С.В. ДЗЮБА

ФИБРОПЛАСТИКОВЫЕ СИСТЕМЫ В СОВРЕМЕННОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

УТВЕРЖДЕНО
Ученым Советом Одесской государственной академии строительства и архитектуры

ОДЕССА - 2017

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ УКРАИНЫ

ОДЕССКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ АКАДЕМИЯ СТРОИТЕЛЬСТВА
И АРХИТЕКТУРЫ



С.В. Дзюба

ФИБРОПЛАСТИКОВЫЕ СИСТЕМЫ В СОВРЕМЕННОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

УТВЕРЖДЕНО
Ученым Советом Одесской государственной академии строительства и архитектуры

ОДЕССА — 2017

УДК 624.011.78:[624.011.01+624.012+624.014+624.016+624.042.7]

УТВЕРЖДЕНО
решением Ученого Совета Одесской государственной академии строительства и архитектуры
от 30.11.2017г., протокол №3

Рецензенты: **Семко А.В.,** д.т.н., проф., лауреат Государственной премии Украины в области науки и техники, заведующий кафедрою архитектуры и городского строительства Полтавского национального технического университета им. Юрия Кондратюка**,**

Клименко Е.В., д.т.н., проф., профессор кафедры строительных конструкций Одесской государственной академии строительства и архитектуры.

Дзюба С.В. Фибропластиковые системы в современном строительстве. – Одесса: ОДАБА, 2017. – 407с.

ISBN 978-617-7195-56-5

В работе обобщен опыт применения фибропластиковых систем в современном строительстве. Даны описание, общие технические характеристики и оценка материалов, используемых для изготовления конструкционных фибропластиков: армирующих волокон, тканей, матов, связующих матриц и адгезивов. Рассмотрены различные виды фибропластиковых систем, даны рекомендации по их выбору при производстве строительных работ. Приведен порядок определения физико-механических свойств систем конструкционных фибропластиков. На основе существующих экспериментально-теоретических исследований раскрыты общие особенности фибропластикового усиления железобетонных, металлических и деревянных конструкций. Дана оценка возможности фибропластикового сейсмостойкого усиления, а также соответствующей защиты строительных конструкций от взрывов и ударных воздействий.

Для научных и инженерно-технических сотрудников научно-исследовательских и проектных организаций, а также аспирантов и студентов специальности 192 Строительство и гражданская инженерия.

ISBN 978-617-7195-56-5 УДК 624.011.78:[624.011.01+624.012+624.014+624.016+624.042.7]

© Одесская государственная академия строительства и архитектуры, 2017

ВВЕДЕНИЕ

Уникальные прочностные и эксплуатационные свойства фиброкомпозитных материалов привлекают резко нарастающее внимание инженеров-строителей на протяжении последних трех десятилетий. При этом специалистами высказываются противоречивые точки зрения о целесообразности их широкого использования в строительстве. С одной стороны можно услышать тезисы скептиков о том, что фибропластики на самом деле существуют уже достаточно давно и отдельные попытки их внедрения, делавшиеся неоднократно с конца 60-х годов XX века, только подтверждают не бесспорность подобных решений. С другой стороны, под влиянием впечатляющих экспериментов, спонсируемых крупными химическими концернами, высказываются противоположные мнения о происходящей в настоящее время фибропластиковой революции в строительстве.

Тем не менее, реально складывающаяся современная практика применения фиброармированных пластиков, позволяет позиционировать их как привлекательную, хотя и не бесспорную, альтернативу традиционным строительным материалам, с успехом оправдывающую себя как в новом строительстве так и, в особенности, при выполнении работ по усилению и восстановлению уже существующих конструкций. Неординарные свойства фиброармированных композитов, такие как высокая прочность, низкий вес и коррозионная стойкость, сочетающиеся с относительно несложными технологическими операциями по их применению, определяют резко растущий интерес к внедрению данных материалов. В немалой степени этому способствует значительный прогресс, имевший место в области промышленного производства и совершенствования потребительских свойств, как самих конструкционных волокон, так и пластиков на их основе. Резкое удешевление в 90-х годах прошлого века углеродных, арамидных, борных и керамических волокон, позволило при решении ряда задач проектирования эффективно дополнить традиционно использовавшееся стекловолокно, что обусловило нарастающее применение армированных фиброй пластиков в строительстве, значительно опережающее реально существующую теоретическую и нормативную базы их расчетов.

Целью настоящей книги является обобщение рационального опыта применения фибропластиков в составе строительных конструкций, определение их преимуществ и недостатков, систематизация физических и механических свойств соответствующих конструкционных материалов, а также ознакомление читателей с эффективными конструктивными решениями, возможными при использовании этих материалов.

1. Фиброармированные пластики в современном строительстве

1.1. Основные определения

Современные тенденции развития мирового рынка строительных материалов свидетельствуют о перманентном росте спроса на материалы с длительным сроком эксплуатации, обладающие коррозионной стойкостью, низким весом и предоставляющие возможность экономии средств на протяжении всего их «жизненного цикла». В максимальной степени комплексу таких требований соответствую современные композиционные материалы.

Под понятием ***конструкционные композиционные материалы*** обычно принято подразумевать материалы, сочетающие армирующие элементы в виде нитей, волокон или хлопьев с менее прочными связующими компонентами — матрицами. В качестве их традиционно приводимых примеров часто упоминаются разнообразные пластики, армированные углеродными, арамидными, базальтовыми, борными или стеклянными волокнами, а также жгутами или тканями на основе данных волокон, реже — различные сплавы (например, алюминиевые) и керамические материалы, армированные нитями нержавеющей стали, бериллия, различных жаропрочных сплавов и т.п.

Комбинации количественного состава исходных компонентов, позволяют получать композиты с различными значениями прочности, огнестойкости, модуля упругости, абразивной стойкости, а также придавать материалам необходимые магнитные, диэлектрические, радиопоглощающие и другие специфические свойствами. Изменяя тип и вид армирующих составляющих, трансформируя их ориентацию, подбирая связующие матрицы и меняя соотношения исходных материалов, добиваются необходимых сочетаний эксплуатационных и технологических свойств конструкционных композитов.

Современные композитные материалы допускают наличие нескольких матриц (***полиматричные композиты***) и наполнителей (***гибридные композиты***) с различными свойствами, что значительно расширяет возможности регулирования их конечных физико-механических характеристик. Армирующие составляющие практически всегда воспринимают основную долю нагрузок, действующих на композитные материалы, в то время как матрицам отводятся связующая и выравнивающая усилия функция.

Группу композиционных материалов, армированных высокопрочными волокнами, помещенными в полимерные матрицы, в свою очередь принято называть конструкционными ***фиброармированными пластиками*** (или просто

фибропластиками) с международно-признанным обозначением: ***FRP — fiber-reinforced plastics***. Именно эта группа композитных материалов в настоящее время находит реальное, относительно широкое использование при изготовлении, усилении и реабилитации строительных конструкций.

Обеспечивают работоспособность соединений, в состав которых входят композитные материалы, клеящие составы — ***адгезивы***, воспринимающие сдвигающие и отрывающие усилия между контактными поверхностями соединяемых элементов.

1.2. Общие особенности фиброармированных пластиков

Для оценки степени эффективности технических решений, достигаемых при применении конструкционных фибропластиков, предварительно рассмотрим общие особенности этих материалов. Более подробное описание армированных волокнами композитов, способов их изготовления, используемых исходных составляющих и получаемых конечных физико-механических свойств, приводится в разделах 2 и 3.

Фибропластиковые элементы обладают высокой прочностью, во многих случаях значительно превосходящей прочность стали, могут демонстрировать модули упругости при продольном растяжении, также существенно превосходящие аналогичные показатели стали (при изготовлении на основе углеродных волокон), имеют низкий вес, высокую коррозионную стойкость, при их использовании обычно отсутствуют размерные ограничения, для выполнения работ с применением данных материалов не требуется сложное оборудование и оснастка. Методы фибропластикового усиления существующих конструкций являются значительно менее трудоемкими и энергозатратными по сравнению с традиционными способами.

Фиброармированные пластики обычно обладают высокой прочностью и жесткостью при работе на растяжение, но в большинстве случаев проявляют сравнительно невысокие соответствующие показатели при работе на сжатие и сдвиг. Вес фиброармированных композитных материалов в зависимости от типа используемых волокон составляет примерно три четверти веса алюминиевых сплавов или одну четверть веса стали.

Также как и у абсолютного большинства композитов, прочность фибропластиков обеспечивается армирующими составляющими — волокнами, а связующие полимерные матрицы придают материалу необходимую жесткость [1, 2, 3]. Выбор ориентации волокон в значительной степени определяет оконча-

тельные прочностные свойства материала. Использование фибропластиков обеспечивает большую свободу форм конструкций и позволяет непосредственно адаптировать их к действующим механическим нагрузкам [4, 5]. Разнообразные способы ламинирования, прошивки, формования или намотки фибры дают принципиальную возможность, хотя пока еще недостаточно используемую в строительстве, формировать материал со сложными анизотропными свойствами, обеспечивающими направленную прочность и жесткость конструкционных элементов.

Основой для изготовления фибропластиков могут являться отдельные армирующие волокна, сплетенные из них нити, жгуты, ленты, ткани и маты, а также короткие рубленые волокна (см. в п.п. 2.2-2.4). Армирующие нити могут переплетаться между собой под определенными углами, образуя слои. Углы переплетения нитей в каждом слое могут быть разными, что дает возможность в некоторой степени компенсировать нежелательную анизотропию материала.

В качестве связующих матриц фибропластиков часто используются термореактивные (эпоксидные, фенольные, полиэфирные, поливинилэфирные и т.д.) или термопластичные (поликарбонаты, полиимиды и т.д.) смолы (см. п. 2.5). При этом при усилении и реабилитации строительных конструкций наибольшее реальное применение имеют составы на основе термореактивных эпоксидных смол. Полимерные матрицы в значительной степени определяют эксплуатационные и технологические свойства конструкционных фибропластиков.

Основной недостаток большинства широко применяемых армированных пластиков, обуславливаемый свойствами используемых матриц, — относительно низкая температура возможной эксплуатации. Наиболее высокотемпературные матрицы на основе полиимидов могут эксплуатироваться при температурах до 400^{o}C, но коммерчески распространенные системы армирования строительных конструкций, обычно предусматривающие использование различных вариаций эпоксидных смол, требуют режимов эксплуатации только с температурами до 60-65^{o}C.

Длительные тепловые воздействия вызывают термодеструкцию матричных полимеров, приводящую к изменению их химической структуры и физико-механических свойств. При длительном воздействии переменной механической нагрузки и недостаточном теплоотводе в некоторых случаях может наблюдаться переход от механического разрушения материала к тепловому за счет диссипации механической энергии в тепловую.

Опасным для ряда видов, традиционно используемых фибропластиков, воздействием, отрицательно влияющими на структуру и свойства материала,

выступает климатическое термовлажностное циклирование, чередующееся или сочетающееся с рабочими тепловыми или механическими нагрузками.

При совместном действии влаги и температуры могут наблюдаться структурные превращения в материале матриц и по границе раздела «волокно-матрица», вызывающие ухудшение физико-механических характеристики. Механизм изменения свойств, обусловленный сорбцией влаги, связан с двумя основными процессами: потерями температурной прочности и жесткости вследствие пластификации матриц в объеме и в приграничном слое, а также потерями из-за их микро- и макрорастрескивания. В зависимости от типа материала предельное влагопоглощение может меняться в 1,5…2 раза и составляет для наиболее влагостойких образцов около 1%.

1.3. Периоды внедрения фибропластиков в строительство

Сопоставление исторических периодов развития технологий применения в строительстве некоторых видов конструкционных материалов, используемых для работы под действием концентрируемых усилий, приведено на рисунке 1.1, по [6].

Развитие конструктивных форм, применявшихся в строительстве, было неразрывно связано с прогрессом технологий изготовления материалов. Так применение металла при возведении различных сооружений берет свое начало от использования чугунных конструкций в конце 18-го столетия, кованного железа в середине 19-го века и элементов из углеродистой стали в его конце.

При этом использование чугунных элементов ограничивалось хрупкостью материала при растяжении, заставлявшей применять их арочные формы, характеризовавшиеся работой металла на сжатие. Кованное железо отличается пластичностью, но размеры производившихся из него листов были весьма ограниченны, что вынуждало при изготовлении конструкций составлять клепанные пакеты элементов. Современные стали, демонстрируя высокую пластичность, имеют широкий выбор размеров поставляемых элементов, позволяют использовать сварку и соединения на высокопрочных болтах.

Контрастируют им своей новизной фибропластиковые материалы, волокна армирующих основ которых в большинстве своем появились в середине 20-го века. При этом первое реальное использование фибропластиков в составе несущих бетонных конструкций принято относить к 1991 году, а их образцов в составе металлических конструкций — к 1996 году [6].

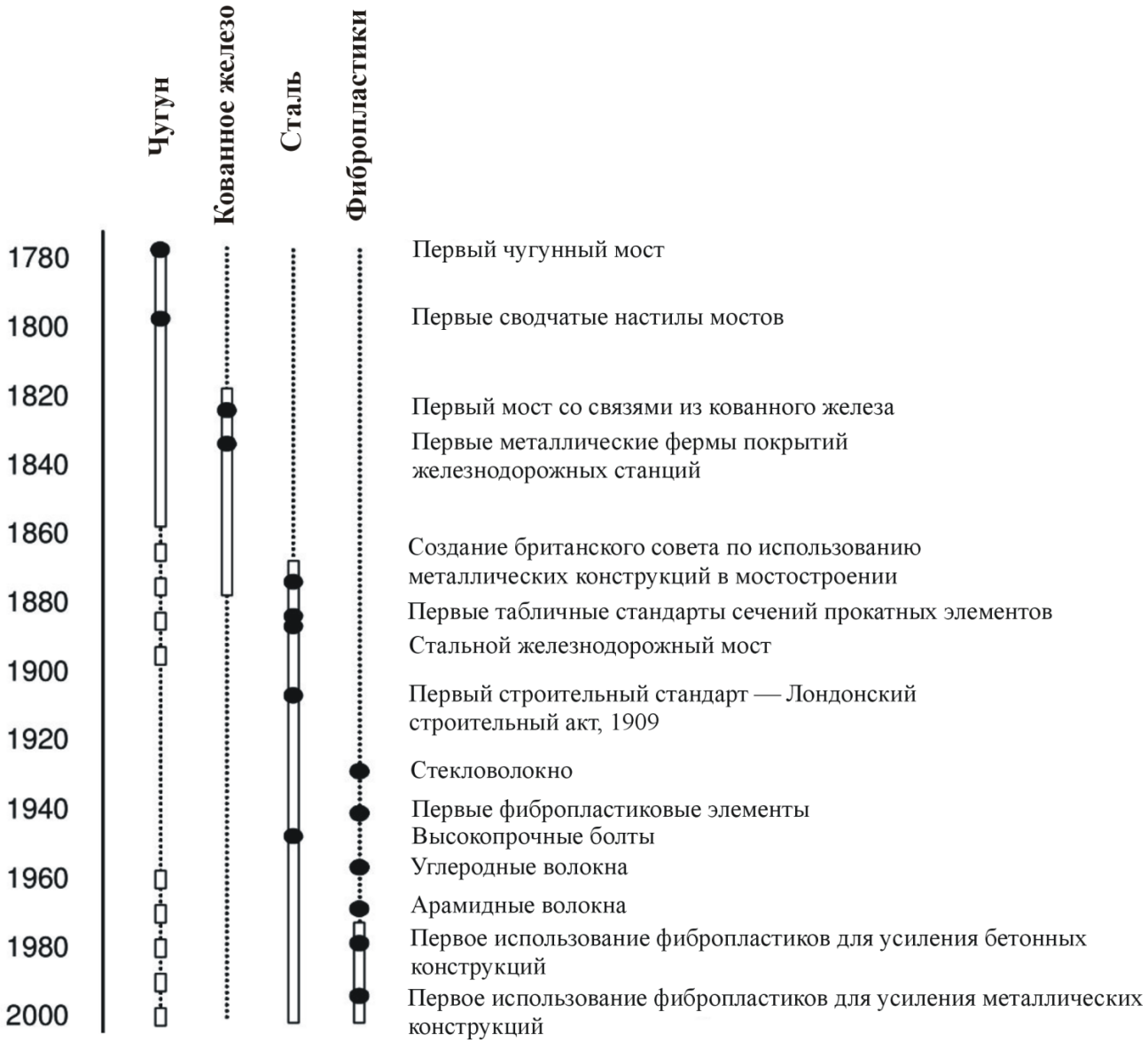


Рис. 1.1. Исторические периоды развития технологий применения в строительстве некоторых видов конструкционных материалов; адаптировано по [6]

1.4. Перспективные направления применения фибропластиков в строительстве

1.4.1. Преимущества конструкций с использованием фибропластиков

Объективная оценка реального использования фибропластиковых материалов в современном строительстве свидетельствует о нарастающем, но все же пока ограниченном их внедрении. Общепризнанными преимуществами конструкций на основе таких материалов является уменьшение потенциальных рисков, связанных с коррозией, старением и усталостью, возможностью сейс-

мических воздействий, увеличением интенсивности эксплуатации или превышением проектных нагрузок.

Фиброармированным композитам свойственны наивысшие коэффициенты соотношения характеристик прочности и веса (особенно в случае использования углеродных волокон, см. п.п. 2.1, 2.2). Многие, с недавнего времени коммерчески доступные и уже относительно широко применяемые в строительстве композитные материалы, обладают прочностью, превышающей предел прочности сталей более чем в 3 раза, в то время как вес единицы их объема составляет менее одной четвертой аналогичного показателя стали. Такие весовые характеристики соответствуют наиболее жестким требованиям рынка строительных материалов и позволяют воплощать наиболее смелые и архитектурно выразительные конструктивные решения.

Композиты обладают достаточно высокой (лучшей, чем у большинства конструкционных материалов) стойкостью при эксплуатации в воде, химических средах и на открытом воздухе, что часто делает их предпочтительными при оформлении архитектурных деталей фасадов зданий и выполнении дополнительного внешнего армирования строительных конструкций. Несомненным их преимуществом также является отсутствие реакций с другими материалами (исключение составляет гальваническая коррозия в соединениях, предусматривающих непосредственный контакт стальных элементов и углеродных волокон, см. п. 6.3.5).

Несмотря на относительную новизну конструкционных фибропластиков, широкое распространение в составе строительных конструкций получили различные их сочетания с другими материалами. Многообразные способы внутреннего и внешнего армирования фибропластиковыми элементами применяются в отношении бетонных, каменных и деревянных конструкций со второй половины 80-х годов прошлого века. Вопрос использования армированных композитов в составе металлических конструкций приобрел актуальность с началом нового тысячелетия.

Армированные волокнами композиционные материалы в настоящее время находят применение как для создания конструкций, используемых в новом строительстве, так и для усиления, восстановления и реабилитации уже существующих несущих элементов, выступая некоторой альтернативой металлу.

1.4.2. Фибропластиковые конструкции в новом строительстве

В новом строительстве из фибропластиков изготавливаются элементы армирования как бетонных, так и предварительно напряженных железобетон-

ных конструкций, создаются полноразмерные части «*гибридных*» конструкций (сочетающих пластик с бетоном и сталью), такие например как, пролетные сооружения и настилы мостов, панели наружного стенового ограждения, заполненные бетонном трубчатые колонны, арки и сваи. Высокую эффективность фибропластики демонстрируют при армировании клееных деревянных конструкций, а также для повышения выносливости металлических элементов.

Конструкции, выполненные из современных композитных материалов, отличаются более длительными сроками эксплуатации, а стоимость их монтажа демонстрирует гораздо более низкие показатели в сравнении с конструкциями, изготовленными из традиционных строительных материалов. Технологическая же сложность размещения таких конструкций в проектном положении значительно ниже в сравнении с металлическими или деревянными элементами. Сочетание низкой монтажной стоимости и длительных сроков эксплуатации обеспечивают композитным конструкциям наилучшие показатели в соответствии с так называемой «стоимостью жизненного цикла» [7].

Широкий выбор возможных комбинаций армирующих волокон и связующих их матриц позволяет добиваться различных физико-механических характеристик используемых композитных материалов, соответствующих форме конструкций и величинам действующих в них усилий.

Рациональные формы фибропластиковых конструкций и несущих элементов определяются высокими прочностными и жесткостными свойствами их материалов при работе на растяжение, а также достаточно низкими аналогичными характеристиками при других видах воздействий, компенсируемыми возможностью многослойного устройства сечений с ориентацией армирующих волокон сообразно направлениям действующих усилий. Эффективность применения фибропластиковых материалов в составе сжатых элементов гибридных конструкций оправдывается возможностью ограничения поперечных деформаций последних, что приводит к повышению работоспособности основного материала, а также потенциальной способностью продольного высокомодульного армирования значительно повышать изгибную жесткости стержней, препятствуя потере их устойчивости.

Выбор конструктивного решения определяет результативность использования фибропластиков. В каждом конкретном случае оценке подлежит техническая и эксплуатационная эффективность, а также конечный вес применяемых конструкций. В настоящее время сформировалось три основных направления использования данных материалов:

- монолитные конструкции сложной формы,
- многослойные элементы с заполнителями различных типов,

- «гибридные» (комбинированные) конструкции, сочетающие в своей структуре различные конструкционные материалы (сталь, дерево, железобетон, камень и т.д.).

Основная тенденция применения фибропластиков в конструкциях первых двух типов заключается в создании крупногабаритных элементов, позволяющих уменьшить общую массу конструкций, а также сократить количество входящих деталей, узлов и соединений.

Третий тип конструкций, как правило, предусматривает сочетание работы композитов на растяжение с работой других строительных материалов (например, бетона или древесины) на сжатие. Данный тип конструкций в большинстве случаев позволяет добиться максимального экономического эффекта от применения армированных пластиков в строительстве.

Комбинирование фибропластиков с другими материалами также часто является следствием использования различных методов восстановления и усиления строительных конструкций, ранее уже находившихся в эксплуатации, и применяется обычно в тех случаях, когда внешнее фибропластиковое армирование демонстрирует гораздо более эффективные результаты по сравнению с традиционно используемыми методами усиления (см. п. 1.4.3).

Поскольку фибропластиковые конструкции крайне чувствительны к высокой концентрации напряжений, что обуславливается обычно относительно низкими прочностными свойствами связующих матриц, то при проектировании узлов их соединений избегают наличия концентраторов напряжений. Переходы форм элементов и конструкций узлов выполняют без резких перепадов толщин с необходимыми скруглениями кромок.

Низкие вес и высокие прочностные свойства фибропластиковых материалов, сочетающиеся с рядом других особенностей (например, электромагнитной проницаемостью), способствуют их нарастающему внедрению при возведении современных сооружений. Список примеров использования фибропластиковых конструкций в новом строительстве весьма обширен, остановимся только на некоторых, наиболее показательных их образцах.

Каркасы зданий и сооружений. Одними из первых строительных конструкций, полностью выполненных с каркасами из полноразмерных фибропластиковых профилей, стали башни на покрытии здания *Сан Банка* в городе *Орландо* (*Sun Bank Building, Orlando, Florida*, США) [8]. Их каркасы имели квадратное основание с размерами 10,7×10,7 м и высоту, также составлявшую 10,7 м (см. рис. 1.2). Все несущие конструкции, входившие в состав этих сооружений, были выполнены с использованием фибропластиковых двутавровых про-

филей, соединявшихся между собой фибропластиковыми же болтами и гайками. Использование волоконноармированных композитов в данном случае определялось необходимостью обеспечения электромагнитной проницаемости, а также их способностью отражать радиоволны.

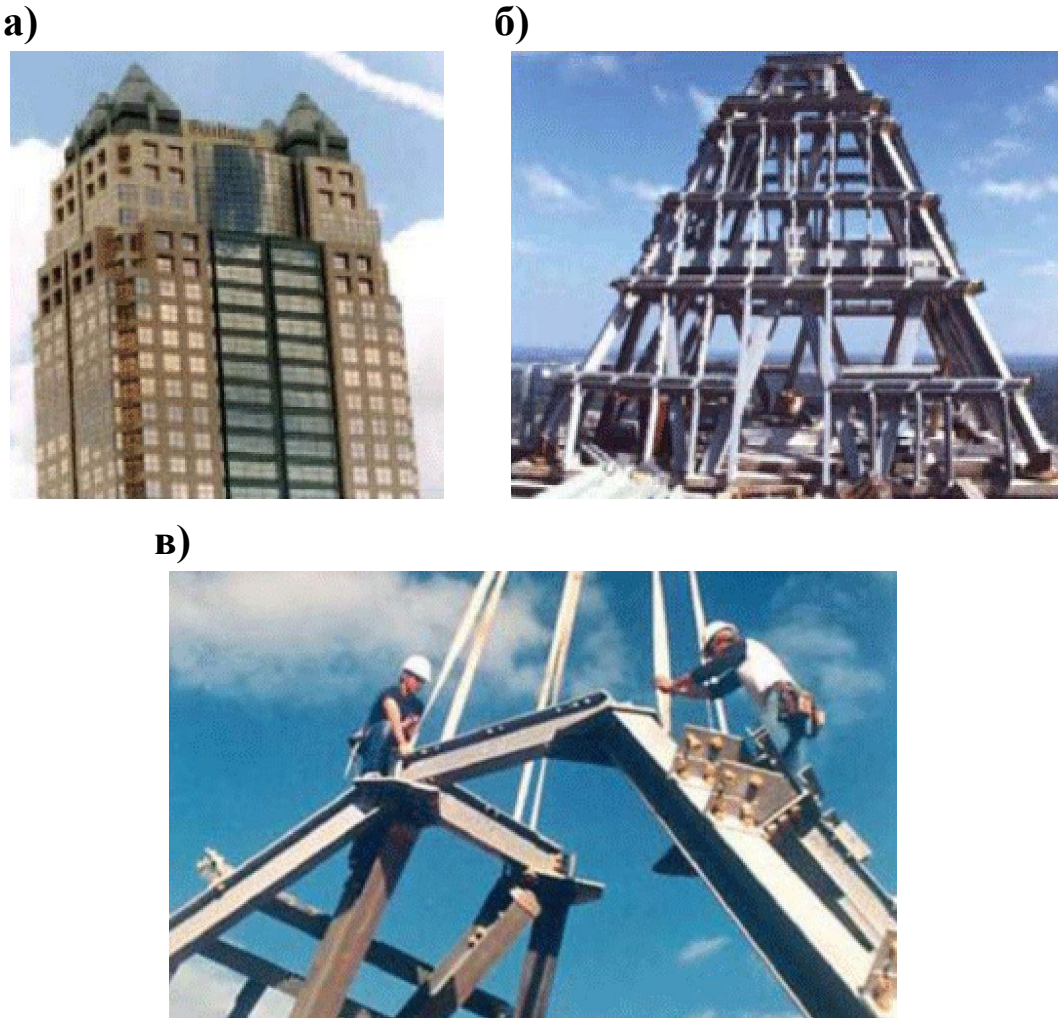


Рис. 1.2. Башни на покрытии здания *Сан Банка* в городе *Орландо* (*Sun Bank Building, Orlando, Florida,* США), каркасы которых полностью выполнены из фибропластиковых двутавровых профилей, соединявшихся фибропластиковыми болтами и гайками: а — общий вид башен на покрытии здания, б — собранный каркас одной из башен, в — каркас одной из башен в процессе монтажа; по [8]

Первое офисное здание, целиком построенное с каркасом из фибропластиковых профилей, было представлено на выставке *Swissbau'99* в *Базеле* (*Basel*, Швейцария) [8]. После окончания мероприятия здание было разобрано и перенесено на новое место (*Münchensteinerstrasse 210, Basel*), где служит постоянным офисом одной из компаний (рис. 1.3). Высота этого 5-ти этажного здания составляет 15,0 м, а размеры в плане — 10,0×12,0 м. Его каркас включает фибропластиковые вертикальные и наклонные колонны, составленные из двутавра и двух швеллеров, а также балки, составленные из двух швеллеров. На-

стилы четырех междуэтажных перекрытия целиком выполнены из фибропластиковых плит. Соединения фибропластиковых профилей в составе элементов каркаса осуществлялось с использованием высокопрочного эпоксидного состава. Окончательная сборка каркаса была выполнена с применением металлических болтов.

а) **б)**

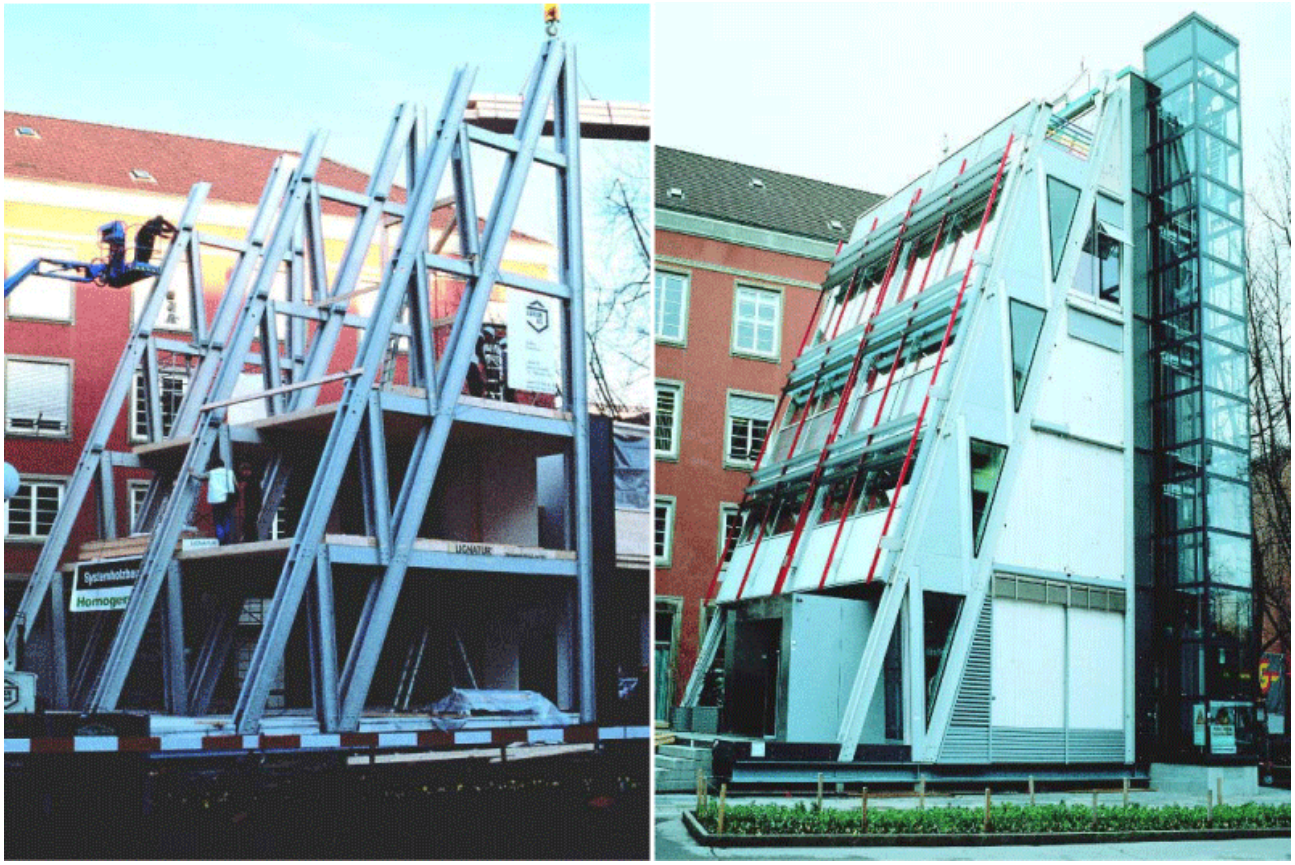


Рис. 1.3. Офисное здание в *Базеле* (*Basel*, Швейцария), построенное с каркасом из фибропластиковых профилей: а — каркасы здания в процессе монтажа, б — общий вид здания по окончанию производства работ; по [8]

Ограждающие конструкции. Низкий вес и высокая прочность фибропластиковых элементов делает их предпочтительными также и при возведении масштабных сооружений. Построенное в *Мекке* (*Саудовская Аравия*) знаменитое здание *Makkah Clock Tower* (*Королевская часовая башня,* 2012г.) известно не только тем, что при высоте 607 м считается третьим наиболее высоким зданием мира, а вместе с примыкающими башнями образует самое крупное по массе сооружение на земле (рис. 1.4), но также и тем, что его верхние 200 м были обшиты дубайской фирмой *Premier Composites Technologies (Dubai, UAE)* с помощью панелей стенового ограждения, изготовленных на основе углеродоволоконных пластиков [7]. Фибропластиковые панели покрывают в общей сложности более 40 000 м^2 внешних поверхностей этого небоскреба. Даже часы

на здании, считающиеся самыми большими в мире, имеющие диаметр 43 м и минутную стрелку длиной 23 м, выполнены из углеродоволоконных композитов. Использование других видов материалов в данном случае могло бы значительно усложнить конструктивные решения и даже поставить под сомнение успешность отдельных частей данного проекта.



Рис. 1.4. Здание *Makkah Clock Tower* (*Королевская часовая башня,* Мекка, Саудовская Аравия, 2012г.) в качестве стенового ограждения которого используется более 40 000 м^2 углеродоволоконных композитных панелей

Мостостроение. Рациональное использование прочностных характеристик фиброармированных пластиков позволяет обеспечить комплексное и долгосрочное решение многих строительных задач. Примером чему может служить возведенный еще более 20 лет назад и эксплуатируемый по сегодняшний день автодорожный «*Мост через безымянный ручей*» (*No-Name Creek Bridge, Russell, Kansas*, США), первое американское сооружение полностью выполненное из фибропластиковых материалов еще в 1996 году [9-12]. При довольно скромных размерах (пролет 7,08 м и ширина 8,45 м) его каркас и несущие конструкции настила полностью составили фибропластиковые элементы (рис. 1.5), позволившие уменьшить среднюю массу квадратного метра пролетного строения в 3 раза по сравнению с традиционными железобетонными конструкциями, вес которых в этом случае составил бы 400…500 кг/м^2. Время монтажных работ (менее 6 часов) и их стоимость при возведении данного композитного сооружения оказались ниже по сравнению с аналогичными мостами, изготавливаемыми из стали или железобетона [13].

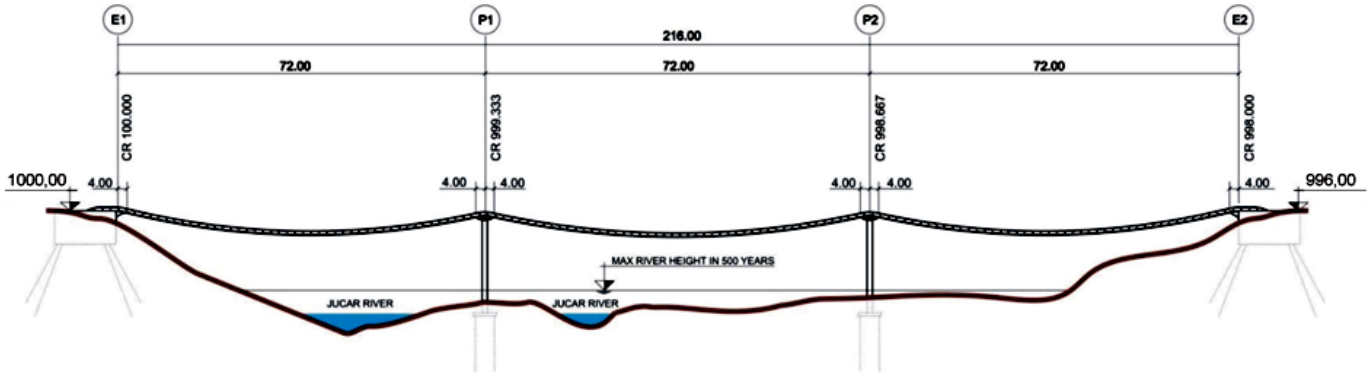


Рис. 1.5. Первый американский автодорожный «*Мост через безымянный ручей*» (*No-Name Creek Bridge, Russell, Kansas*, США), полностью изготовленный из фибропластиковых материалов в 1996 году; по [12]

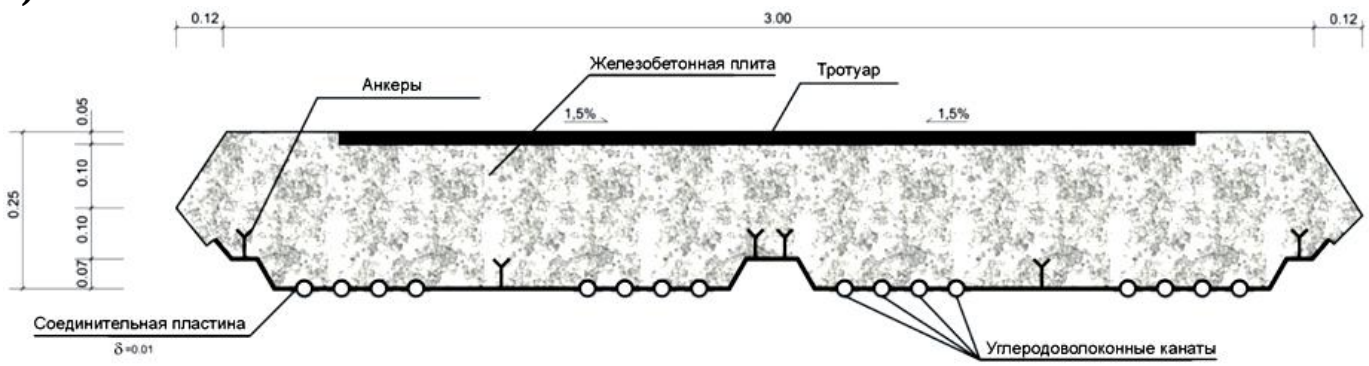
Высокая продольная жесткость при растяжении, сочетающаяся с прочностью, многократно превосходящей прочность стали, позволила использовать углеродоволоконные канаты в качестве несущих элементов подвесного пешеходного моста, возведенного в городе *Куэнка* над рекой *Хукар* (*Cuenca, Jucar river*, Испания). Особенностью данного сооружения, включающего три пролета по 72,0 м (рис. 1.6), явилось размещение растянутых несущих элементов непосредственно под его настилом [14]. В составе неразрезного пролетного строения этого моста шестнадцать канатов диаметром 42 мм, состоящих из пяти углеродоволоконных элементов каждый, поддерживают железобетонную плиту шириной 3,0 м и толщиной 25,0 см (рис. 1.6, б). Высокая прочность углеродоволоконных канатов обеспечила возможность придания каждому из них усилия предварительного напряжения, необходимого для стабилизации сооружения и составившего 70 тс.

Не менее известный, чем башня *Makkah Clock Tower*, второй мост через пролив Босфор (называемый *Fatih Sultan Mehmet Bridge*, Стамбул, Турция, 1988г.), имеющий длину более 1,5 км (рис. 1.7), в качестве основных своих несущих элементов также использует углеродоволоконные канаты [7]. В настоящее время канаты такого же типа предполагаются к применению в составе конструкций 3-го моста, проектируемого через Босфор в Стамбуле.

а)



б)



в)



Рис. 1.6. Подвесной пешеходный мост с несущими углеродоволоконными элементами в городе *Куэнка* над рекой *Хукар* (*Cuenca*, *Jucar river*, Испания): а — продольный разрез моста, б — поперечный разрез настила, в — общий вид моста; адаптировано по [14]



Рис. 1.7. Мост *Fatih Sultan Mehmet Bridge*, связавший берега пролива Босфор (Стамбул, Турция, 1988г.), основными несущими элементами которого являются углеродоволоконные канаты

Уже классическим примером использования в качестве несущих конструкций фибропластиковых элементов стал разводной пешеходный мост, возведенный компанией *FiReCo* в городе *Фредрикстад* (*Fredrikstad*, Норвегия). Части пролетного строения данного сооружения, имеющего ширину 2 м и длину 28 м, выполнены из стекловолоконных и углеродоволоконных композитов (рис. 1.8). Выбор в качестве основных конструкционных материалов фибропластиков в этом случае изначально диктовался сугубо прагматическими соображениями. Стоимость осуществленного проекта была ниже стоимости аналогичных сооружений, реализуемых с использованием стали и бетон, частично благодаря возможности уменьшения размеров и мощности подъемных гидравлических цилиндров, частично в связи с сокращением сроков возведения сооружения и уменьшением стоимости монтажа рабочего оборудования. Сооружение продемонстрировало несостоятельность выбора конструкционного материала только на основании показателя стоимости единицы его веса в отрыве от общей концепции проекта.

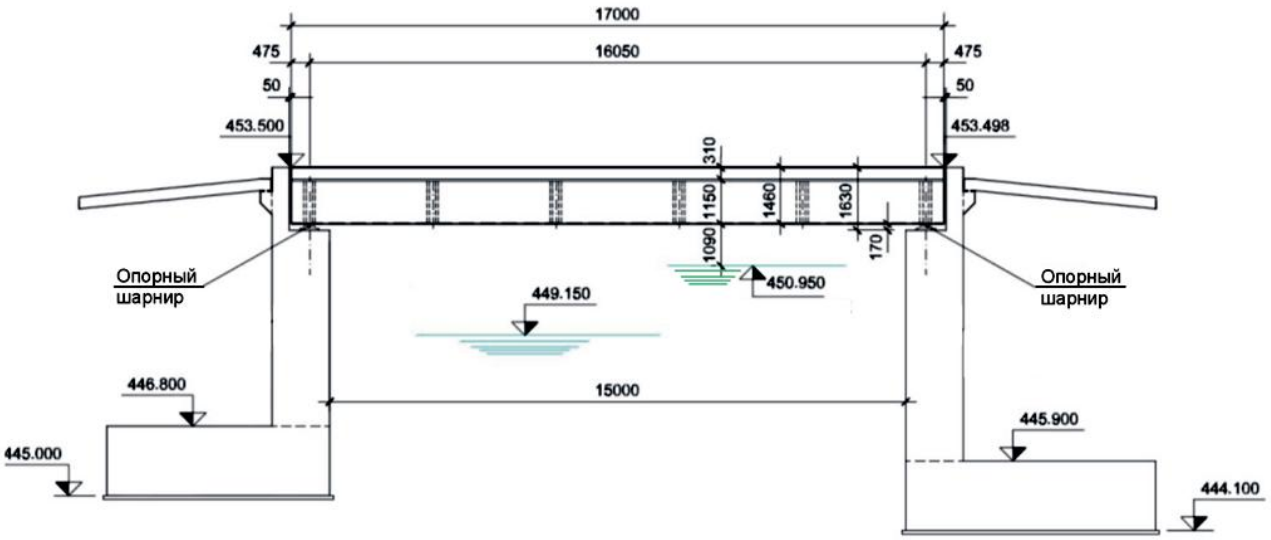


Рис. 1.8. Разводной пешеходный мост шириной 2 м и пролетом 28 м, возведенный компанией *FiReCo* в городе *Фредрикстад* (*Fredrikstad*, Норвегия), изготовленный из стекловолоконных и углеродоволоконных композитов; по [7]

Высокая транспортабельность фибропластиковых конструкций делает их привлекательными для использования в труднодоступных местах при практически полностью отсутствующей дорожной инфраструктуре. Примером чему может служить возведение в 2013 году автодорожного моста в одном из центральных районов *Республики Габон* (Западная Африка). Существенные сложности, связанные с доставкой элементов его строения, необходимого для пере-

крытия пролета 17,0 м при суммарной ширине полос движения 6,0 м, заставило испанскую компанию *ACCIONA* прибегнуть к использованию не стандартного решения [14], предусматривавшего в качестве основных несущих конструкций двух фибропластиковых балок U-образного сечения, выполненных из гибридного композитного материала, сочетающего углеродные и стеклянные волока (см. рис. 1.9). Применение сборных конструкций заводской готовности (рис. 1.10) существенно упростило процесс монтажа и сократило сроки его проведения, а использование композитного материала обеспечило практическую возможность доставки необходимых элементов на место строительства.

