-Bonded FRP Composites," *ACI Structural Journal*, V. 95, No. 2, Mar.-Apr., pp. 107-115.
- Triantafillou, T. C., 1998b, "Strengthening of Masonry Structures Using Epoxy-Bonded FRP Laminates," *Journal of Composites for Construction*, No. 2, pp. 96-104.
- Wang, N., and Evans, J. T., 1995, "Collapse of Continuous Fiber Composite Beam at Elevated Temperatures," *Composites*, V. 26, No. 1, pp. 56-61.
- Wolf, R., and Miessler, H. J., 1989, HLV-Spannglieder in der Praxis, *Erfahrungen Mit Glasfaserverbundstaben*, Beton, 2, pp. 47-51.
- Wu, W., 1990, "Thermomechanical Properties of Fiber Reinforced Plastics (FRP) Bars," PhD dissertation, West Virginia University, Morgantown, W.Va., 292 pp.
- Yamaguchi, T.; Kato, Y.; Nishimura, T.; and Uomoto, T., 1997, "Creep Rupture of FRP Rods Made of Aramid, Carbon and Glass Fibers," *Third International Symposium on Non-Metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures (FRPRCS-3)*, V. 2, Japan Concrete Institute, Tokyo, Japan, pp. 179-186.
- 15.3—Прочая справочная литература**
- Baumert, M.; Green, M.; and Erki, M., 1996, "Low Temperature Behaviour of Concrete Beams Strengthened with FRP Sheets," *Proceedings of the 1996 CSCE Annual Conference*, Edmonton, Alberta, pp. 179-190.
- Brosens, K., and Van Gemert, D., 2001, "Anchorage of Externally Bonded Reinforcements Subjected to Combined Shear/Bending Action," *Proceedings of the International Conference on FRP Composites in Civil Engineering*, Hong Kong, China, pp. 589-596.
- Dutta, P. K., 1988, "Structural Fiber Composite Materials for Cold Regions," *Journal of Cold Regions Engineering*, V. 2, No.3, pp. 124-132.
- Fyfe, E. R.; Gee, D. J.; and Milligan, P. B., 1998, "Composite Systems for Seismic Applications," *Concrete International*, V. 20, No. 6, June, pp. 31-33.
- Hormann, M.; Seible, F.; Karbhari, V.; and Seim, W., 1998, "Preliminary Structural Tests for Strengthening of Concrete Slabs Using FRP Composites," *Structural Systems Research Project, Report No. TR-98/13*, University of California, San Diego, Calif., Sept.
- Irwin, C. A. K., 1975, "The Strengthening of Concrete Beams by Bonded Steel Plates," Technical Report, TRRL Supplemental Report 160UC, Transport and Road Research Laboratory, Department of the Environment, Crowthorne, England.
- ISIS Canada Design Manuals, 2001, "Strengthening Reinforced Concrete Structures with Externally-Bonded Fibre Reinforced Polymers," *The Canadian Network of Centres of Excellence on Intelligent Sensing for Innovative Structures*, Winnipeg, Manitoba, Canada, 86 pp.
- ISIS-Canada, 1998, *Standard Test Methods for FRP Rod and Sheet*, University of Manitoba, Winnipeg, Manitoba.
- Japan Concrete Institute (JCI), 1998, "Technical Report on Continuous Fiber Reinforced Concrete," *TC 952: Committee on Continuous Fiber Reinforced Concrete*, Tokyo.
- Japan Society of Civil Engineers (JSCE), 2001, "Recommendations for Upgrading of Concrete Structures with Use of Continuous Fiber Sheets," *Concrete Engineering Series*, No. 41, Tokyo, Japan, 250 pp.
- Khalifa, A.; Alkhrdaji, T.; Nanni, A.; and Lansburg, S., 1999, "Anchorage of Surface Mounted FRP Reinforcement," *Concrete International*, V. 21, No. 10, Oct., pp. 49-54.
- MacDonald, M. D., and Calder, A. J. J., 1982, "Bonded Steel Plating for Strengthening Concrete Structures," *International Journal of Adhesion and Adhesives*, pp. 119-127.
- MacGregor, J., 1997, *Reinforced Concrete: Mechanics and Design, 3rd Edition*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J., 939 pp.
- Mil Handbook 17, 1999, *The Composite Materials Handbook—Mil-17, V. 2, Materials Properties*, Technomic Publication, Lancaster, Pa.
- Railway Technical Research Institute (RTRI), 1996, "Design and Construction Guidelines for Seismic Retrofitting of Railway Viaduct Columns Using Aramid Fiber Sheets," Tokyo. (in Japanese)
- Saadatmanesh, J.; Ehsani, M. R.; and Jin, L., 1997, "Repair of Earthquake-Damaged RC Columns with FRP Wraps," *ACI Structural Journal*, V. 95, No. 6, Nov.-Dec., pp. 206-215.
- Saadatmanesh, H., and Tannous, F., 1999b, "Long-Term Behavior of Aramid Reinforced Plastic (AFRP) Tendons," *ACI Materials Journal*, V. 96, No. 3, May-June, pp. 297-305.
- Suppliers of Advanced Composite Materials Association, 1994, *SACMA Recommended Methods*, SRM 16-90, Arlington, Va.
- Thomas, J., 1978, "FRP Strengthening—Experimental or Mainstream Technology," *Concrete International*, V. 20, No. 6, June, pp. 57-58.
- Todeschini, C.; Bianchini, A.; and Kesler, C., 1964, "Behavior of Concrete Columns Reinforced with High Strength Steels," *ACI JOURNAL, Proceedings*, V. 61, No. 6, pp. 701-716.
- Triantafillou, T. C., 1998, "Strengthening of Structures with Advanced FRPs," *Progress in Structural Engineering and Materials*, V. 1, pp. 126-134.

Таблица A1.1 Типовые механические свойства при растяжении волокон, используемых в системах FRP

Тип волокна	Модуль упругости		Пределная прочность		Минимальная деформация при разрыве, %
	103 килофут/кв. дюйм	ГПа	103 килофут/кв. дюйм	ГПа	
Углерод					
Общего назначения	32 - 34	220 - 240	300 - 550	2050 - 3790	1.2
Высокопрочное	32 - 34	220 - 240	550 - 700	3790 - 4820	1.4
Сверхпрочное	32 - 34	220 - 240	700 - 900	4820 - 6200	1.5
Высокомодульное	50 - 75	340 - 520	250 - 450	1720 - 3100	0.5
Сверхвысокомодульное	75 - 100	520 - 690	200 - 350	1380 - 2400	0.2
Стекло					
Е-стекло	10 - 10.5	69 - 72	270 - 390	1860 - 2680	4.5
S-стекло	12.5 - 13	86 - 90	500 - 700	3440 - 4140	5.4
Арамид					
Общего назначения	10 - 12	69 - 83	500 - 600	3440 - 4140	2.5
Высококачественное	16 - 18	110 - 124	500 - 600	3440 - 4140	1.6

Таблица A1.2 Механические свойства при растяжении ламинатов FRP при объемной концентрации волокон 40 - 60%

Описание системы FRP (ориентация волокон)	Модуль Юнга		Предел прочности на растяжение		Деформация разрыва при нулевом градусе, %
	Свойство при нулевом градусе	Свойство при 90 градусах	Свойство при нулевом градусе	Свойство при 90 градусах	
	103 килофут/кв. дюйм (ГПа)	103 килофут/кв. дюйм (МПа)	килофут/кв. дюйм (МПа)	килофут/кв. дюйм (МПа)	
Высокопрочный углерод/эпоксидная смола, градусы					
0	15 - 21 (100 - 140)	0.3 - 1 (2 - 7)	150 - 350 (1020 - 2080)	5 - 10 (35 - 70)	1.0 - 1.5
0/90	8 - 11 (55 - 76)	8 - 11 (55 - 75)	100 - 150 (700 - 1020)	100 - 150 (700 - 1020)	1.0 - 1.5
+45/-45	2 - 4 (14 - 28)	2 - 4 (14 - 28)	25 - 40 (180 - 280)	25 - 40 (180 - 280)	1.5 - 2.5
Е-стекло/эпоксидная смола, градусы					
0	3 - 6 (20 - 40)	0.3 - 1 (2 - 7)	75 - 200 (520 - 1400)	5 - 10 (35 - 70)	1.5 - 3.0
0/90	2 - 5 (14 - 34)	2 - 5 (14 - 35)	75 - 150 (520 - 1020)	75 - 150 (520 - 1020)	2.0 - 3.0
+45/-45	2 - 3 (14 - 21)	2 - 3 (14 - 20)	25 - 40 (180 - 280)	25 - 40 (180 - 280)	2.5 - 3.5
Высококачественный арамид/эпоксидная смола, градусы					
0	7 - 10 (48 - 68)	0.3 - 1 (2 - 7)	100 - 250 (700 - 1720)	5 - 10 (35 - 70)	2.0 - 3.0
0/90	4 - 5 (28 - 34)	4 - 5 (28 - 35)	40 - 80 (280 - 550)	40 - 80 (280 - 550)	2.0 - 3.0
+45/-45	1 - 2 (7 - 14)	1 - 2 (7 - 14)	20 - 30 (140 - 210)	20 - 30 (140 - 210)	2.0 - 3.0

Примечания:

Свойства смеси FRP определяются системами FRP, объемная концентрация волокон в которых составляет около 50%, а толщина смеси 0,1 дюйма (2,5 мм). В общем случае в предварительно отвержденных системах объемная концентрация волокон составляет 40 – 60%, в то время как в системах влажной укладки она равна 25 – 40%. Поскольку объемная концентрация волокон сказывается на общих свойствах ламината, предварительно отвержденные ламинаты имеют более высокие механические свойства, чем ламинаты, полученные методом влажной укладки.