а)



б)

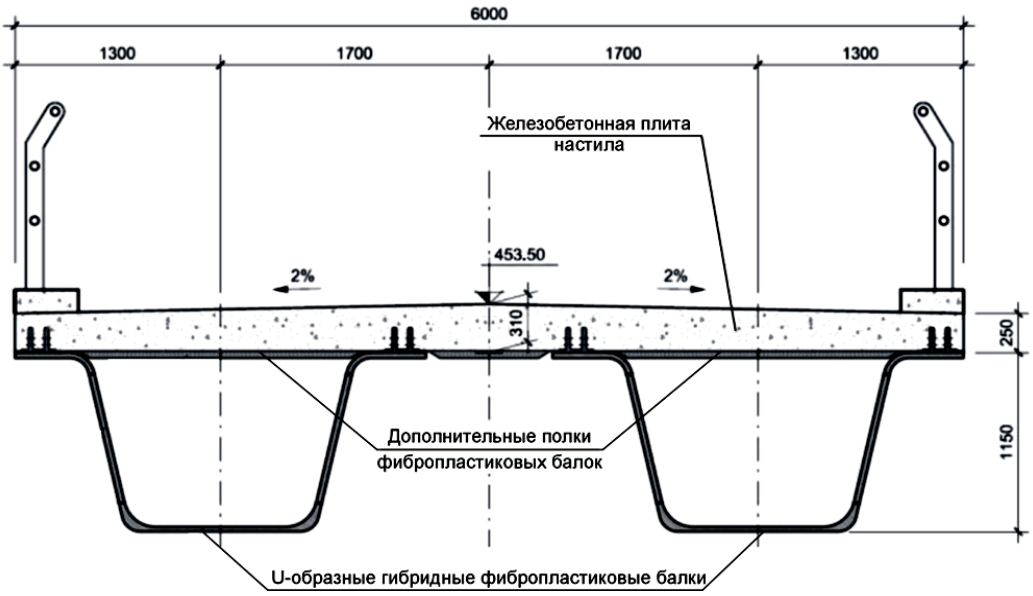


Рис. 1.9. Мост, смонтированный в одном из центральных районов *Республики Габон* (Западная Африка), имеющий пролетное строение в виде U-образных фибропластиковых балок, выполненных из гибридного композитного материала, сочетающего углеродные и стеклянные волокна: а — продольный разрез моста, б — поперечный разрез пролетного строения; по [14]

а) **б)**



Рис. 1.10. Мостовые фибропластиковые балки U-образного сечения с длиной 17 м: а — в процессе изготовления, б — при транспортировке; по [14]

Принципиально новая технология возведения мостов с использованием бетонных несущих элементов, имеющих внешнее фибропластиковое армирование, была разработана в *Университете штата Мэн* (*The University of Maine*, США) и опробована при строительстве в городе *Фитчбург* (*Fitchburg*, *Massachusetts*, США), явившись дешевой и быстрой альтернативой традиционным методам возведения подобных сооружений [7, 15]. Данная технология предусматривает применение в качестве основных несущих элементов арок из фибропластиковых труб, изготовленных на основе углеродных волокон (рис. 1.11). Над трубчатыми арками размещается коррозионностойкий, также фибропластиковый, профилированный настил, после чего их внутренние полости наполняются подвижной бетонной смесью. После набора необходимой прочности бетоном арок, по профилированному настилу выполняется монолитная плита, а затем производится ее засыпка грунтом и укладка дорожного полотна. Использовавшиеся при строительстве в Фитчбурге арки имели пролет 12 м и были изготовлены из фибропластиковых труб длиной 14 м, диаметром 30 см. Каждая монтируемая арка весила всего около 100 кг и быстро размещалась в проектном положении с привлечением минимально доступной механизации.

а)



б)



Рис. 1.11. Мост, возведенный в городе *Фитчбург* (*Fitchburg, Massachusetts,* США), использующий в качестве основных несущих элементов фибропластиковые трубы на углеродоволоконной основе, заполняемые подвижной бетонной смесью: а — конструктивная схема сооружения, б — общий вид в процессе монтажа; по [7]

Продолжением проекта, осуществленного в Фитчбурге, явилась серия аналогичных арочных мостов, построенных на восточном побережье Соединенных Штатов (рис. 1.12), отличавшихся невысокой стоимостью и короткими сроками возведения (до 2-х недель). При этом по ожиданиям авторов, период службы таких сооружений превысит обычный срок эксплуатации похожих мостов, выполненных из традиционных строительных материалов (50-80 лет), и составит более 100 лет [16-17].

а)



б) **в)**



Рис. 1.12. Мосты, построенные на восточном побережье США, использующие в качестве основных несущих элементов фибропластиковые трубы на углеродоволоконной основе, заполненные подвижной бетонной смесью: а — *Мост Нила* в Питсфилде, штат Мэн (*Neal Bridge, Pittsfield, Maine*), построенный в 2008 году, б — *Мост Мак Джи* в Энсоне, штат Мэн (*McGee Bridge, Anson, Maine*), построенный в 2009 году, в — *Рыжий мост*, штат Мэн (*Auburn Bridge, Maine*), построенный в 2010 году; по [16]

В настоящее время усовершенствованные конструкции фибропластиковых труб внешнего армирования несущих арок данных сооружений обладают весом, позволяющим двум рабочим самостоятельно осуществлять перемещение их образцов, имеющих пролет 18,3 м (рис. 1.13).



Рис. 1.13. Углеродоволоконная арка внешнего армирования бетонных несущих конструкций мостовых сооружений, имеющая пролет 18,3 м, перемещаемая двумя рабочими в лаборатории *Центра современных конструкций и композитов* (*Advanced Structures & Composites Center*) *Университета штата Мэн* (*The University of Maine*, США); по [16]

Дальнейшее развитие конструктивные формы рассматриваемых мостов находят в проектах автодорожных развязок, предусматривающих наличие в составе таких сооружений нескольких пролетов (рис. 1.14) [16].

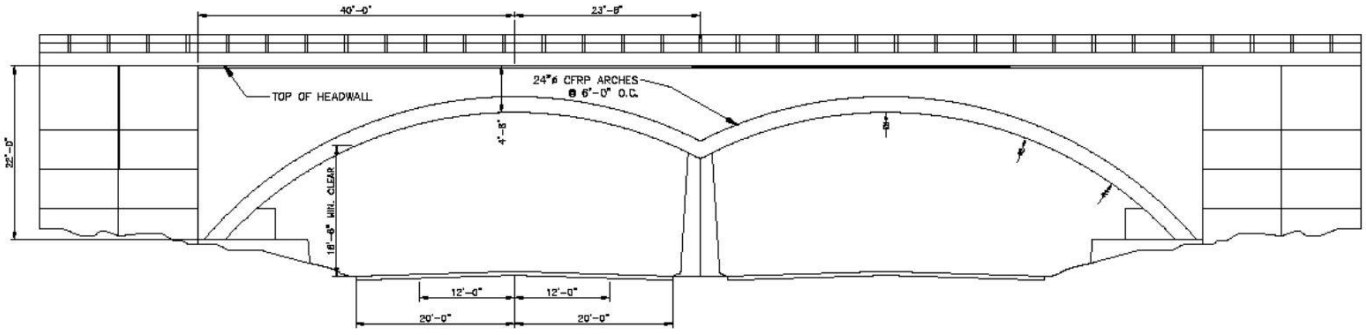


Рис. 1.14. Проект двухпролетного автодорожного моста с несущими арочными конструкциями из углеродоволоконных труб, заполненных бетонной смесью; по [16]

Армирование сборных бетонных конструкций. Широкое использование фибропластиковые элементы с недавних пор находят также и при внутреннем армировании сборных бетонных элементов. Технологии армирования композитами на основе углеродных волокон, появившиеся в США в начале 2000-х готов, в настоящее время демонстрируют все большее распространение. Фибропластики на основе углеродных волокон довольно широко используются для изготовления армирующих решеток панелей отделки фасадов высотных зданий

(начиная вытеснять металлическое армирование), а также в качестве связующих элементов наружных и внутренних слоев бетонных стен (рис. 1.15, а). Отсутствие коррозии композитного армирования позволяет минимизировать толщины защитных слоев бетона фасадных панелей и до 40% снизить их вес [7]. Теплоизоляционные свойства фибропластиковых материалов исключают появление «мостиков холода» при использовании в качестве элементов поперечного армирования сендвичевых стеновых панелей, имеющих внешние бетонные слои.

а) **б)**

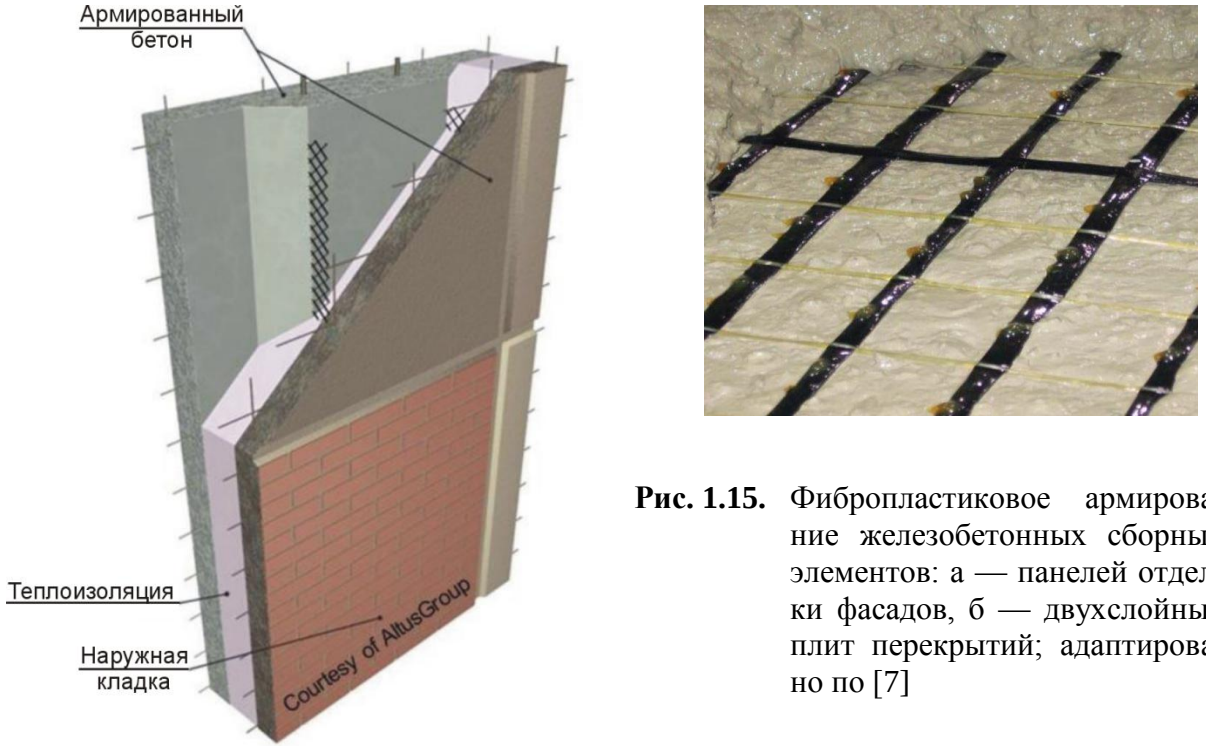


Рис. 1.15. Фибропластиковое армирование железобетонных сборных элементов: а — панелей отделки фасадов, б — двухслойных плит перекрытий; адаптировано по [7]

Углеродоволоконные пластиковые элементы применяются также для армирования полок облегченных плит перекрытий с прямоугольными пустотами. Замена стального армирования на фибропластиковое (рис. 1.15, б), позволяет уменьшить вес таких плит и отказаться от дополнительной антикоррозионной защиты, необходимой при использовании металлических решеток.

Одним из основных преимуществ применения внутреннего фибропластикового армирования бетонных элементов, особенно при использовании углеродных волокон, является отсутствие коррозии, позволяющее значительно уменьшить толщины защитных слоев бетона и таким образом существенно снизить вес ряда типов строительных конструкций (фасадных панелей, облегченных пустотных плит перекрытий, оболочек и т.п.). Такое снижение веса может составлять до 50% для панелей стенового ограждение и до 8% для балочных элементов двутаврового сечения [7].

Использование внутреннего фибропластикового армирования бетонных элементов позволяет улучшить их термотехнические показатели при сопоставлении с железобетонными аналогами. Фиброармированные композиты имеют гораздо более низкую термопроводимость в сравнении со сталью, что обеспечивает практически равномерную теплопередачу, исключающую наличие «горячих» и «холодных» точек.

К недостаткам рассмотренного внутреннего фибропластикового армирования бетонных конструкций следует отнести то, что наиболее современные и эффективные виды высокопрочных и высокомодульных волокон (например, углеродные волокна) имеют достаточно высокую стоимость, приводящую к приблизительно двукратному удорожанию выполненного из них армирования по сравнению с традиционной стальной арматурой [7]. Однако данный недостаток в значительной степени компенсируется уменьшением количества используемого бетона, отсутствием необходимых мероприятий по химической защите арматуры при малых толщинах защитных слоев, облегчением строительных конструкций и соответствующим уменьшением усилий, действующих на каркасы и фундаменты зданий и сооружений.

Немаловажным фактором, учитываемым при строительстве с недавних пор, стало также то, что полный цикл изготовления фибропластиковых материалов и конструкций на их основе приводит к уменьшению эмиссии в атмосферу углекислого газа в сравнении с процессами изготовления традиционных видов строительных материалов.

Инженерные сети. Достаточно обширной сферой применения композитных материалов в строительстве являются инженерные сети. В настоящее время основная масса фибропластиковых труб, используемых в инженерных сетях различного назначения, изготавливается на стекловолоконной основе (рис. 1.16), связываемой полиэфирными или эпоксидными матрицами.

а) **б)**



Рис. 1.16. Стеклопластиковые трубы: а — в процессе транспортировки, б — фасонные детали труб; по [18]

Трубы, при изготовлении которых используются полиэфирные связующие, применяются в инженерных сетях, обслуживающих жилищно-коммунальное хозяйство, а также трубопроводах промышленных предприятий. Температурные режимы их эксплуатации находятся в диапазоне от -50 до +50°С. Выпускаются они обычно с диаметрами от 250 до 3000 мм и рабочим давлением до 32 атм.

Трубы, изготовленные с использованием эпоксидных матриц, находят применение в сетях теплоснабжения и горячего водоснабжения, а также на объектах нефтегазового комплекса, энергетики, горнодобывающей и химической промышленности. Температурные режимы их эксплуатации предусматриваются в диапазоне от -50 до +110°С (иногда до +130°С). Выпускаются они обычно диаметром от 80 до 600 мм и рабочим давлением до 240 атм.

При монтаже труб, армированных стеклянным волокном, используются преимущественно стеклопластиковые муфты, уплотнение которых осуществляется эластомерными кольцами.

К преимуществам фибропластиковых труб относят низкий вес, снижающий расходы на транспортировку и монтаж, способность к более длительной работе в тяжелых условиях (больший «жизненный цикл»), отсутствие утечек вследствие коррозионных повреждений, экономию на антикоррозионных материалах и работах, более низкое гидравлическое сопротивление, уменьшающее затраты, связанные с насосным оборудованием (затраты на электроэнергию снижаются на 10-15% в зависимости от диаметра труб и параметров объектов [18]), а также увеличение скорости монтажа за счет использования механических соединений.

1.4.3. Усиление, восстановление и реабилитация существующих строительных конструкций с использованием фибропластиков

Существующий во многих странах фонд зданий и сооружений, характеризуется существенной долей физического износа, придающей заметную актуальность задаче ремонта и усиления строительных конструкций, решение которой требует значительных материальных затрат. Украина в этом отношении не является исключением [19-24].

Наиболее часто встречающиеся причины усиления определяются повреждениями конструкций в процессе эксплуатации, приведшими к снижению несущей способности, жесткости и трещиностойкости, изменением в величинах внешних воздействий и особенностях расчетных схем, необходимостью повышения долговечности, а также исправлением ошибок, допущенные при проек-

тировании и строительстве. Нередки случаи, когда модернизация строительных конструкций обуславливается изменением предъявляемых к ним нормативных требований (например, связанных с сейсмостойкостью или степенью надежности).

Традиционно решаются подобные проблемы путем увеличения сечений несущих элементов, введением дополнительного армирования в бетонных и железобетонных конструкциях, устройством различных внешних обойм из металлических прокатных элементов, изменением конструктивных схем, введением дополнительных опор и разгружающих элементов, установкой связей, ребер, диафрагм и т.п. (рис. 1.17). Часто, для решения поставленных задач, приходится комбинировать перечисленные способы [20, 24-40].

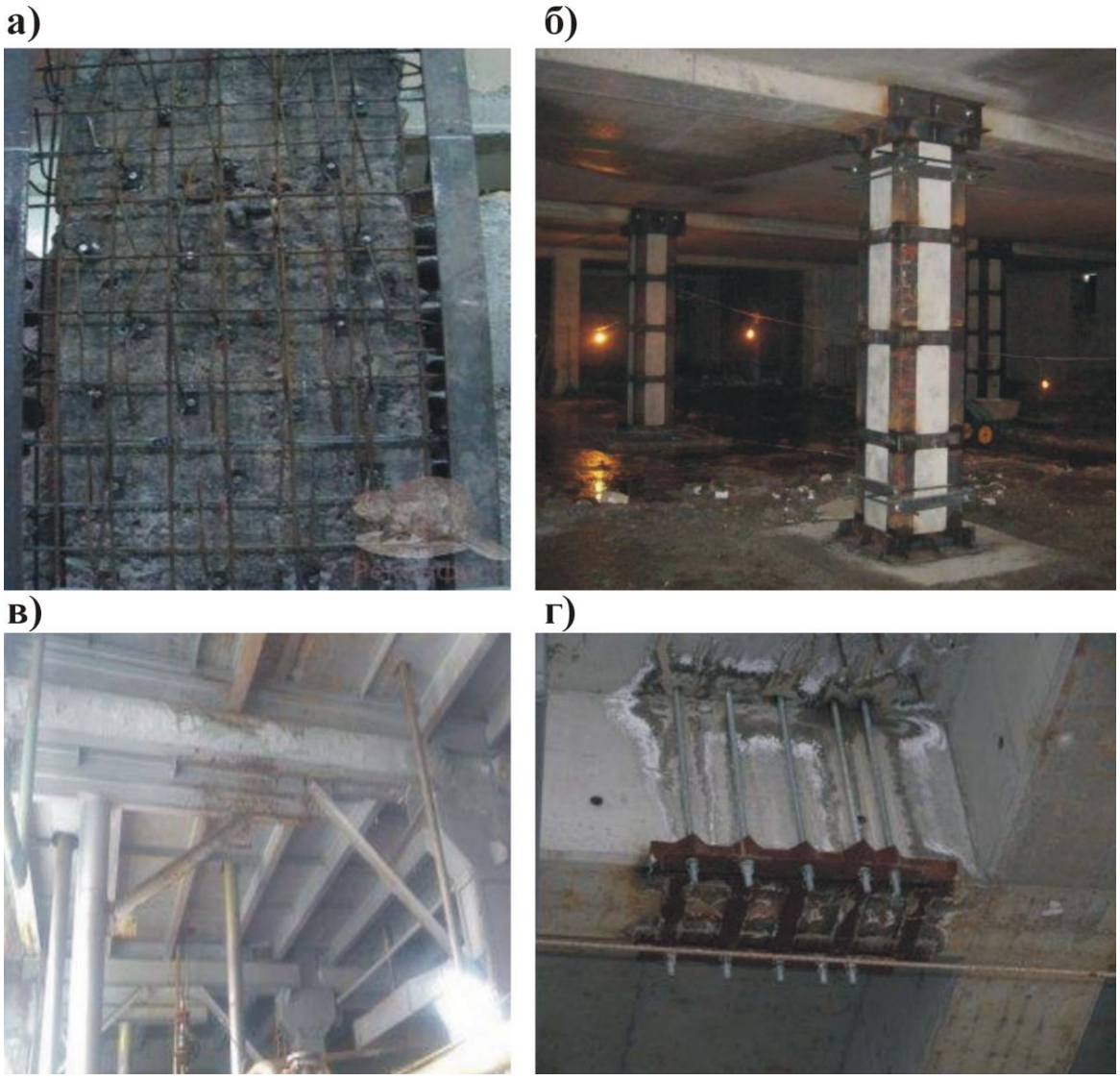


Рис. 1.17. Примеры традиционных решений усиления строительных конструкций: а, б — устройство, соответственно, железобетонных и металлических обойм вертикальных несущих элементов, в — усиление балок дополнительными стойками и подкосами, г — устройство металлических обойм железобетонных балок в местах действия поперечных сил; по [41]

Из возможных решений, позволяющих увеличить несущую способность и жесткости строительных конструкций, особое значение имеют системы внешнего армирования (см. рис. 1.18, а, б). Совместная работа конструкций с внешними стальными армирующими элементами в этих случаях обеспечивается различными способами: анкерами, связями, торцевыми упорами и т.п. Распространение таких методов применительно к усилению конструкций обычно способствует значительному снижению трудозатрат и стоимости производимых работ.

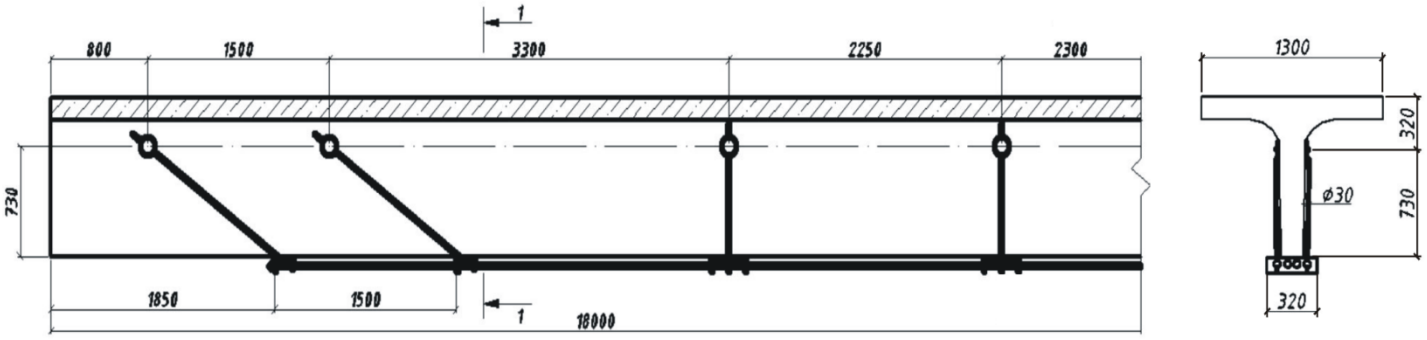
Однако названные преимущества реализуются далеко не для всех видов конструкций. Так, например, для пролетных строений мостов, с увеличением ширины их сечений, работы по устройству элементов внешнего металлического усиления усложняются и, при длине балок 24 м и выше, становятся сопоставимыми по затратам с полной заменой конструкций на новые [13]. Не всегда оказывается эффективным и усиление с использованием внешней стальной напрягаемой арматуры (пучков и прядей) из-за большой стоимости производства подобных работ.

Технологичной альтернативой традиционным способам усиления строительных конструкций выступает использование фиброармированных композитных материалов (рис. 1.18, в; рис. 1.21). Еще с конца 80-х годов XX века в мировой практике широкое распространение стали получать способы усиления строительных конструкций путем внешнего армирования с применением полимерных композиционных материалов на основе углеродных, арамидных, полиэфирных волокон, а также стекловолокна. Совокупность физико-механических, технологических и эксплуатационных свойств фибропластиков, способствовала тому, что в настоящее время одним из наиболее важных направлений их использования в строительстве является именно усиление, восстановление и реабилитация несущих конструкций.

Новый для отечественной практики метод внешнего армирования композиционными материалами позволяет продлевать работоспособность несущих элементов практически независимо от их геометрических размеров. При этом существенно сокращаются затраты труда и времени, отсутствует необходимость привлечения тяжелого оборудования и техники, достигается возможность выполнения работ без полной остановки производства или движения транспорта. Немаловажным преимуществом фибропластиковых систем усиления является их способность сохранять аутентичные внешние формы строительных конструкций и не влиять на общую архитектурную выразительность объектов усиления. Вариантное сравнение «классических» методов усиления

железобетонных балок с решениями, предусматривающими использование композитных материалов, представлено на рисунке 1.19.

а)



б)



в)

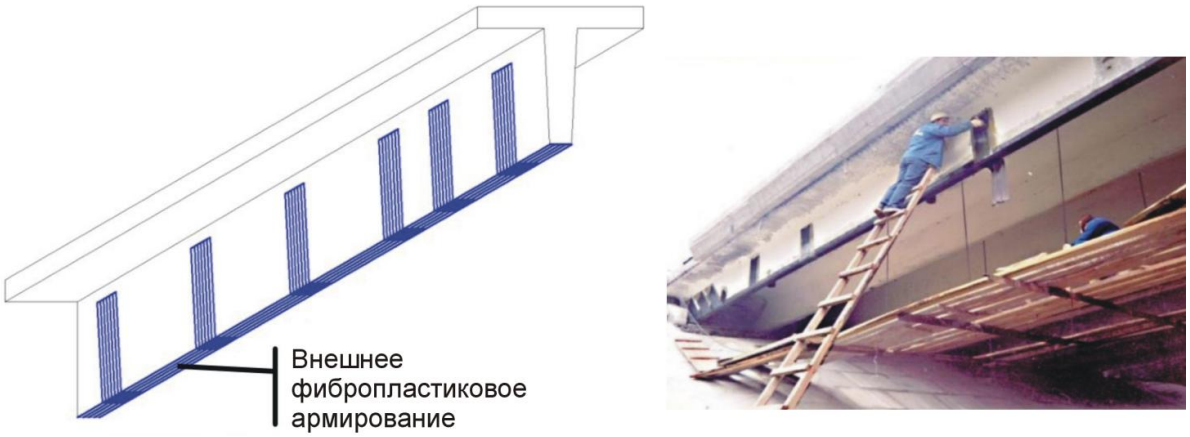


Рис. 1.18. Усиление железобетонных балок пролетных строений моста через реку *Издревая* на 23-м км автодороги «Новосибирск – Ленинско-Кузнецкий» (*Российская Федерация*): а — конструктивное решение, б — решение узлов системы усиления, в — возможное альтернативное решение, предусматривающее внешнее фибропластиковое армирование; по [42, 43]

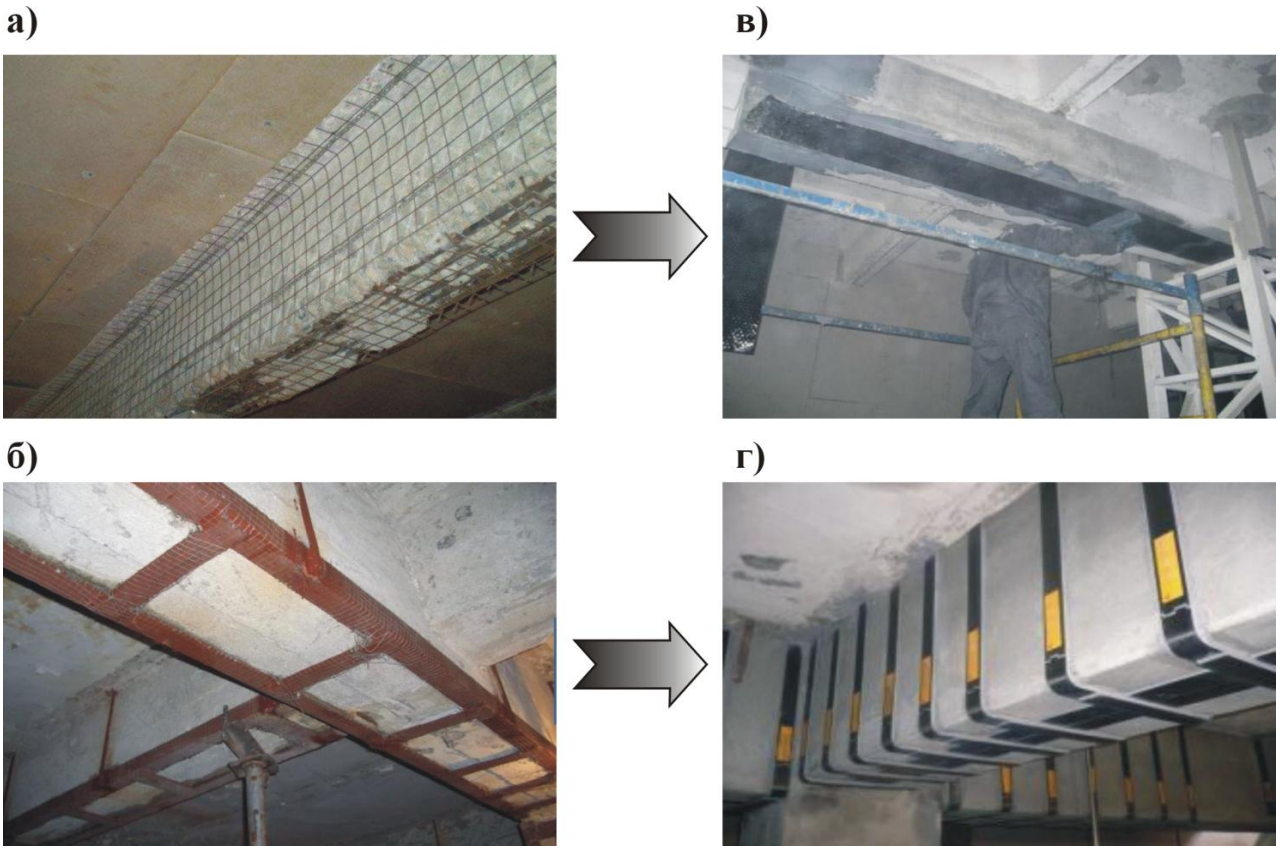


Рис. 1.19. Возможные варианты усиления железобетонных балок: а — устройством железобетонных обойм, б — металлическими обоймами, в — внешним армированием фибропластиковыми элементами, изготавливаемыми по месту усиления, г — внешним армированием фибропластиковыми элементами заводской готовности; по [42, 44]

Общий принцип усиления строительных конструкций фиброкомпозитами заключается в наклейке последних на специально подготовленные поверхности (см. п.п. 3.3, 5.4), что в значительной степени повышает прочность и жесткость исходных конструкций, практически не увеличивая их собственного веса. С помощью фиброкомпозитных материалов осуществляется эффективное усиление железобетонных, каменных, металлических и деревянных элементов. Высокая прочность, низкий вес, наилучший показатель соотношения прочности и веса, коррозионная стойкость и ремонтоспособность позволяют использовать фибропластики в тех случаях, когда другие виды материалов оказываются недостаточно эффективными.

Подобные решения могут реализовываться как с использованием усиливающих элементов конечной заводской готовности (ламинатов, стержней, фибропластиковых профилей и т.п., см. рис. 1.19, г), так и слоев армированных пластиков, изготавливаемых на поверхностях конструкций из лент, холстов и тканей, путем их пропитки и наклейки с помощью специальных полимерных составов непосредственно по месту усиления (см. рис. 1.19, в). Наибольшее практическое применение в современном строительстве получили фибропла-

стики, армированные углеродными и стеклянными волокнами, в несколько меньшей степени используются материалы на основе арамидных и базальтовых волокон, в отдельных случаях могут применяться композиты на основе борных и других видов волокон.

Перспективным является предварительное напряжение элементов внешнего фибропластикового армирования усиливаемых конструкций (см. п.п. 3.8, 5.5.3.4). В этих случаях натяжение лент и ламелей обычно производится гидродомкратами с использованием специальных захватов и анкерных устройств. При натяжении композитных элементов внешнего армирования и их последующем закреплении, также как и в случае использования металлических напрягаемых элементов, достигается не только рост несущей способности, но и заметное повышение жесткости и трещиностойкости строительных конструкций.

По своей сути наиболее близким к фибропластиковому усилению является широко и успешно используемое внешнее армирование железобетонных конструкций стальными элементами. Однако при этом фиброармированные материалы на основе углеродных, арамидных и стеклянных волокон имеют гораздо более высокую прочность на растяжение, чем применяемые в строительстве марки стали (наибольший же предел прочности показывают композиты, изготовленные на основе углеродных волокон). К основным преимуществам использования фибропластиков, в сравнении с внешним стальным армированием, при усилении строительных конструкций относят [45, 46]:

- относительную простату создания усилий предварительного напряжения,
- возможность использования в отношении конструкций с практически любыми геометрическими формами и радиусами кривизны (например, в отношении колонн с круглыми поперечными сечениями),
- допустимость производства работ по монтажу без остановки эксплуатации соответствующих объектов,
- возможность размещения элементов усиления в нескольких направлениях, обеспечиваемую малой толщиной их сечений (в большинстве случаев в пределах от 1,0 до 2,5 мм).

Входящие в состав фибропластиков армирующие волокна и связующие матрицы отличаются долговечностью и высокой выносливостью. Обычно они не требуют специальных мероприятий по защите от агрессивных внешних воздействий. В случае повреждения фибропластиковые элементы хорошо поддаются ремонту, предусматривающему устройство их дополнительных внешних слоев.

Перечисленные преимущества конструкционных композитов определяют нарастающий объем их использования при усилении строительных конструкций в ряде развитых стран, к числу которых относятся Австралия, Австрия, Бельгия, Великобритания, Германия, Испания, Канада, Корея, Нидерланды, Норвегия, Объединенные Арабские Эмираты, Польша, Россия, Саудовская Аравия, США, Франция, Чехия, Швейцария, Швеция и Япония. В некоторых перечисленных государствах опыт применения рассматриваемых усилений железобетонных и деревянных конструкций составляет около 40 лет, а металлических конструкций — близко 15-ти лет. Результаты практического применения внешнего фибропластикового армирования свидетельствуют о том, что с их помощью сроки эксплуатации усиливаемых конструкций могут быть продлены не менее чем на 30 лет [13].

В настоящее время практическое применение различных способов фибропластикового усиления существующих конструкций значительно превышает использование композитных элементов в новом строительстве. Примеров внешнего усиливающего армирования высокопрочными волоконными материалами достаточно много, в связи с чем, остановимся только на некоторых, потенциально близких существующим потребностям отечественного строительства и способных дать принципиальную оценку экономической эффективности подобных решений.

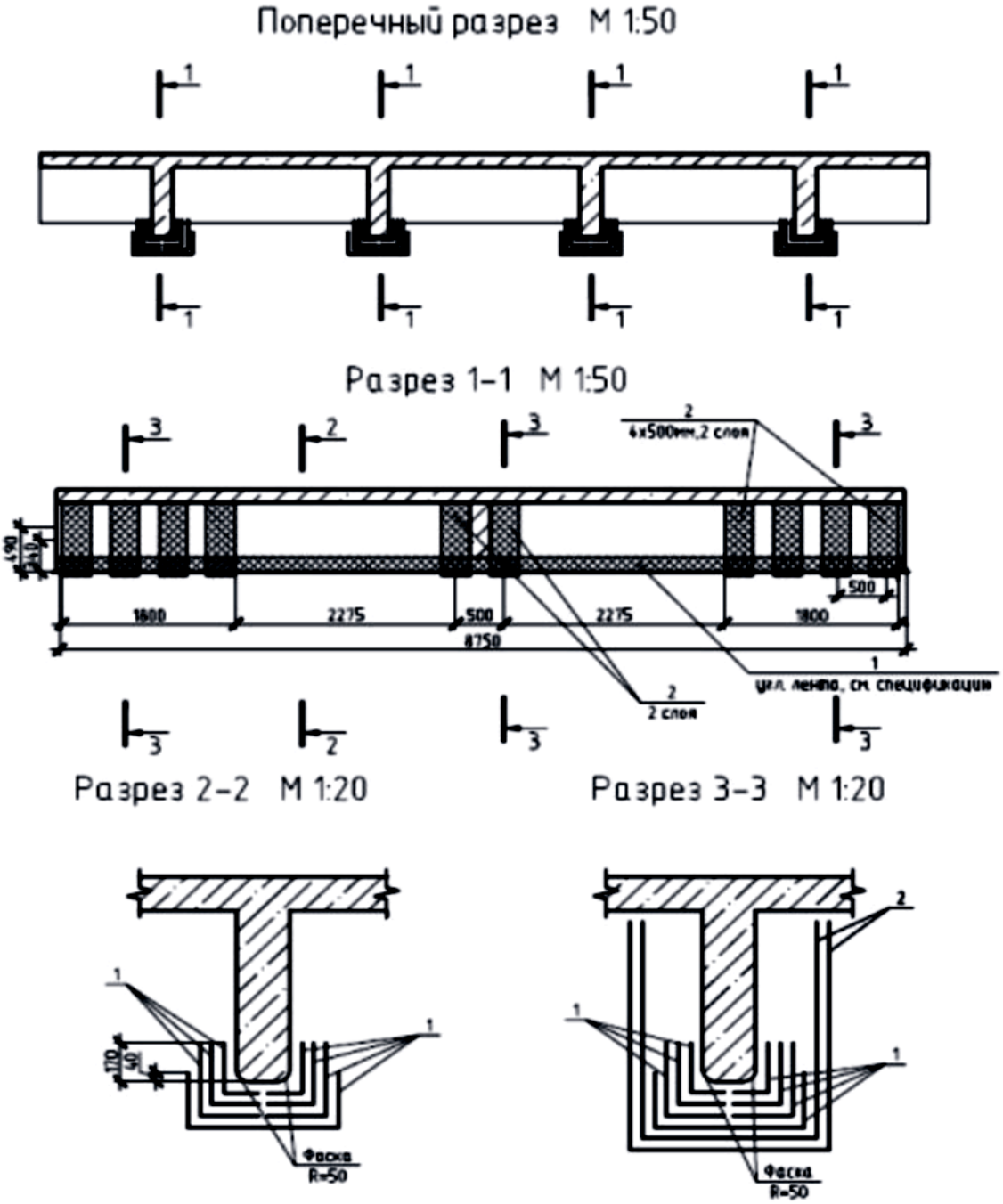
Усиление мостовых конструкций. Ремонт моста через реку в поселке *Татищево (Саратовская область, Российская Федерация*), железобетонное пролетное строение которого, перекрывающее пролет 15,65 м при ширине 8,29 м, имело массовые разрушения защитного слоя бетона с обнажением и коррозией несущей арматуры, содержало продольные трещины и было перегружено дополнительными слоями дорожного покрова (рис. 1.20), в случае использования традиционных методов усиления металлическими конструкциями оценивался в 1,4 млн. руб. (в ценах 2013 года) [44, 47].

а) **б)**



Рис. 1.20. Мост через реку в поселке *Татищево* (*Саратовская область, Российская Федерация*): а — общий вид, б — характерные дефекты конструкций; по [44, 47]

а)



б)

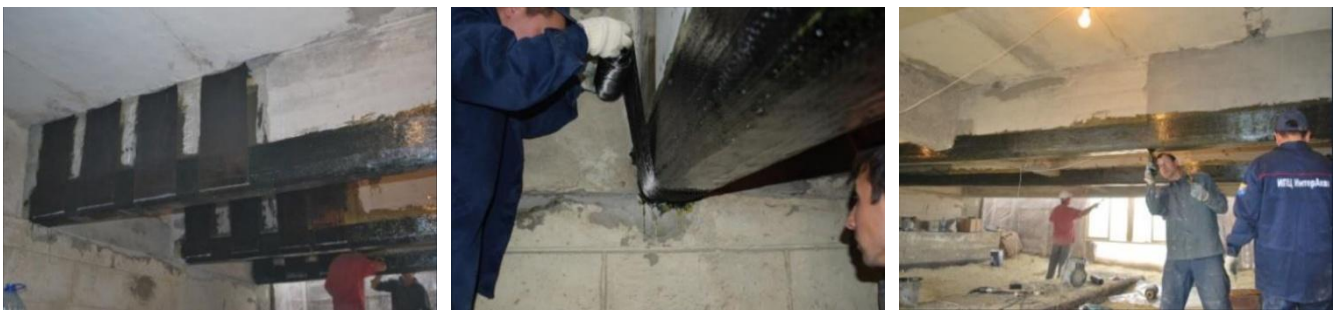


Рис. 1.21. Усиление углеродоволоконными композитами конструкций пролетного строения моста через реку в поселке *Татищево* (*Саратовская область, Российская Федерация*): а — схема размещения углеродоволоконных холстов, б — производство работ по усилению конструкций; по [44, 47]

В качестве более дешевой, но не менее эффективной альтернативы, было выбрано внешнее фибропластиковое армирование, изготавливавшееся на основе углеродоволоконных холстов непосредственно на поверхностях конструкции (рис. 1.21). Проведенные работы обошлись в 756 тыс. руб., что дало экономию более 45%. При этом, по данным разработчиков проекта, было достигнуто повышение общей несущей способности сооружения на 70%.

Примером еще более весомой экономической целесообразности фибропластикового усиления производителями данных систем приводится железнодорожный мост, расположенный на подъездных путях города *Соликамск* (*Российская Федерация*) [42]. В связи с планируемым изменением величин действующих нагрузок стояла задача модернизации его железобетонного пролетного строения (рис. 1.22, а). При этом рассматривались три принципиальных решения: полная замена пролетной части сооружения, усиление конструкции системой металлических элементов и фибропластиковое усиление углеродоволоконными элементами, изготавливаемыми «по месту» на поверхностях конструкции (см. п. 3.3.3). Решающим при выборе проектного решения, явилось то, что сметные затраты на полную замену пролетного строения в ценах 2013 года составляли более 6,2 млн. руб, затраты на усиление конструкций металлическими элементами превышали 1,3 млн. руб., а фибропластиковое усиление (рис. 1.22, б) было оценено в 460 тыс. руб. Таким образом, применение углеродоволоконных систем в данном случае дало экономию, в зависимости от рассматривавшихся альтернативных решений, от 65 до 93%.

а) **б)**



Рис. 1.22. Фибропластиковое усиление железобетонного пролетного строения железнодорожного моста на подъездном пути города *Соликамск* (*Российская Федерация*): а — общий вид моста, б — внешнее армирование углеродоволоконными лентами главных балок пролетного строения до нанесения слоя защитного покрытия; по [42]

Значительного снижения расходов на усиление пяти мостовых конструкций в *Республике Башкортостан* (*Российская Федерация*) удалось также достигнуть использованием внешнего фибропластикового армирования с использованием ламинированных углеродоволоконных элементов заводской готовности [43]. Необходимость перевозки тяжелого крупногабаритного оборудования *ОАО «Газпром Нефтехим Салават»* обусловило работы по повышению несущей способности пролетных строений данных сооружений на автомобильной дороге *Уфа-Оренбург* (рис. 1.23).

а)



б)



Рис. 1.23. Один из мостов на автомобильной дороге *Уфа-Оренбург* (*Российская Федерация*), претерпевший фибропластиковое усиление: а — общий вид моста, б — установленные в проектное положение ламинированные элементы углеродоволоконного усиления; по [43]

Примером усиления строительных конструкций фибропластиками, изготовленными на основе базальтоволоконных холстов, может служить ремонт моста через реку *Киржач* (*Российская Федерация, 94-й км автомагистрали М-7 «Волга»*), произведенный в 2002г. по проекту, разработанному институтом *«РОСДОРНИИ»* [13]. Пятилетнее наблюдение за конструкциями этого моста позволило авторам проекта рекомендовать базальтоволоконные ткани для практического использования при усилении мостовых сооружений общей сети автомобильных дорог. Однако следует учитывать и то, что даваемая в [13] сравнительная оценка работы углеродоволоконных и базальтоволоконных композитов в составе элементов усиления мостов, при выборе конструкционных материалов отдает предпочтение фибропластикам на основе углеродных волокон, как более прочным и надежно работающим в зонах возможного трещинообразования.



Рис. 1.24. Усиленные внешним поперечным армированием с использованием углеродоволоконных лент опор путепровода, расположенного на пересечении дорог *Большого казанского кольца* и *Оренбургского тракта* (*Российская Федерация*); по [43]

Эффективность демонстрирует и усиление вертикальных опор мостовых сооружений. Так «охватывающее» поперечное армирование углеродоволоконными лентами промежуточных опор путепровода (рис. 1.24), расположенного на пересечении дорог *Большого казанского кольца* и *Оренбургского тракта* (*Российская Федерация*), позволило увеличить несущую способность единиц площади их сечений с 11,5 до 15 МПа, повысив общую несущую способность сооружения на 30% [43].

Усиление каркасов зданий и сооружений. Показательным примером фибропластикового усиления железобетонных каркасов промышленных сооружений могут служить работы, проведенные испанской компанией *ACCIONA* в 2008 году при реконструкции здания теплоэлектростанции, ставившие целью дальнейшее размещение в его помещениях музея и офисного центра [14]. Усиливаемое здание (рис. 1.25, а) было построено в 1920-1930 годах и имело железобетонный каркас с сеткой колонн 20,35×16,36 м (рис. 1.25, б). Элементы каркаса на момент производства работ не соответствовали современным норма-

тивным требованиям, а в отношении части конструкций предусматривалось существенное увеличение действующих нагрузок. Немаловажным условием осуществления проекта являлось сохранение максимально аутентичного внешнего вида строительных элементов сооружения.

а) **б)**

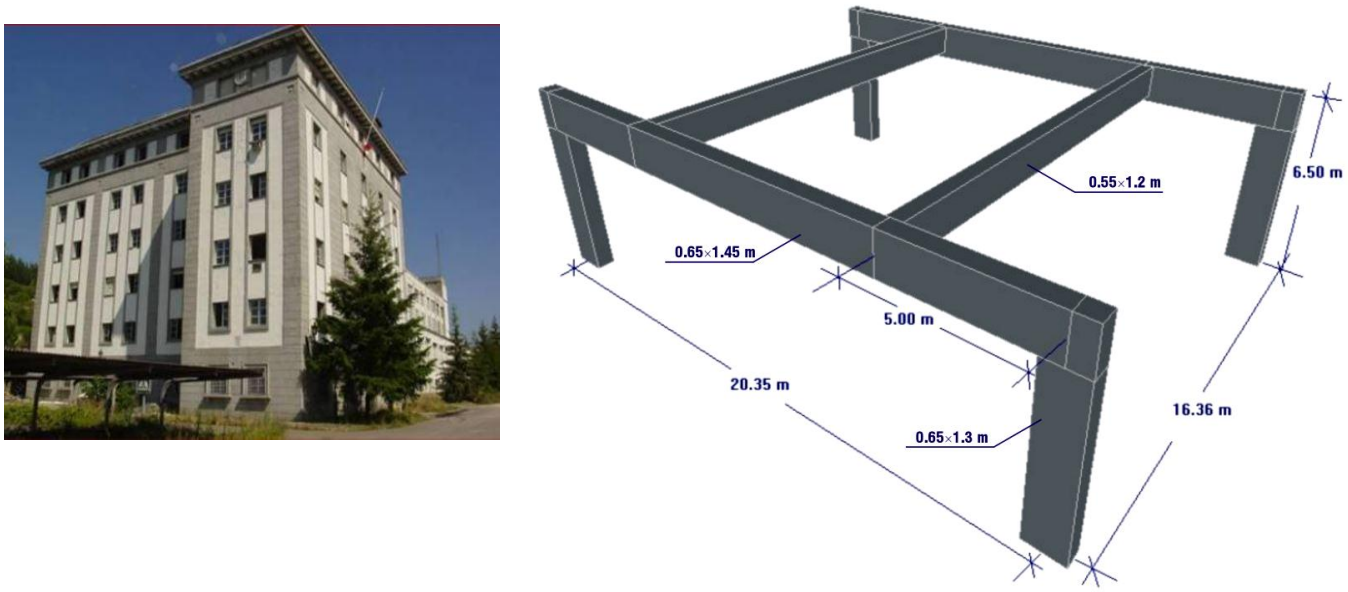


Рис. 1.25. Здание теплоэлектростанции, реконструированное компанией *ACCIONA* (Испания) с использованием внешнего углеродоволоконного армирования железобетонных элементов его каркаса: а — общий вид, б — схема типичного фрагмента каркаса; по [14]

Для производства работ по усилению была избрана технология внешнего фибропластикового армирования элементами, изготавливаемыми «по месту» (см. п. 3.3.3) с использованием углеродоволоконных холстовых материалов, позволяющая увеличивать несущую способность железобетонных конструкций практически без изменения размеров их поперечных сечений. При этом на первом этапе работ элементы каркаса освобождались от примыкающих фрагментов стеновых заполнений, что обеспечивало непрерывность устраиваемого внешнего армирования (рис. 1.26, а). Затем осуществлялась очистка их поверхностей (рис. 1.26, б), обработка грунтовочными составами (рис. 1.26, в) и монтаж по адгезионному раствору армирующих полотен (рис. 1.26, г), положение которых фиксировалось временными креплениями до набора минимально необходимой прочности матрицами элементов фибропластикового армирования (рис. 1.26, д). На заключительном этапе конструкции были подвергнуты испытаниям с фиксацией параметров напряженно-деформируемого состояния.

Принятое решение позволило произвести перепланировку помещений с увеличением нагрузок на элементы каркаса здания, сохранив их первоначальный внешний вид.

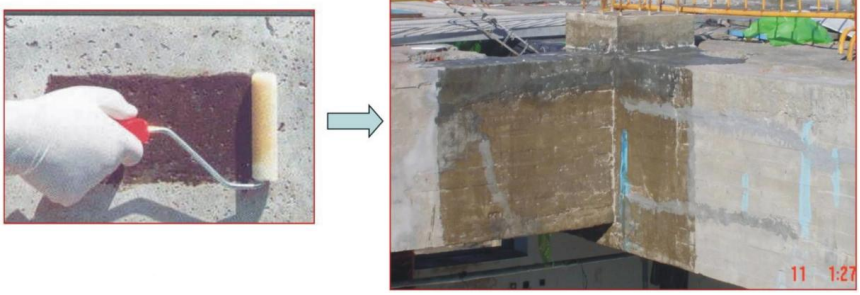
а)



б)



в)



г)



д)



Рис. 1.26. Этапы производства работ, осуществлявшихся компанией *ACCIONA* (Испания) при усилении железобетонного каркаса перестраиваемого здания теплоэлектростанции: а — освобождение от примыкающих фрагментов стенового заполнения, б — очистка усиливаемых конструкций, в — обработка грунтовочными составами усиливаемых поверхностей, г — монтаж по адгезионному раствору полотен внешнего армирования, д — временная фиксация положения элементов усиления; по [14]

Экономическая эффективность фибропластикового усиления элементов сборных железобетонных каркасов промышленных зданий подтверждается на примере работ, проводившихся на предприятиях российской корпорации «*Росатом*». Так, расходы на восстановление несущей способности плит и балок, покрытий цехов *ОАО «Ковровский механический завод»* (*г. Ковров, Владимирская область, Российская Федерация*), входящего в данное объединение, удалось уменьшить на 23% (с 11,4 млн. до 8,8 млн. руб. в ценах 2013 года) за счет ухода от классических конструктивных решений и применения фибропластиковых систем на основе углеродных волокон [47]. Сроки же производства работ на объекте были сокращены вдвое — с 3 до 1,5 месяцев, что в совокупности с уменьшением расходов на непосредственное производство работ, дало общий экономический эффект порядка 30%.

Серьезные перспективы внешнее фибропластиковое армирование демонстрирует также при устранении последствий стихийных бедствий и пожаров. Пожар, имевший место в цехах научно-производственного центра *«Производственное объединение «СТАРТ» им. М.В.Проценко»* (*ФГУП ФНПЦ ПО «СТАРТ», г. Заречный, Пензенская область, Российская Федерация*), привел к значительным повреждениям элементов конструкции сборного железобетонного каркаса здания: плит покрытия, балок, колонн и ригелей (рис. 1.27, а). Сметная стоимость восстановления с использованием традиционных в этих случаях металлических конструкций в ценах 2013 года составляла 10,9 млн. руб. Применение композитных углеродоволоконных систем усиления позволило снизить этот показатель до 9,9 млн. руб. (т.е. на 10%), а сроки производства работ сократить с 2,5 до 1,5 месяцев [47].

а) **б)**



Рис. 1.27. Строительные конструкции цехов научно-производственного центра *«Производственное объединение «СТАРТ» им. М.В.Проценко»* (*ФГУП ФНПЦ ПО «СТАРТ», г. Заречный, Пензенская область, Российская Федерация*): а, б — соответственно, до и после восстановительных работ, выполнявшихся с использованием углеродоволоконных фибропластиков; по [47]

Усиление каменных конструкций. Методы фибропластикового усиления обнаруживают эффективность также и в отношении каменных конструкций, получивших существенные повреждения в процессе длительной эксплуатации. Примером чему могут служить работы, проводившиеся при ремонте многоквартирного жилого дома в поселке *Кумор* (*Республика Татарстан, Российская Федерация*).

В данном случае конструкции каменных стен двухэтажного здания (рис. 1.28) по всей своей высоте содержали сквозные вертикальные и наклонные трещины, усугублявшиеся наличием множественных подрезов кладки опорных зон сборных перемычек стеновых проемов. При этом усиление стен, предусматривавшее устройство традиционных металлических обойм, требовало капитальных затрат порядка 1,6 млн. руб. (в ценах 2013 года). В качестве альтернативного решения было выбрано армирование углеродоволоконными композитными элементами, позволившее сократить общие расходы более чем на 35% [42]. Результативное усиление сквозных вертикальных и наклонных трещин было достигнуто их местным поперечным армированием фибропластиковыми стержнями диаметром 6 мм и длиной около 1,0 м, размещавшимися в штрабах глубиной 30 мм с шагом 0,5 м, комбинированным с инъекционным заполнением трещин подвижным ремонтным составом (рис. 1.29, а). Усиление кладки опорных зон перемычек стеновых проемов было выполнено их внешним армированием фибропластиковыми элементами, изготовленными «по месту» на основе мононаправленных углеродоволоконных холстов (см. рис. 1.29, б).



Рис. 1.28. Многоквартирный жилой дом в поселке *Кумор* (*Республика Татарстан, Российская Федерация*), каменные конструкции несущих стен которого претерпели фибропластиковое усиление; по [42]

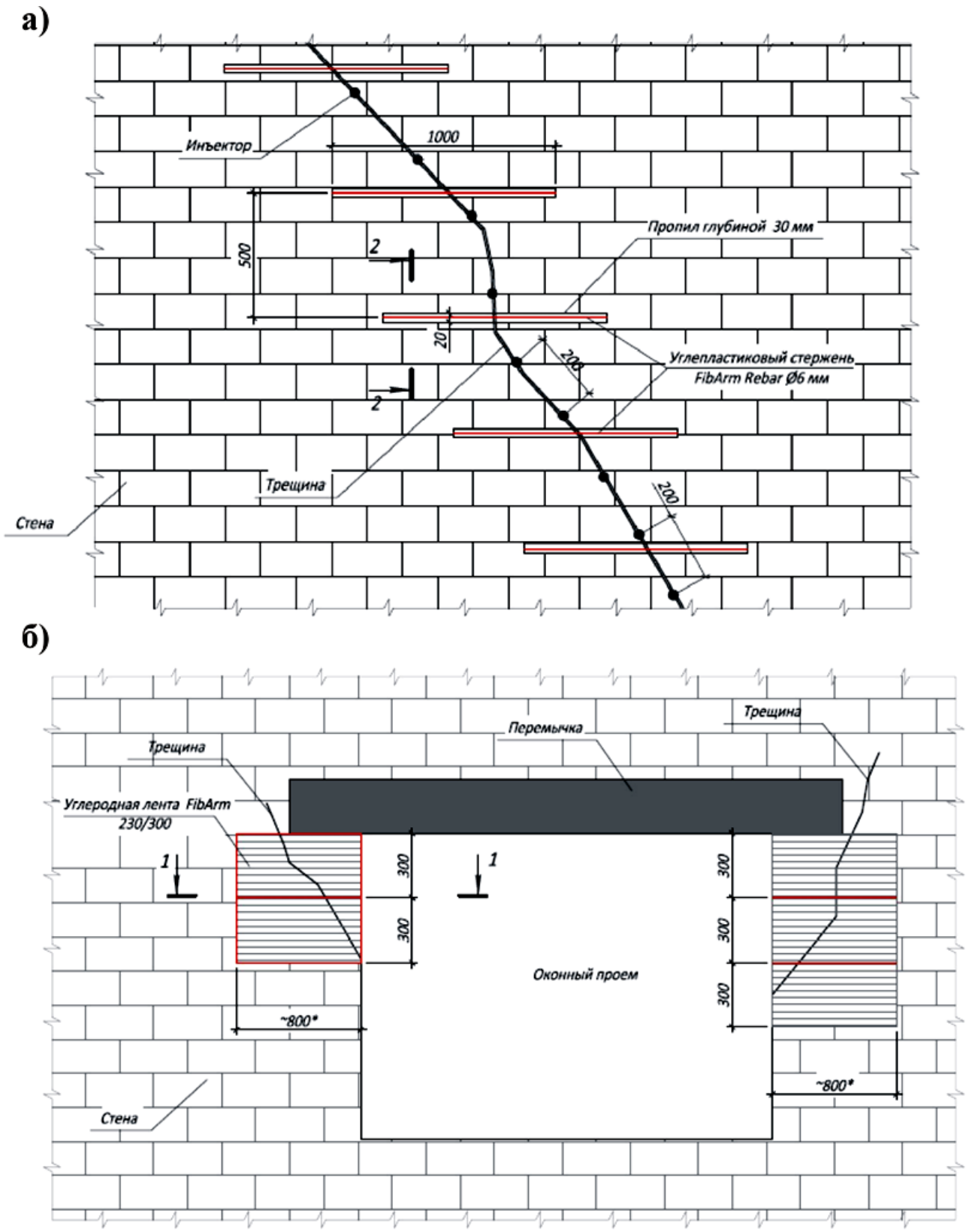


Рис. 1.29. Усиление несущих каменных стен жилого дома в поселке *Кумор* (*Республика Татарстан, Российская Федерация*): а — местным поперечным армированием углеродоволоконными стержнями, б — фибропластиковыми элементами, изготовленными «по месту» на основе мононаправленных углеродоволоконных холстов; по [42]

1.5. Современные тенденции применения композиционных материалов в строительстве

В настоящее время объемы применения композитных материалов в строительстве отличаются динамичным ростом, а их рынок демонстрирует существенное расширение.

Основной причиной все более широкого вовлечения фиброармированных композитов в строительную практику является поиск материалов, функциональные качества которых превосходят характеристики традиционных строительных материалов. Прогресс материаловедения и строительной химии постепенно привел к тому, что масштабы использования фиброармированных пластмасс, в частности, углеродопластиков, арамидопластиков, стеклопластиков и базальтопластиков, резко выросли. Однако, справедливости ради, необходимо отметить, что в настоящее время в составе потребляемого строительством общего объема стали, алюминия и пластмасс доля композитных материалов, составляет не более 1,5% [13].

В 2013 году общемировой рынок композитных строительных материалов оценивался примерно в 3,5 млрд. долларов США, а его прогнозируемый рост в период с 2012 по 2017 год составил 1,4 раза (см. рис. 1.30) при показателе совокупного среднегодового темпа роста (*Compound Annual Growth Rate — CAGR*) около 5,2% [48]. При этом в отличии от предыдущих десятилетий, в которые основную долю данного рынка составляли изделия вспомогательного назначения (декоративно-отделочные элементы, трубы, фитинги и т.д.), современные тенденции заставляют превалировать изделия конструкционного предназначения (элементы внешнего и внутреннего армирования в виде стержней, ламелей, лент, холстов и гибких сеток, профильные элементы различных сечений, канаты из высокомодульных материалов, фибра для армирования бетонных смесей и асфальта, панели наружного ограждения, полноразмерные мостовые конструкции и т.п.), которые, собственно, и обеспечивают рост потребления соответствующей строительной продукции.

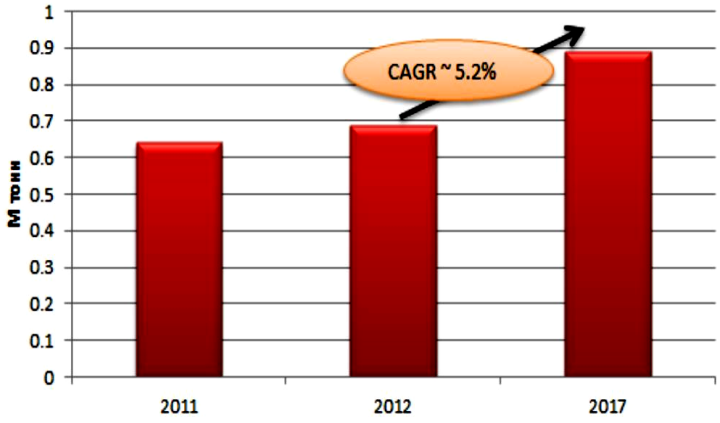


Рис. 1.30. Мировой рынок композитных материалов в строительстве, млн. т. (*CAGR* — совокупный среднегодовой темп роста, %); по [48]

В течение сорока лет цены на коммерчески доступные конструкционные волокна демонстрировали постепенное падение, а потребление данных материалов неуклонно возрастало, достигнув максимального прироста последнее десятилетие. Проекцией общемировых тенденций использования волоконноармированных материалов в строительстве на страны постсоветских экономик может служить статистическая информация о применении подобных конструкционных материалов в *Российской Федерации*, показывающая в период с 2010 по 2012 год увеличение потребления строительных материалов на основе стеклянных волокон примерно в 1,7 раза при показателе совокупного среднегодового темпа роста (*CAGR*) около 29% (рис. 1.31, а), материалов на основе базальтовых волокон в 1,2 раза при совокупном среднегодовом росте 9-10% (рис. 1.31, б) и углеродных волокон примерно в 2,9 раза при среднегодовом росте около 73% (рис. 1.31, в) [48].

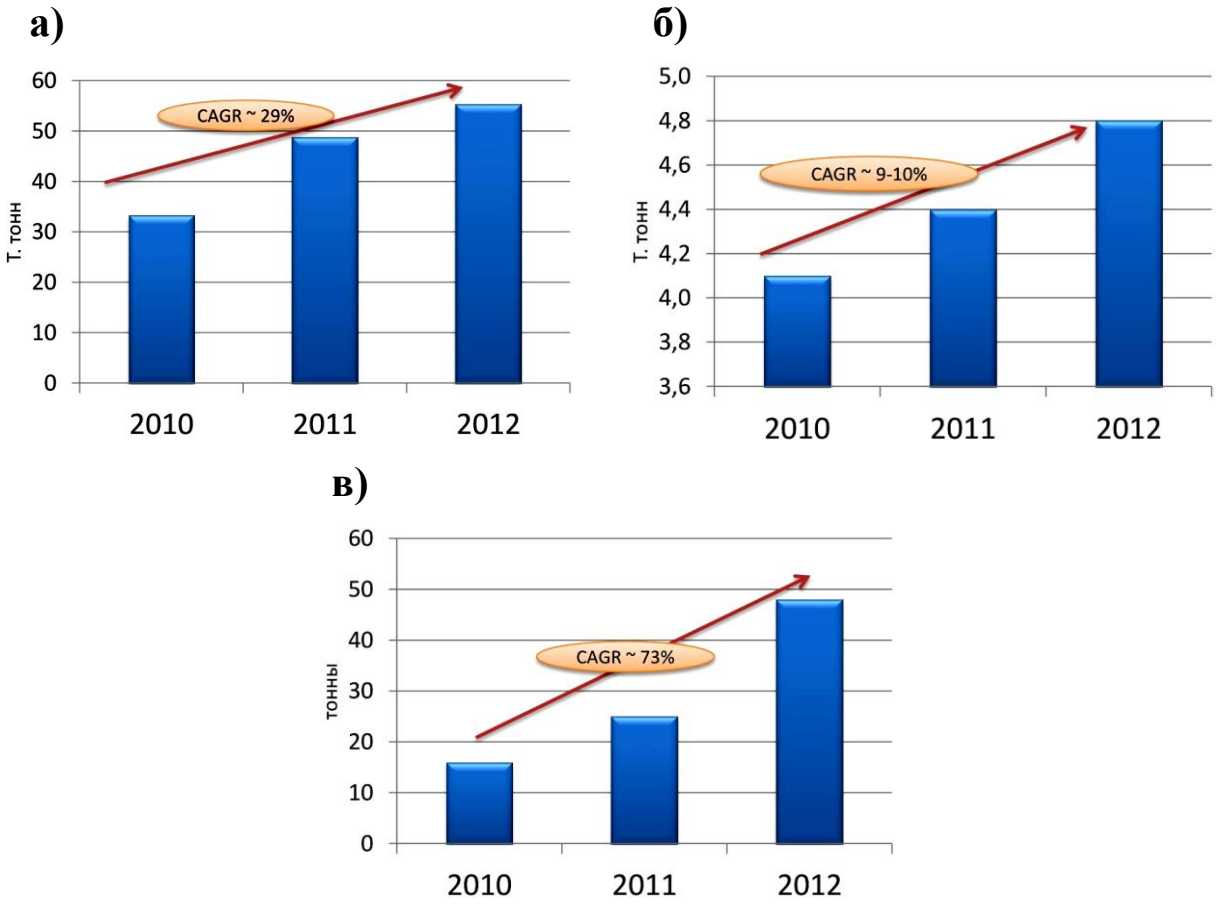


Рис. 1.31. Потребление в строительной отрасли *Российской Федерации* композитных материалов, изготовленных на основе: а — стеклянных волокон в тыс.т., б — базальтовых волокон в тыс.т., в — углеродных волокон в т. (*CAGR* — совокупный среднегодовой темп роста, %); по [48]

Как видно из последнего графика, наиболее динамично развивающимся, но в тоже время демонстрирующим наименьшие абсолютные показатели по-

требляемых объемов, является рынок строительных углеродных волокон. Относительная узость этого рынка объясняется практической новизной углеродных волокон, а также их высокой стоимостью. В тоже время данный вид конструкционных волокон, благодаря совокупности своих физико-механических свойств (см. п.п. 2.1 и 2.2), оценивается как наиболее перспективный материал армирования фибропластиков, в отношении которого прослеживается устойчивая тенденция снижения среднемировых цен, роста потребления и развития производственных мощностей, обеспечивающих из выпуск [49]. Как видно из соответствующих графиков (рис. 1.32) в ближайшие годы ожидается резкий рост потребления углеродных волокон, затрагивающий практически все отрасли современной промышленности. Строительство в этом плане не является исключением.

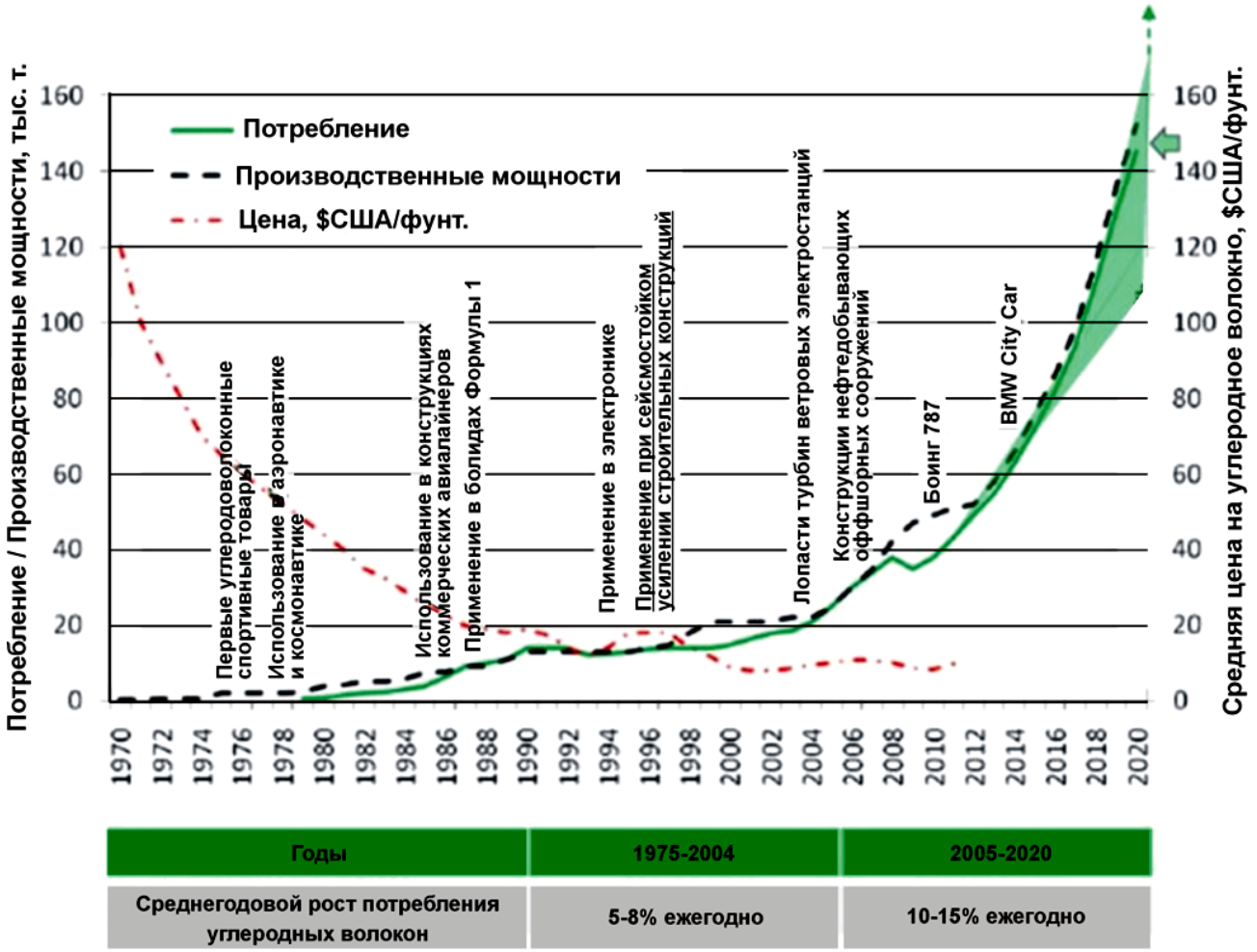


Рис. 1.32. Изменения среднемировых показателей цены, потребления и развития производственных мощностей по выпуску углеродных волокон; адаптировано по [49]

Нарастающее внедрение фиброармированных композитов в строительстве обуславливается совокупностью их физико-механических свойств, во многих случаях превосходящих аналогичные показатели других конструкционных материалов.

2. Материалы, используемые для изготовления конструкционных фибропластиков

2.1. Состав фибропластиков

Фиброармированные материалы на основе полимерных матриц (международное обозначение: ***FRP — fiber-reinforced plastics*** или, что тоже самое, ***fiber-reinforced polymers***) обычно рассматриваются как композитные, гетерогенные и анизотропные, отличающиеся преобладающим линейно-упругим характером деформирования, проявляющимся вплоть до момента разрушения. Обладая рядом преимуществ (малым весом, высокими прочностными свойствами, устойчивостью к коррозии и т.д.) они находят все более частое использование в новом строительстве, а также при усилении, восстановлении и реабилитации уже существующих конструкций.

Конструкционные фибропластики, являясь по своей сути макрогенными системами, изготавливаются из двух или более составляющих различной природы, обладающих достаточно разнородными физическими и механическими свойствами, в совокупности придающими комплексному материалу характеристики, существенно отличающиеся от тех, что проявляются исходными частями в отдельности. Фиброармированные пластики изготавливаются из полимерных матриц и армирующих волокон. Основные характерные показатели их свойств собраны в таблице 2.1.

Таблица 2.1

Характерные показатели свойств армирующих волокон и матриц фибропластиковых материалов в сравнении со сталью; адаптировано по [50]

Материал	**Модуль упругости, E, ГПа**	**Прочность при растяжении, σ_r, МПа**	**Относительная деформация при разрыве, ε_r, %**	**Коэффициент линейных температурных деформаций, α, 10^{-6} °C^{-1}**	**Плотность, ρ, гр./см^3**
1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
E-стекловолокно	70…80	2000…3500	3,5…4,5	5…5,4	2,5…2,6
S-стекловолокно	85…90	3500…4800	4,5…5,5	1,6…2,9	2,46…2,49
Высокомодульное углеродное волокно	390…760	2400…3400	0,5…0,8	-1,45	1,85…1,9
Высокопрочное углеродное волокно	240…280	4100…5100	1,6…1,73	-0,6…-0,9	1,75

1	2	3	4	5	6
Арамидные волокна	62…180	3600…3800	1,9…5,5	-2	1,44…1,48
Полимерные матрицы	2,7…3,6	40…82	1,4…5,2	30…54	1,10…1,25
Сталь	206	230…400 – предел текучести, 350…600 – предел прочности	20…30	10,4	7,8

Прочностные свойства строительных материалов определяются, главным образом, их способностью воспринимать усилия растяжения, сжатия, изгиба и сдвига. Сложность достижения оптимального уровня этих параметров в случае продольного армирования непрерывными волокнами связана с низкими прочностными характеристиками большинства видов волокон в поперечном направлении. Применение комбинированной ориентации волокон в композитах позволяет в некоторой степени компенсировать указанный недостаток.

Формы армирования фибропластиков могут предусматривать использование отдельных волокон, сплетенных из них нитей, пучков, жгутов, лент, одно- и многонаправленных тканей, матов, а также коротких рубленных волокон.

Из всех видов армирующей фибры наибольшие величины временной прочность и модуля упругости обнаруживают углеродные волокна. С конструкционной точки зрения они часто являются наиболее эффективными. Однако следует отметить, что потенциальные преимущества и недостатки имеют все виды широко используемых армирующих волокон, требующие от проектировщиков правильной оценки совокупности их свойств.

Связующие композиты матрицы принято рассматривать как изотропные, в то время как армирующая составляющая (за исключением стеклянных волокон) является анизотропной частью материала. Характеристиками, определяющими область применения фибропластиков, являются их геометрия (форма и протяженность), ориентация волокон (случайная ориентация делает материал подобным изотропному; направленная ориентация придает ему анизотропность) и степень концентрации фибры (объемное содержание и дисперсия). В большинстве случаев конструкционные композиты представляют собой неоднородные анизотропные материалы.

Физико-механические свойства фибропластиков определяются характеристиками применяемых волокон, текстурной формой и структурой армирующего наполнителя, упруго-прочностными свойствами полимерных матриц, качеством сцепления по границе «волокно-матрица» и технологией изготовления.

Их физико-механические свойства в трех перпендикулярных направлениях обычно отличаются весьма существенно. Анизотропия свойств особенно ярко проявляется при однонаправленном расположении армирующих волокон.

В зависимости от технологии изготовления фибропластиков волокна обычно составляют около 30…70% их объема и приблизительно 50% веса. При изготовлении фибропластиков по месту применения (см. п. 3.3.3), содержание волокна в большинстве случаев не превышает 30% объема материала, для фибропластиковых элементов заводской готовности, например, ламинированных или изготовленных пултрузионным способом, (см. п. 3.3.2), объемное содержание волокон может достигать 65…70%.

В настоящее время производителями могут предлагаться конструкционные фибропластики на основе волокон одного вида (см. табл. 2.1) или их комбинаций, т.е. так называемые ***гибриды*** (***hybrids***).

Гибридные фибропластики представляют собой особый класс многослойных материалов, изготавливаемых из волокон различных видов и свойств (например, композиты на основе эпоксидных матриц, объединяющих углеродные и арамидные волокна или арамидные и алюминиевые волокна), в совокупности придающих им специфические свойств, во многом отличающиеся от характеристик отдельно взятых исходных волокон. Гибридные материалы могут сочетать, например, высокую прочность, жесткость и выносливость со стойкость к ударным воздействиям, а также демонстрировать стоимость, несколько более низкую, в сравнении с материалами, изготовленными только на основе высокопрочных или высокомодульных волокон.

Выраженные анизотропные характеристиками определяют зависимость механических свойств фиброармированных пластиков от выбора их конструкционных типов. Обычно эти материалы принято рассматривать в соответствии с осями симметрии (естественными осями). Пример мононаправленного фибропластикового материала приведен на рисунке 2.1.

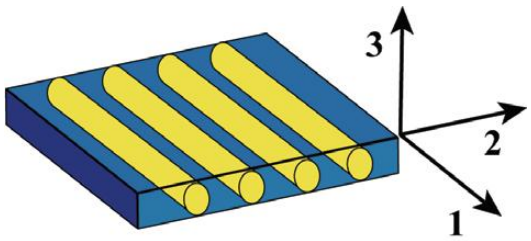


Рис. 2.1. Схема мононаправленного фибропластикового материала (1, 2, 3 — условные оси); по [50]

Отношение между значениями характеристик, найденных в соответствии с направлениями различных осей композитных материалов, определяют их

анизотропные коэффициенты. Некоторые величины анизотропных коэффициентов мононаправленных фибропластиков приведены в таблице 2.2.

Таблица 2.2

Характерные величины анизотропных коэффициентов мононаправленных фибропластиковых материалов; по [50]

Фибропластики: волокна / матрица	E_1/E_2	E_1/G_{12}	σ_1/σ_2	α_1/α_2
Волокна карбида кремния / керамика	1,09	2,35	17,8	0,93
Борные волокна / алюминий	1,71	5,01	11,6	0,30
Волокна карбида кремния / алюминий	1,73	5,02	17,0	0,52
S-стекловолокно / эпоксид	2,44	5,06	28,0	0,23
E-стекловолокно / эпоксид	4,42	8,76	17,7	0,13
Борные волокна / эпоксид	9,27	37,40	24,6	0,20
Углеродное волокно / эпоксид	13,60	19,10	41,4	-0,07
Арамидные волокна / эпоксид	15,30	27,80	26,0	-0,07
где: E_i — модуль упругости, G_i — модуль сдвига, σ_i — предел прочности, α_i — коэффициент линейных температурных деформаций (направление осей смотри на рис. 2.1)				

Свойства фиброармированных пластиков определяются природой их исходных составляющих. Для получения композитов с высокой механической прочностью не достаточно использование высокопрочных волокон. Важное значение имеет хорошая адгезия между волокнами и матрицей, обычно достигаемая при помощи дополнительных компонентов, располагающихся на поверхности фибры в виде очень тонких разделительных слоев (часто толщиной в один атом) и обеспечивающих необходимую совместимость с органическими смолами (рис. 2.2). Разделительный слой во многом обусловливает окончательные свойства материала. Разрушение фиброармированных пластиков часто вызывается недостаточным сцеплением между матрицей и волокнами, что заставляет производителей очень тщательно подбирать компоненты, составляющие основу разделительных слоев.



Рис. 2.2. Составляющие поперечного сечения однонаправленного фиброармированного композита; адаптировано по [50]

Наивысшие показатели работоспособности фибропластиков удается достичь при мононаправленном расположении непрерывных, так называемых «бесконечных», волокон. Наиболее низкие характеристики механических свойств обычно показываю композиты, армированные короткими, беспорядочно расположенными волокнами.

При действии усилий, направленных в разных направлениях, применение может находить двунаправленное или многонаправленное армирование, осуществляемое с использованием различных армирующих тканей, располагаемых в один или несколько слоев.

Достаточно часто композиционные материалы обладают продольной прочностью и жесткостью (углеродоволоконные пластики), превышающими аналогичные показатели традиционных конструкционных материалов, и таким образом являются эффективными в тех случаях, когда важен минимальный вес строительных конструкций. Конструкции, выполненные из композитных материалов, обычно имеют вес, составляющий приблизительно половину веса равножестких конструкций, изготовленных из традиционных строительных материалов [50].

2.2. Армирующие волокна

Основным назначением армирующих волокон является обеспечение прочности, жесткости и термической стабильности соответствующих фибропластиков. Для обеспечения названных целей волокна должны иметь существенные величины модулей упругости и пределов прочности, демонстрировать незначительное варьирование диаметров и прочностных характеристик отдельных образцов, давать возможность одновременного армирования в различных направлениях, а также обеспечивать удобство своего практического использования.

Диаметры различных видов конструкционных волокон могут меняться в диапазоне от *6* до *15 мм*. Однако некоторые производители в настоящее время стремятся к увеличению указанного размера до *20…30 мм*. Вызвано это сопутствующим снижением стоимости волокон и возможностью упрощения технологического процесса их пропитки матричными составами [51]. Но при этом следует учитывать и то, что с увеличением диаметра волокон возрастает риск негативного влияния дефектов их поверхности и снижается прочность. Пример взаимозависимости прочности и диаметра углеродных волокон представлен на рисунке 2.3.

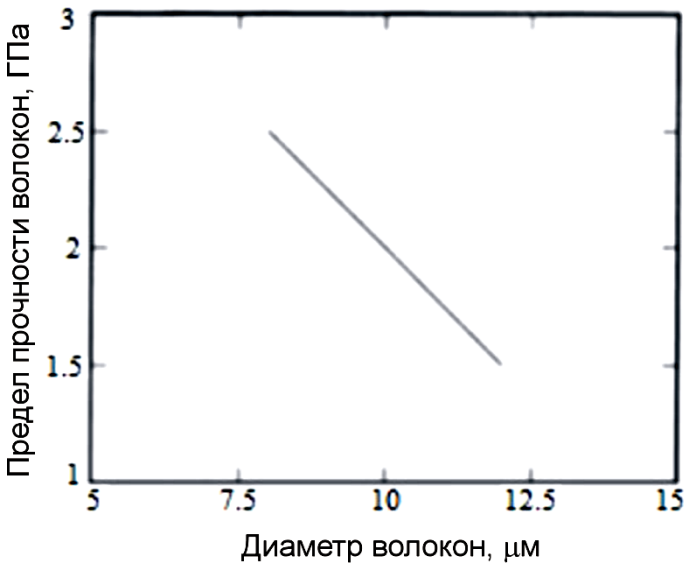


Рис. 2.3. Взаимозависимость диаметра и прочности углеродных волокон; адаптировано по [51]

Размеры сечения армирующих волокон влияют также на жесткость, пластичность и способность к перераспределению напряжений в композитах, определяя площадь поверхности контакта волокон со связующими матрицами, обратно пропорциональную их диаметру.

Увеличение диаметра волокон ограничивается также требованием исключения разрушения при их случайном изгибе в процессе изготовления фибропластиковых элементов, вероятность которого значительно возрастает с увеличением данного размера.

Строительные стали и армированные непрерывной фиброй композиты демонстрируют различные физико-механические свойства. Одним из главных отличий является то, что стали проявляют практически идеальные упруго-пластические свойства, в то время как конструкционные фибропластиковые материалы обнаруживают линейно-упругую работу, диктуемую особенностями механических свойств армирующих волокон (рис. 2.4, 2.5). Данное обстоятельство существенно влияет на расчет и проектирование элементов строительных конструкций.

Наиболее часто для армирования пластиков, применяемых в строительстве, используются стеклянные, углеродные и арамидные волокна (табл. 2.1). Их моноразмерная структура, предполагающая меньшее содержание возможных дефектов, обеспечивает материалу большую прочность и жесткость. Кроме того, некоторое практическое применение в настоящее время находят и другие волокна (например, борные и керамические). Различные виды конструкционных волокон имеют свои преимущества и недостатки.

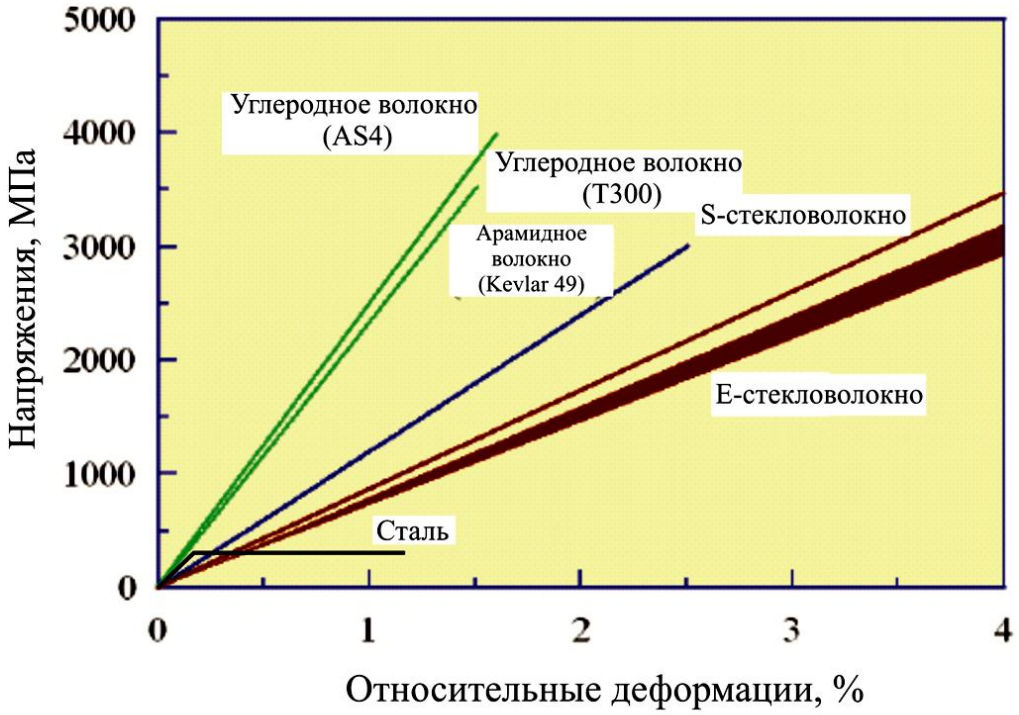


Рис. 2.4. Характерные зависимости напряжений и относительных деформаций армирующих волокон в сравнении с показателями конструкционных сталей; адаптировано по [50]

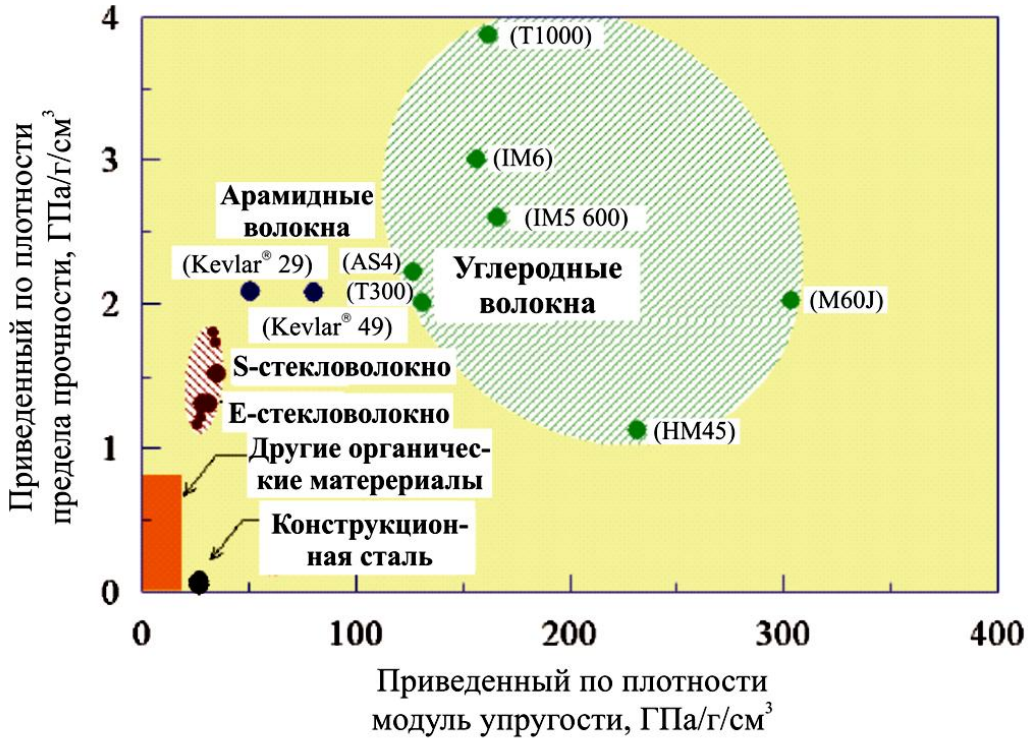


Рис. 2.5. Зависимости относительной прочности и относительного модуля упругости армирующих волокон в сравнении с показателями конструкционных сталей; адаптировано по [50]

2.2.1. Формы коммерчески доступных волокон

Армирующие волокна изготавливают из очень тонких непрерывных структур — ***филамент***, достаточно неудобных при самостоятельном использовании. Малое сечение отдельных филамент (диаметр обычно около *10 мкм*) заставляет производителей группировать их в волокна (рис. 2.6), состоящие из:

— не скручиваемых пучков непрерывных, параллельно направленных филамент (международное название: ***tow***),
— непрерывных пучков скрученных филамент, удобных для изготовления текстильных материалов (международное название: ***yarn***),
— групп отдельных пучков филамент, собранных в нити со слабым скручиванием или без него (международное название: ***roving***).

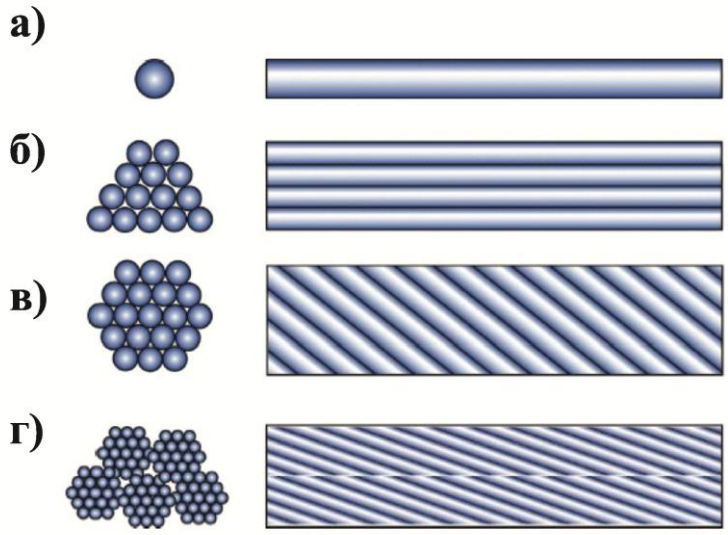


Рис. 2.6. Формы армирующих волокон: а — монофиламент, б — не скручиваемый пучок непрерывных, параллельно направленных филамент (*tow*), в — пучок скрученных филамент (*yarn*), г — группа отдельных пучков филамент, собранных со слабым скручиванием или без него (*roving*); по [50]

Комбинируя группы различных форм волокон, получают ленты, в которых они могут размещаться параллельно или с взаимной прошивкой. Современная классификация армирующих волокон практически полностью позаимствована у текстильной промышленности. Филаменты, собираемые в пучки со скручиванием (*yarn*), в основном характеризуются своим химическим составом или массой на единицу длины.