Нуль градусов соответствует однонаправленной ориентации волокон.

Нуль/90 градусов (или +45/-45 градусов) соответствует волокну, балансирующему в двух ортогональных направлениях, при этом нулевой градус определяет направление действия нагрузки, а 90 градусов определяет нормаль к направлению действия нагрузки.

Натяжение прикладывается в направлении нулевого градуса.

ПРИЛОЖЕНИЯ

ПРИЛОЖЕНИЕ А—МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА УГЛЕРОДНЫХ, СТЕКЛЯННЫХ И АРАМИДНЫХ ВОЛОКОН

В таблице А1.1 представлены диапазоны значений параметров при растяжении для углеродных, стеклянных и арамидных волокон. Табличные значения прочны в результате тестирования пропитанных волоконных нитей или прядей согласно методу 16-90 Ассоциации поставщиков перспективных композиционных материалов. Пряди или волоконные нити пропитываются смолой, выдерживаются, а затем проверяются на растяжение. Табличные параметры вычисляются относительно площади волокон, без учета площади смолы. Так что параметры, представленные в таблице А1.1, характерны для однонаправленных систем FRP, свойства которых оцениваются только относительно площади волокон (раздел 3.3.1).

В таблице А1.2 представлены диапазоны значений параметров для ламинатов CFRP (на основе углерода), GFRP (на основе стекла) и AFRP (на основе арамида) при объемной концентрации волокон 40 - 60%. Свойства определяются с учетом общей площади ламината (раздел 3.3.1). Свойства приводятся для однонаправленных, двунаправленных и направленных под углами +45/-45 градусов структур. Кроме того, таблица А1.2 отражает эффект воздействия изменений ориентации волокон на прочность ламината при нулевом градусе.

В таблице А1.3 приводятся значения прочности на растяжения ряда промышленно выпускаемых систем FRP. Прочность однонаправленных ламинатов зависит от типа волокна и сухой массы материала.

Эти таблицы не предназначены предоставлять предельные значения прочности для целей проектирования.

ПРИЛОЖЕНИЕ В—СПРАВКА КАСАТЕЛЬНО СТАНДАРТНЫХ МЕТОДОВ ИСПЫТАНИЙ

Методы испытаний Американского общества специалистов касательно испытаний и материалов (ASTM), которые дают количественную оценку прочностных свойств систем FRP, связанных с бетоном, находятся в стадии подготовки. Некоторые существующие методы испытаний ASTM применимы к материалам FRP.

Таблица А1.3 – Предел прочности на растяжение* для некоторых промышленно выпускаемых систем FRP

Описание системы FRP (тип волокна/пропитывающая смола/тип материала)	Масса материала		Предельная прочность	
	унция/ярд ³	г/м ³	фунт/дюйм	кН/мм
Однонаправленный лист из углерода общего назначения/эпоксидной смолы	6	200	2600	500
	12	400	3550	620
	7	230	1800	320
Однонаправленный лист из высокопрочного углерода/эпоксидной смолы	9	300	4000	700
	18	620	5500	960
	9	300	3400	600
Однонаправленный лист из высокомодульного углерода/эпоксидной смолы	9	300	1000	180
Сбалансированный лист из углерода общего назначения/эпоксидной смолы	27	900	4100	720
	10	350	1300	230
Однонаправленный лист из Е-стекла/эпоксидной смолы	9	300	680	120
Е-стекло/сбалансированная структура	9	300	680	120
Однонаправленный лист из арамида / эпоксидной смолы	12	420	4000	700

Однонаправленный ламинат из высокопрочного углерода/пропитки эпоксидной смолой	70*	2380*	19,000	3300
Однонаправленная оболочка из Е-стекла/пропитки виниловыми эфирами	50*	1700*	9000	1580

* Представленные значения не следует использовать для проектирования.

† Предел прочности при растяжении на единицу ширины листа или материала.

‡ Масса предварительно отвержденного ламината.