Единицей погонной массы филамент является величина ***TEX***, эквивалентная массе километровой длины волокна, выраженной в граммах (международный стандарт *ISO 2974:2000(E)*). В качестве другой единицы измерения линейной массы волокон, сейчас уже устаревшей, может использоваться ***den***

(***denier*** или ***денье***), равная *0,111 TEX* или 1 грамму на каждые 9 километров длины волокон. В настоящее время производители обычно маркирует волокна с указанием размерности в единицах *TEX*. Углеродные волокна в форме *yarn* также могут классифицироваться с помощью символа «***k***», обозначающего *1000 филамент* в составе волокна (*1k = 66,6 TEX = 1000 филамент*, *3k = 200 TEX = 3000 филамент* и т.д.).

Армирующие волокна обычно коммерчески доступны в виде тканей. Взаимное положение различных форм волокон определяет свойства такого материала: волокна главного направления маркируются как ***основа*** (международное название: ***warp***), а перпендикулярные — как ***уток*** (соответственно: ***weft***).

2.2.2. Виды армирующих волокон

2.2.2.1. Стеклянные волокна



Рис. 2.7. Пучок стеклянных волокон

Стеклянны волокна (рис. 2.7) обычно используются для изготовления и усиления конструкций, к работе которых предъявляются не очень высокие эксплуатационные требования. Важными их чертами являются высокая прочность (см. табл. 2.1) и низкая стоимость. Именно последний фактор определяет наибольшее использование стекловолокна в строительстве, составляющего около 90% рынка конструкционных волокон [51].

К преимуществам данного вида волокон также относят относительно высокую сопротивляемость ударным воздействиям, определяемую значительным деформированием, предшествующим их разрушению.

Главными конструкционными недостатками стеклянных волокон являются относительно низкий модуль упругости, чувствительность к воздействиям окружающих сред, высокая механическая повреждаемость и большой вес.

Сырьем для изготовления стеклянных волокон служит кремний с тетраэдрической структурой (SiO_4), к которому в разной пропорции добавляют оксиды различных металлов (алюминия, железа, магния, бора и др.), упрощающих процесс варки или модифицирующих свойства материала [50, 51].

Технология производства стекловолокна предусматривает изготовление соответствующих линейных структур из расплава песка, глинозема и известня-

ка. Сухое сырье перемешивается и плавится при температуре около 1260°С (в некоторых случаях температура может достигать 1400°С). Приготовленный расплав под действием собственного веса пропускается через специальные платиновые формы с мельчайшими калибровочными отверстиями на дне (*фильеры*), в результате чего со скоростью примерно 25 м/с образуются бесконечные элементарные волокна (*филаменты*, см. п. 2.2.1), наматываемые при помощи механических устройств на бобины [51-53].

Полученные филаменты группируются в пряди, обычно по 204 штуки. Одиночные филаменты, используемые в дальнейшем при производстве конструкционных композитов, изготавливают с диаметром около *10 мкм* (хотя возможный диаметр таких волокон, в зависимости от размеров отверстий фильеры и скорости вытягивания, в принципе может колебаться в приделах *3…100 мкм*) и часто покрываются тонким слоем органического грунтующего состава, представляющего собой смесь вяжущих разделительного слоя, а также защищающих, смазывающих и антистатически обрабатывающих веществ (технологическая схема изготовления стеклянных волокон приведена на рисунке 2.8).

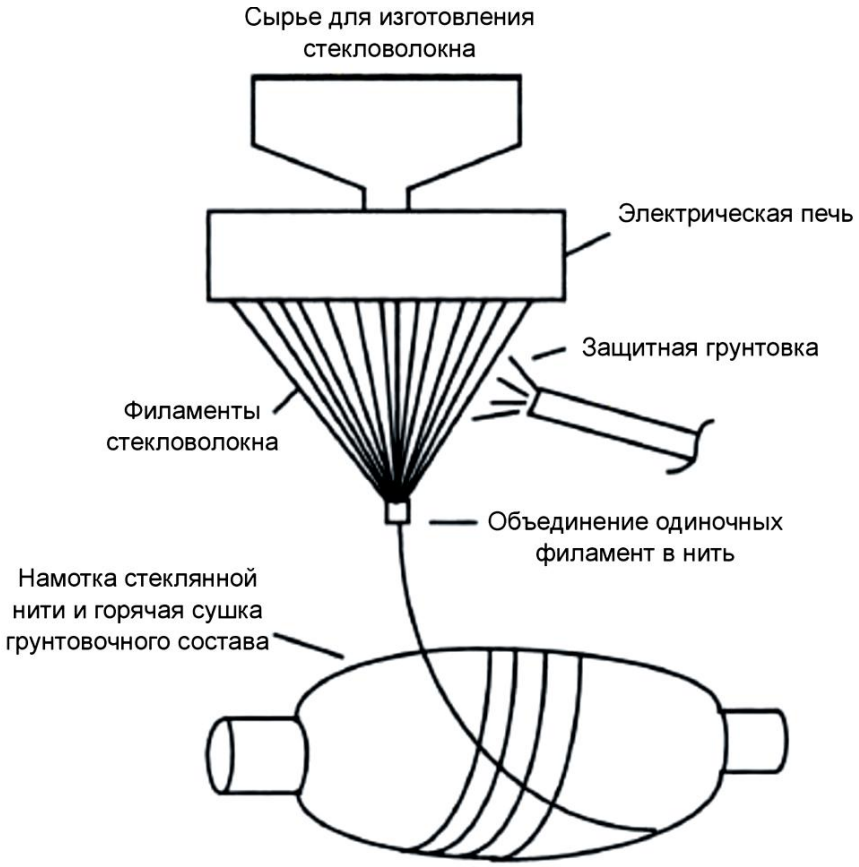


Рис. 2.8. Технологическая схема изготовления стеклянных волокон; адаптировано по [51]

Из одиночных филамент первоначально изготавливают пучки в форме *yarn* (рис. 2.6, в), в дальнейшем собираемые, в основном без скручивания, в волокна с формой *roving* (рис. 2.6, г). В строительстве преимущественно находят применение волокна с показателем погонной массы более *2000 TEX*.

Стеклянные волокна обладают модулем упругости меньшим, чем у углеродных и арамидных волокон (например, для Е-стекловолокна составляющим порядка *70 ГПа*). На предел прочности при растяжении стеклянных волокон в значительной степени влияют микроскопические дефекты поверхности и царапины. Их стойкость к абразивным воздействиям довольно низка, что требует соблюдения особых предосторожностей при практическом использовании. Кроме того стекловолокну под нагрузкой свойственны ползучесть и низкий усталостный предел выносливости. Улучшение сцепления между волокнами и матрицей, а также защита от щелочей и влаги, обеспечивается слоем грунтовочного состава (см. выше). Такая обработка позволяет повысить долговечность, а также выносливость (статическую и динамическую), конечных композиционных материалов.

Незащищенные стеклянные волокна (например, Е-стекловолокно) обычно активно разрушаются во влажной и щелочной среде, что требует их поставки со специальным покрытием. Учитывая возможность повреждения защитных слоев при практическом использовании, стеклянные волокна рекомендуются применять при отсутствии щелочей (например, для армирования асфальта) или в тех случаях, когда они полностью покрыты матричными смолами в составе фибропластиков. В качестве связующих стеклянные волокна матриц не допускается использование водо- и паропроницаемых составов.

Стеклянные волокна делятся на подвиды в соответствии с особенностями технологического процесса их изготовления, вводимых добавок химических элементов и конечного назначения. Наиболее частое практическое использование находят Е- и S-стекловолокна.

***Е-стекловолокна* (*E-glass*)** являются наиболее распространенным подвидом. В составе маркировки символ «*Е*» обозначает «*электрического назначения*», т.к. первоначально данные волокна предназначались для использования в электротехнической промышленности. В настоящее время Е-стекловолокна, обладающие высокой прочностью, хорошей термической и электрической сопротивляемостью, являются наиболее дешевыми конструкционными волокнами, представленными на рынке.

Е-стекловолокна считаются чувствительными к физическим воздействиям и окружающим средам, способным существенно понижать их прочность.

Влажные среды приводят к деградации физико-механических свойств этих волокон. Воздействия слабых щелочей и кислот им также противопоказано.

Модуль упругости таких волокон составляет около *70…80 ГПа*, а фибропластиков на их основе, с объемной наполняемостью волокнами 75%, — порядка *45…50 ГПа*.

***C-стекловолокна* (*C-glass*)** используются в случаях, когда необходима повышенная устойчивость к химическим воздействиям. Символ «*C*» обозначает устойчивость к коррозии (англ. *corrosion*). Прочность этих волокон, модуль упругости и электрическое сопротивление несколько ниже, чем у E-стекловолокна.

***E-CR-стекловолокна* (*E-CR-glass*)** имеют свойства, подобные E-стекловолокну, однако не содержат бора. Их химическая стойкость, особенно при воздействии кислотами, выше, чем у E-стекловолокна.

***S2- и R-стекловолокна* (*S2-, R-glass*)** главным образом используются при наличии высоких требований, предъявляемых к их работоспособности (например, в авиационной и космической промышленности). Символ «*S*» обозначает повышенное содержание окиси кремния (англ. *silica*), а символ «*R*» — повышенную стойкость (англ. *resistance*). В сравнении с E-стекловолокном их предел прочности выше примерно на 40%, а продольная жесткость — на 20%. Данные волокна более устойчивы к воздействиям высокими температурами и имеют больший усталостный предел выносливости.

Недостатками S2- и R-стекловолокон являются относительно высокая стоимость и совместимость только с определенными матричными составами фибропластиков. В то время как E-стекловолокна могут использоваться совместно с практически всеми доступными на рынке системами связующих смол.

Благодаря более высоким механическим характеристикам на основе данных волокон могут быть получены фибропластики с модулем упругости до 60 ГПа, при мононаправленном расположении волокон, и 25 ГПа, при двунаправленном расположении.

***AR-стекловолокно* (*AR-glass*)** является стойким к щелочным воздействиям подвидом. Как показывают испытания, проводившиеся производителями (компания *S&P FRP Systems*) на воздействия рядом агрессивных сред [54], подобные волокна имеют хорошие показатели сохранения механических свойств, веса и качества внешних поверхностей (рис. 2.9).

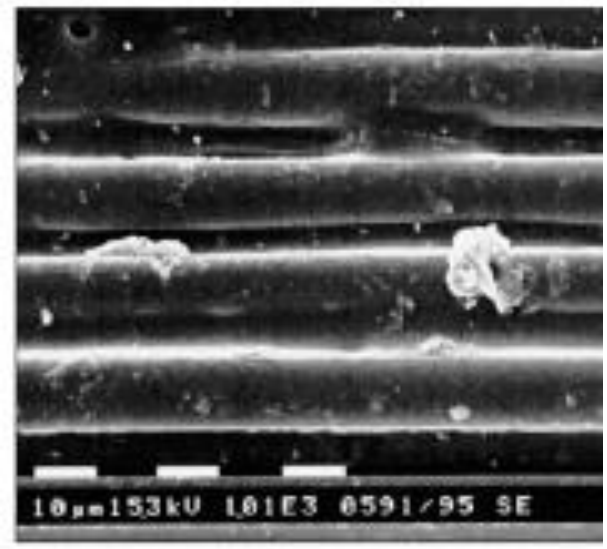


Рис. 2.9. Поверхность *AR-glass* волокон после 28 суток сложно-агрессивного воздействия с применением кислот, солей и щелочей [54, 55]

Стеклянные волокна могут подвергаться практически всем видам текстильной переработки, из них изготовлению различные холсты, полотна и лент (тканые и нетканые), см. рис. 2.10. Одна из основных современных областей применения стекловолокна и текстильных материалов на их основе — использование в качестве армирующих составляющих фибропластиковых композитов.



Рис. 2.10. Образец стекловолоконной ткани; по [51]

Внешнее армирование фибропластиками на основе стеклянных волокон обычно применяется в отношении железобетонных конструкций, потенциально подверженных сейсмическим воздействиям. Для повышения ударостойкости бетонных конструкций рекомендуются *AR-стекловолокна.*

Фибропластики, армированные стекловолокном, обычно обозначаются как ***GFRP (glass fiber-reinforced plastics)***.

2.2.2.2. Углеродные волокна



Рис. 2.11. Пучки углеродных волокон, по [56]

Углеродные волокна (рис. 2.11) принято рассматривать как наиболее долговечный, обладающий наибольшим пределом выносливости и наименее подверженный вредным воздействиям окружающих сред вид широко используемых конструкционных волокон. Применяют эти волокна обычно в ответственных конструкциях, требующих сочетания высокой прочности и жесткости с низком весом. Главным недостатком углеродных волокон является высокая стоимость, превышающая соответствующие показатели других видов наиболее распространенных конструкционных волокон.

Углеродные волокна характеризуются высокими величинами модуля упругости и предела прочности, превышающими аналогичные показатели стеклянных и арамидных волокон (см. табл. 2.1). Волокнам данного вида присуще хрупкое разрушение, сопровождаемое относительно низким поглощением энергии. Углеродные волокна менее подвержены разрушению вследствие ползучести и усталости; при эксплуатации им свойственно весьма незначительное снижение длительного предела прочности [1- 4, 50, 57, 58].

По своей природе ***углеродное волокно*** (или как его еще часто называют ***карбоновое волокно*** или просто ***карбон***, от англ. ***carbon***) представляет синтетическое или природное органическое волокно, нагретое до температуры полного обугливания и состоящее в основном из атомов углерода, соединенных в кристаллы, расположенные параллельно его длине [3, 57-59]. Диаметр углеродных волокон обычно составляет порядка *0,005…0,010 мм* (*5…10 мкм*).

Материал обладает гексагональной кристаллической структурой с атомами углерода, образовывающими плоские структуры, объединяемые вместе поперечными связями, гораздо более слабыми, чем те, что соединяют атомы углерода в плане (ковалентными связями). В связи с этим модуль упругости и прочность очень высоки вдоль оси волокон, а в поперечном направлении имеют значительно меньшие величины (демонстрируют существенную анизотропию) [50].

Структура углеродных волокон не является полностью кристаллической как у графита. Употребляемый термин «***графитовые волокна***» в большинстве случаев используется для обозначения волокон с содержанием углерода более

99%. Термином «***углеродные волокна***» обычно определяются волокна, содержащие порядка *80…95%* углерода.

Первые прототипы волокон, условно относимые к углеродным, получили известность еще в 1880 году благодаря идеи Эдисона об их использовании в качестве нитей накаливания электрических ламп. Однако, вскоре, с внедрением вольфрамовой проволоки, о них забыли. В настоящее время считается, что приоритет создания углеродных волокон, в современном их понимании, принадлежит Британии, где в *Фарнборо* (*Farnborough*) в 1910-х годах были проведены базовые исследования, легшие в основу создания данного материала.

Интерес к практическому использованию углеродных волокон возник в середине прошлого века в связи с поисками новых материалов, способных воспринимать высокие усилия и многотысячные температуры. Первое свое широкое использование они нашли в программе *NASA* при постройке космических кораблей. Затем углеродными волокнами заинтересовались военные, применившие их высокие прочностные свойства в авио- и судостроении, а также для изготовления элементов стрелковой техники и защитной амуниции. После чего углеродные волокна засекретили до 1967 года, когда они впервые в ограниченном количестве и под строгим контролем государства появились на английском рынке. Только в 1981 г. новый материал стал по настоящему широко известен в связи с созданием *Джоном Барнардом* кузова спортивного автомобиля *формулы F1* для команды *McLaren*.

Процессы изготовления углеродных волокон, по сравнению со стекловолокном, являются значительно более сложными и требующими большего энергопотребления (рис. 2.12). Современные технологии их производства в основном основаны на пиролизе (термическом разложении органических веществ при отсутствии кислорода) полиакрилонитрильных (ПАН) или вискозных волокон, в результате которого в структуре последних остаются главным образом системы атомов углерода. В отдельных случаях термическому разложению также могут подвергаться синтетические волокна, выполненные из фенольных смол, лигнина, каменноугольных и нефтяных пеков. В настоящее время в качестве исходного сырья наиболее часто используются ПАН волокна (рис. 2.13). Процесс пиролиза может также сопровождаться направленной механической обработкой изготавливаемых волокон.

На первом этапе производства ПАН волокна «*стабилизируются*» при температуре *200…240°C* в течении примерно 24 часов, что приводит к ориентированию их молекулярной системы в направлении прикладываемых нагрузок с образованием, так называемых, «лестничных» структур, характеризуемых появлением поперечных химических связей между макромолекулами полимера.

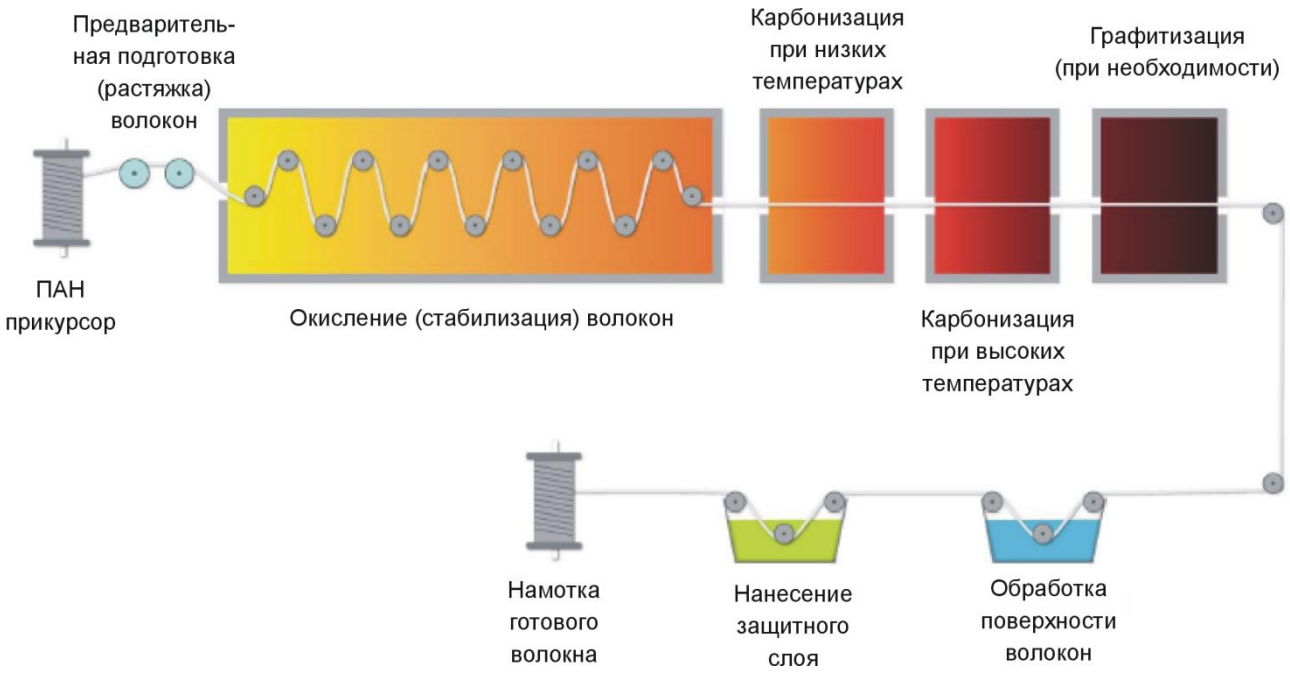


Рис. 2.12. Последовательность процессов классической технологии изготовления углеродных волокон; адаптировано по [49]



Рис. 2.13. ПАН (полиакрилонитрильные) волокна на катушках, по [56]

На втором этапе производится «*карбонизация*» в инертной среде (например, азота или аргона) при температурах *1000…1600°C*, удаляющая ненужные химические компоненты и сохраняющая углерод. При этом образуются структуры, состоящие на 80…95% из элементарного углерода и обладающие высокой прочностью и продольной жесткостью.

Далее, в случае необходимости, могут быть получены кристаллические структуры, подобные графиту. Опционный процесс «*графитизации*» ранее уже карбонизированного волокна также производится в инертной среде при температурах до *3000°C* и позволяет достичь кристаллической структуры, включающей до 99% углерода.

Наибольшей прочностью обладают волокна, которые на этапе карбонизации, при нагреве до *1400…1600°C*, приобретают мелкокристаллическую структуру. Наиболее высокомодульные образцы получают в результате растяжения

волокон на последней стадии изготовления при температурах около *2700…3000°C*. Морфологическое строение некоторых типов углеродных волокон представлено на рисунке 2.14.

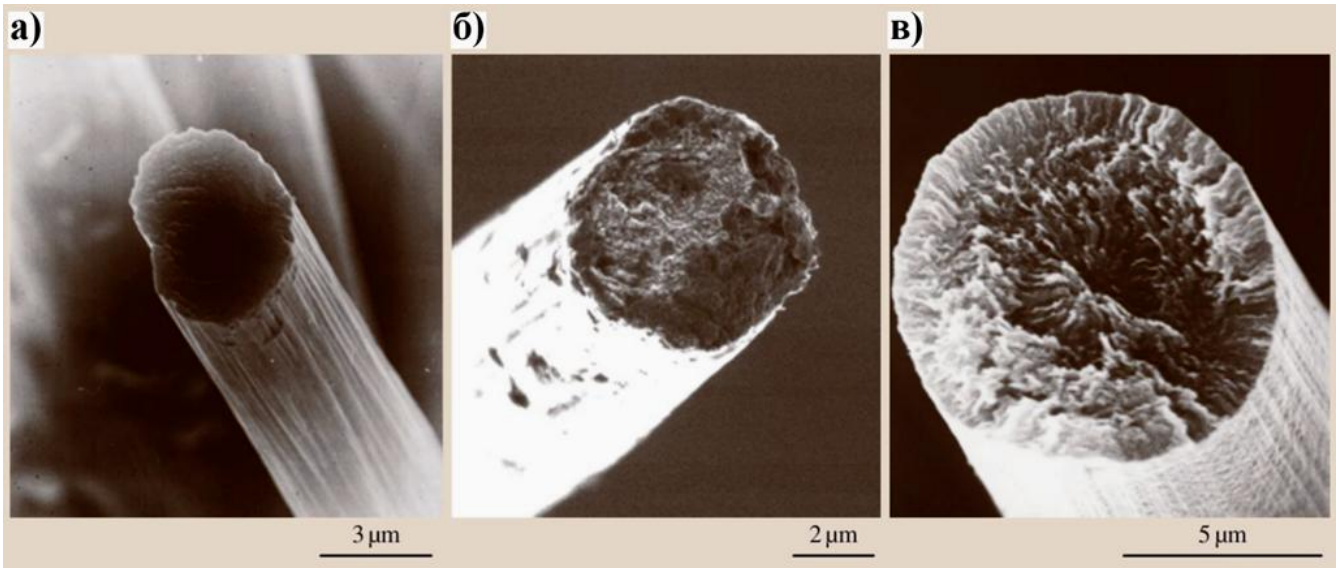


Рис. 2.14. Морфологическое строение некоторых типов углеродных волокон: а — высокопрочных, изготовленных на ПАН основе, б — высокомодульных, изготовленных на ПАН основе, в — изготовленных на основе пека; по [60]

Углеродные волокна принято подразделять на ***высокопрочные*** и ***высокомодульные*** (в составе последних иногда отдельно выделяют еще и ***ультра высокомодульные волокна***). Четкая, международно-признанная классификация, учитывающая соотношения показателей прочности и продольной жесткости, в настоящее время отсутствует. Однако наиболее часто (см. табл. 2.1, приведенную по [50]) к высокопрочным волокнам относят те, что характеризуются пределами прочности порядка *4000…5000 МПа* и модулем упругости *240…280 ГПа*, а к высокомодульным — имеющие модуль упругости около *390…760 ГПа* и предел прочности *2400…3400 МПа* (к ультра высокомодульным волокна относят при модуле упругости более *550 ГПа*). Один из альтернативных, более сложных вариантов классификации углеродных волокон, представлен на рисунке 2.15, а.

Углеродные волокна значительно превосходят по прочности, продольной жесткости и выносливости стеклянные и арамидные волокна, демонстрируют высокую сопротивляемость щелочам и различным видам растворителей, не впитывают влагу, но при этом являются более хрупкими и менее технологичными, а также отличаются значительно большей стоимостью.

Существенным недостатком рассматриваемых волокон является низкое деформирование, предшествующее разрушению, отражающееся на способно-

сти воспринимать ударные воздействия. Компенсировать данную особенность удается сочетанием углеродных волокон с более деформативными видами материалов, такими как стеклянные или арамидные волокна.

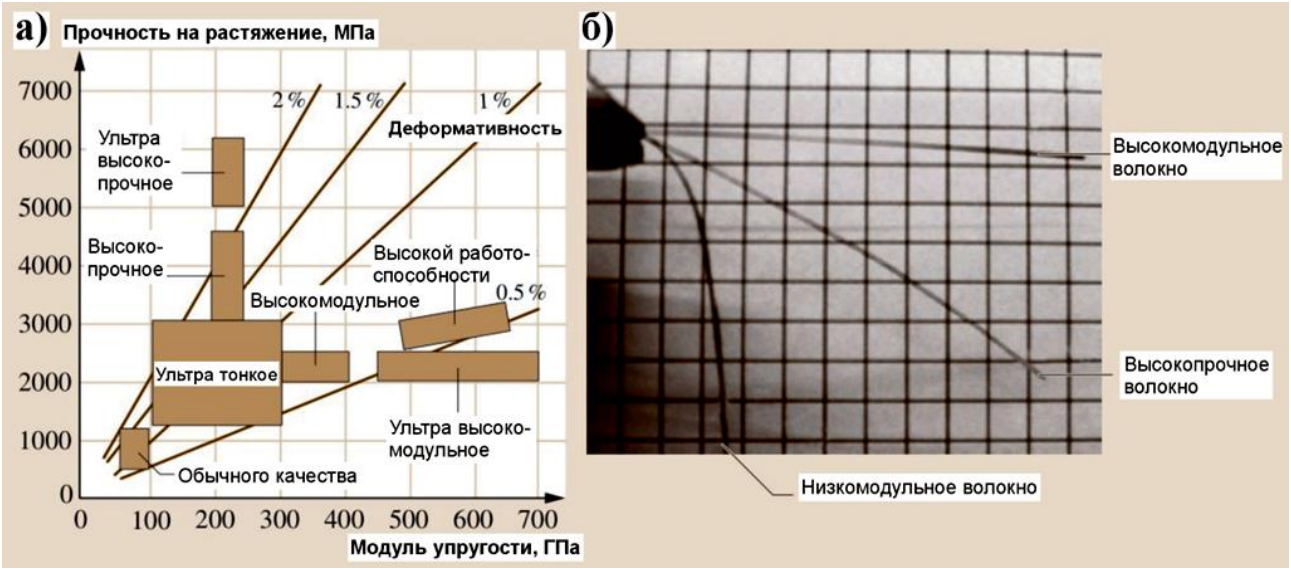


Рис. 2.15: а — механические характеристики различных типов углеродных волокон, б — визуальное сравнение механических свойств высокопрочных и высокомодульных углеродных волокон; адаптировано по [60]

Еще одним характерным свойством углеродных волокон выступает низкое термическое деформирование, проявляющееся в различных ситуациях, как их преимущество, так и как недостаток, приводящий к появлению дополнительных напряжений в соединениях с другими конструкционными материалами, обладающими большей термической деформативностью (например, со сталью). Кроме того волокна этого вида отличаются хорошей температурной и электрической проводимостью, а также биологической инертностью.

Общая химическая инертность и низкая поверхностная энергия, присущие углеродным волокнам, обусловливают существенно более худшее, в сравнении со стекловолокном, их смачивание растворами и расплавами матричных материалов, что в итоге приводит к несколько пониженной прочности сцепления на границе «волокно-матрица».

Отдельные филаменты углеродных волокон обычно собираются в пучки формы *tow* (рис. 2.6, б) в количестве от *400* до *160 000* штук.

Углеродные волокна, также как и остальные виды конструкционных волокон, часто подвергаются различным видам текстильной переработки с изготовлением холстов, полотен и лент, см. рис. 2.16. Основное их назначение заключается в армировании соответствующих композиционных материалов.

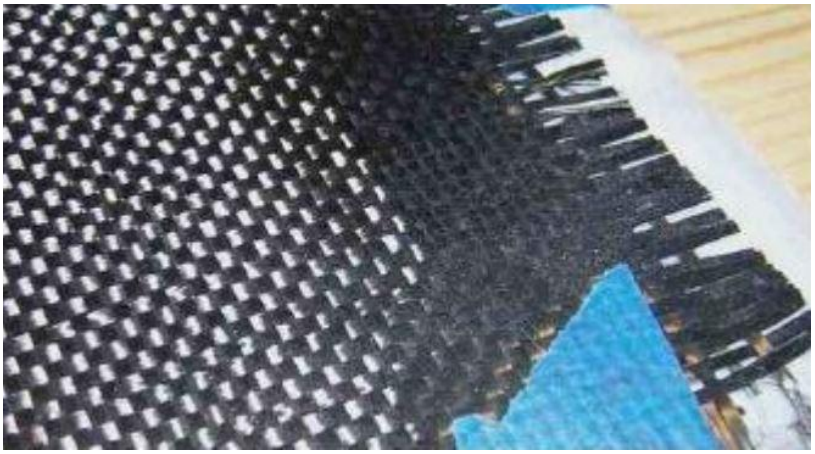


Рис. 2.16. Образец углеродоволоконной ткани; по [51]

Современные композиты, изготовленные на основе углеродных волокон, благодаря своим необычным физико-механическими свойствам широко используются в авиационной и космической технике, автомобилестроении, судостроении, машиностроении, медицинской технике и при изготовлении спортивных товаров. Последние десятилетия армирующие возможности углеродных волокон также находят резко возрастающее применение в строительстве. В период 1998…2010 годов ежегодное потребление углеродных волокон в мире удвоилось и составило более 30 тыс. т. [51]. В настоящее время примеры включения в состав строительных конструкций фибропластиковых элементов, выполненных на основе этих волокон, имеют место в отношении большинства видов конструкций, изготовленных из бетона, камня, древесины и металлов.

В качестве недостатка необходимо отметить, что углеродные волокна являются относительно сложными и дорогими в переработке, а изготовленные на их основе фиброармированные композиты трудно поддаются утилизации и вторичной переработке.

Относительная дороговизна углеродоволоконных конструкционных элементов вызвана, прежде всего, сложной технологией производства и высокой стоимостью исходных материалов. Кроме того следует уточнить, что в настоящее время в мире изготовлением изделий из углеродных волокон занимается довольно большое количество производителей. Однако при этом, само исходное волокно, являясь высокотехнологичным материалом, производится только достаточно ограниченным количеством крупных химических концернов.

Фибропластиковые материалы, армированные углеродными волокнами, обычно обозначаются как ***CFRP (carbon fiber-reinforced plastics)***.

2.2.2.3. Арамидные волокна

Арамидные волокна имеют органическое происхождение и изготавливаются из ориентированных форм ароматических полиамидов (аромополиамидов). По своей сути ***ароматический полиамид*** (***aromaticpolyamide***) или ***арамид*** (***aramid***) представляет собой длинную цепочку синтетического полиамида, в которой, по меньшей мере, 85% амидных связей прикреплены к двум ароматическим кольцам (рис. 2.17) [61-64].

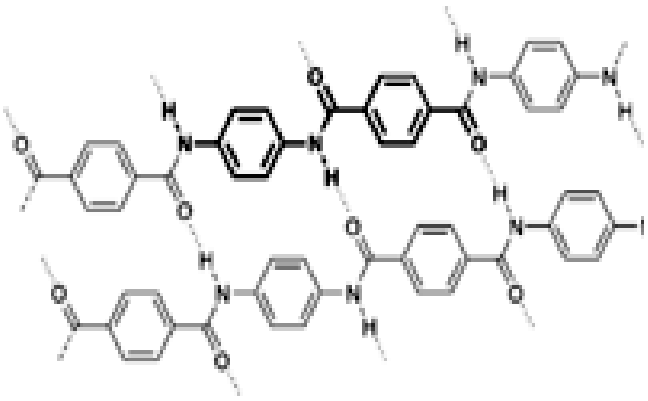


Рис. 2.17. Структурная формула пара-арамидного полимера

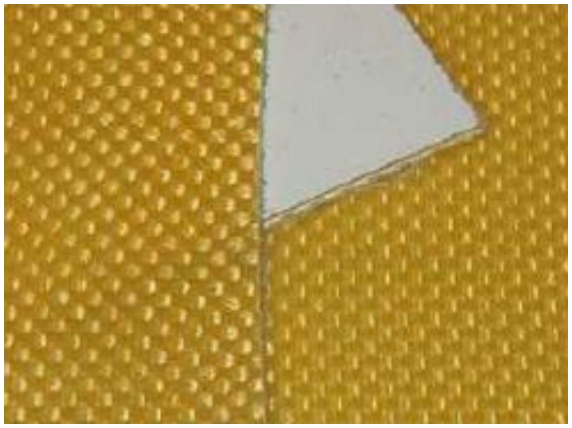


Рис. 2.18. Образец ткани, изготовленной из арамидных волокон; по [51]

Впервые предложенные на рынок материалов в начале 1970-х годов, арамидные волокна характеризуются высокой прочностью и жесткостью. Величины модуля упругости и предела прочности арамидных волокон занимают промежуточное положение между соответствующими значениями стеклянных и углеродных волокон (см. табл. 2.1, рис. 2.4).

Прочность данных волокон при сжатии обычно составляет около 1/8 прочности при растяжении. Анизотропия структуры волокон, находящихся в сжатом состоянии, способствует локальному процессу текучести, приводящему к потере устойчивости и образованию изгибов.

Арамидные волокна хорошо воспринимают ударные и абразивные воздействия, обладают термо- и электроизоляционными характеристиками, однако могут терять свои свойства при интенсивном действии прямых солнечных лучей (потеря прочности может составлять до 50%) и нуждаются в соответствующей защите при использовании вне помещений. Кроме того у рассматриваемых волокон возможны также проявления чувствительности к воздействиям влагой.

Под нагрузкой арамидные волокна обнаруживают ползучесть, подобную демонстрируемой стекловолокном. Предел прочности арамидных волокон и их усталостный предел выносливости заметно выше, чем у стеклянных волокон.

Технология производства арамидных волокон основана на высокотемпературной и высокоскоростной экструзии полимерного раствора, с последующим очень быстрым его охлаждением и высушиванием. Волокна, полученные таким способом, для улучшения механических характеристик могут также подвергаться горячему ориентированию быстрой намоткой на вращающиеся катушки.

Свойства арамидных волокон варьируются в зависимости от их химической и физической микроструктуры. Различают три основных типа присутствующих на рынке арамидных волокон: пара-арамиды (п-арамиды), мета-арамиды (м-арамиды) и сополимеры полиамида.

Пара-арамиды наиболее часто применяются в мире под торговыми марками ***Kevlar®*** (компании *DuPont*) и ***Twaron®*** (компании *Akzo/Acordis*). Их изготавливают из *парафенилендиамина* и *терефталоилхлорида* в растворе *N-метилпирролидона* или *хлористого кальция*.

Эти волокна впервые были получены группой *Стефани Кволек* в 1964 году, технология их производства появилась в 1965 году, а с 1971 года берет начало их коммерческое производство.

Серийно производятся волокна *Kevlar® 29, Kevlar® 49, Kevlar® 149*, имеющие прогрессивно высокую ориентацию полимерных молекул и обладающие высокой степенью кристалличности, благодаря чему они отличаются большим модулем упругости и пределом прочности.

Наибольшее практическое применение имеют волокна марок *Kevlar® 29* и *Kevlar® 49*, обладающие близкими пределами прочности, плотностью и коэффициентами термического деформирования (см. табл. 2.1). Однако волокна марки *Kevlar® 29* демонстрируют относительно не высокий, близкий по величине к показателю стекловолокна, модуль упругости, составляющий порядка *60…70 ГПа*. В то время как волокна марки *Kevlar® 49* обнаруживают почти в два раза большую его величину.

Пара-арамидные волокна сохраняют прочность и эластичность при низких температурах, вплоть до криогенных (-196°С), а при нагреве не плавятся, разлагаясь при сравнительно высоких температурах (430…480°С). При повышенных температурах (более 150°С) прочность таких волокон существенно утрачивается с течением времени.

Более современные серии пара-арамидных волокон, выходящие под марками *Kevlar® HT* и *Kevlar® HM*, обладают, соответственно, прочностью большей на 20% и модулем упругости большим на 40%, в сравнении с классическими волокнами *Kevlar® 29*. Такие волокна широко используются в аэрокосми-

ческой промышленности, а также для производства фибропластиковых материалов, в том числе, и строительного назначения.

Мета-арамиды, наиболее известны в мире под торговыми марками ***Nomex®*** (компании *DuPont*), ***Teijinconex®*** (компании *Teijin*), ***Newstar®*** (компании *Yantai Taiho*), представляют собой *поли м-фениленизофталамид*, полученный в результате межфазной поликонденсации *м-фенилендиамина* и *дихлорангидрида изофталевой кислоты*.

Один из первых мета-арамидов был представлен в 1961 году компанией *DuPont* под маркой *Nomex®*.

Мета-арамиды обугливаются при температурах свыше 400°С и способны воспринимать короткие воздействия температур до 700°С. Прочность при повышенных температурах мета-арамиды теряют в меньшей степени, чем пара-арамиды.

Сополимеры полиамида выпускаются с 1972 года, когда компанией *Rhone Poulenc* было организовано производство огнестойких термостабильных волокон под торговой маркой ***Kermel®*** (*полиамид-имид* семейства *мета-арамидов*), разработка которых велась с 1960 года. При воздействии высоких температур данные волокна теряют механические характеристики в еще меньшей степени, чем пара-арамиды и мета-арамиды.

В настоящее время арамидные волокна коммерчески доступны в основном в виде пучков форм *yarn* (рис. 2.6, в) и *roving* (рис. 2.6, г), а также в виде разнообразных лент и тканей.

Арамидные волокна считаются материалом, хорошо воспринимающим различные ударные воздействия. По этой причине их широко используют, например, для изготовления бронежилетов (особенно *Kevlar® 49*). Стойкость к абразивным воздействиям способствовала внедрению арамидных волокон для изготовления канатов и тросов. В строительстве волокна данного вида обычно применяются для усиления внешним армированием железобетонных колонн, а также для защиты конструкций при возможности аварийных ударов машинами, механизмами и т.п. Обычно арамидные волокна рекомендуются к применению в сочетании с методами предварительного напряжения.

Фибропластиковые композиты, армированные арамидными волокнами, обычно обозначаются общей аббревиатурой ***AFRP (aramid fiber-reinforced plastics)***.

2.2.2.4. Базальтовые волокна

В ряде стран также налажено масштабное производство армирующих материалов на основе так называемых ***базальтовых волокон***, близких по прочности к углеродным, но отличающихся от них более низким модулем упругости.

Непрерывные волокна данного вида получают из расплава горных пород базальта, порфиритов и диабазов. Изверженные горные породы, в отличие от стекольных шихт, состоящих из смесей силикатных компонентов, представляют собой систему, полученную в результате физико-механических процессов, происшедших при застывании и кристаллизации расплавленных силикатных масс – магмы [13]. Механическая структура базальтовых волокон характеризуется беспорядочным расположением и наличием воздушных прослоек между ними, т.е. пористостью, которая зависит от диаметра волокон и степени их уплотнения.

В качестве сырья для производства базальтовых волокон используются базальтосодержащие горные породы [65]. Производство данного вида волокон основано на получении расплава базальта в плавильных печах непрерывного действия и его свободном вытекании через специальные устройства — *фильерные питатели*, изготовленные из платины или жаростойких металлов.

Базальтовые волокна отличаются хорошей температурной и химической стойкостью. Они способны противостоять воздействиям органических веществ (масел, растворителей и др.), а также щелочей и кислот. Являясь коррозионностойкими, базальтовые волокна используются как элементы армирования конструкций. Пористость базальтового волокна может составлять более 70 % его объема, что обеспечивает низкую теплопроводность. При наличии в волокнах сообщающихся пор, они характеризуются высокой паропроницаемостью.

На основе данных волокон производятся различные виды крученных комплексных нитей, являющихся основой различных конструкционных лент и тканей. В современном строительстве базальтовое волокно и композиты на его основе находят применение в качестве теплозвукоизоляционных и огнезащитных материалов, а также в качестве основы соответствующих фибропластиков, используемых для внешнего и внутреннего армирования строительных конструкций. Предел прочности при растяжении таких фибропластиков обычно находится в пределах 550…2000 МПа, а модуль упругости составляет 40…90 ГПа.

Усиление бетонных, железобетонных и каменных элементов композитными материалами на основе базальтовых волокон во многих случаях оказывается более экономичным, чем на основе углеродных волокон, хотя и уступающим ему в соответствии с физико-механическими характеристиками.

2.2.2.5. Другие виды волокон

Кроме рассмотренных выше видов конструкционных волокон, являющихся основными для изготовления строительных фибропластиковых материалов, некоторое применение могут найти борные и керамические волокна (см. табл. 2.3).

Таблица 2.3

Характеристики борных и керамических волокон; по [50]

Показатель	Борные волокна	Керамические волокна		
		Окиси алюминия с химическим процессом получения	Карбида кремния, SiC	
			При химическом парофазном осаждении (CVD)	При пиролизе
Диаметр, μм	16,5	20±5	140	10…20
Плотность, г/см^3	2,63	3,95	3,3	2,6
Предел прочности, МПа	2800	1380	3500	2000
Модуль упругости, ГПа	385	379	430	180

Борные волокна (***boron fibres*** или ***boron filaments***) отличаются высоким модулем упругости и приделом прочности. Получают их обычно осаждением бора на непрерывную тонкую нить или проволоку [66].

Метод получения волокон путем химического осаждения из газовой фазы (CVD) предусматривает подачу смеси BCl_3 и H_2 в герметичный реактор, через ртутные затворы которого протягивается нить-подложка, как правило, выполненная из вольфрама, имеющая диаметр около 12 μм и нагреваемая пропускаемым электрическим током. При температуре нити-подложки 1000…1300°С получают конечное волокно с наружным диаметром 100…200 μм (обычно около 140 μм) и поликристаллической структурой, имеющей размеры зерен 2…4 μм.

Рекристаллизуются волокно бора при температурах выше 600°С, что ограничивает технологические температуры получения соответствующих композитов и их дальнейшей эксплуатации.

Волокна бора находят практическое применение в качестве армирующих наполнителей в полимерных и алюминиевых матрицах. Из-за высокой стоимости их практическое применение в настоящее время достаточно ограничено.

Наиболее эффективным считается использование волокон в составе бороалюминиевых композитов, используемых в конструкциях космических аппаратов или агрегатов, эксплуатируемых в особо сложных условиях окружающих сред.

Керамические волокна (***ceramic fibers*** или ***ceramic filaments***) также имеют высокие показатели модуля упругости и предела прочности.

К данному виду относятся волокна, изготавливаемые из плавленого кварца, высококремнеземистого сырья, глиноземкварцевого сырья, титаната калия, глинозема и циркония.

В относительно больших количествах также производятся алюмосиликатные волокна. Для их изготовления используется чистое сырье Al_2O_3 и SiO_2 с добавлением стекла, двуокиси циркония и окиси хрома. Приготовленную смесь плавят при температурах порядка 2000°С, а затем вытекающую из печи струю расплава подвергают воздействию сжатым воздухом, приводящим к ее расщеплению на отдельные тонкие струйки, которые в воздушном потоке вытягиваются в тончайшие нити.

Эксплуатационные свойства керамических волокон, подвергаемых воздействию высокими температурами (более 1200°С), могут снижаться за счет их рекристаллизации.

Керамические волокна используются в качестве теплоизоляционных, наполнительных и уплотнительных материалов, а также в качестве армирующей основы соответствующих композитов, эксплуатируемых в условиях высоких температур.

2.2.2.6. Сравнительная оценка различных видов конструкционных волокон

Основными характеристиками, определяющими использование различных видов конструкционных волокон, являются модуль упругости, продольная прочность и деформативность.

Плотность стеклянных волокон всегда выше, чем у арамидных и углеродных (см. рис. 2.19, а). Предел прочности стекловолокна и арамидных волокон несколько выше, чем у высокомодульных углеродных волокон, но уступает аналогичному показателю высокопрочного углеродоволокна (рис. 2.19, б). При этом модули упругости различных типов стеклянных и арамидных волокон всегда ниже, чем у углеродных (рис. 2.19, в).

С другой стороны стеклянные волокна имеют существенный недостаток в виде крайней чувствительности к мельчайшим дефектам, приводящим к значительному снижению их прочности. В связи с чем, предел прочности фибропла-

стиков на их основе, как правило, гораздо ниже, чем у фибропластиков на основе углеродных волокон.

Стеклянным, арамидным и углеродным волокнам свойственно хрупкое разрушение. Углеродные и стеклянные волокна демонстрируют отсутствие ползучести под воздействием переменных температур окружающих сред. Арамидные волокна отличаются более низкой сопротивляемостью к действию поперечных нагрузок.

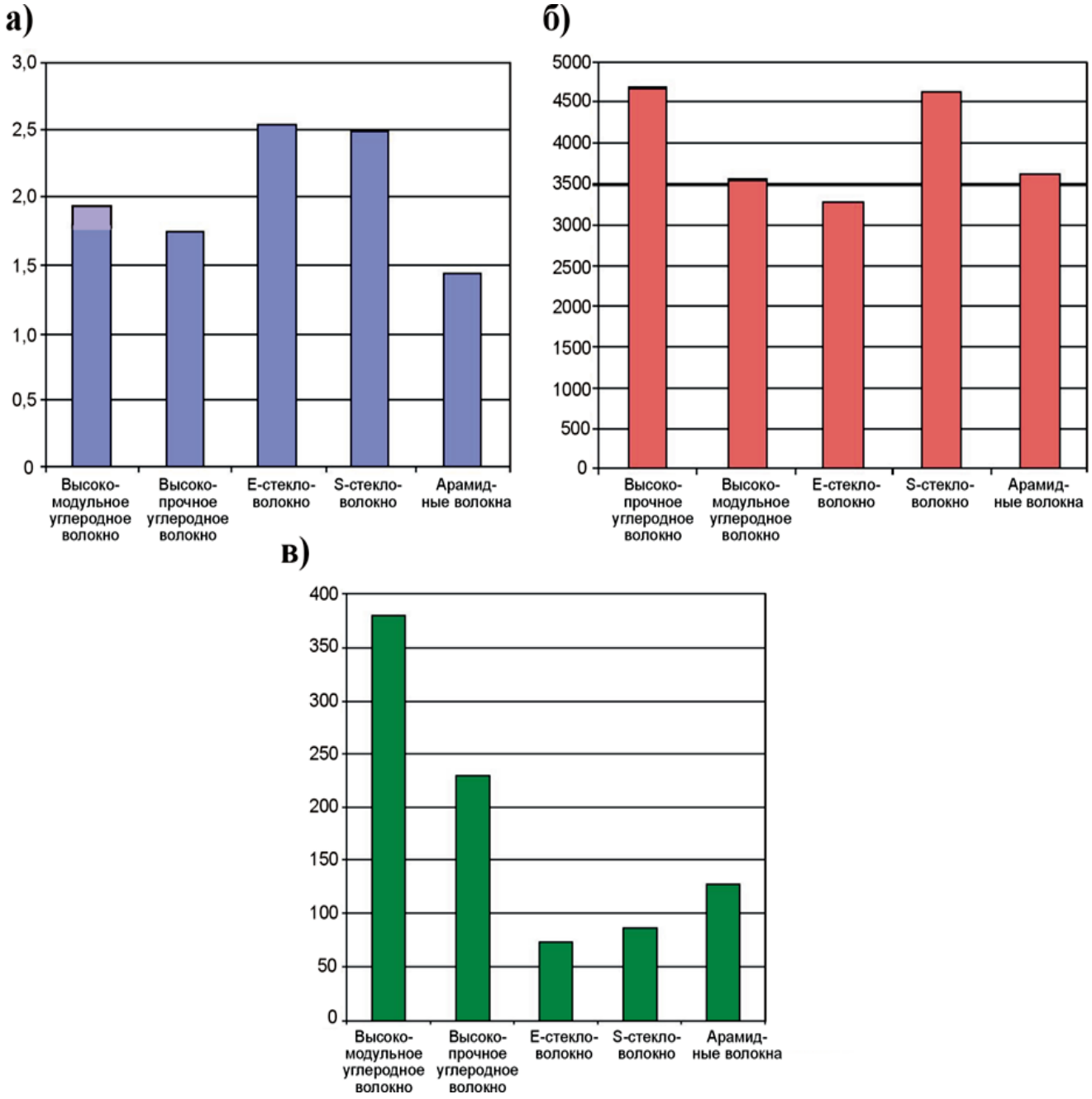


Рис. 2.19. Характерные соотношения некоторых показателей физико-механических свойств конструкционных волокон: а — плотности, г/см^3, б — прочности при растяжении, МПа, в — модуля упругости, ГПа; адаптировано по [51]

Углеродные волокна обладают наилучшей сопротивляемостью действию различных химических веществ, переменных температур и других факторов окружающей среды. Стеклянные волокна, наоборот, наиболее подвержены вредным воздействиям.

Стеклянные и углеродные волокна считаются не горючими, а большинство арамидных — подверженными воздействию огня.

Оценочный рейтинг различных видов волокон [51], в соответствии с различными показателями их свойств, приведен в таблице 2.4. При этом наилучшую конструкционную оценку получают углеродные волокна, затем следуют арамидные волокна и стекловолокно.

Таблица 2.4

Оценочный рейтинг физико-механических свойств различных видов конструкционных волокон; адаптировано по [51]

Показатель	Вид волокон		
	Углеродное	**Арамидное**	**Е-стеклянное**
Прочность при растяжении	9	9	9
Прочность при сжатии	6	0	4
Модуль упругости	9	6	3
Поведение при действии длительных нагрузок	9	6	3
Поведение при действии циклических нагрузок	6	4	2
Плотность	4	6	2
Сопротивляемость воздействиям окружающих сред	6	4	0
Цена	6	6	9
Суммарный рейтинг	**55**	**41**	**32**

Примечание. Показатель 0 является неудовлетворительным, а 10 — соответствует наивысшей оценке.

Цены на конструкционные волокна значительно меняются в зависимости от их вида. В соответствии с этим показателем стеклянные волокна обычно рассматриваются как относительно недорогие, что и определяет их наибольшее практическое применение в строительстве.

В таблице 2.5 приведено сравнение цен на различные виды конструкционных волокон. При этом приведенные величины заметно выше соответствующего показателя обычной арматурной стали, лежащего в диапазоне 0,6…0,7 евро/кг [51]. Однако армирующие волокна обладают гораздо более высокими показателями соотношения прочности и веса, определяющими значительно

меньшие затраты материала. Соотношение условных коэффициентов стоимости различных видов конструкционных волокон приведено на рисунке 2.20.

Таблица 2.5

Сравнение ценовых показателей различных видов конструкционных волокон; адаптировано по [51]

Вид волокон	Цена, евро/кг
E-стеклянные	1,25…2,5
R-стеклянные, S-стеклянные	15…25
Углеродные	10…45
Арамидные	18…30
Борные	70…500

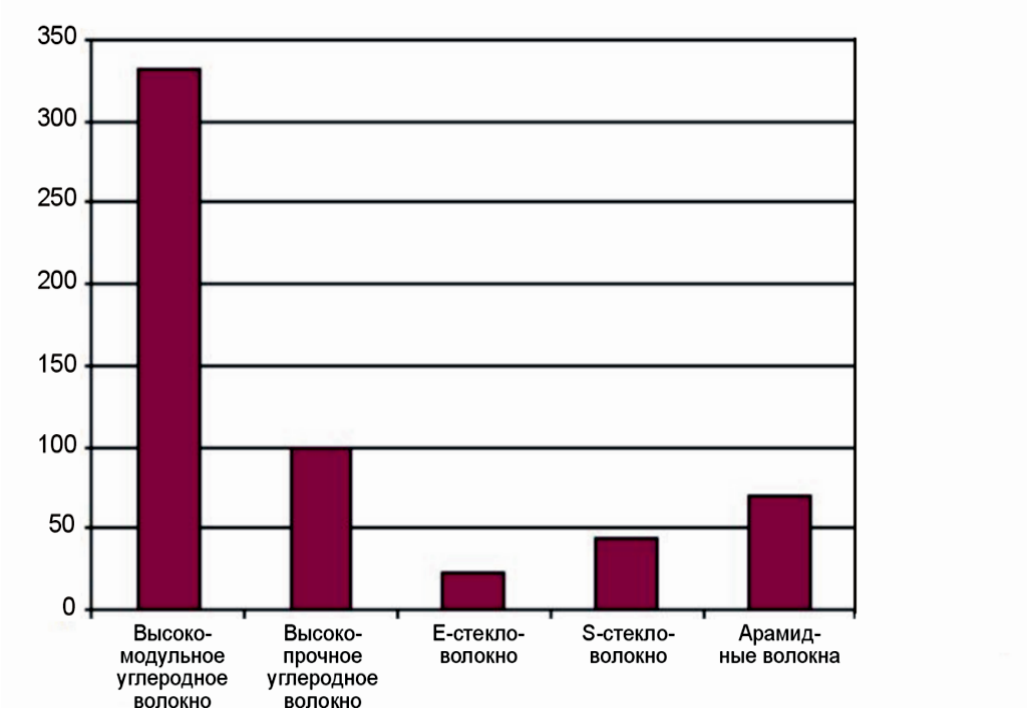


Рис. 2.20. Соотношение условных коэффициентов стоимости различных видов конструкционных волокон; адаптировано по [51]

2.2.3. Технические характеристики волокон

Отдельные волокна обычно не поставляются на рынок как самостоятельный конструкционный материал, но из них производятся ткани и ленты, являющиеся основой соответствующих фиброармированных пластиков. Нормативные требования к определению технических характеристик волокон в настоящее время регламентируются целой серией международных стандартов [50], из которых базовым считается *ISO 2113:1996(E)*.

Для определения погонной плотности волокон используется международный стандарт *ISO 1889:1997(E)*, предусматривающий отбор из ткани контрольных образцов произвольной длины с последующим их взвешиванием. Погонная масса выражается соотношением

$$T_x = \frac{P \cdot 1000}{L} \ , \quad \text{ТЕХ (г/км)} \tag{2.1}$$

где: P — вес образца волокна, граммы,
L — длина образца волокна, метры.

Площади поперечных сечений отдельных филамент или их пучков (*tow, yarn* или *roving*) определяются следующим выражением

$$A = \frac{T_x}{\rho \cdot 1000} \ , \quad \text{мм}^2 \tag{2.2}$$

где: ρ — плотность волокна, г/см^3,
T_x — погонная масса волокна, ТЕХ (г/км).

Уточнение приведенных выше характеристик применяется для контроля качества поставляемого материала.

2.3. Армирующие ткани

Для создания систем внешнего фибропластикового армирования строительных конструкций возможно использование различные холстовые материалы в виде полотен и лент.

Армирующие ткани, не пропитанные матричными растворами, обычно называют «***сухими***». В их качестве могут применяться:

- ***однонаправленные (мононаправленные)*** ткани с волокнами ориентированными в направлении длины материала, зафиксированными легкой прошивкой не конструкционными уточными волокнами,
- ***двунаправленные (бинаправленные)*** ткани, включающие перпендикулярно переплетенные волокна (обычно с равными коэффициентами объемного наполнения в обоих направлениях),
- ***много осевые*** ткани, предусматривающие ориентирование волокон в различных направлениях.

Наиболее простые формы конструкционных тканей получают из волокон формы *roving* (рис. 2.6, г). Так как волокна данной формы изготавливаются с очень слабым скручиванием или вообще без него, то филаменты поперечно сжаты только в местах пересечения *основных* (*warp*) и *уточных* (*weft*) волокон.

Такая ткань дает возможность изготовления больших по размеру и толщине фибропластиковых изделий.

Текстильные материалы, сотканные из волокон формы *yarn* (рис. 2.6, в), являясь тоньше и легче, используются для более специфичных аппликаций, в тех случаях, когда важен показатель минимального веса конструкции. Композиты, изготавливаемые на основе этих тканей, имеют меньший показатель расчетной объемной доли волокон, чем фибропластики, полученные из однонаправленных тканей, что объясняется наличием волнистостей, вызванных переплетениями волокон.

При использовании однонаправленных тканей (рис. 2.21), изготовленных с плотно сцепленными между собой рабочими волокнами одного направления, достигается повышенный модуль упругости фибропластиковых материалов. Параллельное положение волокон обеспечивает максимальную прочность и жесткость фибропластиков, предназначенных для работы относительно определенных осей, а также позволяет достигнуть максимально эффективного увеличения несущей способности строительных конструкций, подвергаемых внешнему армированию.

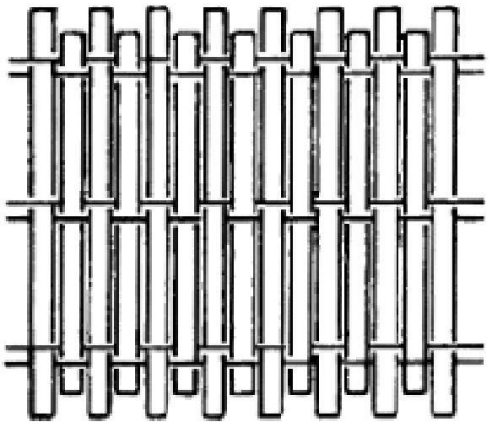


Рис. 2.21. Образец однонаправленной армирующей ткани с рабочими волокнами, направленными вдоль длины материала, зафиксированными легкой прошивкой не конструкционными уточными волокон; по [51]

При необходимости обеспечения более сложной работы материала могут применяться различные виды тканых материалов, предусматривающих двунаправленное расположение фибры.

В армирующих двунаправленных тканях волокна, как было отмечено выше, приобретают форму сглаженной волны. В результате подобные полотна и ленты менее предпочтительны при выполнении сложных силовых усилений, но хорошо себя рекомендуют для повышения пластических свойств элементов конструкций, потенциально подверженных динамическим воздействиям. Отно-

сительно широкое их использование имеет место при сейсмостойком усилении бетонных конструкций.

В настоящее время для изготовления армированных пластиков наиболее часто используются двунаправленные конструкционные ткани следующих форм плетения:

- ***плейн*** (международное обозначение ***plain***) или полотняное плетение — простое, плоское переплетение волокон (рис. 2.22, а),
- ***твил*** (***twill***) или саржевое — форма плетения, при котором на лицевой стороне ткани проявляются диагональные линии (рис. 2.22, б),
- ***сатин*** (***satin***) — на лицевой стороне преобладают уточные нити (рис. 2.22, в).

Ткани формы плетения *plain* (рис. 2.22, а) демонстрируют наиболее жесткую и стабильную структуру. Главным их недостатком является относительная сложность насыщения матричными составами, а также наличие волнистости основных и уточных волокон. Последняя особенность определяет более низкую эффективность применения. Волнистость таких тканей оценивается величиной около 10% [50].

Конструкционные ткани форм плетения *twill* и *satin* (рис. 2.22, б, в) обнаруживают большую гибкость, но в тоже время подвержены повреждениям в процессе использования. Ткань формы *satin*, имея меньшую волнистость волокон обоих направлений, обеспечивает большую конечную жесткость изготавливаемых фибропластиковых элементов.

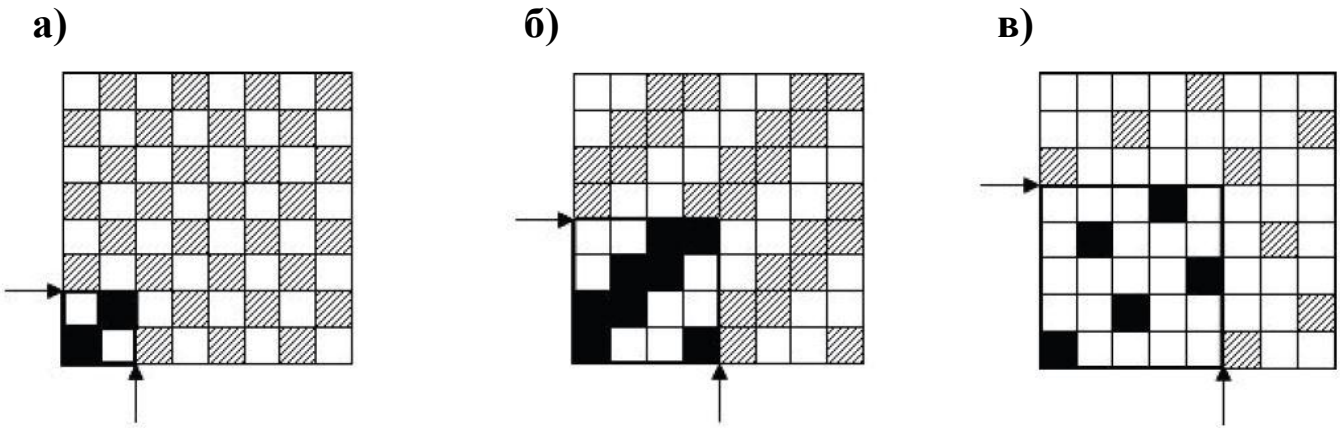


Рис. 2.22. Геометрическое строение наиболее часто используемых двунаправленных конструкционных тканей: а — ткань формы плетения *plain*, б — ткань формы плетения *twill*, в — ткань формы плетения *satin* (черные и заштрихованные квадраты — уточные волокна (*weft*) над основными волокнами (*warp*), белые квадраты — уточные волокна (*weft*) под основными волокнами (*warp*)); по [50]

Армирование фибропластиков также может производиться много осевыми тканями с волокнами ориентированными более чем в двух направлениях, изготавливаемыми тканьём или простой прошивкой. Кроме того производятся и объемные ткани, в которых присутствуют уточные волокна, направленные перпендикулярно плоскости материала. Армирование объемными тканями придает фибропластикам большую прочность и жесткость. При насыщении таких тканей матричными составами обычно наблюдается заметное «вздутие».

Ткани, используемые для изготовления и усиления строительных конструкций, обычно поставляются в «сухом» виде. Их пропитка матричными составами производится непосредственно при изготовлении фибропластиковых элементов.

Нормативные требования к определению технических характеристик конструкционных тканей регламентируются серией международных стандартов [50], из которых основным является *ISO 8099:1980*. Для двунаправленных и много осевых тканей кроме общей информации (о типе ткани, ее плотности и т.п.) производителями в обязательном порядке предоставляются сведения об ориентации и расчетных характеристиках всех слоев волокон.

В случае если в листе технических данных ткани для отдельных слоев указаны только погонная масса волокон и количество волокон на единицу ширины материала, показатель массы волокон заданного направления может быть найден из выражения

$$p_x = \frac{T_x \cdot N_f}{10} \ , \quad \text{г/м}^2 \tag{2.3}$$

где: T_x — погонная масса волокна в рассматриваемом направлении, ТЕХ (г/км),
N_f — количество волокон заданного направления на единицу ширины ткани, шт./см.

При необходимости определения количества волокон заданного направления, приходящихся на единицу ширины ткани, международный стандарт *ISO 4602:1997(E)* предлагает выполнить подсчет волокон одного направления фрагмента ткани (например, с шириной 10 см) с дальнейшим пропорциональным приведением к искомой ширине материала.

2.4. Армирующие маты

Армирующие маты изготавливаются из случайно расположенных волокон конечной длины и являются наиболее дешевыми материалами плоскостного армирования композитов. Они подразделяются на два основных типа:

- ***маты из рубленных прядей*** (***chopped strand mats: CSM***),
- ***маты из непрерывных филамент*** (***continuous filament mats: CFM***).

В большинстве случаев сырьем для изготовления армирующих матов служит стекловолокно. Конструкционные качества этих материалов в значительной степени уступают свойствам соответствующих армирующих тканей.

Поскольку волокна в составе матов располагаются случайно, их рассматривают как материалы с плоскостной изотропией.

Соединяются волокна обычно с помощью химических связующих веществ, которые могут быть как на водорастворимой, так и водонерастворимой основе. Использование матов, волокна которых соединены водорастворимыми связующими не допускается в случае вероятностных влажностных воздействий, поскольку последние могут вызвать расслаивание соответствующих композитов. Кроме того крайне важна совместимость данных связующих с матричными системами пропитки фибропластиков.

Маты из рубленных прядей (CSM) изготавливаются из волокон формы *roving*, равномерно распределенных и случайно направленных в плоскости материала, имеющих длину около 25…50 мм (см. рис. 2.23). Эффективность волоконного наполнителя в составе фибропластиков, изготовленных на основе таких матов, обычно составляет не более 10…25% в любом из направлений их плоскости. В связи с прерывистостью фибры, в этом случае передача нагрузки, определяется главным образом особенностями пропитывающих маты матричных систем.

Наиболее часто маты из рубленных прядей используются при изготовлении фибропластиковых элементов «по мету», а также при автоклавном прессовании. Их ширина может составлять от 5 см до 2 м [50], а плотность колеблется в пределах 225…900 гр./м^2 [51]. Рабочие характеристики фибропластиков на основе этих матов зависят от плотности фибры на единицу площади материала, длины рубленных волокон и типа связующего вещества.



Рис. 2.23. Образец армирующего мата из рубленных прядей; по [51]

Маты из непрерывных филамент (CFM) изготавливаются аналогично матам из рубленных прядей, но с использованием непрерывных волокон, случайно переплетающихся в плоскости материала (рис. 2.24) и придающих ему некоторые технологические преимущества [51].

Рабочие характеристики таких матов определяются теми же факторами, что и у матов, изготавливаемых из рубленных волокон, с дополнительным учетом способа размещения непрерывных волокон. Используются маты из непрерывных филамент обычно при промышленном изготовлении фибропластиковых элементов.



Рис. 2.24. Образец армирующего мата из непрерывных филамент; по [51]

2.5. Связующие матрицы

Матрицы состоят из смол, наполнителей и добавок, а также катализаторов и, в ряде случаев, из разделительных веществ и ингибиторов, подавляющих активность их отдельных компонентов. Важным требованием, предъявляемым к матрицам, является меньшее значение модуля упругости и большая деформативность в сравнении с армирующими фибропластик волокнами, позволяющие перераспределять нагрузку между отдельными филаментами в составе композитного материала. Функции матриц сводятся к следующим:

- соединение армирующих фибропластик волокон и сохранение их заданного порядка,
- распределение нагрузки между волокнами,
- обеспечение работоспособности материала при действии касательных, сжимающих и растягивающих, в поперечном волокнам направлении, усилий,
- придание общей жесткости и требуемой формы изготавливаемым элементам,

- обеспечение независимой работы отдельных волокон, повышающей трещиностойкость материала,
- защита армирующих волокон от воздействий окружающей среды, химических и механических повреждений,
- повышение пластичности и ударной стойкости композитных материалов.

Кроме того особенности конкретных связующих матриц оказывают большое влияние на тепло- и электропроводность получаемых с их использованием фибропластиковых материалов.

В составе фибропластиков в качестве связующих матриц могут использоваться составы на различной основе, предусматривающей наличие термореактивных синтетических смол (эпоксидных, фенольных, полиэфирных, поливинилэфирных и др.), а также термопластов (полиимидов, поликарбонатов, полисульфонов и др.).

2.5.1. Виды коммерчески доступных матриц

В качестве связующих матриц фибропластиковых материалов строительного назначения наиболее часто используются термореактивные смолы. Они обычно поставляются в частично полимеризованном состоянии, представляя собой при комнатных температурах жидкости или пасты. В процессе смешивания с соответствующими реагентами происходит полимеризация, приводящая к образованию твердого, стекловидного материала. Реакция может быть ускорена регулированием температур.

Термореактивные смолы имеют ряд преимуществ, включающих малую вязкость (позволяющую относительно просто производить пропитку волокон), хорошую адгезионную способность, пригодность к полимеризации при комнатных температурах, высокую сопротивляемость к химическим воздействиям и т.д. Главными их недостатками являются ограниченный диапазон рабочих температур, определяемый температурой стеклования (при которой полимер теряет свои свойства и переходит в так называемое «стеклообразное» состояние, не обеспечивающее требуемые параметры соединения с армирующими фибропластик волокнами), плохая ударная вязкость, характеризуемая хрупким разрушением, чувствительность к влажностным воздействиям при применении в условиях строительных площадок.

Термореактивные составы, наиболее часто используемые в строительстве, изготавливаются на основе эпоксидных смол. Также в их качестве находят применение полиэфирные и винилоэфирные смолы. Учитывая то, что такие матричные составы приобретают необходимые характеристики при смешива-

нии непосредственно на месте производства работ, особые требования предъявляются к квалификации привлекаемого технического персонала.

Фиброармированные композитные материалы на основе термопластичных полимерных матриц в настоящее время также доступны для использования в строительстве, но в отличие от термореактивных смол, требуют несколько более сложной техники установки.

Матричные материалы поставляются производителями с указанием основных технических характеристик, состав и порядок определения которых регламентируется серией международных стандартов [50].

2.5.2. Эпоксидные смолы

Эпоксидные смолы отличаются относительно высокими прочностными характеристиками, хорошей сопротивляемостью к воздействиям влаги и различных химических веществ, имеют высокий эксплуатационный ресурс, а также демонстрируют надежность и высокие адгезионные свойства, что и определило их широкое использование в строительстве.

Максимальная рабочая температура матриц на основе данных смол зависит от их окончательного состава и ретикулярных температур (т.е. температур структурирования с образованием поперечных молекулярных связей). При рабочих температурах, превышающих 60°С, подбор таких матричных составов производится с учетом возможной изменчивости механических свойств. В тоже время существенные ограничения минимальных температур эксплуатации фибропластиков, изготовленных с использованием эпоксидных смол, обычно отсутствуют.

Главный реагент эпоксидных смол состоит из органических веществ с низким молекулярным весом, содержащих эпоксидные группы, т.е. молекулярные кольца, скомпонованные из атома кислорода и двух атомов углерода (рис. 2.25). Данные вещества могут быть получены при реакции *эпихлоргидрина* с *аминосоединениями* или *кислотной смесью бисфенола А*.

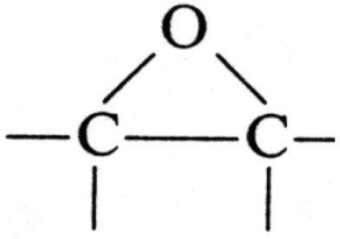


Рис. 2.25. Молекулярное строение эпоксидной группы

Эпоксидный предполимер обычно представляет собой вязкую жидкость с коэффициентом вязкости, зависящим от степени полимеризации. Ретикулярное вещество (в большинстве случаев *алифатический амин*) в точной пропорции добавляется в смесь для получения нужной структуры и свойств смолы с поперечными молекулярными связями. Экзотермическая реакция (сопровождаемая выделением тепла) не приводит к образованию вторичных продуктов. В соответствии с особенностями технологических требований к работе с отдельными составами, а также исходя из необходимости получения различных свойств конечного материала, реакция может осуществляться как при комнатных, так и при более высоких температурах.

Химическая структура смол может быть изменена на базе особенностей химического состава эпоксидных предполимеров. Наиболее часто используемые для строительных композитов эпоксидные смолы представляют собой *диглицидиловый эфир бисфенола А*.

2.5.3. Полиэфирные смолы

Полиэфирные смолы, в сравнении с эпоксидными, имеют меньшую вязкость и обладают высокой химической активностью. Их механические и адгезионные свойства обычно уступают аналогичным свойствам эпоксидных смол.

Ненасыщенные полиэфиры являются линейными полимерами с высоким молекулярным весом, содержащими двойные углеродные связи типа *C=C*, способные вступать в химическую реакцию. Степень их полимеризации и длина молекул могут меняться.

При комнатных температурах такие смолы всегда находятся в твердом состоянии. Для использования полиэфирные смолы должны быть растворены в растворителе (обычно в реактивном мономере), уменьшающем вязкость и, таким образом, способствующем процессу пропитки. Мономер (в большинстве случаев *стирол*) также должен содержать двойные связи типа *C=C*, обеспечивая образование поперечных соединений между полиэфирными молекулами. При этом экзотермическая реакция, обычно проходящая при комнатных температурах, не приводит к образованию вторичных продуктов.

Химическая структура полиэфирных смол может быть адоптирована путем замены используемых в полимерном синтезе кислот и гликоля или путем привлечения иного реактивного мономера.

Группа полиэфирных смол, применяемых для изготовления композитных материалов, как правило, включает *изофталевую, ортофталивую и бисфенольную* смолы. При эксплуатации в условиях высоких температур и химически аг-

рессивных сред часто используются *винилоэфирные* смолы, представляющие собой компромисс между свойствами полиэфирных и эпоксидных смол.

2.5.4. Другие виды матричных смол

Существующие ограничения применения термореактивных смол (в особенности: низкая жесткость, относительно невысокие температуры эксплуатации и склонность к абсорбции влаги) обусловили разработку композитов с термопластовыми матрицами. Таким связующим присуща способность «течь» только при нагреве до достаточно высоких температур, превышающих температуру стеклования аморфных материалов T_g и температуру плавления частично кристаллизованных материалов T_m.

Матрицы данного вида предполагают использование процесса горячего формования, что значительно усложняет процесс изготовления соответствующих фибропластиков и делает их применение в строительстве достаточно ограниченным. Тем не менее, в настоящее время они находят внедрение в составе некоторых фиброармированных элементов заводской готовности (например, стержней для армирования бетонных конструкций, а также различных элементов конечной длины с плоскими и профильными формами поперечных сечений).

Термопластовые матрицы жестче термореактивных, а их образцы (особенно полиимидные) отличаются более высокими температурами эксплуатации, доходящими до *200…400°C*. Кроме того подобные связующие выделяются более высокими показателями сопротивляемости к воздействиям окружающей среды. Одним из главных факторов, ограничивающих их использование, является высокая вязкость, усложняющая процесс пропитки волокон и требующая дорогостоящего технологического оборудования.

Также следует отметить, что использование неорганических матриц (цементосодержащих, металлических, керамических и т.п.) в качестве составляющих фиброармированных композитов, быстро растет. Их эффективное использование считается возможным при наличии соответствующей технической базы и необходимого инженерного сопровождения.

2.6. Адгезивы и принципы их использования

Адгезив это материал, часто полимерного происхождения, создающий связи, способные передавать нагрузки, по крайней мере, между двумя поверхностями.

Усиление конструкций фиброармированными элементами (например, ламинатами заводского изготовления) требует использование адгезивов. Предва-

рительный подбор последних, как и выбор способа обработки усиливаемых поверхностей, обуславливается материалом строительной конструкции и особенностями используемых фибропластиковых систем. Технические описания поставляемых фиброкомпозитных материалов обычно включают общие рекомендации по назначению необходимых марок адгезивов, зависящих от конкретных видов усиления. Аппликации сухих тканей, пропитываемых в условиях строительных площадок, теоретически также рассматриваются как монтажные операции, основанные на применении адгезивов.

Эффективность использования клеящих составов во многом связана со способом обработки поверхностей конструкций, предваряющей наклейку фибропластиков. В связи с чем, рассмотрим некоторые особенности работы данных соединений.

В настоящее время используется много видов натуральных и синтетических адгезивов (эластомеры, термопласты, одно- и двухкомпонентные термореактивные смолы и т.д.), среди которых наиболее распространенными в отношении композитных материалов считаются составы, основанные на эпоксидных смолах.

Эпоксидные адгезивы обычно представляют собой двухкомпонентные вязкие смеси. В результате химической реакции, образовывающей поперечные молекулярные связи, они затвердевают и становятся пригодными для передачи нагрузок в соединениях.

В сравнении с механическими связями адгезионные соединения имеют ряд преимуществ: позволяют сочетать материалы различного происхождения, обеспечивают большую жесткость, исключают необходимость ослабления сечений отверстиями и обычно не требуют сопутствующего разогрева соединяемых элементов. С другой стороны адгезивы во многих случаях чувствительны к воздействиям окружающих сред и высоким температурам.

Характеристику сдвиговой адгезионной прочности соединений в настоящее время принято определять в соответствии с международным стандартом *ISO 4587:2003(E)*, а прочности на отрыв — в соответствии со стандартом *ISO 4578:1997(E)* (см. раздел 4).

Работа адгезионных соединений характеризуется тремя типами их разрушений:

- *когезионное разрушение* (рис. 2.26, б), имеющее место в материале одного из элементов соединения (идеальный случай разрушения, характеризуется наличием одного и того же материала на образовавшихся при разрушении поверхностях),

- *адгезионное разрушение* (рис. 2.26, а), наблюдаемое на границе адгезива и основного материала при недостаточной прочности созданных связей (поверхность разрушения обычно гладкая),
- *смешанное разрушение* (рис. 2.26, в), сочетающее признаки когезионного и адгезионного разрушения (образовавшиеся поверхности отличаются значительными неоднородностями).

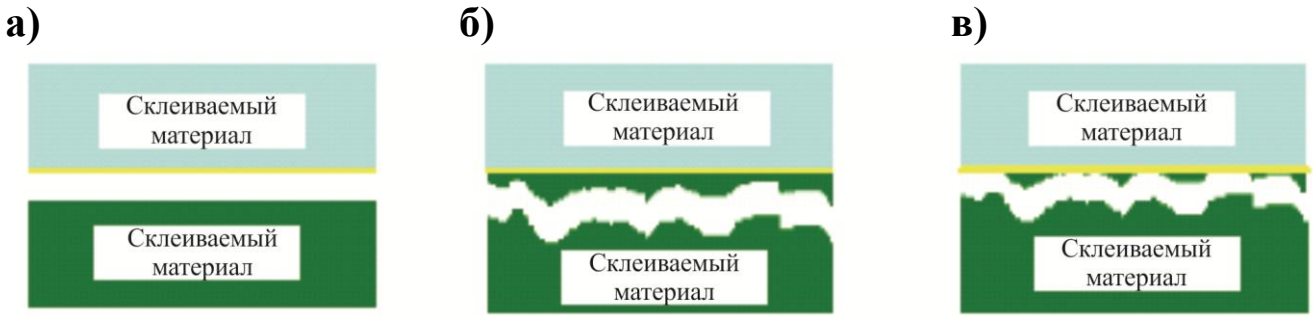
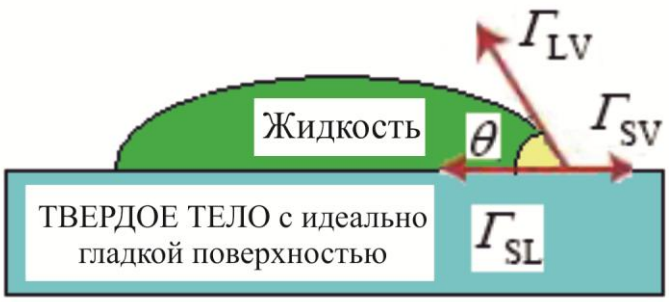


Рис. 2.26. Различные типы разрушений адгезионных соединений: а — адгезионное разрушение, б — когезионное разрушение, в — смешанное разрушение; адаптировано по [50]

Эффективность адгезии зависит от многих факторов, таких как предварительная обработка поверхностей, химический состав и вязкость клеящих составов, технология их нанесения, условия набора прочности и т.п. Механизм адгезии зависит от особенностей взаимодействия клеящего состава с соединяемыми поверхностями, сопровождаемого образованием химических связей между полимером и основой. Адгезионная прочность может быть существенно повышена обработкой граничных поверхностей, повышающей степень их шероховатости. Традиционно принято рассматривать следующие виды и механизмы работы адгезионных связей [50]:

- *физические связи,* включающие вторичные, ионные и водородные связи между молекулами адгезива и материала основы. Их рассмотрение строится на электростатической и абсорбционной теориях (рис. 2.27, а), в соответствии с которыми свойства адгезива обеспечиваются при наличии его способности смачивать поверхности. В этом случае энергия, приходящаяся на единицу площади поверхности материала основы Γ_{SV} должна быть больше энергии адгезива Γ_{LV} , см. рис. 2.28 (так, например, способность смачивать сталь у эпоксидных смол достаточно высокая, но низкая в отношении других материалов, таких как полиэтилен),



$\theta = 0°$ — полное покрытие материала,

$0° < \theta < 180°$ — частичное смачивание,

$\theta = 180°$ — отсутствие смачивания

Рис. 2.27. Влияние контактного угла смачивания поверхности адгезивом в соответствии с абсорбционной теорией (θ — контактный угол); адаптировано по [50]

- *химические ковалентные связи,* основывающиеся на первичных (ковалентных) связях между молекулами основы и адгезива (рис. 2.28, б). С целью их образования обычно дополнительно вводятся специальные связующие вещества (особенно в случае применения стеклянных волокон). Связующие вещества, соединяясь с оксидами поверхности материала основы, создают перекрестные молекулярные или диффузионные связи,
- *диффузионные связи,* возникающие вследствие диффузии атомов или молекул на границе сред (рис. 2.28, в). Данный механизм характерен для композитов с полимерными матрицами, обладающими подвижностью молекулярных цепочек. Для образования этих связей важным фактором является время, определяющее конечную прочность соединений,
- *механические связи,* использующие местное сопротивление материалов взаимопроникающих поверхностей (рис. 2.28, г). Требуют наличия неоднородных поверхностей, позволяющих адгезионным растворам осуществлять заполнение пор, трещин и других несовершенств до затвердевания.

Главное требование к подготовке поверхностей материалов — это их очистка, удаляющая все виды загрязнений: окислы, инородные частицы, пыль, влагу, масла и т.п. Рекомендуемые производителями фибропластиковых систем методы предварительной подготовки обычно направлены на улучшение поверхностного химического состава материалов и обеспечение более прочных связей с адгезивом, устойчивых к агрессивным воздействиям окружающих сред. Кроме того данная процедура должна обеспечивать требуемую неоднородность подготавливаемых поверхностей.

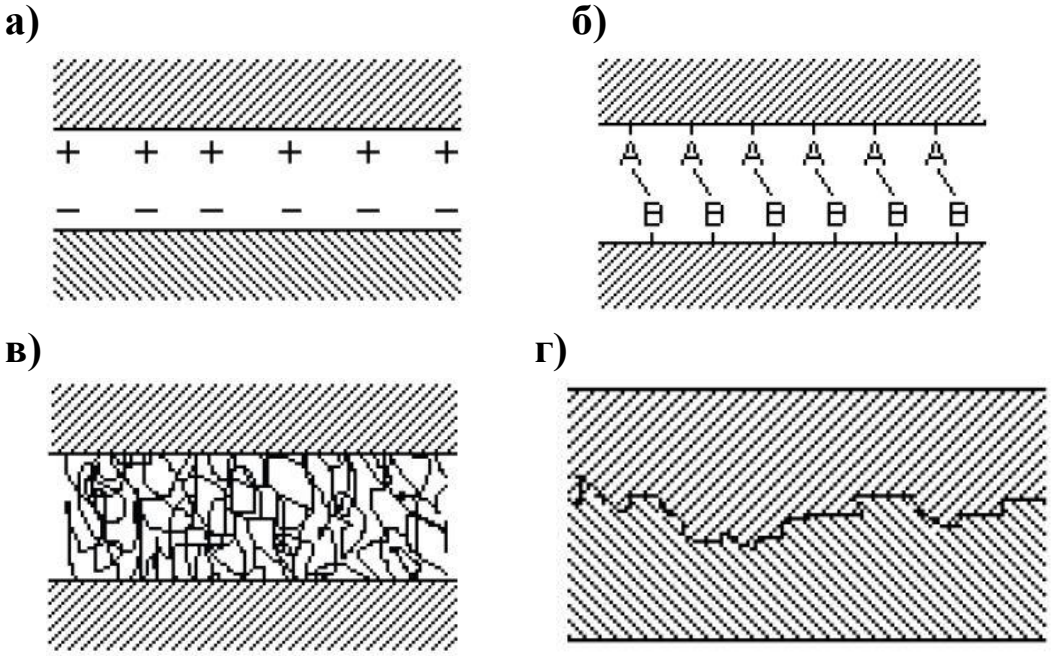


Рис. 2.28. Механизмы образования адгезионных связей: а — электростатический, б — химический, в — диффузионный, г — механический; по [50]

Использование растворителей и пескоструйная обработка демонстрируют эффективность. В ряде случаев, при подготовке поверхности основного материала конструкции, может предварительно наносится слой специальной грунтовки, выполняющей функции связующего вещества. Поверхности ламинированных фибропластиковых элементов обычно также требуют дополнительной очистки (за исключением тех, что покрываются производителями защитной пленкой, удаляемой перед использованием). Для исключения дополнительного загрязнения все виды работ по подготовке склеиваемых поверхностей выполняются непосредственно перед установкой фибропластиковых элементов. При этом контактные поверхности должны быть абсолютно сухими.

3. Фибропластиковые системы

3.1. Механические характеристики конструкционных фибропластиков

Развитие технологий изготовления фиброармированных пластиков и постепенное снижение их цен, способствовало увеличению объемов использования данных материалов в строительстве. В настоящее время производителями предлагается широкий выбор различных систем, технические характеристики которых зависят от используемых типов армирующих волокон, материалов матриц и методов изготовления.

Существенная анизотропия большинства предлагаемых материалов приводит к значительным отличиям в упруго-прочностных свойствах, проявляемых вдоль и поперек направления армирующих волокон. Вдоль волокон монофибровые пластики, изготовленные с применением карбоновых, арамидных и стеклянных волокон, обычно демонстрируют линейно-упругую работу вплоть до своего разрушения. Гибридные же фибропластики, выполненные на основе комбинаций различных видов волокон, отличаются упруго-пластичной работой, свойственной большинству строительных сталей [67].

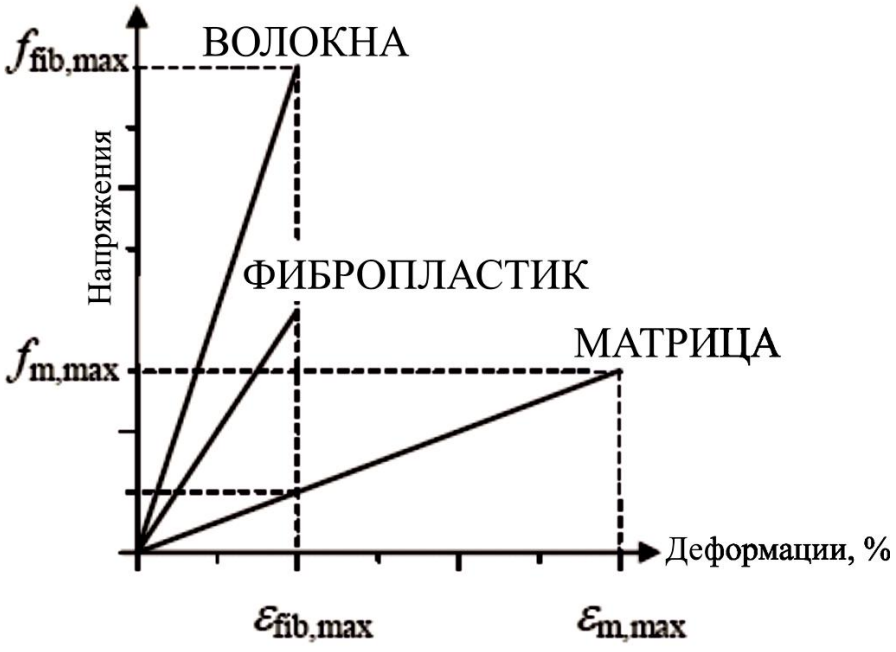


Рис. 3.1. Взаимосвязь напряжений и относительных деформаций в армирующих волокнах, матрицах и конечных фибропластиках; адаптировано по [50]

В составе фибропластиковых материалов армирующие волокна обеспечивают несущую способность и жесткость, в то время как матрицы гарантируют относительно равномерное распределение нагрузки между волокнами и их

защиту от воздействий внешней среды. Большинство конструкционных фиброармированных пластиков включают в свой состав волокна высокой прочности и малой деформативности. Предельные деформации матриц практически всегда много больше предельных деформаций фибры. Взаимозависимости напряжений и относительных деформаций волокон, матриц и конечных фибропластиков представлены на рисунке 3.1. Фибропластиковые материалы отличает меньшая, чем у отдельно взятых армирующих волокон, прочность и соответствующая им предельная деформативность $\varepsilon_{fib,max}$, превышение которой исключает дальнейшее распределение нагрузки между волокнами и матрицей.

Пример сопоставления механических свойств предварительно отвержденных углеродоволоконных ламинатов заводского изготовления и исходных волокон приведен в таблице 3.1. Ламинаты показывают меньшие значения модуля упругости E_f и предела прочности f_f , нежели армирующие их волокна. В тоже время предельные деформации этих материалов находятся в границах одного и того же диапазона величин.

Таблица 3.1

Сопоставление механических свойств предварительно отвердженных углеродоволоконных ламинатов заводского изготовления и исходных волокон; по [50]

Виды фибропластиковых систем усиления	Модули упругости, ГПа		Предел прочности, МПа		Предельные деформации, %	
	Ламинат, E_f	Волокно, E_{fib}	Ламинат, f_f	Волокно, f_{fib}	Ламинат, ε_{fu}	Волокно, $\varepsilon_{fib,u}$
Углеродоволоконные низкомодульные	160	210…230	2800	3500…4800	1,6	1,4…2,0
Углеродоволоконные высокомодульные	300	350…500	1500	2500…3100	0,5	0,4…0,9

Для фибропластиковых композитов с однонаправленными волокнами, величины модуля упругости и предела прочности могут быть определены в соответствии с правилом смесей как

$$E_f = V_{fib} E_{fib} + (1 - V_{fib}) E_m \ , \qquad (3.1)$$

$$f_f \cong V_{fib} f_{fib} + (1 - V_{fib}) f_m \ , \qquad (3.2)$$

где: V_{fib} — объем фракции волокон (соотношение между объемом волокон и общим объемом композита),

E_{fib}, E_m — соответственно, модули упругости волокон и матрицы,

f_{fib}, f_m — соответственно, пределы прочности волокон и матрицы.