Материалы FRP могут быть испытаны в соответствии с методами, перечисленными в таблице В1.1, при условии, что все исключения - методу будут указаны в протоколе испытаний. Прочностные испытания используют те же методы, но требуют проведения специальной предварительной подготовки образцов. Данные, полученные в ходе указанных методов испытаний, могут служить основанием для качественной оценки и приемки систем FRP.

ПРИЛОЖЕНИЕ С—КАСАТЕЛЬНО НАПРАВЛЕНИЯ ДАЛЬНЕЙШИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Как было отмечено в основной части документа, проведение дальнейших исследований необходимо для получения информации по нерешенным на данный момент вопросам или дополнительным доказательствам, подтверждающим достигнутые результаты. Перечень вопросов, представленный в данном Приложении, может быть использован в качестве резюме.

Материалы

- Подтверждение нормального распределения (распределения Гаусса), отражающего предел прочности для семейства упрочняющих FRP-систем.
- Способы обеспечения огнестойкости упрочняющих FRP-систем.
- Характеристики упрочняющих элементов FRP при повышенных температурах.
- Характеристики упрочняющих элементов FRP при пониженных температурах.
- Класс огнестойкости элементов бетона, армированных стержнями из FRP.
- Результат различия между коэффициентами теплового расширения систем FRP и материалов подложки.
- Характеристики длительной прочности FRP-систем.
- Ухудшение прочности и жесткости FRP-систем в неблагоприятных внешних условиях.

Изгибающее/осевое усилие

- Характеристики - сжатия некруговых элементов конструкции с использованием FRP.
- Характеристики элементов конструкции, армированных с помощью системы FRP, ориентированными в направлении приложения осевой нагрузки.
- Улучшение действующего напряжения при изгибании.

Таблица В1.1 – Методы испытаний систем FRP

Форма FRP	Характеристика	Методы испытаний
Лист и препрег	Предел прочности, натяжении, модуль упругости	ISIS, ASTM D 3039
	Сдвигающее усилие адгезива между листами	ISIS
	Сдвигающее усилие адгезива между листом и бетоном	ISIS
	Напряжение адгезива между листом и бетоном	ISIS
	Коэффициент теплового расширения	ASTM D 696
	Температура стеклования	ASTM D 4065
	Поверхностная твердость	ASTM D 2583, D 2240, D 3418
	Прочность плоского кольца	ISIS
Листовой прокат	Предел прочности, натяжение, модуль упругости	ISIS, ASTM D 3039
	Сдвиговое напряжение адгезива между листовым прокатом	ISIS, ASTM D 3165, D 3528
	Сдвиговое напряжение адгезива между листовым прокатом и бетоном	ISIS
	Напряжение адгезива между листовым прокатом и бетоном	ISIS
	Коэффициент теплового расширения	ASTM D 696
	Температура стеклования	ASTM D 4065
	Поверхностная твердость	ASTM D 2583, D 2240, D 3418
Подпрессованная оболочка	Предел прочности, натяжение, модуль упругости	ISIS, ASTM D 3039
	Сдвиговое напряжение адгезива между оболочками	ISIS, ASTM D 3165, D 3528
	Сдвиговое напряжение адгезива между оболочкой и бетоном	ISIS
	Напряжение адгезива между оболочкой и бетоном	ISIS
	Коэффициент теплового расширения	ASTM D 696
	Температура стеклования	ASTM D 4065

- Результаты воздействия прочности бетона на характеристики элементов конструкции, армированных FRP
- Результаты воздействия легко бетона на характеристики элементов конструкции, армированных FRP.
- Характеристики элементов конструкции, работающих на изгиб, натяжение и сжатие которых улучшено посредством FRP.
- Прогнозирование и контроль максимальной ширины трещины и прогиба бетона, армированного системами FRP.
- Прогиб от действия долговременных нагрузок поведение бетонных элементов конструкции, работающих на изгиб, армированных системами FRP.

Прочность на сдвиг

- Повышение прочности на сдвиг бетонных элементов конструкции, армированных системами FRP.
- Действующее напряжение систем FRP, не полностью оборачиваемых вокруг секции.
- Использование систем FRP для ослабления напряжения среза при продавливании в системах армирования - двум направлениям.

Конструирование

- Технические характеристики анкерных опор FRP.

Инструкция по проектированию, особо отмечающая, что для определения следующих характеристик балок FRP необходимо привлечение следующих методов испытаний:

- Характеристики элементов связи и относящиеся к ним коэффициенты.
- Разрушение при длительных нагрузках
- Усталостные характеристики
- Коэффициент теплового расширения
- Предел прочности на сдвиг
- Предел прочности на