Правило смесей основывается на гипотезе об идеальном сцеплении между волокнами и матрицей и дает для однонаправленных композитов достаточно точную оценку модуля упругости. Однако для предела прочности данная оценка не всегда является вполне приемлемой. При назначении названных показателей, используемых в расчетах и проектировании, обычно рекомендуется проведение предварительных экспериментальных определений их величин [50].

Оценка жесткости и прочности фибропластиковых материалов, изготавливаемых по месту, может быть выполнена на основании геометрических (объемное соотношение волокон и матриц) и механических характеристик всех исходных компонентов. При этом следует учитывать то, что величины модулей упругости и пределов прочности армирующих волокон обычно в десятки и сотни раз превышают аналогичные показатели матриц (см. раздел 2, табл. 2.1). В результате механические свойства фиброармированных пластиков (показатели модуля упругости E_f и предела прочности f_f) фактически определяются свойствами их волокон. Влиянием матриц на данные показатели, при решении практических задач, обычно пренебрегают.

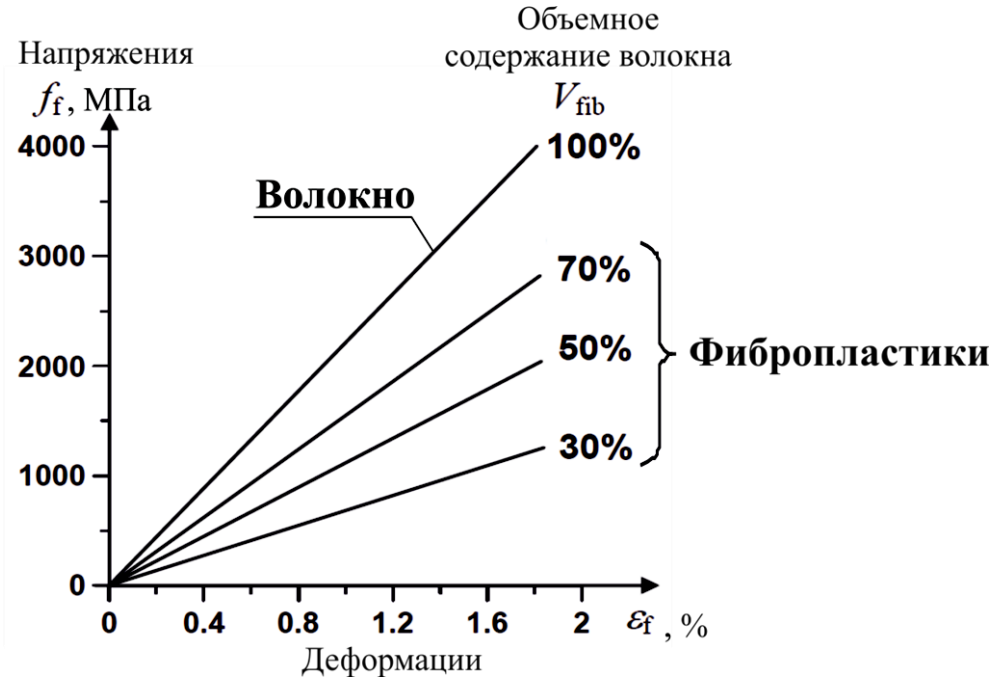


Рис. 3.2. Взаимозависимости напряжений и относительных деформаций фибропластиковых элементов, имеющих различное процентное содержание армирующих волокон; адаптировано по [50]

Поскольку жесткость и прочность зависят от размеров всего поперечного сечения композитного элемента, общий модуль упругости и предел прочности снижаются с ростом процентного содержания матричного материала (рис. 3.2). При этом величины прикладываемого на элемент предельного усилия F_{fu} и продольной жесткости $E_f \cdot A_f$ меняются не значительно (в пределах 3…4%) и их

переменностью возможно пренебречь [50]. В этом случае снижение модуля упругости E_f и предела прочности f_f конечного композита компенсируется ростом общего поперечного сечения фибропластикового элемента и зависит только от фактического содержания волокон.

Таким образом, объемное содержание матриц в составе фибропластиковых элементов является существенным при определении их изгибной жесткости и предела прочности. Пренебречь же наличием матриц допускается при расчете величин максимального продольного усилия F_{fu} и продольной жесткости композитных элементов $E_f \cdot A_f$.

3.2. Фибропластиковые конструкции заводской готовности

3.2.1. Основные методы изготовления

Физико-механические характеристики получаемых фибропластиковых элементов в значительной степени определяются особенностями применяемых технологических процессов их формообразования: температурой и скоростью ее подъема; наличием, величиной и временем приложения внешнего давления; скоростью и температурой охлаждения.

В зависимости от формы и геометрических размеров при изготовлении фибропластиковых элементов в заводских условиях могут использоваться следующие основные технологии:

- ***литьевое прессование,*** применяемое для получения тонкостенных изделий сложной формы, для которых важно соблюдение повышенных требований к точности размеров,
- ***автоклавное и вакуумное прессование***, также применяемое для изготовления элементов сложной формы, но отличающееся от литьевого прессования меньшими величинами действующих давлений,
- ***контактное формование***, позволяющее создавать конструкции различных габаритных размеров и конфигураций,
- ***намотка***, используемая для получения труб, различных оболочек вращения, сетчатых конструкций, сосудов повышенного давления и т.п.,
- ***пултрузия***, применяемая при изготовлении длинномерных элементов постоянных поперечных сечений.

Литьевое, автоклавное и вакуумное прессование. Использование различных методов прессования предусматривает применение специальных форм, на поверхность которых укладываются предварительно выполненные заготов-

ки, включающие слои армирующего наполнителя, пропитанного связующими матричными смолами. При изготовления изделий указанные заготовки подвергаются давлению с одновременным повышением температуры. При помещении в формы «сухих» заготовок, состоящих только из армирующих наполнителей, пропитка производится под давлением, создаваемым вакуумированием или нагнетанием связующего в форму. Величины давления и температуры определяются типом матричных смол, а также размерами и конфигурацией изготавливаемых элементов. Необходимость использования парных прессовочных форм в значительной степени ограничивает возможность получения крупногабаритных конструкций. Данные методы обычно применяются для изготовления элементов малых и средних размеров.

Контактное формование. При применении контактного формования в специальные формы, смазанные разделительным составом, укладываются армирующие слои, по месту пропитываемые матричными смолами. Прочность и жесткость фибропластиковых материалов в этом случае ниже, чем при прессовании, намотке или пултрузии. Однако данный способ, являясь наиболее простым и универсальным, позволяет создавать элементы различных габаритных размеров и конфигурации. Контактное формование позволяет обеспечивать достаточно высокие прочностные и упругие характеристики изготавливаемых элементов только при использовании внутреннего армирования в виде тканей и широких лент.

Преимущество методов прессования и контактного формообразования заключается в универсальности, позволяющей с помощью недорогих шаблонов изготавливать элементы сложных форм. В большинстве случаев подобные технологии изготовления фибропластиковых элементов применяются в аэронавтике, космонавтике, автомобилестроении и транспорте. В строительстве данными методами обычно производят крупноразмерные элементы монтажной готовности. Кроме того при помощи контактного формования может осуществляться фибропластиковое усиление несущих элементов эксплуатируемых конструкций. Применение таких технологий позволяет производить многослойные элементы – «*ламинаты*» с толщинами до нескольких сантиметров, но отличается относительной трудоемкостью, особенно в случае контактного формования. Толщины изготавливаемых элементов определяют скорость производства работ, составляющую для несложных конструкций, изготавливаемых по отработанной технологии, около 0,5 кг/час [50].

В сравнении с методами намотки и пултрузии данные способы изготовления элементов дают возможность практически полной свободы направления

волокон и криволинейности получаемых форм. Применяемые технологические процессы включают следующие основные этапы: предварительную подготовку материалов, непосредственную ламинацию (обрезку, пакетирование пластов и прессование), подготовку вакуумных пакетов, выдержку элементов (при комнатной температуре, в печи или в автоклаве), приводящую к набору прочности матрицами, инспекцию качества полученных элементов (визуальную, ультразвуковую или рентгенографическую) и окончательную подгонку (обрезку краев фрезой или водяной струей высокого давления).

В качестве армирующих составляющих могут использоваться одно- и многонаправленные «сухие» ткани или припреги (см. п. 2.3). Одним из важных условий процесса является создание зоны вакуума вокруг формируемого элемента (рис. 3.3). Вакуум способствует быстрому удалению из ламинатов (до набора прочности матричными составами) растворителей и воздушных включений.

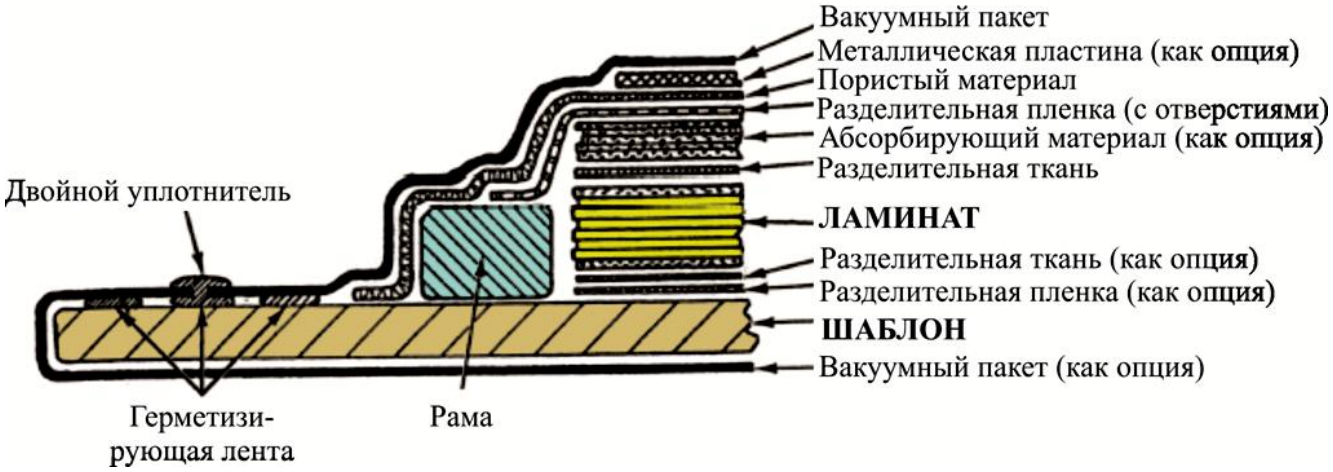


Рис. 3.3. Схема изготовления фибропластикового элемента методом контактного формования; адаптировано по [50]

Методы намотки армирующих волокон, предусматривающие одновременную пропитку получаемых слоев матричными смолами, обеспечивают высокие прочностные и упругие свойства фиброармированных материалов, но применимы только для элементов, имеющих форму тел вращения (рис. 3.4).

В некоторых случаях при изготовлении конструкций симметричной формы, может производиться совмещение их фрагментов с последующей дополнительной намоткой, отверждением и окончательной обрезкой по месту полученных скорлупообразных деталей.



Рис. 3.4. Процесс изготовления стеклопластиковых труб методом намотки армирующих волокон [18]

Метод пултрузии используется главным образом для изготовления фиброармированных элементов большой длины, широко применяемых при усилении строительных конструкций (для подобных элементов плоского сечения принято также использовать термин «ламинат», не совсем точно отражающий технологическую природу их происхождения). Технология основывается на непрерывном производственном процессе, включающем три основные фазы: формование, пропитку и отверждение.

Наиболее распространенная технология производства предусматривает использование термореактивных матричных смол. Исходные компоненты (армирующие волокна и матричные смолы) загружаются по отдельности в агрегаты технологической линии (рис. 3.5), где волокна подхватываются и непрерывно протягиваются через все стадии обработки.

Обычно применяются подаваемые с катушек волокна типа *roving*, пропускаемые через емкость с жидким матричным составом, осуществляющим их пропитку. Пучки пропитанных волокон вводятся в разогретый формующий блок, где под высоким давлением производится окончательное формообразование элементов и создание в материале поперечных молекулярных связей. Во время данной технологической фазы устраняются возможные зазоры и пустоты между волокнами, обеспечивается требуемая однородность материала в поперечном направлении.

Разогрев формующего блока обеспечивается электрическим сопротивлением его элементов и контролируется термопарами. Продолжительность стадии разогрева регулируется скоростью движения волокон. На выходе из формую-

щего блока матричный состав получает отверждение. В конце технологической цепочки выполняется обрезка элементов нужной длины. Для гарантирования прочности композита в направлениях, отличных от основного направления волокон, возможно нанесение дополнительных внешних слоев армирующих тканей. При наличии специального оборудования на производственной линии также может выполняться предварительное плетение, прошивка или скручивание основных армирующих волокон.

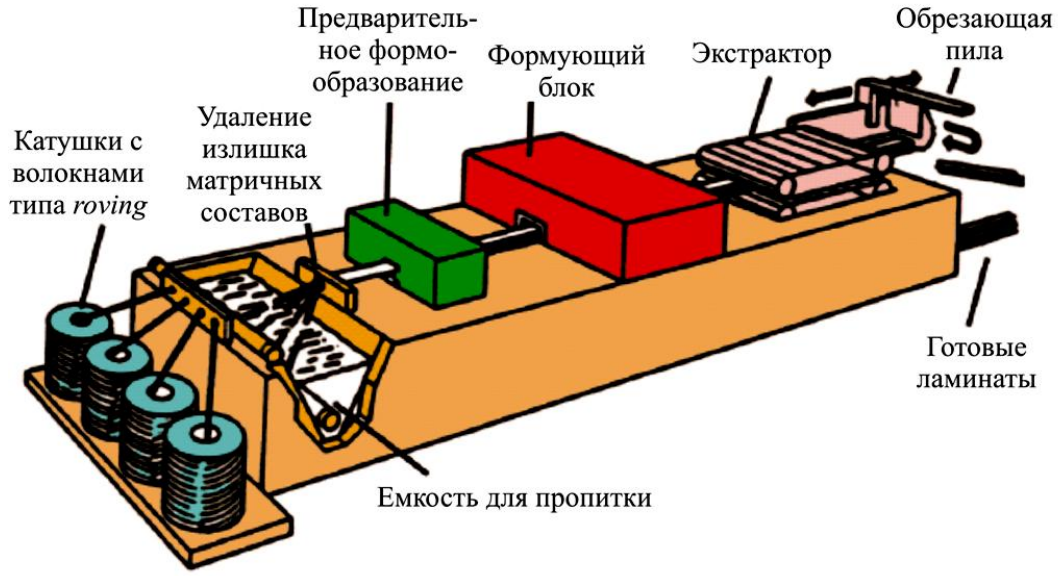


Рис. 3.5. Изготовление фиброармированных ламинатов методом пултрузии с ванной пропиткой волокон; адаптировано по [50]

Пултрузионные фиброармированные материалы, имея поперечные сечения постоянной величины с толщинами вплоть до нескольких сантиметров, отличаются легкостью и высокой коррозионной стойкостью. Наиболее распространенными элементами данного типа являются ламинаты малой толщины, стержни круглого и фасонных (швеллеры, двутавры, уголки и т.д.) поперечных сечений, различные виды панелей и пластин. Применяются такие элементы для внутреннего и внешнего армирования новых и уже существующих строительных конструкций, а также как самостоятельно работающие конструкции.

3.2.2. Используемые виды соединений

Поскольку фибропластиковые конструкции склонны к высоким концентрациям напряжений, то при проектировании их узлов и соединений избегают возможных точек таких концентраций. Переходы форм элементов и конструкции узлов выполняют без резких перепадов толщин с соблюдением необходимых скруглений кромок.

При изготовлении фибропластиковых конструкций в заводских условиях и наличии соответствующей материальной базы количество соединений стремятся минимизировать, отдавая предпочтение большеразмерным монолитным элементам. В случае необходимости в качестве основных видов узловых соединений подобных конструкций заводской готовности могут использоваться:

- ***формованные соединения,*** т.е. выполненные с использованием дополнительных приформовочных накладок различных конфигураций и сечений, обычно изготавливаемых из тех же материалов, что и сами соединяемые элементы (рис. 3.6, а, б),
- ***клеевые соединения***, в составе которых композитные и металлические элементы могут соединяться между собой (рис. 3.6, в),
- ***клее-формованные соединения***, в которых приклеенные детали дополнительно приформовываются различными фибропластиковыми накладками (рис. 3.6, г),
- ***клее-механические соединения***, предусматривающие дополнительное крепление приклеенных элементов механическими связями (например, болтовыми, винтовыми или заклепочными), допускающие дальнейшее поверхностное приформование накладками различных типов ,
- ***болтовые соединения,*** предусматривающие крепление деталей болтами и допускающие дополнительную проклейку по швам сплачивания,
- ***клепаные соединения,*** применяемые в основном для соединения тонколистовых (толщиной до 5,0 мм) фибропластиковых элементов, в составе которых могут использоваться как металлические (легкосплавные), так и пластиковые заклепки (например, термопластовые). Данные соединения также могут быть подвергнуты дополнительной проклейке по швам сплачивания (рис. 3.6, д).

Для снижения концентрации напряжений у отверстий механических соединений может применяться дополнительное армирование фибропластиковых элементов добавочными слоями армирующих тканей. В случае выполнения отверстий в не полностью отвердженных деталях малой толщины предпочтение отдается прокалыванию, а не сверлению, что позволяет значительно повысить прочность соединений благодаря меньшей повреждаемости раздвигаемых армирующих волокон.

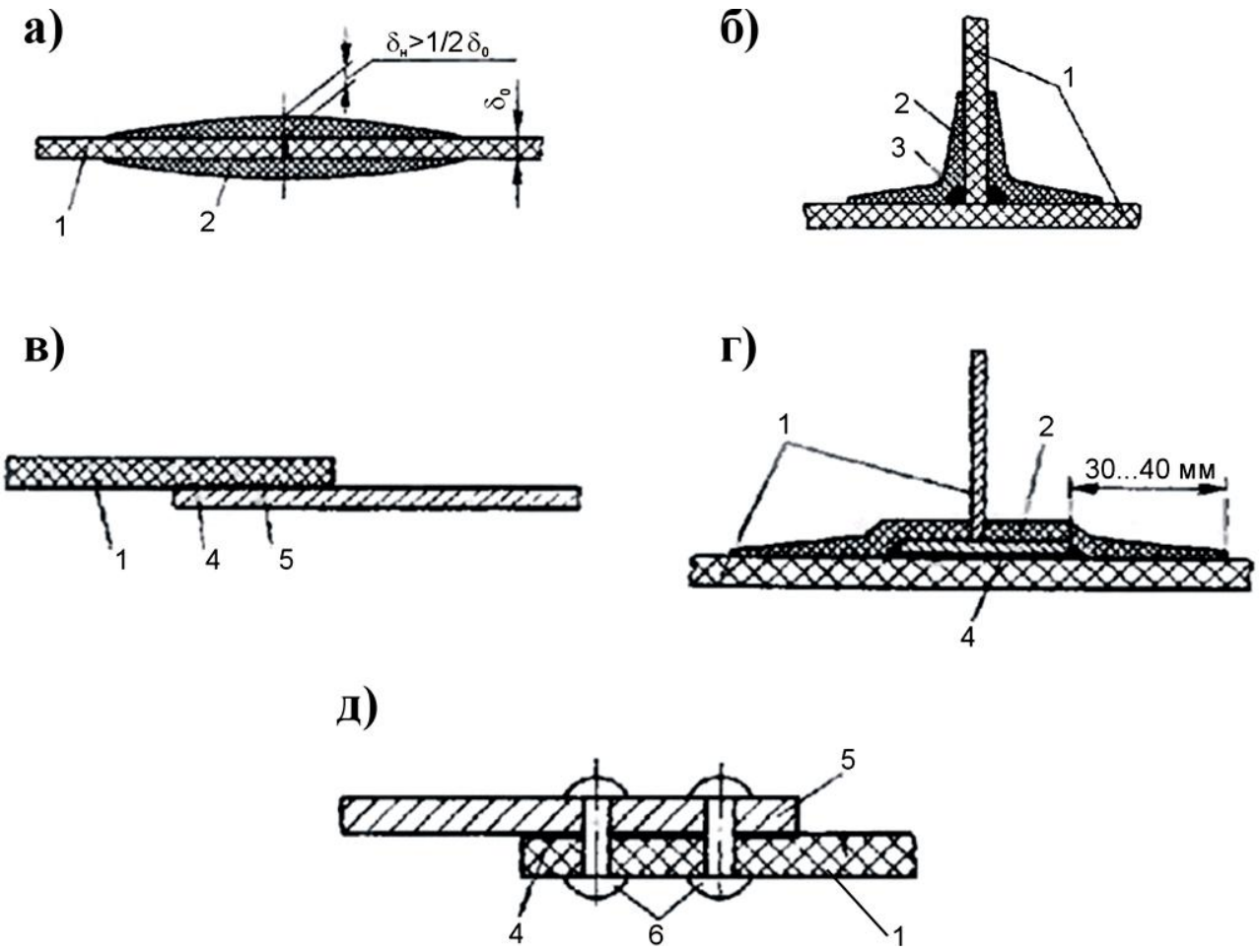


Рис. 3.6. Соединения фибропластиковых конструкций заводской готовности: а, б — формованные, в — клееное, г — клее-фармованное, д — клее-клепаное: 1 — соединяемые фибропластиковые элементы, 2 — прифармовочные накладки, 3 — уплотняющая паста, 4 — клеевая прослойка, 5 — металлический элемент, 6 — заклепки

При наличии необходимых производственных мощностей высокую эффективность демонстрируют многослойные, и в частности трехслойные, конструкции (рис. 3.7, а), наружные слои которых выполняются из прочных армированных материалов, разделенных легкими заполнителями (состоящими из вспененных пластмасс, сот и т.п.) или пустотами. Отсутствие технологических возможностей изготовления большеразмерных многослойных конструкций заставляет производителей применять решения, предусматривающие составные формы несущих элементов, в составе которых соединения могут выполняться как формовано-монолитными (рис. 3.7, б), так и сборными (рис. 3.7, в).

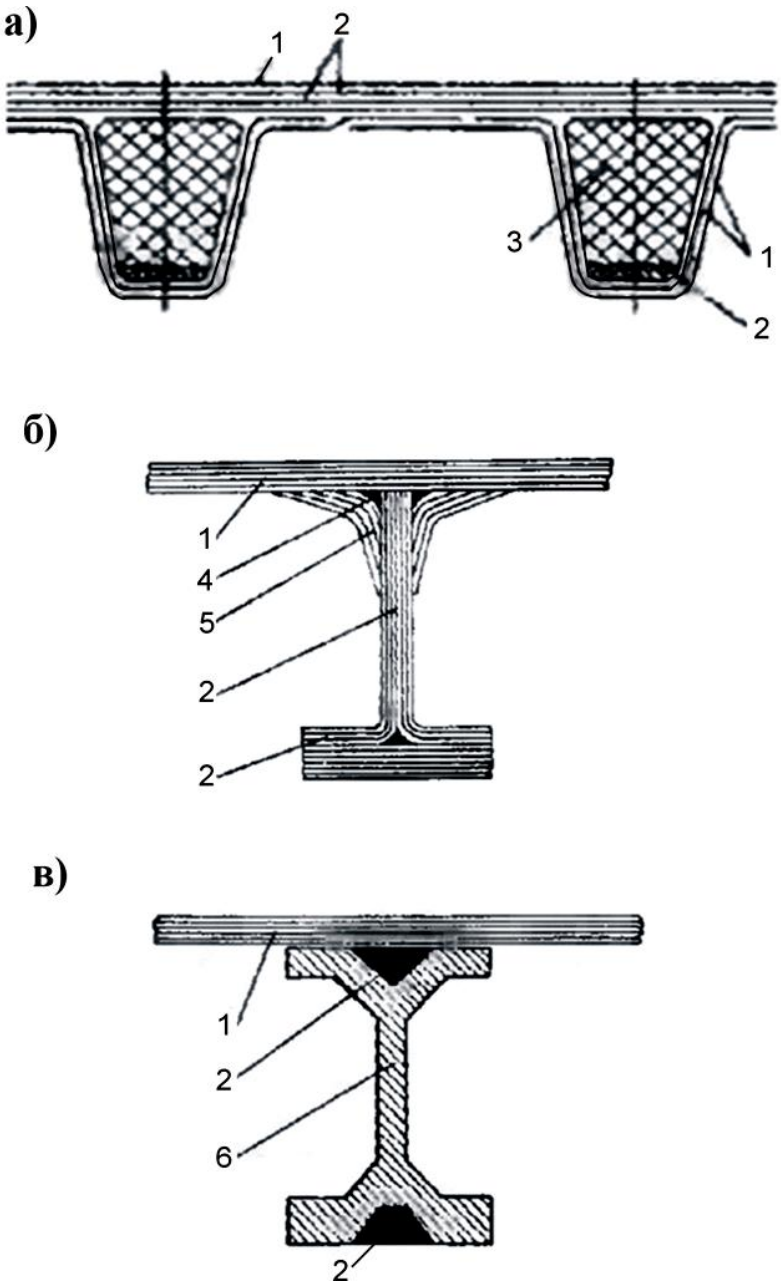


Рис. 3.7. Конструктивные схемы фрагментов фибропластиковых настилов, изготавливаемых в виде: а — монолитных многослойных конструкций, б — формовано-монолитных конструкций, в — сборных конструкций; 1 — слой, армированный стеклянными волокнами, 2 — слой, армированный углеродными волокнами, 3 — вспененный пластик, 4 — уплотняющая паста, 5 — приформовочные накладки, 6 — металлическая балка

Ограничения размеров фибропластиковых конструкций, диктуемые возможностями их изготовления, заставляют использовать модульные элементы, соединяемые непосредственно по месту монтажа. Соединения таких монтажных модулей должны обеспечивать передачу изгибающих моментов и поперечных сил, компенсировать деформации, вызванные термическими эффектами, и

позволять применение относительно простых технологических операций последовательной сборки конструкций.

Одним из вариантов объединения модульных фибропластиковых элементов является введение соединительных вставок. На рисунке 3.8 представлен пример подобного решения, используемого для элементов, собранных из отдельных листов и коробчатых профилей, предварительно изготовленных методом пултрузии [68, 69]. В этом случае для объединения панелей конструкции вводятся фибропластиковые двутавры, также изготовленные методом пултрузии и соединяемые адгезионным швом, выполняемым по длине всех контактных поверхностей.

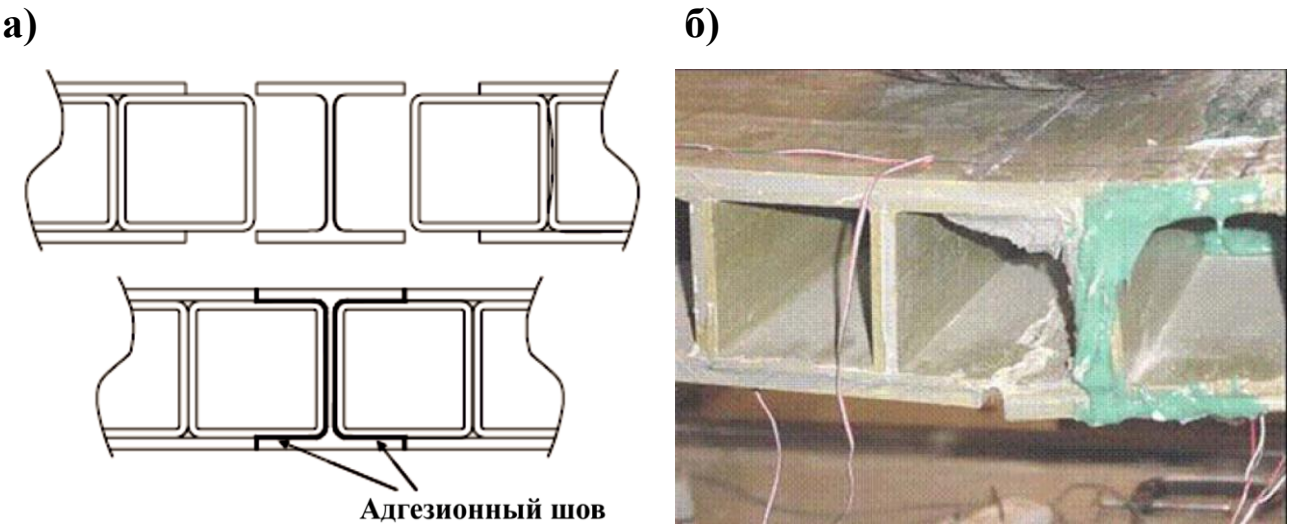


Рис. 3.8. Узел сопряжения фибропластиковых панелей, собранных из коробчатых и листовых элементов, предварительно изготовленных методом пултрузии, соединяемых монтажной вставкой в виде пултрузированного двутавра: а — монтажная схема, б — разрушение в процессе испытаний; по [68, 69]

3.3. Фибропластиковые системы усиления существующих строительных конструкций

Расчет и проектирование строительных конструкций осуществляется в соответствии с нормативными документами, действовавшими на момент выполнения данных работ. С течением времени, под влиянием различных факторов, особенности работы конструкций и соответствующие величины их внутренних усилий могут претерпеть изменения. Наиболее частыми причинами таких процессов являются:

- изменения условий эксплуатации и действующих нагрузок,

- вынужденные трансформации расчетных схем, модификация несущих элементов, узлов и деталей,
- старение конструкционных материалов и коррозионные разрушения металлических элементов.

Немаловажным фактором, определяющим необходимость модернизации существующих строительных конструкций, также является изменение нормативных требований, предъявляемых, например, к характеру и надежности эксплуатации, к сейсмо- и огнестойкости.

Традиционные методы решения возникающих при этом проблем предусматривают:

- увеличение поперечных сечений несущих элементов,
- введение дополнительного внутреннего и (или) внешнего армирования,
- изменение расчетных схем, введение дополнительных опор и разгружающих элементов,
- применение принципов предварительного напряжения и т.п.

Осуществление указанных методов, основывающееся на предварительной оценке фактической несущей способности, обычно ведется с использованием материалов, входящих в состав усиливаемых конструкций, или стальных элементов. Современной альтернативой, появившейся в последние десятилетия и находящей все большее распространение, являются системы усиления фиброармированными полимерными композитами (фибропластиками). Армирующие волокна таких систем размещаются в составе полимерных матриц на поверхностях конструкций и ориентируются в направлениях действующих усилий.

В настоящее время для усиления строительных конструкций используются фибропластиковые системы, изготавливаемые как непосредственно по месту усиления — на гранях конструкций, так и устанавливаемые в виде элементов заводской готовности.

3.3.1. Виды систем фибропластикового усиления

Фибропластиковые системы внешнего усиления строительных конструкций принято классифицировать на

- ***предварительно отвердженные***, производимые пултрузией или ламинацией в виде элементов заводской готовности, имеющие различные формы поперечных сечений (чаще всего плоскую или круглую), которые приклеиваются в проектном положении к усиливаемым элементам конструкций,

- ***изготавливаемые по месту усиления***, выполняемые укладкой волокон в одном или нескольких направлениях с дальнейшей их пропиткой матричными составами непосредственно по месту усиления: в этом случае в качестве армирующих волокон чаще всего используются так называемые «сухие» конструкционные ленты и ткани,
- ***припреги***, изготавливаемые из одно- или многонаправленных полос волокон или тканей, предварительно пропитанных в заводских условиях частично полимеризованными составами. Могут размещаться в проектном положении, как без дополнительной пропитки, так и с ее использованием.

Предварительно отверженные заводские ламинаты и стержни, доставляемые к месту производства работ в готовом виде, обычно находят применение в тех случаях, когда действуют значительные величины внутренних усилий (например, при усилении растянутых граней изгибаемых элементов). Для этих элементов насыщение матричными смолами и термическое отверждение выполняется поставщиками в заводских условиях. Наиболее часто они изготавливаются с однонаправленным расположением волокон, однако часть производителей предлагает и изделия с двунаправленными волокнами.

Поскольку готовые фибропластиковые элементы не всегда удобны при практическом использовании (например, при решении задач поперечного усиления железобетонных конструкций или при повышении несущей способности конструкций, имеющих сложную конфигурацию), достаточно широко также применяются фибропластики на основе армирующих полотен и лент, изготавливаемые по месту усиления пропиткой матричными составами. В этих случаях в качестве матриц, обеспечивающих необходимую передачу усилий от основного материала конструкции к элементам внешнего армирования, могут использоваться составы холодного и теплого отвержения.

Составы холодного отвержения применяются при «***сухом***» и «***влажном***» способах производства работ. Армирование одно- и двунаправленными полотнами, имеющими вес до 400 гр/м^2, обычно выполняется «*сухим*» способом, при котором на поверхность конструкции равномерным слоем наносится матричный клеящий состав с последующим размещением по нему волоконных материалов, не имеющих пропитки.

При использовании фиброматериалов с весом 400...800 гр/м^2, применяется «*влажный*» способ, предусматривающий размещение на поверхности конструкции предварительно пропитанных полотен. Иногда могут применяться сочетания данных способов.

В настоящее время для осуществления внешнего армирования «*влажным*» способом производители систем фибропластикового усиления предлагают использование специальных пропиточных машин, насыщающих полотна и ленты матричными смолами под давлением и обеспечивающих их качественную подготовку в условиях строительных площадок.

Матрицы теплого отвержения обычно используются в составе так называемых ***припрегов***, т.е. одно- и двунаправленных полотен и лент, насыщенных при изготовлении матричными смолами. Доставляются и сохраняются припреги при строго регламентированных, относительно низких температурах. Термическое отвердение таких матриц осуществляется нагревом после расположения усиливающего материала в проектном положении. Находят применение припреги обычно в авиации и спортивной индустрии, для усиления строительных конструкций они используются сравнительно редко.

3.3.2. Предварительно отвердженные фибропластиковые системы усиления

Фибропластиковые элементы заводской готовности (см. рис. 3.9, 3.10) обычно производятся методом пултрузии (см. п. 3.2.1), предполагающим непрерывный процесс смачивания групп волокон матричными смолами с последующим термическим отверждением получаемого материала. Технологические особенности данного метода ограничивают максимальное содержание армирующих волокон в элементах величиной 70%.

а) **б)**



Рис. 3.9. Фибропластиковые элементы заводской готовности на основе углеродных волокон: а — стержневые, б — пластинчатые; по [70]



Рис. 3.10. Фибропластиковые профильные элементы заводской готовности на основе стекловолокна; по [8]

В отличие от фибропластиков, изготавливаемых по месту усиления, при рассмотрении которых используются теоретические характеристики сечений волокон и их механические свойства (см. п. 3.3.3), в отношении элементов заводской готовности обычно применяют показатели размеров сечений и свойств комплексного композитного материала.

Предлагаемые в настоящее время производителями предварительно отвердженные фибропластиковые композиты в абсолютном большинстве случаев характеризуются наличием однонаправленных волокон (фактическое фракционное содержание обычно не достигает максимально возможных значений и находится в пределах 50…70%), позволяющих использовать правило смесей при определении показателей жесткости и прочности материалов (п. 3.1). Однако полученные таким образом значения дают только предварительную оценку (часто завышенную), так как не берут во внимание ряд влияющих факторов (фактическую адгезию волокон и матриц, наличие производственных дефектов, пор и возможную несоосность волокон).

Надежные величины показателей механических свойств фиброармированных пластиков, учитывающие особенности используемых технологических процессов, в настоящее время находят только на основе экспериментальных исследований, выполняемых с учетом необходимой статистической обработки полученных результатов.

Для предварительно отвердженных систем усиления, фирмами-изготовителями обычно предоставляются справочные характеристики механических свойств в зависимости от марок и конкретных размеров поперечных сечений поставляемых элементов.

В настоящее время производителями предлагаются готовые фибропластиковые элементы больших длин. Так, например, плоские ламинаты поставляются в рулонинированном виде (рис. 3.9, б), предполагающем длину 150 и более метров.

Адгезионные растворы на поверхность фибропластиковых элементов заводской готовности могут наноситься вручную или с помощью специальных приспособлений, обеспечивающих необходимую толщину и равномерность их слоев.



Рис. 3.11. Усиление железобетонного перекрытия углеродоволоконными фибропластиковыми ламинатами заводской готовности; по [54, 55]

Справочная информация о некоторых видах коммерчески доступных предварительно отвердженных пластинчатых элементов систем фибропластикового усиления строительных конструкций собрана в таблице 3.2.

Таблица 3.2

Некоторые виды коммерчески доступных предварительно отвердженных пластинчатых элементов систем фибропластикового усиления

Торговая марка	Вид армирующего волокна	Толщина, мм	Прочность при растяжении, σ_r, МПа	Модуль упругости, E, ГПа
1	2	4	5	6
Aslan 400 plate	Углеродное	1,4	2400	131
Aslan 500 plate	Углеродное	2,0	2068	124
Aslan 500 plate	Углеродное	4,5	1965	124
CarboDur S plate	Углеродное	1,2, 1,4	2800	165
CarboDur M plate	Углеродное	1,2	2400	210
CarboDur H plate	Углеродное	1,2	1300	300
FibARM Lamel	Углеродное	1,2, 1,4	2800	165
FibARM Lamel HS	Углеродное	1,2, 1,4	3500	170
FibARM Lamel M	Углеродное	1,2, 1,4	2400	210
FibARM Lamel HM	Углеродное	1,2, 1,4	1500	300
Koalmin YC-CPS	Углеродное	1,2, 1,4	3000	165
Koalmin YC-CPI	Углеродное	1,4	2400	210
Koalmin YC-CPH	Углеродное	1,4	1300	300
Koalmin YC-AP	Арамидное	1,2, 1,4	1400	60
Koalmin YC-BP	Базальтовое	1,2, 1,4	1400	45
Koalmin YC-GP	Стеклянное	1,2, 1,4	1000	40
Mapei Carboplate E170	Углеродное	1,2, 1,4	3100	170
Mapei Carboplate E200	Углеродное	1,2, 1,4	3300	200
Mapei Carboplate E250	Углеродное	1,2, 1,4	2500	250
MBrace Laminate 165/2500	Углеродное	1,3	2500	165
MBrace Laminate 170/3100	Углеродное	1,4	3100	170
MBrace Laminate 210/3300	Углеродное	1,4	3300	210
MBrace Laminate 460/1500	Углеродное	1,4	1500	460
MBrace Lam CF 165/3000	Углеродное	1,2, 1,4	3000	165
MBrace Lam CF 210/2400	Углеродное	1,4	2400	210
MBrace Lam CF 210/2800	Углеродное	1,4	2800	210
MBrace Lam CF 300/1300	Углеродное	1,4	1300	300
MBrace Lam AF 70/2100	Арамидное	1,2, 1,4, 2,4, 5,0	2100	70
MBrace Lam BF 45/1400	Базальтовое	1,2, 1,4	1400	45
MBrace Lam GF 40/1000	Стеклянное	1,2, 1,4	1000	40
PC$^{@}$ Carbocomp UNI	Углеродное	1,2, 1,4	1750	285

1	2	4	5	6
Sika CarboDur S	Углеродное	1,2, 1,3, 1,4, 2,5	2800	165
Sika CarboDur M	Углеродное	1,4	2800	210
Sika CarboDur H	Углеродное	1,4	1350	300
S&P 100	Углеродное	1,4	2700	159
S&P Laminates CFK 150	Углеродное	1,2, 1,4	2500	165
S&P Laminates CFK 200	Углеродное	1,2, 1,4	2500	210
SST Laminates CFK LA150	Углеродное	1,2, 1,4	2800	164
SST Laminates CFK LA200	Углеродное	1,4	2500	205
Tyfo SEH51	Стеклянное	1,3	575	26,1
Tyfo SCH41	Углеродное	1,0	985	95,8
Tyfo UC 65HM	Углеродное	1,0	1200	450

На современном рынке систем фибропластикового усиления присутствуют также и готовые *гибридные* элементы, предусматривающие сочетания волокон различных типов, физико-механических свойств и стоимости.

Обычно гибридные материалы отличаются нелинейным характером деформирования и переменной величиной модуля упругости. Однако современные технологии пултрузионного изготовления позволяют обходить данную проблему. Примером чему могут служить линейно деформируемые гибридные углеродоволоконные ламинаты, состоящие из волокон с отличающимися величинами модуля упругости и показателями прочности. Углеродные волокна с высоким модулем упругости практически всегда разрушаются ранее волокон с более низким его показателем. В гибридных же ламинатах более низкомодульные волокна в процессе изготовления получают предварительное напряжение, что обеспечивает материалу практически линейное деформирование [54, 55]. Указанная технология изготовления позволяют более широко использовать менее дорогие волокна, отличающиеся меньшим модулем упругости, но обладающие при этом большей величиной предела прочности.

3.3.3. Фибропластиковые системы, изготавливаемые по месту усиления

3.3.3.1. Общая характеристика

При изготовлении фибропластиков по месту усиления используются одно-, дву- и многонаправленные армирующие ленты и полотна (см. рис. 3.12), наклеиваемые в соответствии с «сухой» и «влажной» технологиями производства работ (п. 3.3.1), см. рис. 3.13. В отдельных случаях с этой целью также могут применяться припреги. Матрицы обеспечивают передачу нагрузки между

армирующими волокнами и основными материалами строительных конструкций. Характеризуют параметры сечений подобных систем теоретическая толщина и механические свойства фиброматериала.



Рис. 3.12. Однонаправленное углеродоволоконное армирующее полотно, используемое для изготовления фибропластиковых элементов усиления «по месту»; по [71]



Рис. 3.13. Устройство «охватывающего» усиления железобетонной колонны фбропластиковой системой, изготавливаемой «по месту»; по [72]

В соответствии с технологическими особенностями производства работ по изготовлению фибропластиковых элементов непосредственно на строительных площадках, существуют определенные риски не всегда достаточно правильного размещения их волокон, кроме того, последние могут получать некоторые повреждения в процессе прикатки к поверхностям усиливаемых конструкций, что заставляет существенно понижать расчетные характеристики соответствующих систем усиления [50].

Свойства холстовых фибропластиков определяются видом применяемых волокон и их расположением в составе материала (одно-, дву- или многонаправленное). Справочная информация о некоторых видах коммерчески доступных «сухих» конструкционных армирующих тканей и полотен, используемых при изготовлении фибропластиковых систем усиления строительных конструкций «по месту», собрана в таблице 3.3.

Таблица 3.3

Некоторые виды коммерчески доступных конструкционных армирующих тканей и полотен, используемых при изготовлении фибропластиковых систем «по месту»

Торговая марка	Вид армирующего волокна	Масса, г/м^2	Расчетная толщина монослоя, мм	Прочность при растяжении, σ_r, МПа	Модуль упругости, E, ГПа
1	2	3	4	5	6
FibARM Tape	Углеродное	200, 230, 300, 350, 530	0,111, 0,128, 0,167, 0,194, 0,294	4300	245
FibARM Tape twill	Углеродное	240, 300, 450	0,066, 0,083, 0,125	4300	245
FibARM Spread Tape	Углеродное	230, 530	0,128, 0294	4300	245
Fosroc C120	Углеродное	200	0,111	2300	230
Fosroc C530	Углеродное	300	0,166	2300	375
Koalmin YC-N	Углеродное	200, 300	0,111, 0,166	4900	230
Koalmin YC-H	Углеродное	300	0,166	4600	340
Koalmin YC-HM	Углеродное	300	0,140	2600	640
Koalmin YC-A	Арамидное	280, 415, 623	0,194, 0,288, 0,433	2880	100
Koalmin YC-B	Базальтовое	200, 250, 300	0,073, 0,091, 0,109	2500	90
Koalmin YC-G	Стеклянное	460, 600, 680, 920	0,16, 0,23, 0,26, 0,350	2300	76
Kevlar@29	Арамидное	280, 420	0,193, 0,286	2920	70.5
Kevlar@49	Арамидное	280, 420	0,193, 0,286	3000	112,4
Kevlar@SRS	Арамидное	280, 420	0,193, 0,286	2100	120
MBrace EG 175	Стеклянное	175	0,067	2400	73
MBrace EG 900	Стеклянное	930	0,370	2400	73
MBrace GF 76/2300	Стеклянное	420, 600, 680, 920	0,160, 0,230, 0,260, 0,350	2300	76
MBrace AK	Арамидное	400, 600, 900	0,193, 0,286, 0,430	2100	120
MBrace AF 129	Арамидное	290	0,200	2900	120
MBrace AF 100/2880	Арамидное	280, 415, 623, 830	0,194, 0,288, 0,433 0,576	2880	100
MBrace AF 120/3200	Арамидное	280, 415	0,194, 0,288	3200	120
MBrace BF 90/2500	Базальтовое	200, 250, 300	0,073, 0,091, 0,109	2500	90
MBrace CF 120	Углеродное	200	0,111	4900	230
MBrace CF 130	Углеродное	300	0,165	4900	230
MBrace CF 140	Углеродное	400	0,230	4900	230
MBrace CF 160	Углеродное	600	0,330	4900	230
MBrace CF 530	Углеродное	300, 400	0,165, 0,190	3000	390

1	2	3	4	5	6
MBrace CF 230/4300	Углеродное	530	0,294	4300	230
MBrace CF 230/4900	Углеродное	150, 200, 230, 300, 450, 530, 600	0,086, 0,111, 0,131, 0,166, 0,255, 0,293, 0,337	4900	230
MBrace CF 300/4900	Углеродное	300	0,166	4900	300
MBrace CF 340/4600	Углеродное	300	0,167	4600	340
MBrace CF 640/2600	Углеродное	300, 400	0,145, 0,190	2600	640
Replark 230/3400	Углеродное	200	0,167	3400	230
Replark 390/2900	Углеродное	300	0,167	2900	390
Replark 640/1900	Углеродное	300	0,143	1900	640
Sika Wrap Hex 103C sheet	Углеродное	160	0,111	3800	235
Sika Wrap Hex 230C sheet	Углеродное	230	0,131	3500	238
Sika Wrap Hex 100G sheet	Стеклянное	840, 915	0,270, 0,360	2250	70
S&P C Sheet 240	Углеродное	200, 300, 400, 600	0,113, 0,168, 0,223, 0,335	4300	240
S&P C Sheet 640	Углеродное	400	0,190	2650	640
S&P A Sheet 120	Арамидное	290, 420, 650	0,200, 0,290, 0,450	2900	120
S&P G Sheet AR	Стеклянное	175, 350, 400, 800	0,065, 0,135, 0,149, 0,299	2800	65
S&P G Sheet E	Стеклянное	175, 350, 400, 800	0,067, 0,135, 0,154, 0,308	3300	73
SST C-sheet CS240	Углеродное	200, 300	0,117, 0,176	3800	240
SST A-sheet AS120	Арамидное	290	0,200	2900	120
Torayca UT70-20	Углеродное	200	0,111	4090	230
Torayca UT70-30	Углеродное	300	0,167	4020	235
Tradecc	Углеродное	225, 300	0,125, 0,167	4000	240
Tyfo SCH41 sheet	Углеродное	750	0,417	3803	227,7

Условия работы армирующих тканей на углах усиливаемых элементов и существующий опыт повышения несущей способности элементов с криволинейными поверхностями определяют рекомендуемый диапазон толщин применяемых «сухих» холстовых армирующих материалов, составляющий в большинстве случаев 0,1…0,3 мм.

3.3.3.2. Поперечные сечения элементов усиления

Окончательная толщина фибропластиковых элементов, изготавливаемых непосредственно по месту усиления конструкции, не поддается абсолютно точной оценке. Поэтому рекомендуется принимать за основу механические и гео-

метрические характеристики «сухих» конструкционных тканей, предоставляемые производителями [50].

Теоретическая толщина расчетного слоя фибры в составе плоского элемента, обычно определяется как отношение веса волокон, ориентированных в одном направлении, к их плотности. Таким образом, соответствующее поперечное сечение единицы ширины фибропластикового элемента системы усиления, выполняемой «по месту», может быть определено выражением

$$A_{rt} = \frac{T_x N_f}{10\rho_{fib}} \quad , \quad \text{мм}^2/\text{м} \tag{3.3}$$

где: T_x — погонная масса волокна в рассматриваемом направлении, ТЕХ (г/км),
N_f — количество волокон заданного направления на единицу ширины ткани, шт./см,
ρ_{fib} — плотность волокон, г/см^3.

В случае применения тканей с одинаковым количеством волокон, направленных в двух перпендикулярных направлениях (симметричных тканей), поперечное сечение единицы ширины элемента системы составит

$$A_{rt} = \frac{p_t}{2\rho_{fib}} \quad , \quad \text{мм}^2/\text{м} \tag{3.4}$$

где: p_t — масса единицы площади ткани, г/м^2.

Та же величина для однонаправленных тканей вычисляется как

$$A_{rt} = \frac{p_t}{\rho_{fib}} \quad . \quad \text{мм}^2/\text{м} \tag{3.5}$$

Достаточно часто сечение фибропластиковых элементов усиления характеризуется условной толщиной эквивалентной фиброармирующей пластины (или, что тоже самое, монослоя фибры)

$$t_{eq} = \frac{A_{rt}}{1000} \quad . \quad \text{мм} \tag{3.6}$$

Недостатком данного метода является то, что различные величины толщин эквивалентной пластины будут соответствовать одной и той же несимметричной ткани (ткани с неодинаковым количеством разнонаправленных волокон).

3.3.3.3. Механические характеристики

Механические характеристики фибропластиковых систем усиления, изготавливаемых «по месту», не могут быть определены прямым умножением пло-

щадей их поперечных сечений A_{rt}, вычисленных по формулам (3.3)…(3.5), на величины модулей упругости E_{fib} или пределов прочности f_{fib} соответствующих волокон. Указанные показатели не учитываю фактическую геометрию и структуру тканей (волнистость и разнонаправленность волокон), существенно влияющие на механические свойства. Аналогичным образом, значения продольной жесткости и прочности «сухих» тканей, предоставляемые некоторыми производителями, не могут напрямую определять механические свойства конечных композитов. Для решения возникающей проблемы обычно используется два основных метода [50], требующих от производителей систем усиления предоставления дополнительной справочной информации.

Метод коэффициентов приведения предусматривает введение поправок к величинам продольной жесткости и предела прочности.

В этом случае продольная жесткость сечения элемента фибропластиковой системы, выполненной по месту усиления, определяется как

$$A_f E_f = \alpha_{fE} A_{fib} E_{fib} \quad , \tag{3.7}$$

где: $A_{fib} = A_{rt}$ — площадь единицы ширины сечения фибропластикового элемента, определяемая формулами (3.3)…(3.5),
E_{fib} — модуль упругости волокон,
α_{fE} — коэффициент приведения модуля упругости.

Коэффициент приведения по модулю упругости α_{fE} определяется производителем фибропластиковой системы усиления на базе экспериментального исследования образцов композита, выполненных в соответствии с конкретными марками армирующих волокон и связующих матриц, а также с учетом требуемого объемного содержания фибры и геометрии сечения элемента усиления. Качество производства работ по устройству фибропластиковой системы и тип основного материала конструкции данным коэффициентом не учитывается.

Аналогичным образом определяется усилие, предшествующее разрушению фиброармированного элемента системы усиления, изготовленного «по месту»:

$$N_f = A_f f_f = \alpha_{ff} A_{fib} f_{fib} \quad , \tag{3.8}$$

где: f_{fib} — предел прочности волокон,
α_{ff} — коэффициент приведения предела прочности.

Величина коэффициента приведения по пределу прочности α_{ff} также определяется производителем системы усиления в соответствии с условиями,

предусмотренными для коэффициента приведения по модулю упругости α_{fE} (см. выше).

Метод характеристических величин является альтернативой метода коэффициентов приведения и предусматривает предоставление производителями специфических характеристических величин механических свойств фибропластиковых систем, размещаемых на конкретных видах усиливаемых конструкций, основанных на их экспериментальных исследованиях. В этом случае становится возможным учитывать все влияющие на конечную систему параметры, в том числе, тип, свойства и геометрию сечения основного материала конструкции.

3.3.3.4. Обеспечение требуемой паро-влажностной передачи

При усилении бетонных, каменных и деревянных конструкций фибропластиковыми системами, изготавливаемыми «по месту», рекомендуется избегать сплошного покрытия внешней поверхности матричными материалами [54, 55]. Предполагается, что 30…50% наружных плоскостей аутентичных конструкций должны сохранять водо- и паропроницаемость (рис. 3.14). В противном случае возникает необходимость привлечения методов строительной физики для проверки обеспечения требуемой паро-влажностной передачи.

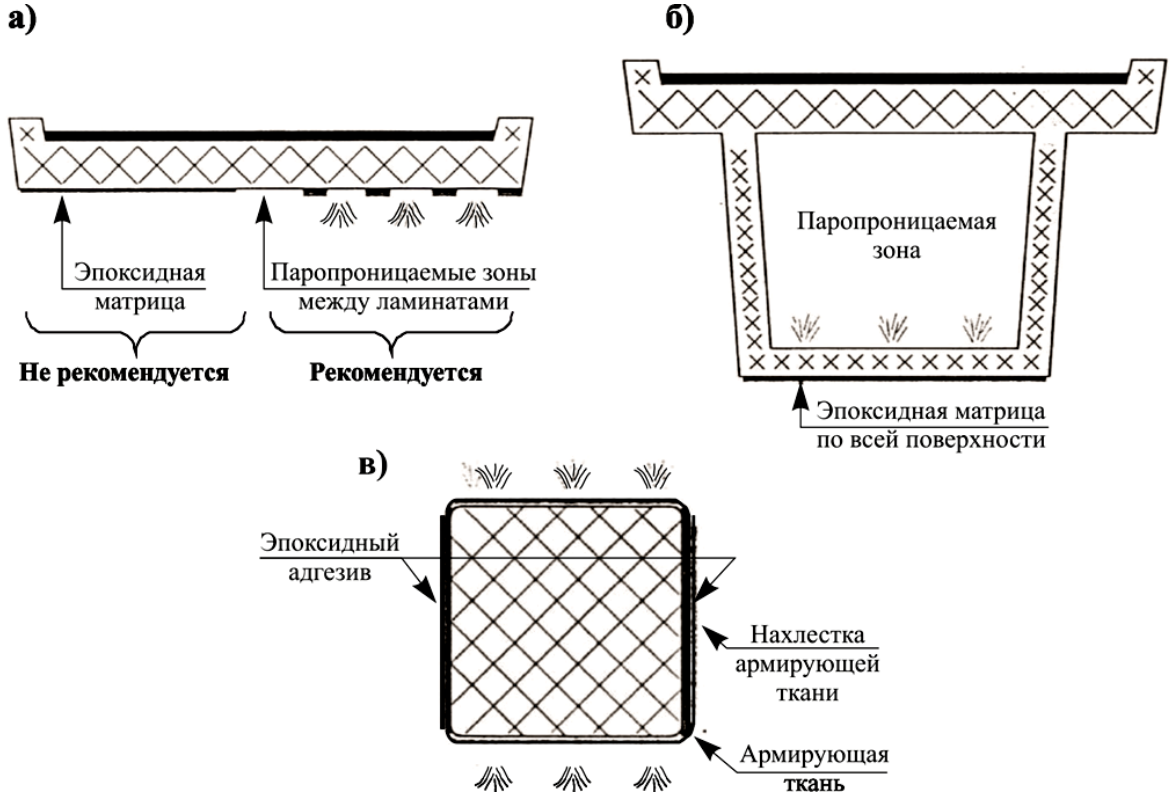


Рис. 3.14. Примеры частичного покрытия усиливаемых конструкций матричными материалами: а, б — по нижним граням, соответственно, плоских и коробчатых пролетных строений мостов, в — по двум боковым граням колонны прямоугольного поперечного сечения; адаптировано по [55]

3.3.4. Системы предварительно пропитанных фибропластиковых элементов усиления

Системы усиления, использующие предварительно пропитанные фибропластиковые полуфабрикаты заводского изготовления (***припреги***), поставляются в рулонах, имеющих длину до 250 м. Их матричные составы могут иметь частичную полимеризацию. Такие системы состоят из тонких полос или тканей (обычно толщиной около 0,15 мм), эластичных и умерено клейких, покрытых защитным слоем силиконовой бумаги (или подобного ей материала), ограждающим от воздействий внешней среды.

Хранение припрегов осуществляется при строго контролируемых температуре и влажности. В упакованном виде они могут сохранять свои свойства в течение достаточно длительного периода времени. Использование препрегов обеспечивает четкое соотношение количества волокон и связующих матриц и устраняет необходимость введения дополнительных отверждающих добавок. Образование в адгезионном слое припрегов поперечных молекулярных связей происходит во время наклейки за счет сопутствующей термической обработки.

Механические характеристики подобных систем близки к параметрам «мокрых» систем усиления.

3.4. Фибропластиковые системы внутреннего армирования строительных конструкций

В качестве элементов современного внутреннего фибропластикового армирования строительных конструкций могут использоваться разнообразные системы, предусматривающие применение стержней, пластин (ламинатов), гибких сеток и канатов (рис. 3.15), в своем большинстве изготавливаемых на основе стеклянных, углеродных, арамидных или базальтовых волокон. Изготавливаются стержневые и плоские элементы внутреннего армирования аналогично предварительно отверженным элементам систем внешнего армирования конструкций, а гибкие сетки — из пересекающихся пучков армирующих волокон, зафиксированных легкой прошивкой или проклейкой.

Наиболее универсальное — стержневое армирование, в зависимости от технологий, используемых производителями арматурных систем, может осуществляться сплошными или трубчатыми композитными элементами круглого и прямоугольного сечений. При этом такая арматура различается видом внешнего покрытия. Производители предлагают армирующие элементы с внешней навивкой дополнительными волокнами (рис. 3.16, а), профили, созданные деформированием стержней (рис. 3.16, б), а также обсыпанные при полимеризации

песком (рис. 3.16, в, г). В зависимости от размеров сечений и показателя модуля упругости фибропластиковая арматура может поставляться в виде стержней заданной длины или в виде мотков (рис. 3.17).

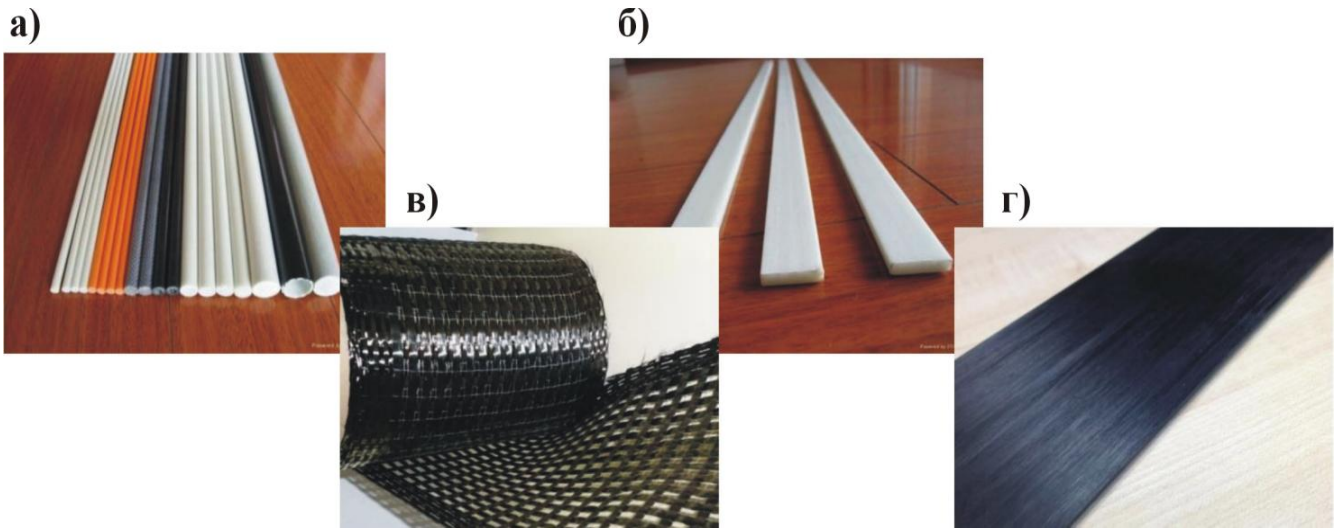


Рис. 3.15. Фибропластиковые элементы внутреннего армирования строительных конструкций: а — стеклопластиковая арматура круглого сплошного и трубчатого сечений, б — стеклопластиковая арматура прямоугольного сечения, в — гибкая углеродоволоконная арматурная сетка, г — углеродоволоконная ламинированная пластина; по [73]

В отличие от традиционного стального армирования, нормативные требования к форме, методам изготовления и особенностям внешней поверхности фибропластиковой арматуры в настоящее время отсутствуют. Общие технические условия для элементов подобного армирования регламентированы международным стандартом *ISO 10406-1:2008* [74].

В настоящее время для каждой конкретной марки арматуры, предлагаемой многочисленными производителями, весь комплекс физико-механических свойств, определяющих возможность ее надежной эксплуатации, устанавливается индивидуально (рис. 3.18) и, как правило, гарантируется отдельными сертификатами.

Стержневые элементы внутреннего композитного армирования могут применяться как в виде отдельных стержней, так и в виде сеток и каркасов, изготавливаемых перевязкой мест их пересечения с помощью металлической проволоки, полипропиленовых хомутов или пластмассовых клипс. Толщины защитных слоев бетона подобных конструкций обычно назначаются только из условий его совместной работы с армированием.

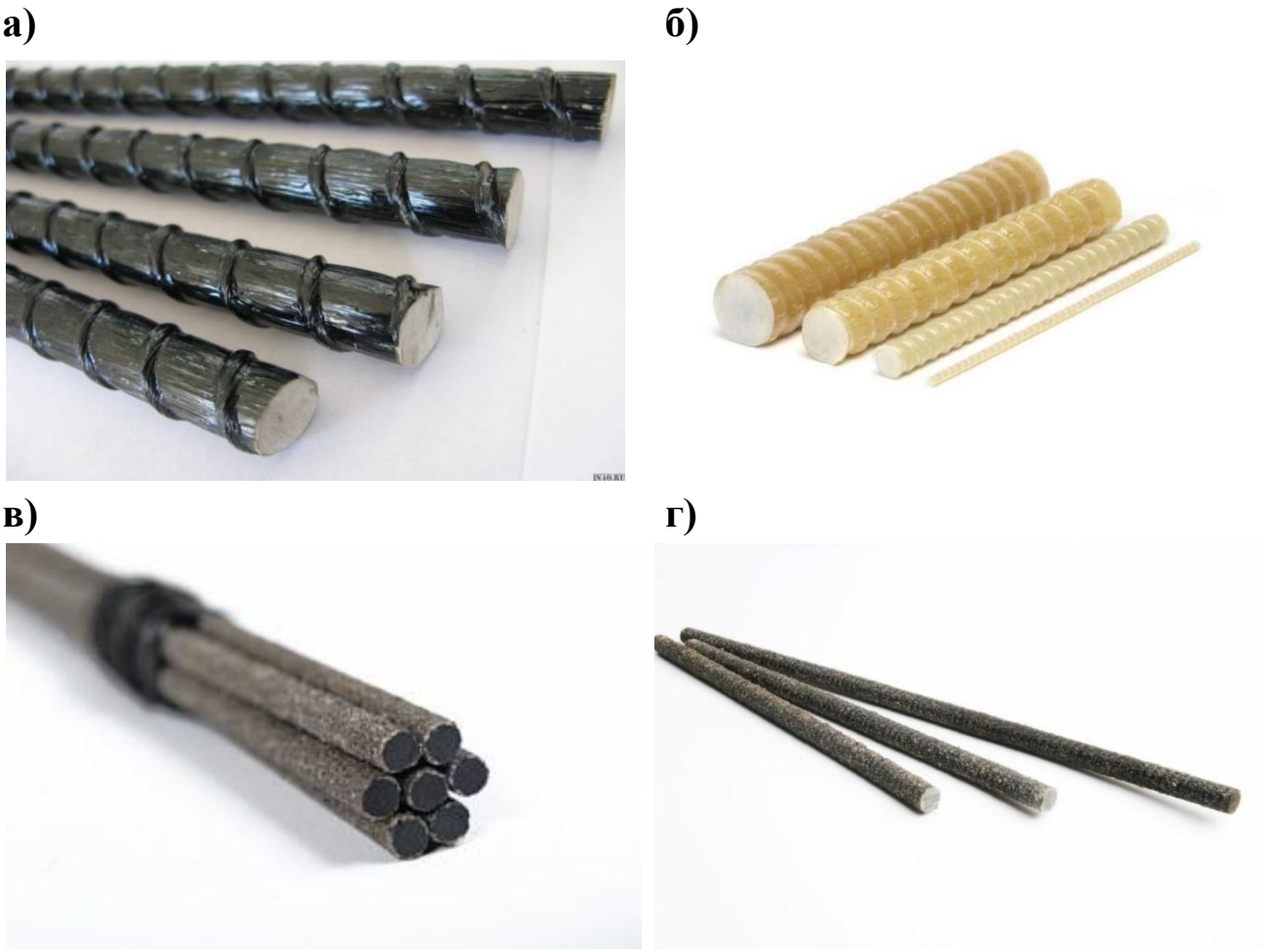


Рис. 3.16. Фибропластиковая стержневая арматура круглого поперечного сечения на основе различных видов армирующих волокон, имеющая различные типы внешней поверхности: а — углеродоволоконная периодического профиля, полученного навивкой дополнительных волокон, б — стекловолоконная периодического профиля, полученного деформированием стержня, в — углеродоволоконная, обсыпанная при полимеризации песком, г — базальтоволоконная, обсыпанная при полимеризации песком; по [73]

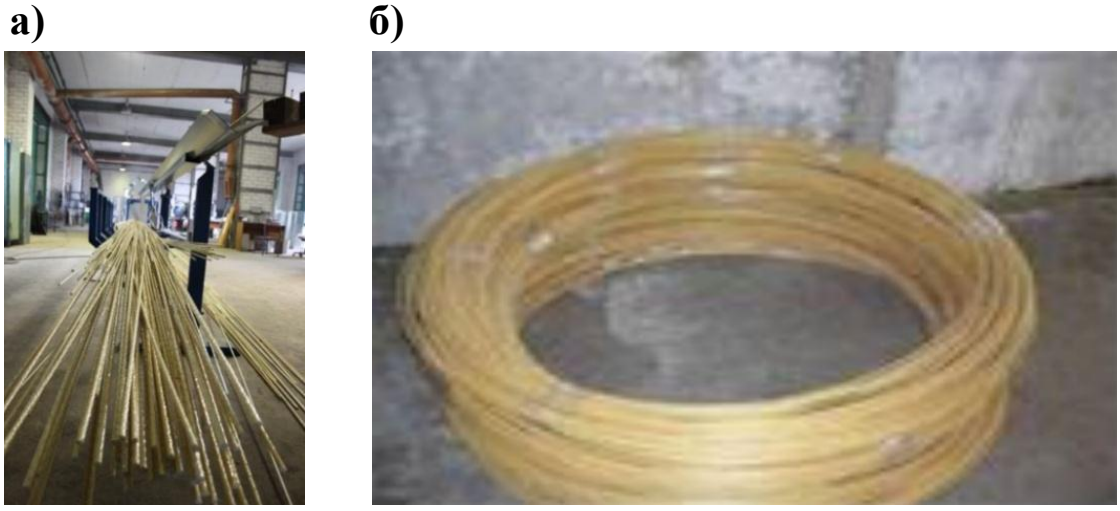


Рис. 3.17. Стеклопластиковая арматура: а — поставляемая в виде стержней заданной длины, б — поставляемая в виде мотков; по [43]

а) **б)** **в)**



Рис. 3.18. Образцы композитной арматуры: а — до испытаний, б — в процессе испытаний на растяжение, в — после испытаний; по [73]

Справочная информация о некоторых видах коммерчески доступных стержней систем внутреннего фибропластикового армирования строительных конструкций собрана в таблице 3.4.

Таблица 3.4

Некоторые виды коммерчески доступных стержней систем внутреннего фибропластикового армирования строительных конструкций

Марка	Вид армирующего волокна	Диаметр / сечение, мм	Площадь сечения, мм^2	Прочность при растяжении, σ_r, МПа	Модуль упругости, E, ГПа
1	2	3	4	5	6
Aslan 100 GFRP rod	Стеклянное	9,5	84	760	41
Aslan 200 CFRP rod	Углеродное	9,0	65	2068	124
FibARM Rebar	Углеродное	4…12	12…113	1600	130
Koalmin Carbon FRP rod	Углеродное	5…16	19…200	2300	130
Koalmin Aramid FRP rod	Арамидное	5,5…10	23…78	1400	60
Koalmin Glass FRP rod	Стеклянное	12…28	113…615	1000	40
Koalmin Glass FRP flat bar	Стеклянное	20…40 × 5…15	100…600	1000	40
LEADLINE^{TM} CFRP rod	Углеродное	12	113	2255	147
MBar^{TM}	Углеродное	8…16	47…194	2500	165
MBrace MBar CF130/2300	Углеродное	5…16	19…200	2300	130

1	2	3	4	5	6
MBrace Rod CF200/2400	Углеродное	3…19	7…283	2400	200
MBrace MBar AF60/1400	Арамидное	5,5…12	23…113	1400	60
MBrace MBar GE40/1000	Стеклянное	5…28	19…615	1000	40
MONSTEROD	Стеклянное	4…32	12…803	850	50
NEFMAC GFRP grid	Стеклянное	—	79	600	30
NEFMAC CFRP grid	Углеродное	—	100	1200	100
NEFMAC AFRP grid	Арамидное	—	92	1300	54
V-ROD CFRP rod	Углеродное	9,5	71	1596	120
V-ROD GFRP rod	Стеклянное	9,5	71	852	43

Физико-механические свойства армирующих волокон и матриц, составляющих структуру материала фибропластиковой композитной арматуры, определяют преимущества бетонных конструкций, армированных с их использованием. Таким конструкциям свойственна долговечность, коррозионная стойкость, высокая прочность и более низкий удельный вес. Использование композитного армирования упрощает производство заготовительных работ на строительных площадках, а процесс прорезки проемов в элементах, армированных подобным образом, является менее трудоемким. Особым преимуществом стекловолоконного композитного армирования является электромагнитная нейтральность.

Стойкость фибропластиковой арматуры к воздействиям влаги обусловила эффективность ее использования в конструкциях берегоукрепительных, морских и припортовых сооружений, при армировании фундаментов, элементов систем мелиорации и водоотведения, при изготовлении опор ЛЭП, дорожного полотна (рис. 3.19), тротуарных плит и конструкций мостовых ограждений. Относительно широко в настоящее время внутренне композитное армирование используется при изготовлении бетонных емкостей химических предприятий и очистных сооружений канализационных стоков, а также при возведении элементов инфраструктуры производств, характеризуемых наличием агрессивных сред. Практически незаменимым армирование фибропластиковыми элементами на основе стеклянных волокон является для конструкций, требующих отсутствия магнитных полей.

К основным недостаткам внутреннего композитного армирования могут быть отнесены его относительно высокая стоимость (компенсирующаяся повешенными физико-механическими характеристиками), отсутствие комплексной нормативной базы по изготовлению и практическому использованию, а также

подверженность температурным воздействиям (требующая увеличения защитного слой бетона или применения специальных мероприятий по огнезащите).

а) **б)**



Рис. 3.19. Армирование стекловолоконными композитными стержнями: а — дорожного полотна мостового перехода поверхностного водосброса *Можайской плотины МГТУ* (*Российская Федерация*), б — фундамента жилого комплекса *«Троицкая Ривьера»* (*г. Москва, Российская Федерация*); по [43, 73]

Серии экспериментальных исследований бетонных образцов, армированных композитными стержнями, проводившихся, в том числе, и на постсоветском пространстве [73], показали отсутствие влияния процессов циклического замораживания на их прочность и деформативность. Характерный недостаток, присущий большинству широко используемых конструкционных фибропластиков, определяющийся процессами стеклования матричных материалов при достижении температуры +60°С, проявляется и для бетонных конструкций с внутренним композитным армированием. При равномерном прогреве таких конструкций до названной температуры наблюдается рост общей деформативности и сопряженное падение несущей способности.

Влажные и агрессивные среды, характеризующиеся длительным наличием сульфатов, водных растворов аммониальных и магнезиальных солей, также могут снижать прочность и увеличивать деформативность нагружаемых бетонных элементов, имеющих соответствующее внутреннее армирование. В большей степени такие процессы составляют опасность для элементов, имеющих стекловолоконное армирование.

Рекомендаций по применению фибропластиковых систем внутреннего армирования строительных конструкций в мировой практике довольно много

[50, 75-91]. К соответствующим же документам, разработанным на постсоветском пространстве, могут быть отнесены [92-96].

3.5. Адгезивы коммерчески доступных систем усиления

Важными компонентами систем усиления конструкций дополнительным армированием, выполняемым при помощи композиционных материалов, являются адгезивы (или, другими словами клеящие составы). Основное их назначение сводится к восприятию сдвигающих и отрывающих усилий между соединяемыми поверхностями.

Для размещения фибропластиков на поверхностях строительных конструкций в настоящее время чаще всего используются эпоксидные двухкомпонентные клеящие составы, некоторые наиболее распространенные на постсоветском пространстве, коммерчески доступные версии которых, приведены в табл. 3.5. Теоретический выбор возможных адгезивов, отличающихся гораздо более высокими характеристиками работоспособности (например, используемых в авиа-космической или военной промышленности), может быть значительно шире. Однако на практике он ограничивается высокой ценой, условиями поставки и существующими ограничениями широкого распространения технологий.

Таблица 3.5

Некоторые виды коммерчески доступных версий конструкционных эпоксидных адгезивов

Производитель / Торговая марка	Показатели				
	Прочность при растяжении, МПа	Прочность при изгибе, МПа	Прочность на сдвиг, МПа	Модуль упругости, ГПа	Температура стеклования T_g, °С
1	2	3	4	5	6
BASF / MBrace adhesive	30	100	—	3,5	56
BASF / MBrace saturant	50	120	—	3,5	—
Exchem / Resifix 31	24	55	22	6,5	60
Koalmin / YC-CPA10	30	—	15	12,8	—
MAPEI SpA / Mapewrap 11/12	30	70	—	5	—
MAPEI SpA / Mapewrap 21	30	55	—	2,5	—

1	2	3	4	5	6
MAPEI SpA / Mapewrap 31	40	70	—	3	—
Resiplast / Epicol U	50	—	—	—	60
SBD / Epoxy Plus	19	35	18	9,8	60,8
Sika / Sikadur-30	33	35	—	12,8	62
S&P / Resicem	22	—	—	5,5	45
S&P / Resin Epoxy 55/50	36	—	—	2,6	44
S&P / Resin 220 epoxy adhesive	—	—	26	7,1	—
Tyfo S Epoxy	72,4	123,4	—	3,2	82
Tyfo S-T Epoxy	50	123,4	—	3,2	101

Выбор типа эпоксидного адгезива зависит от особенностей его применения и определяется такими факторами как температурно-влажностный режим окружающей среды, качество склеиваемых поверхностей, а также требуемая скорость твердения. Рекомендуемая температура стеклования конструкционных адгезивов составляет не менее 50°С.

Определенное коммерческое распространение также имеют адгезивы и на других химических основах. Однако присущие им недостатки существенно ограничивают область практического применения в строительстве. Так составы на основе полиэстера, отличающиеся большими усадочными деформациями и высокими коэффициентами температурного расширения, чувствительны к щелочным воздействиям и быстро затвердевают. Адгезивы на основе виниловых полиэфиров также имеют большие усадочные деформации и в условиях повышенной влажности воздуха плохо обеспечивают необходимое сцепление соединяемых поверхностей. Полиуретановые адгезивы, обладая теми же недостатками, что и полиэфирные, плохо обеспечивают необходимое сцепление между поверхностями.

3.6. Особенности углеродоволоконных систем конструкционных фибропластиков

Как уже отмечалось выше, системы конструкционных фибропластиков, изготавливаемых на основе углеродных волокон, в настоящее время принято рассматривать как наиболее современные и перспективные, способные обеспечить наивысшие показатели предела прочности и модуля упругости. В связи с этим, рассмотрим данные системы более подробно.

3.6.1. Общая характеристика

Характеризуются углеродоволоконные фибропластики низкой плотностью, высокой прочностью, высоким модулем упругости, статической и дина-

мической выносливостью, вибропрочностью, повышенной химической и радиационной стойкостью, химической инертностью, хорошей теплопроводностью и отрицательным, близким к нулю, коэффициентом линейного расширения. Прочность на разрыв данных материалов в четыре-восемь раза превосходит прочность лучших марок стали, а их объемная масса составляет примерно четверть массы стали. Также углеродоволоконные пластики в значительной степени превосходят сталь по усталостным свойствам.

Фибропластики на основе однонаправленных углеродоволоконных полотен и лент, а также соответствующие заводские ламинаты являются гомогенными материалами. Поскольку углеродные волокна демонстрируют линейно-упругие свойства и отличаются хрупким характером разрушения, полученным на их основе однонаправленным композитам также присуща линейная упругость. Учитывая незначительный вклад матриц в прочностные свойства материала, основные расчетные характеристики, определяемые в направлении волокон углеродных фибропластиков, могут быть назначены в соответствии с удельным объемом и механическими параметрами используемой фибры.

3.6.2. Механические свойства при длительно действующих нагрузках

Ползучесть и прочность. Отличительными свойствами углеродоволоконных пластиков являются высокая длительная прочность и низкая ползучесть, обеспечиваемые высокой продольной жесткостью и низкой деформативностью их волокон.

Сопротивляемость ползучести, свойственная углеродоволоконным пластикам, значительно превосходит аналогичные свойства прочих фиброкомпозитов, что находит подтверждение во многих экспериментальных исследованиях [55]. Испытания углеродопластиковых прутьев, помещенных в соляной раствор и подвергавшихся в течение 10 000 часов чередующимся нагрузкам, достигающим 70% временной прочности, не показали признаков разрушения материала. Полученные результаты экспериментов позволили экстраполировать сопротивление ползучести данных стержней, составившее 79% временной прочности, на период 50 лет.

При этом в случае использовании углеродоволоконных пластиков в качестве элементов усиления строительных конструкций, длительные растягивающие напряжения, вызываемые рабочими величинами нагрузок, обычно присутствуют на уровне, не превышающем 20% временной прочности материала [55]. Подобные значения длительных усилий на практике исключают потерю проч-

ности конструкций, усиленных углеродоволоконными материалами, связанную с процессом ползучести.

Усталостная прочность. Пластики, армированные углеродными волокнами, выделяются среди других композитных материалов наибольшей усталостной прочностью. Их коэффициент усталостного сопротивления в 2…3 раза выше, чем у стеклопластиков, что связано с высокими значениями модуля упругости углеродных волокон и как следствие более низким уровнем напряжений и меньшей повреждаемостью полимерных матриц.

Проведенные в Японии эксперименты, предусматривавшие более чем 4×10^6 циклов загружений с напряжениями, составлявшими до 87,5% временной прочности материала, и амплитудой до 1000 Н/мм^2, показали отсутствие усталостного разрушения [55]. Отсутствовали усталостные разрушения и снижение прочности на растяжение также и в последующих испытаниях углеродоволоконных фибропластиковых стержней, омоноличенных в бетоне и подвергнутых 4×10^5 циклам загружений с диапазоном колебаний от 0,05 до 0,5 временной прочности материала и частотой загружений 50 Гц.

Максимальные ожидаемые напряжения, имеющие место при нормальной эксплуатации углеродоволоконных элементов усиления строительных конструкций, не превышают 20% от временной прочности фибропластикового материала. Таким образом, усталостная прочность не является определяющей при соответствующем расчете и проектировании [55].

Ползучесть и релаксация. Ползучесть и релаксация выражают вязкоупругие свойства материала. В фиброкомпозитах разделяют продольную ползучесть, протекающую в поперечном сечении, и интерламинарную ползучесть. Оба типа ползучести незначительны у углеродоволоконных ламинатов, воспринимающих непрерывные напряжения в составе элементов усиления [97].

Под непрерывными эксплуатационными нагрузками, углеродные волокна сами по себе не обнаруживают измеримые деформации ползучести или потери напряжений, результированные соответствующей релаксацией. В отличие от них, большинство широко используемых связующих матриц (на основе эпоксидных и других смол) являются вязкоупругими вплоть до деформаций, составляющих около 20%. В связи со сказанным, разрушения углеродоволоконных пластиков, обусловленные ползучестью, не наступают при деформациях меньших деформаций пределов текучести строительных сталей (не допускающих ползучесть при нормальной эксплуатации).

Отношение модулей упругости волокон и матриц углеродоволоконных пластиков, составляющее в большинстве случаев около 30, и удельное содержание матричных смол, колеблющееся на уровне около 30% от объема компо-

зитного материла, определяет продольное усилие, воспринимаемое матрицей, составляющее приблизительно 0,5% от общей нагрузки [55]. В результате, перераспределением усилий в волокнах, вызываемым ползучестью матриц, возможно пренебречь. Практически не просматривается корреляция между временем приложения нагрузок и прочностью однонаправленных непрерывно армированных ламинатов, загружаемых в продольном направлении.

Испытания, проведенные на углеродоволоконных стержнях в течение более 3000 часов при уровне напряжений, составлявшем 70% от статической временной прочности материала, демонстрируют релаксационные потери, меньшие 2%. Для продолжительности времени 50 лет и указанного выше уровня напряжений в соответствии с логарифмическим профилем кривой ползучести были экстраполированы величины релаксационных потерь, составившие 2…3% [55].

Однонаправленные углеродоволоконные ламинаты, установленные с помощью эпоксидных составов, не проявляют существенных признаков ползучести и релаксации при их использовании в качестве дополнительных усиливающих элементов конструкций, уже несущих основную часть постоянных нагрузок.

3.6.3. Физические и химические свойства

Долговечность. Углеродоволоконные пластики обладают хорошей сопротивляемостью к практически всем видам химических воздействий, возможных в отношении строительных конструкций, а также к термовлажностному циклированию [98-101]. Уровень безопасного содержания в них влаги обычно оценивается в 0,6…0,7%. Данная особенность подтверждается многими исследованиями. Эксперименты на ползучесть углеродоволоконных стержней, находящихся в непрерывном напряженном состоянии с уровнем действующих усилий 5…75% от временной прочности материала, испытывающих температуры 21…80°С и погруженных на период более трех месяцев в жидкость с водородным показателем *pH = 12,5…13*, имитирующую влагу пор бетона, не выявили снижения их интерламинарной поперечной прочности [55].

Детальные эксперименты, проведенные на предварительно напряженных бетонных балках, армированных углеродоволоконными стержнями с предварительными напряжениями, составлявшими 40% от их временной прочности, и погружавшихся на 81 день в щелочные растворы с показателем *pH= 12,5…13*, не показали понижения прочности. Одновременные эксперименты на незащищенных углеродоволоконных стержнях, помещавшихся в тот же раствор с тем-

пературой 60°С, также не смогли выявить негативных изменений механических свойств [55].

Стойкость к ударным воздействиям. Широко известным недостатком большинства углеродоволоконных пластиков является так называемая «боязнь точечных ударов». По сравнению с другими видами фиброкомпозитов они обладают меньшей удельной ударной вязкостью, трещиностойкостью и сопротивляемостью к концентрации напряжений. Значительное влияние на чувствительность к концентрации напряжений оказывает структура армирования углеродопластов и направление приложения действующих нагрузок по отношению к ориентации волокон.

Существенного повышения ударной вязкости таких материалов удается достичь при их гибридной структуре, предусматривающей дополненное включение части высокопрочных, но более низкомодульных арамидных или стеклянных волокон.

В отдельных случаях для повышения трещиностойкости и вязкости разрушения гибридных углеродных композитов также используется периодическое введением под углом ±45° высокомодульных (борных) или низкомодульных (стеклянных) волокон — так называемых стопоров трещин. Применение высокомодульных стопоров приводит к перераспределению большей части нагрузки на их фибру, расположенную у вершин трещин, а эффективность низкомодульных стопоров заключается в создании зон низких напряжений с повышенной вязкостью разрушения по длине трещин.

Термические свойства. Коэффициенты линейного термического расширения однонаправленных углеродоволоконных пластиков имеют существенные отличия при их рассмотрении в продольном и поперечном направлениях [100]. Так, например, углеродоволоконные ламинаты, выпускаемые швейцарской компанией *S&P Clever Reinforcement Company AG*, демонстрируют в продольном направлении коэффициенты температурных деформаций, приближающиеся к нулю, а в поперечном направлении, составляющие $(20...30)\times10^{-6}\ K^{-1}$.

Коэффициент поперечных температурных деформаций обычно не влияет на особенности расчета и проектирования систем усиления. Отличия в коэффициентах продольных температурных деформаций углеродоволоконных пластиков и бетонов, составляющие около $\alpha_T \approx 10\times10^{-6}\ K^{-1}$, в случае значительных температурных колебаний могут негативно влиять на их соединения.

Для определения влияния термического циклирования в швейцарском институте *EMPA* (*EMPA Switzerland, Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology*) были испытаны изгибом две серии балок с армировани-

ем углеродоволоконными пластиками, предварительно подвергнутых 100 циклам замораживания и оттаивания в температурном диапазоне -25…+20°С [55, 102]. Полученные результаты сравнили с экспериментальными данными, соответствующими аналогичным балкам, не претерпевшим температурных воздействий. Балки первой испытанной серии содержали трещины, полученные загружениями, предшествовавшими процессу периодического замораживания. В балках второй серии начальные повреждения отсутствовали. Циклы замораживания сопровождались насыщением балок водой, что позволило изучить потенциальные потери композитной структуры, вызываемые замораживанием воды, на фоне возможных температурных несовместимостей углеродоволоконных пластиков и бетона. Результаты экспериментов не выявили снижения изгибной несущей способности сравниваемых балок.

В дальнейшем бетонная балка, усиленная углеродоволоконной пластиной, была охлаждена до -60°С. В результате, отслоения фибропластиковой пластины от бетона и потеря устойчивости ее отдельных волокон, вызванные сопутствующими сжимающими напряжениями, отсутствовали.

Проблема температурной несовместимости становится более явной при соединении углеродоволоконных пластиков с алюминиевыми элементами, нежели в соединениях углеродных пластиков и бетонов, так как алюминий имеет повышенный коэффициент температурных деформаций ($\alpha_{T,al} = 23{,}4\times10^{-6}\ K^{-1}$). Однако проведенные исследования адгезионных связей между углеродоволоконными ламинатами компании *S&P Clever Reinforcement Company AG* и алюминиевыми поверхностями не выявили уменьшения их несущей способности до температур -133°С [55, 103]. Хотя возможность изучения потенциального разрушения клеевых соединений при данном эксперименте и отсутствовала, проведенные испытания показали, что при температурных параметрах, сопоставимых с условиями эксплуатации строительных конструкций, под действием сопутствующих сжимающих напряжений потеря устойчивости отдельных волокон или углеродопластиковых пластин, характеризуемых стандартными моделями упругости, не происходит.

В соответствии с современной точкой зрения, разнородность температурно-деформационных свойств углеродоволоконных пластиков и бетона не влияет на несущую способность железобетонных конструкций, имеющих подобные усиления. Тем не менее, в соответствии с существующими руководствами по расчету и проектированию конструкций, для исключения последствий потенциально возможных теоретических неопределенностей, рекомендуется, при учете больших температурных колебаний, снижать расчетную величину на-

пряжений подобных клеевых соединений на 10% [55]. Указанная рекомендация основывается на приблизительных оценках.

При расчете всех видов металлических конструкций, разность величин коэффициентов линейных температурных деформаций основного материала и используемых фибропластиковых элементов усиления, следует учитывать всегда.

Огнестойкость. Углеродные волокна обладают хорошей устойчивостью к высоким температурам. Точка стеклования большинства эпоксидных матричных смол соответствует температуре $T_{gm} = 100...130\,℃$. Несущая способность композитных систем, находящихся в условиях действия повышенных температур, обычно ограничивается свойствами используемых адгезивов, демонстрирующих в большинстве случаев точку стеклования при температурах $T_{gk}=47...65\,℃$, достигаемую в течение нескольких минут, так называемого, «стандартного» пожара.

При фибропластиковом усилении строительных конструкций, увеличивающем несущую способность на величину, не превышающую той, что диктуется коэффициентами надежности, отказ элементов усиления не приводит к разрушению и огнестойкость диктуется начальными параметрами не усиленной конструкции.

В случае осуществления усилений, отказ которых чреват разрушением конструкций, соответствующее внешнее огнезащитное покрытие должно быть способным обеспечить защиту адгезионного слоя от нагрева более T_{GK} на требуемый период времени. Данное требование проверяется в каждом конкретном случае.

3.7. Выбор фибропластиковых систем

Фибропластиковые системы на основе низкомодульных лент и полотен, изготовленных с использованием стеклянных и арамидных волокон, широко используются для повышения пластических свойств элементов конструкций. Поскольку стоимость стекловолокна значительно ниже, чем у арамидных волокон, оно имеет заметно большее распространение. Арамидоволоконные ленты и полотна эффективно используются для защиты конструкций от ударных и взрывных воздействий.

Особенности повышения пластических свойств конструкций различными фибропластиковыми системами были оценены при испытаниях (рис. 3.20) на переменные загружения железобетонных колонн, усиленных поверхностным армированием сплошными поперечно направленными конструкционными полотнами [54, 55]. При этом для внешнего армирования использовались углеро-

доволоконные (характеризуемые модулем упругости *E = 240 000 МПа*) и стекловолоконные (с модулем упругости *E = 65 000 МПа*) однонаправленные ткани. Так как модуль упругости используемого стеклянного волокна составлял примерно 27% от показателя углеродного волокна, расход стекловолоконных полотен был увеличен в 3,6 раза (составил для углеродных и стеклянных волокон, расположенных по окружности, соответственно 1,0 и 3,6 кг).

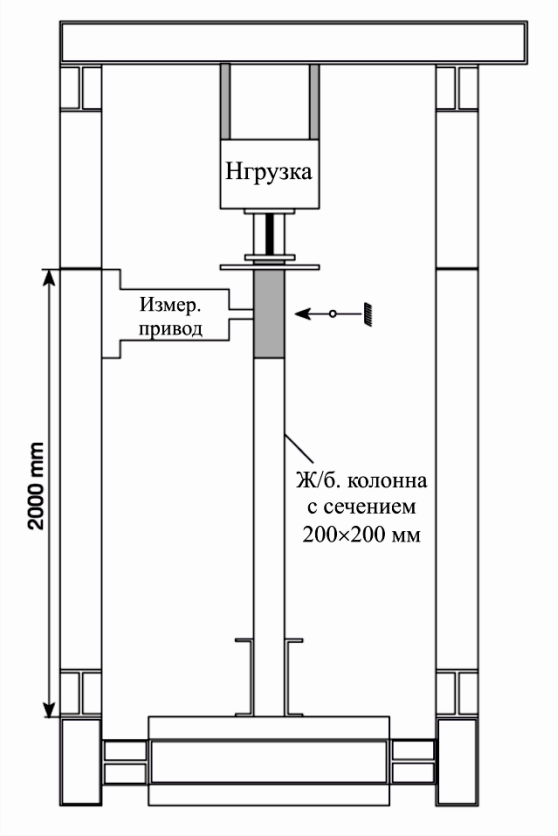


Рис. 3.20. Схема стенда для испытаний на переменные загружения железобетонных колонн, усиленных фибропластиковыми системами, использовавшихся для оценки степени повышения пластических свойств; адаптировано по [54, 55]

Полученные результаты испытаний (рис. 3.21) продемонстрировали более пластичный характер работы стекловолоконных усилений, использующих большее количество рабочего материала, нежели углеродоволоконных решений. Данная особенность часто является определяющей для выбора стекловолоконных фибропластиковых систем при повышении сейсмостойкости конструкций.

Однако при проектировании и расчете усилений реальных конструкций необходимо учитывать также и то, что при использовании стекловолоконных полотен приходится применять более высокие значения коэффициентов надежности. На практике это приводит к тому, что 1 кг углеродоволоконного материала фактически может соответствовать 7 кг E-стекловолокна [54].

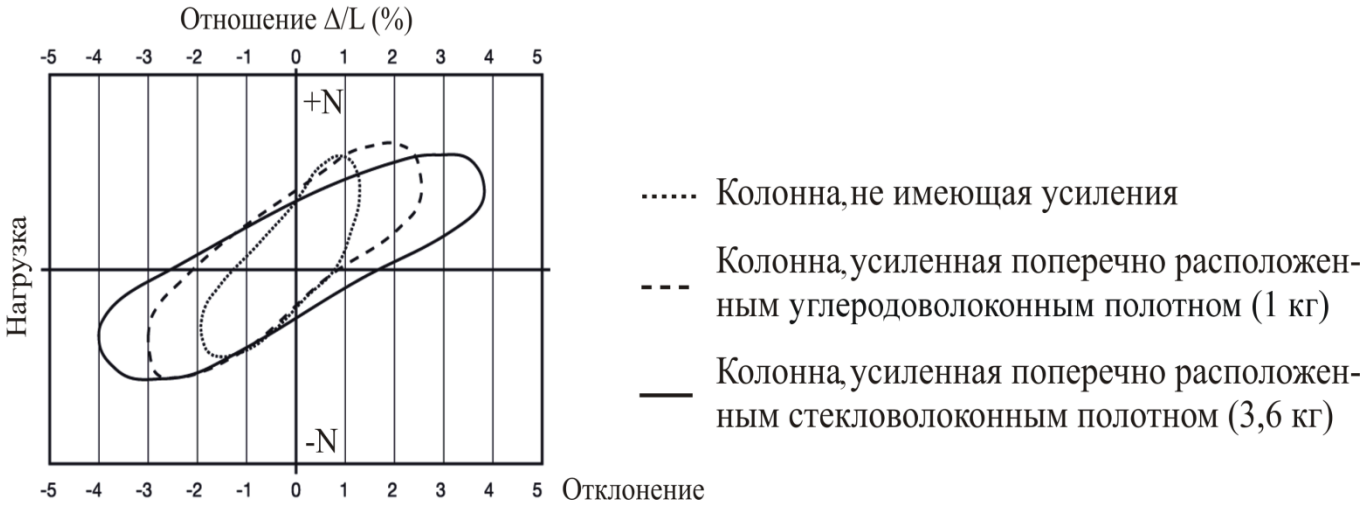


Рис. 3.21. Результаты сравнительных испытаний на пластичность железобетонных колонн, усиленных фибропластиковыми системами; адаптировано по [54, 55]

В техническом университете города *Гент* (*TU Gent*, Бельгия) были проведены испытания колонн круглого сечения с длиной 2,0 м и диаметром 400 мм, усиленных различными фибропластиковыми системами [54, 55, 104]. В качестве материала внешнего сплошного поперечного армирования использовались однонаправленные углеродоволоконные полотна с модулем упругости *240 000* и *640 000 МПа* (временная прочность, соответственно, *3800* и *2650 МПа*) и стекловолоконные полотна, характеризуемые модулем упругости *65 000 МПа* (временная прочность *3000 МПа*). Результаты исследования работы колонн, усиленных разным количеством названных фиброматериалов (рис. 3.22), позволили, в данном случае, сделать вывод о наибольшей эффективности углеродоволоконных полотен с модулем упругости *240 000 МПа* (рис. 3.23). Несущая способность образцов, усиленных 1 кг подобного углеродного волокна, соответствовала несущей способности, получаемой при усилении с использованием 3,6 кг стекловолокна. Достигаемая степень усиления составила 57% при продольной деформации 11 мм/п.м. (рис. 3.24). Учитывая чрезмерность подобных продольных деформаций, примененное решение является актуальным только для обеспечения необходимой степени надежности конструкции в предельном состоянии, предшествующем непосредственному разрушению. Отмечается, что достигаемая максимальная степень усиления может составлять 1,8…2,0 раза.

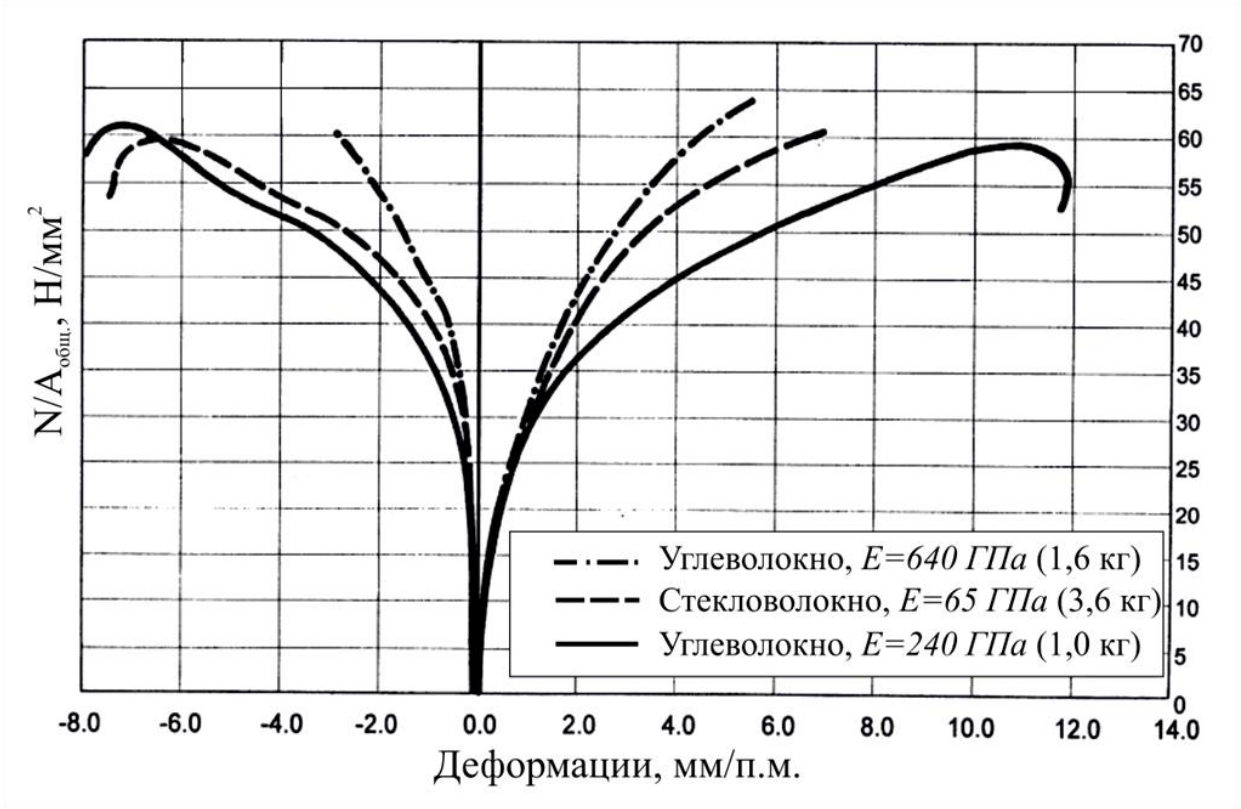


Рис. 3.22. Результаты сравнительных испытаний железобетонных колонн, усиленных фибропластиковыми системами различных видов, проведенных в техническом университете города *Гент* (*TU Gent*, Бельгия); адаптировано по [54, 55]



Рис. 3.23. Разрушение железобетонной колонны, усиленной сплошным поперечным армированием углеродоволоконными полотнами; по [54, 55]

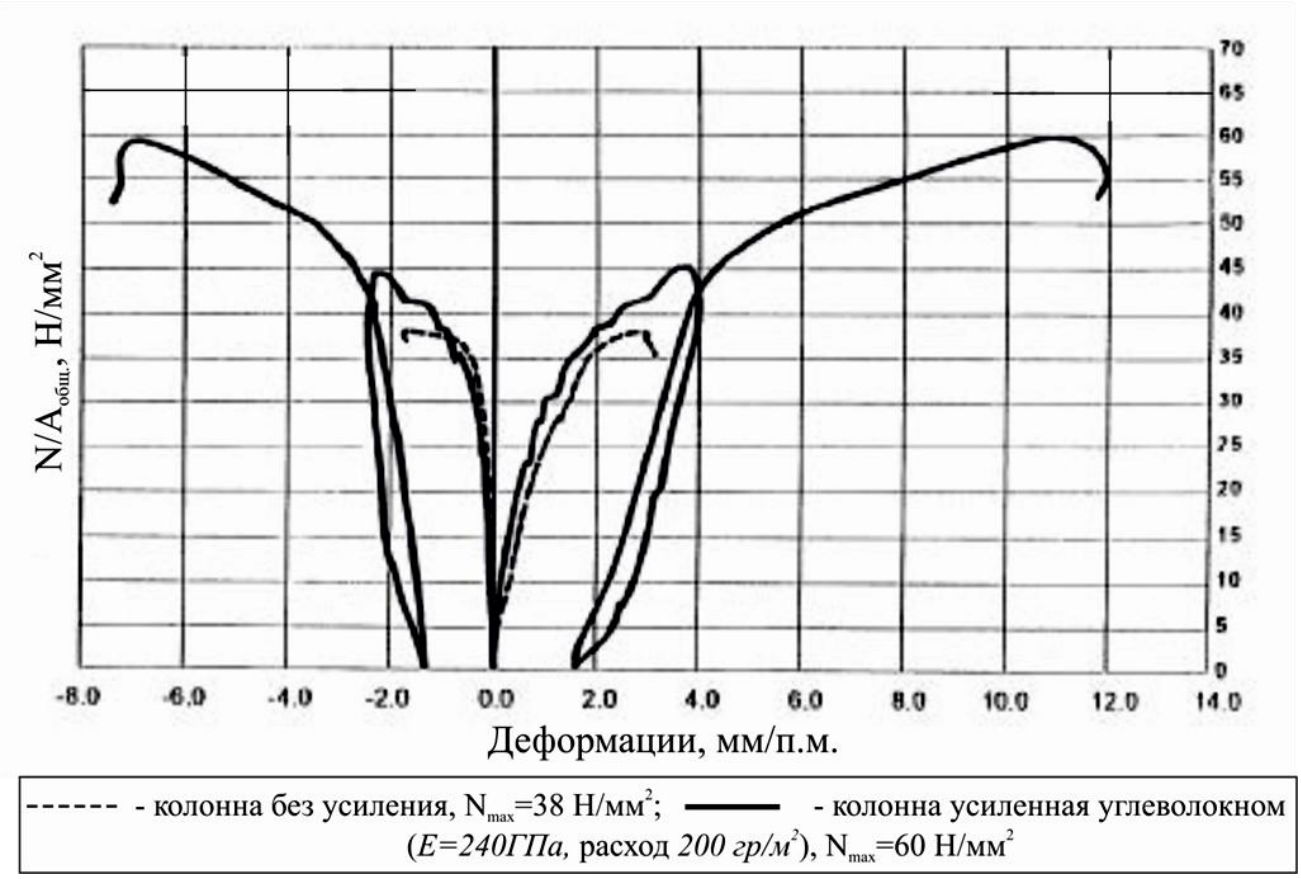


Рис. 3.24. Результаты испытаний железобетонных колонн, усиленных углеродо-волоконным полотном; адаптировано по [54, 55]

Таким образом, фибропластиковые системы на основе углеродных волокон демонстрируют высокую эффективность при осуществлении силовых усилений, ставящих целью исключение наступления предельных состояний первой группы. Эффективное же развитие пластических свойств строительных конструкций, важных при действии динамических нагрузок (особенно сейсмических), становится возможным при использовании фибропластиковых систем на основе стеклянных и арамидных волокон. При необходимости защиты конструкций от ударных и взрывных воздействий наиболее актуальным является применение систем на основе арамидных волокон (см. п. 3.12 и раздел 9).

Следует также обратить внимание на то, что выбору систем усиления строительных конструкций исторических зданий и сооружений, в отношении которых фибропластики являются наиболее эффективными, должно предшествовать детальное обследование, включающее обязательное определение показателей влажности и поверхностной прочности их элементов. При этом выбор типа армирующего волокна зависит от общей совокупности физико-механических качеств материала конструкции и предъявляемых требований к осуществляемому усилению. Так, например, при необходимости усилений,

предусматривающих анизотропное увеличение прочности элементов или при наличии значительных величин действующих усилий, предпочтение отдается однонаправленным углеродоволоконным системам (рис. 3.25), а усиление низкопрочных каменных кладок выполняется обычно с использованием двунаправленных стекловолоконных полотен (рис. 3.26).



Рис. 3.25. Усиление элементов ферм однонаправленными углеродоволоконными ламинатами, лентами и полотнами; по [54]



Рис. 3.26. Усиление каменных сводов двунаправленными стекловолоконными полотнами; по [54]

3.8. Предварительное напряжение при использовании фибропластиковых систем

Фибропластиковые системы могут применяться как без предварительного напряжения, так и с его использованием. Существующий опыт производства работ [54] демонстрирует, что материалы на основе фибры с меньшей величиной модуля упругости (стекловолокно и арамидные волокна) на практике являются более удобными для создания предварительного напряжения, чем высокомодульные углеродные волокна. Высокий модуль упругости определяет относительно небольшие величины удлинений волокон и существенно осложняет технологический процесс придания предварительного напряжения необходимой величины.

Для надежной передачи усилий в предварительно напряженных фибропластиковых элементах обычно требуется дополнительное крепление их концов, что значительно сложнее осуществляется в отношении довольно ломких углеродных и стеклянных волокон, чем при использовании арамидных волокон. По этой причине в настоящее время наибольшее распространение получили системы предварительного напряжения, предусматривающие использование

арамидоволоконных лент (рис. 3.27) и углеродоволоконных предварительно отвердженных ламинатов заводской готовности.



Рис. 3.27. Усиление железобетонной колонны внешним армированием предварительно напряженными арамидоволоконными хомутами, с использованием системы *S&P A-Straps*; по [54]

Следует также отметить, что при предварительном напряжении и наклейке ламинатов заводской готовности, их волокна располагаются в хорошо отвердженной матрице и усилия практически равномерно распределяются между волокнами, обеспечивая большую надежность подобных систем. Использование же «сухих» волокон не позволяет добиться равномерной передача усилий от захватов систем предварительного напряжения: волокна, расположенные в центре, демонстрируют большие деформации, чем внешние волокна. По этой причине сухие волокна, используемые при изготовлении предварительно напрягаемых лент и ремней, обычно собираются в скручиваемые пучки.

3.9. Требования к наружным поверхностям усиливаемых строительных конструкций

Усилия между основным материалом и фибропластиками передаются через адгезионный шов, что требует соответствующего качества поверхности строительной конструкции. К фибропластиковым системам, использующим различные типы армирующих волокон, в данном вопросе предъявляют дифференцированные требования (табл. 3.6).

Системы на основе стекловолокон могут размещаться на поверхностях материалов, обладающих малой прочностью. Их часто используют для восстановления исторических зданий и повышения общей несущей способности каменных конструкций.

Таблица 3.6

Требования к прочности внешних поверхностей усиливаемых фибропластиками строительных конструкций; по [54]

Системы усиления	Минимально-допустимая прочность поверхности строительных конструкций
Полотнами и лентами углеродных и арамидных волокон	1,0 МПа
Полотнами и лентами стекловолокна	0,2 МПа
Углеродоволоконными ламинатами	1,5 МПа



Рис. 3.28. Предварительная пескоструйная обработка поверхности конструкции; по [54]

Фибропластики, изготавливаемые непосредственно на строительной площадке с использованием углеродных и арамидных волокон, требуют прочности основного материала, превышающей 1,0 МПа.

В случае применения ламинатов заводского изготовления, способствующих сосредоточенной передаче усилий, прочность усиливаемой поверхности должна составлять не менее 1,5 МПа.

Для обеспечения необходимого сцепления и эффективной передачи усилий в соединениях фибропластиковых усилений, рабочая поверхность основного материала конструкций обычно подвергается предварительной подготовке. С этой цель может использоваться пескоструйная обработка (рис. 3.28) или различные методы шлифовки (более подробно см. в п.п. 5.9, 6.6.2 и 7.6.1.1).

3.10. Влияние окружающих сред

Правильный подбор фибропластиковых материалов в немалой степени зависит от учета их совместимости с условиями среды дальнейшей эксплуатации. Механические свойства фиброармированных систем усиления строительных конструкций, такие как, например, предел прочности или модуль упругости, могут претерпевать некоторые изменения под влиянием факторов окружающей среды. К числу неблагоприятных воздействий традиционно относят наличие щелочных сред, повышенную влажность, повышенные и пониженные

температуры, термическое циклирование, а также воздействия ультрафиолетовой радиации.

Условия эксплуатации, предполагающие наличие щелочных сред, способных наносить вред матричным основам фибропластиков и их адгезионным соединениям, требуют применения специальных защитных покрытий. Использование систем усиления обычно предполагает, что процесс набора прочности составляющими смолами полностью завершен к моменту проявления данных воздействий.

Повышенная влажность окружающих сред может абсорбироваться матричными смолами и адгезионными составами с последующей их пластификацией, снижением температуры стеклования, прочности и жесткости (последний показатель обычно снижается незначительно). Процесс абсорбции зависит от типа используемых смол, состава и качества изготовления фибропластиковых элементов, их толщин, условий набора прочности, особенностей контактного слоя между матрицами и армирующими волокнами, а также от интенсивности эксплуатации. Меры специальной защиты, предусматривающие нанесение предохраняющих внешних покрытий, исключающих появление в матицах так называемых «воздушных карманов», обычно предпринимаются в условия интенсивного увлажнения (например, в конструкциях, эксплуатируемых на морских сооружениях).

Повышенные температуры и термическое циклирование могут влиять на вязкостные свойства как всего композита, так и входящих в его состав отдельных смол. С повышением температур модуль упругости смол снижается, а при превышении температурой показателя стеклования наблюдается резкое снижение работоспособности фибропластиковых композитов. Обычно термические циклы сами по себе не оказывают вредного воздействия на фибропластики, однако в отдельных случаях они могут способствовать формированию микротрещин в системах с высокими модулями упругости входящих матриц. Для большинства реальных температурных режимов эксплуатации строительных конструкций существует практическая возможность исключения подобных последствий путем выбора матричных компонентов, имеющих температуру стеклования, превышающую максимально возможную эксплуатационную температуру. Однако при этом следует учитывать, что с повышением данного показателя в значительной степени растет стоимость соответствующих систем усиления.

В абсолютном большинстве случаев последовательные замораживания фиброармированных пластиков не оказывают существенных воздействий на их механические свойства. При температурах ниже 0°С системы, основанные на полимерных смолах, могут демонстрировать улучшение своих механических

свойств, выражающееся в некотором повышении прочности и жесткости. Эффект вредного воздействия низких температур обычно наблюдается при эксплуатации данных материалов с незащищенными поверхностями в условиях повышенной влажности.

Ультрафиолетовая радиация редко снижает механические свойства фибропластиковых систем усиления. Тем не менее, указанный фактор может влиять на отдельные виды матричных смол, приводя к появлению в них некоторых признаков хрупкости и способствуя эрозии поверхностей элементов. В большинстве случаев наиболее вредный эффект воздействия ультрафиолетовой радиации сводится к повреждению поверхности, способствующему дальнейшему проникновению влаги и других агрессивных веществ. Фиброармированные системы усиления конструкций могут быть защищены от подобных воздействий путем ввода в состав матричных смол специальных добавок или нанесением предохраняющих покрытий.

Наличие неблагоприятных факторов окружающей среды, оказывающих влияние на работоспособность конструкционных фибропластиков, обычно оценивается с помощью системы соответствующих коэффициентов надежности η_a [50, 75, 76, 105-107], учитывающих с консервативной точки зрения условия их эксплуатации и типы используемых сочетаний «волокно-матрица». При этом данные рекомендации указывают на обязательность применения экспериментально опробованных защитных покрытий в отношении рабочих элементов систем усиления.

3.11. Влияние длительно действующих усилий

Показатели механических свойств фибропластиковых систем усиления (предел прочности, модуль упругости и т.п.) могут демонстрировать некоторую деградацию под воздействием длительно действующих усилий. Так со временем в фиброармированных композитах возможно проявление признаков ползучести, релаксации и усталости материала.

Наличие эффектов ползучести и релаксации в элементах фиброармированных композитных систем зависит как от свойств отдельно взятых волокон и матричных смол, так и от их совместных сочетаний. В настоящее время принято считать, что термореактивные смолы (ненасыщенные полиэфиры, виниловые эфиры, эпоксидные и фенольные смолы) являются менее подверженными ползучести, чем термопластичные смолы (полипропилены, найлоны, поликарбонаты и т.д.).

Поскольку присутствие в комплексном материале волокон уменьшает влияние ползучести матричных смол, подобный эффект актуален при действии

нагрузок, приложенных поперек направления армирующей фибры, или при ее малом процентном содержании. Наиболее предрасположенными процессу ползучести являются системы на основе стеклянных волокон, наименее предрасположенными — углеродоволоконные системы, системы на основе арамидных волокон с данной точки зрения занимают промежуточное положение и считаются умерено предрасположенными. При наличии эффекта ползучести, его влияние может быть уменьшено путем снижения уровня длительно действующих эксплуатационных напряжений.

Необходимой оценки также требует возможность развития в фибропластиковых материалах, находящихся под действием циклических нагрузок, усталостных свойств. Работоспособность в этом случае зависит от структуры связующих матриц и в меньшей степени от типа используемых волокон. В однонаправленных композитах армирующие волокна, как правило, имеют незначительные дефекты и таким образом способны приостанавливать процесс разрушения. При появлении местных разрывов наблюдается перераспределение усилий между прилежащими к ним волокнами, также замедляющее разрушение элементов.

Исключить процесс разрушения фибропластиковых элементов систем усиления строительных конструкций, находящихся под действием длительных напряжений или циклических нагрузок, призвана система соответствующих коэффициентов надежности η_1 [50, 75, 76, 105-107], учитывающих характер приложения нагрузок во времени и типы используемых сочетаний «волокно-матрица».

3.12. Ударные и взрывные воздействия, вандализм

Абсолютно четкое и обоснованное понимание механизма восприятия ударных и взрывных воздействий фиброармированными пластиками в настоящее время еще не сформировалось [106]. В соответствии с современными представлениями наиболее надежными с этой точки зрения являются арамидоволоконные композитные системы (способные воспринимать наибольшие величины ударных нагрузок), а также стекловолоконные фибропластики (см. раздел 9). Углеродоволоконные системы традиционно считаются менее пригодными для восприятия подобных воздействий.

Элементы фибропластиковых усилений особенно чувствительны к действию режущих инструментов, что требует, в местах свободного доступа к ним, применения специальных защитных мероприятий, исключающих проявления вандализма. Подобная уязвимость систем усиления явилась причиной настоятельных рекомендаций о проведении отдельных расчетов конструкций, пред-

полагающих действие комбинаций квазипостоянных (длительно действующих) нагрузок при отсутствии усиливающих элементов. Расчет же конструкций, предполагающий наличие внешнего фиброармирования, производится с учетом действия характеристических (полных) значений нагрузок, взятых с учетом соответствующих коэффициентов надежности.

3.13. Пожарные ограничения использования фибропластиковых систем усиления

Абсолютное большинство коммерчески доступных в настоящее время систем усиления строительных конструкций фиброармированными пластиками крайне чувствительны к действию высоких температур, имеющих место при пожаре. Рабочая температура эксплуатации входящих в их состав адгезивов обычно ограничивается пределами 60…100°С.

Достижение окружающей средой температуры, превышающей температуру стеклования матричных смол (или температуру плавления полукристаллических материалов), приводит к резкому снижению прочностных и жесткостных свойств фибропластиковых элементов систем усиления строительных конструкций. При использовании подобных систем внешнего армирования (особенно в случаях усиления металлических элементов) превышение допустимых температур приводит к быстрой деградации адгезионных соединений фибропластиков с основным материалом конструкции. В результате наблюдается снижение степени усиления, сопровождаемое возможным отслаиванием усиливающих элементов.

Таким образом, в случае тепловых воздействий, вызванных пожаром, несущая способность фиброармированных элементов, размещаемых на поверхностях конструкций, не обеспечивается. В связи с этим необходимы конструктивные мероприятия, призванные продлить период эксплуатации композитов при повышенной температуре окружающей среды. Традиционным способом улучшения механические свойств фиброармированных систем при подобных воздействиях является увеличение толщин защитных покрытий. С этой целью ведущие производители фибропластиковых материалов предлагают специальные сертифицированные внешние теплозащитные системы, способствующие уменьшению распространения пламени, дыма и других продуктов горения.

В том числе, для уменьшения степени непосредственного влияния тепловых воздействий производители фибропластиковых систем предлагают системы температурной защиты. Например, компанией *S&P Clever Reinforcement Company AG* (Швейцария) для защиты фибропластиковых ламинатов собственного производства поставляет специальные пожарозащитные панели (рис. 3.29)

[54, 55], адаптированные к соответствующим европейским нормативным документам, а российский производитель углеродоволоконных систем *FibARM* рекомендует использование минераловатной тепловой защиты усиленных поверхностей строительных конструкций.



Рис. 3.29. Пожарозащитные панели компании *S&P Clever Reinforcement Company AG* (Швейцария); по [54]

Оценка конструкций, ставших объектом действия пожара, предполагает два основных случая, в соответствии с которыми системы усиления проектируются способными противостоять огневым воздействиям либо рассматриваются, как исключаемые из комплексной работы [106]. В первом случае анализируется совместное действие характеристических (нормативных) значений нагрузок, с учетом снижения несущей способности всех элементов (обусловливаемого продолжительностью пожарных воздействий) и частными коэффициентами надежности, соответствующими исключительной ситуации (для фибропластиков $\gamma_f = 1$). Во втором случае предполагается действие комбинаций квазипостоянных (длительных) нагрузок при соответствующем пожару снижении несущей способности элементов, продолжающих работу в составе конструкции, также учитывающем коэффициенты надежности, применяемые в случаях исключительных ситуаций.

На практике же при реальном проектировании усилений наиболее часто предполагают, что в случае отсутствия огневой защиты конструкции должны

быть способны воспринимать нормативные величины действующих усилий самостоятельно, без вступления в работу фибропластиковых элементов, а композитное усиление необходимо для обеспечения восприятия расчетных величин усилий (т.е. выполняет требования необходимых коэффициентов надежности) при отсутствии пожарных воздействий [55].

3.14. Стойкость фибропластиковых систем к воздействиям радиационного излучения

Наиболее перспективными фибропластиковыми системами, применяемыми для силового усиления конструкций объектов атомной промышленности, являются системы, выполняемые на основе углеродных волокон. В связи с этим в настоящее время ведутся исследования, направленные на определение надежности их использования в условиях повышенной радиации.

Изучение влияния гамма излучений на механические свойства углеродоволоконных систем армирования строительных конструкций проводились *Научно-исследовательским институтом атомных реакторов* (Российская Федерация) [108]. При этом радиационные испытания на образцах углеродоволоконных композитов с эпоксидными матрицами осуществлялись с воздействием гамма-излучениями различных радионуклидов (кобальт, марганец, ниобий), в том числе Eu-152 и Eu-154, с мощностью эквивалентных доз внешнего облучения 2,4-60000 мк^{3}в/ч. Облучённые образцы в дальнейшем подвергались механическим испытаниям на растяжение по ГОСТ 25601-80 (рис. 3.30), в соответствии с которыми определялись показатели их предела прочности и модуля упругости (табл. 3.7).

а) **б)**



Рис. 3.30. Испытания углеродоволоконных композитов на растяжение после воздействия гамма-излучением, проводившиеся *Научно-исследовательским институтом атомных реакторов* (Российская Федерация): а — проведение испытаний, б — облучённые образцы до и после испытаний; по [108]

Таблица 3.7

Средние значения показателей механических свойств углеродоволоконных композитов, подвергшихся воздействию гамма-излучением, определенные по толщине монослоя волокна; по [108]

	Значения до облучения	Доза 105 рад	Доза 569 рад	Доза 1 Мрад	Доза 3 Мрад
Предел прочности, МПа	3143	3229	3406	3453	3709
Модуль упругости, ГПа	247	254	236	221	247

Проведенные испытания свидетельствуют о незначительном влиянии (в пределах доверительного интервала 1-8%) гамма облучения дозами 105 рад и 569 рад на предел прочности и модуль упругости исследовавшихся образцов. Облучение большими дозами 1 Мрад и 3 Мрад, согласно расчетам, выполненным по ГОСТ 20.601-80, приводило к увеличению модуля упругости в среднем на 5,0 ГПа, а прочности — на 10 МПа. Эффект изменения исследовавшихся характеристик находился в пределах 1-15%.

Полученные результаты позволили рекомендовать системы внешнего композитного углеродоволоконного армирования, использующие эпоксидные матрицы, для усиления строительных конструкций в помещениях АЭС, имеющих высокий уровень радиации.

3.15. Монтаж и мониторинг фибропластиковых систем усиления

Конструкции, усиленные фибропластиковыми системами, требуют соответствующего мониторинга в процессе монтажа и по его окончании. Кроме того, учитывая относительную новизну таких систем и фактическое отсутствие надежной информации о длительной их работе, необходим объективный мониторинг, проводимый с регулярными интервалами на протяжении всего периода эксплуатации подобных конструкций.

К основным факторам, обеспечивающим качественный монтаж фибропластиковых систем усиления, принято относить: правильную транспортировку, складирование и хранение исходных материалов, необходимую подготовку поверхностей монтажа, выполнение технологических требований по смешиванию матричных (адгезионных) составов, соблюдение условий, определяющих параметры окружающей среды в период устройства усилений (температуру,

влажность и т.д.), а также надлежащую организацию работ, обеспечивающую необходимую чистоту при их производстве.

Условия поставки и хранения исходных материалов фиброармированных систем (волокон, тканей, ламинатов, смол, смесей и т.п.) регламентируются производителями и указываются в прилагаемых документах. Подготовка составляющих систем усилений требует строго соблюдения технологических инструкций. Смешивание частей матричных и адгезионных растворов (обычно поставляемых в виде двухкомпонентных смесей) должно осуществляться с точным соблюдением указанных производителем пропорций.

Условия температуры и влажности окружающей среды, имеющих место в период монтажа систем усиления, могут во многом определять качество адгезионных соединений. Температура поверхности усиливаемой конструкции и внешней среды в значительной степени влияют на продолжительность набора требуемой прочности используемых клеевых соединений. Допустимый температурный диапазон, определяющий правильное развитие химической реакции и необходимый набор прочности, указывается производителем и является одним из основных факторов, обуславливающих скорость формирования соединения. Чрезмерная влажность может неблагоприятно влиять на конечную прочность и выносливость адгезионных связей, что делает важным требование тщательной защиты соединений от влаги в период набора ими прочности.

Надлежащая организация технологического процесса во многом определяет конечное качество рассматриваемых систем усиления. При этом особое внимание уделяется обеспечению чистоты усиливаемых поверхностей конструкций, исключению присутствия частиц неблагоприятно влияющих на формируемое соединение.

4. Определение физико-механических свойств систем конструкционных фибропластиков

4.1. Комплексная оценка свойств

Фибропластиковые материалы, предназначенные для использования в строительстве, подлежат серии контрольных мероприятий, гарантирующих надежность их заявленных физико-механических характеристик. При этом используются специальные стандарты, методы испытаний и критерии соответствия, определяющие минимальные значения показателей физико-механических свойств.

Комплексная оценка свойств систем конструкционных фибропластиков предполагает гарантирование характеристик отдельных материалов и систем в целом, основывающееся на статистической обработке достаточного числа экспериментальных результатов определения физических и механических свойств, используемых при расчетах и проектировании строительных конструкций. Такая оценка должна учитывать данные, позволяющие судить об особенностях длительной эксплуатации фибропластиковых систем.

Проводимые испытания обычно выявляют физические и механические (упругость, прочность и т.п.) свойства композитных материалов, не учитывая особенностей выполнения конкретных аппликаций. Качество же устройства фибропластиковых систем усиления и дальнейший мониторинг их эксплуатации определяются существующими рекомендациями по расчету и проектированию конструкций (например, [50, 75, 76, 105-107]).

Оценка свойств фибропластиковых систем включает два этапа, предполагающие определение:

- ***физических и механических характеристик***, устанавливаемых с учетом статистического анализа результатов больших серий соответствующих испытаний,
- ***длительных физико-механических свойств***.

Практическое определение механических и физических характеристик поставляемых для строительства фибропластиковых систем обычно осуществляется сертифицированными, обладающими необходимым оснащением и имеющими опыт работы с композитными материалами, лабораториями. В настоящее время практически каждый производитель таких систем предоставляет показатели механических характеристик, полученные на основе статистического анализа, учитывающего их характеристические величины, вероятности от-

клонения, выборочные средние значения, выборочные среднеквадратические отклонения и доверительные интервалы. Необходимые коэффициенты надежности применяются в соответствии с особенностями используемых технологий производства.

4.2. Определение физико-механических характеристик

4.2.1. Общие регламенты

Этап определения физических и механических свойств композитных материалов и их исходных компонентов включает различные виды испытаний, регламентированных сериями международных стандартов *ISO* и *ASTM* (см. табл. 4.1-4.3). При этом испытываемые образцы передаются непосредственно предприятиями-изготовителями или выполняются в лабораторных условиях в соответствии с технологиями, применяемыми на строительных площадках. Количество образцов, используемых для каждого вида испытаний, должно составлять не менее пяти штук. Отдельно проводятся испытания всех компонентов (волокон и матричных составов), а также конечных элементов фибропластиковых систем.

Таблица 4.1

Международные стандарты, определяющие механические и физические характеристики композитных материалов; адаптировано по [50]

Характеристики	**Международные стандарты**	
	ISO	***ASTM***
Механические характеристики		
При работе на растяжение: модуль упругости, предел прочности, предел деформативности	527-1, 4, 5:1993(E)	D3039-00, D5083-02, D3916-02
При работе на сжатие: модуль упругости, предел прочности, предел деформативности	14126:1999(E)	D3410
Ползучести	899-1:2003(E)	D2990-01
Физические характеристики		
Плотность	1183-1:2004(E)	D792-00
Коэффициент термического деформирования	11359-2:1999(E)	E831, D696
Температура стеклования (матриц)	11357-2:1999(E) (DSC), 11359-2:1999(E) (TMA)	E1356, E1640
Содержание волокон	11667:1997(E)	D3171, D2584

Таблица 4.2

Международные стандарты, определяющие механические характеристики армирующих тканей; адаптировано по [50]

Характеристики	**Стандарты *ISO***
При работе на растяжение: модуль упругости, предел прочности, предел деформативности	4606:1995(E), 13934-1:1999(E)

Основные физико-механические характеристики рассматриваемых материалов обычно определяют при действии статических нагрузок, вызывающих усилия растяжения, сжатия и сдвига. В отдельных случаях могут также выполняться испытания на изгиб.

Важными параметрами, характеризующими работу систем конструкционных фибропластиков, также являются показатели их адгезионного сцепления с материалами строительных конструкций.

Таблица 4.3

Международные стандарты, определяющие механические и физические характеристики матричных смол и адгезивов; адаптировано по [50]

Характеристики	**Международные стандарты**		**Тип вещества**
	ISO	***ASTM***	
1	**2**	**3**	**4**
Механические характеристики			
При работе на растяжение: модуль упругости, предел прочности, предел деформативности	527-1:1993(E)	D638-02	смола
При работе на сжатие: модуль упругости, предел прочности, предел деформативности	604:2002(E)	D695	смола
Прочность при сдвиге	4587:2003(E)	D3163-01	адгезив
Прочность при отрыве	4578:1997(E)	D3167-03	адгезив
Физические характеристики			
Вязкость	2555:1989(E), 3219:1993(E)	D2196-99	смола
Плотность	1675:1985(E)	D1217-93	смола
Время гелеобразования	9396:1997(E), 2535:2001(E), 15040:1999(E)	D2471-99	смола
Время жизнеспособности	10364:1993(E)	D1338-99	смола, адгезив

1	2	3	4
Экзотермический пик	12114:1997(E)	D2471-99	смола
Время полного структурирования	12114:1997(E)	D4473-03	смола
Объемная усадка	12114:1997(E)	D6289-03	смола
Коэффициент термического деформирования	11359-2:1999(E)	E831, D696	смола
Температура стеклования	11357-2:1999(E) (DSC), 11359-2:1999(E) (TMA)	E1356, E1640	смола

Основным отечественным стандартом, традиционно использовавшимся для определений механические свойства фиброармированных материалов и позволявшим судить об их пригодности для усиления строительных конструкций, является *ГОСТ 25.601-80** [109]. Однако в мировой практике с этой целью наиболее часто применяется стандарт *ISO 527-4* (см. табл. 4.1), посвящённый методам испытания на растяжение пластмасс, армированных в одном или двух направлениях, и содержащий требования к форме образцов, используемому оборудованию, а также дающий общие указания по построению графика «усилия-деформации». При необходимости определения механических характеристик фиброармированных пластиков при сжатии, обычно используется стандарт *ISO 14126* (табл. 4.1).

Определение свойств фибропластиковых ламинатов при изгибе, схемы их загружения и возможный диапазон скоростей нагружения образцов регламентированы международным стандартом *ISO 14125*.

Испытания коротких балочных образцов пластиков, армированных волокнами (как правило, ламинатов), определяющие сдвиговые характеристики материала, обычно производятся в соответствии со стандартом *ISO 14130:1997*.

4.2.2. Особенности проведения испытаний

4.2.2.1. Испытания на растяжение

Определение физико-механических характеристик при работе на растяжение высокопрочных мононаправленных фибропластиковых материалов осложняется необходимостью передачи усилий через специальные захватные устройства, способные обеспечить максимально возможную равномерность загружения армирующих волокон и исключающих появление сдвига между ними. При проведении испытаний следует учитывать то, что используемые захваты обычно в большей степени нагружают внешние волокна материала, провоцируя более ранее их разрушение.

Проведение испытаний плоских фибропластиковых элементов предусматривает использование специальных металлических или композитных пластинчатых накладок, наклеиваемых в зонах захвата их образцов и равномерно распределяющих нагрузку между внешними волокнами. Накладки защищают поверхность материала от точечных повреждений и исключают возможность, разрушения образцов в захватных устройствах.

Испытания образцов фибропластиковых стержней и прутьев производятся с применением стальных трубчатых анкеров, в которые помещаются их концы, подвергаемые последующей заливке полимерными смолами или цементосодержащими растворами.

Площади боковых поверхностей испытываемых образцов, обеспечивающих сцепление фибропластиковых элементов с анкерными устройствами, должны быть достаточными для полной передачи усилий, прикладываемых при испытаниях.

4.2.2.2. Испытания на сжатие

В настоящее время отсутствует четкий порядок проведения достоверных испытаний фибропластиков при работе на сжатие. Разрушения данных материалов при сжимающих воздействиях обусловливаются потерей устойчивости, протекающей как в пределах всего сечения элемента, так и в границах отдельных армирующих волокон. Указанный фактор обычно приводит к тому, что при лабораторных испытаниях образцов с ограниченными геометрическими размерами, получают завышенные величины, характеризующие прочность материала на сжатие.

Для плоских фибропластиковых элементов применяются различные методы испытаний на сжатие, предусматривающие использование разнообразных тонкопластинчатых образцов с продольным ориентирование волокон, отличающихся от образцов, предназначенных для испытаний на растяжение, значительно меньшей рабочей длиной. Аналогичным образом, с применением образцов малой длины, испытываются фибропластиковые стержни.

4.2.2.3. Испытания на сдвиг

Существующая практика проведения испытаний фибропластиков на сдвиг предусматривает применение нескольких стандартов, разработанных *ASTM* (*American Society for Testing and Materials* — американское общество испытаний и материалов). Плоские образцы могут подвергаться испытаниям на действие сдвигающих усилий, направленных вдоль их волокон и вызывающих разрушение по одному или нескольким симметричным сечениям, а также мето-

дом растяжения фрагментов фибропластиков, усилиями, ориентированными под углом 45° к направлению их волокон. Определение рассматриваемых характеристик для композитных стержней осуществляется с использованием специальных приспособлений, подвергающих образцы сдвигу в основных плоскостях.

4.2.2.4. Испытания на изгиб

Простота методов испытаний фибропластиков на изгиб определила широкую их распространенность в мировой практике. Однако данные методы не дают точной информации о базовых свойствах материала. Напряженное состояние нагруженной грани образца определяется сжатием, противоположной грани — растяжением, а на нейтральной оси действуют усилия «чистого» сдвига. Сдвигающую составляющую напряженного состояния при испытаниях обычно стараются минимизировать увеличением относительной длины образца (используются соотношения высоты сечений к длине элементов, близкие к 1:32).

Тем не менее, несмотря на то, что использование методов испытаний изгибом не позволяет получить основные расчетные характеристики, их применение часто оправдывается для конкретных фибропластиковых элементов, предназначенных для работы под поперечными нагрузками.

4.2.2.5. Определение параметров сцепления фибропластиковых элементов внутреннего армирования с материалами строительных конструкций

Важными показателями, во многом определяющими работоспособность строительных конструкций, являются физико-механические характеристики, обуславливающие механизм передачи нагрузки между их основным материалом (бетоном, камнем, сталью, деревом и т.п.) и элементами фибропластикового армирования.

В настоящее время разработан и применяется ряд методов исследования прочностных и деформационных характеристик соединений различных типов стержневых и ламинатных фибропластиков с основными строительными материалами [77].

Определение показателей сцепления. Для проведения испытаний, используемых для сравнительной оценки степени сцепления фибропластиковых элементов внутреннего армирования с материалами строительных конструкций, армирующие стержни вклеиваются или омоноличиваются в составе соответствующих блоков. Длина поверхности сцепления стержневого образца с ок-

ружающим материалом назначается близкой пяти его диаметрам. При испытании стержень подвергается осевой нагрузке (рис. 4.1) с последующим определением величин средних напряжений, действующих по площадке сцепления, а также зависимостей между прикладываемыми усилиями и получаемыми деформациями нагруженного конца стержня.

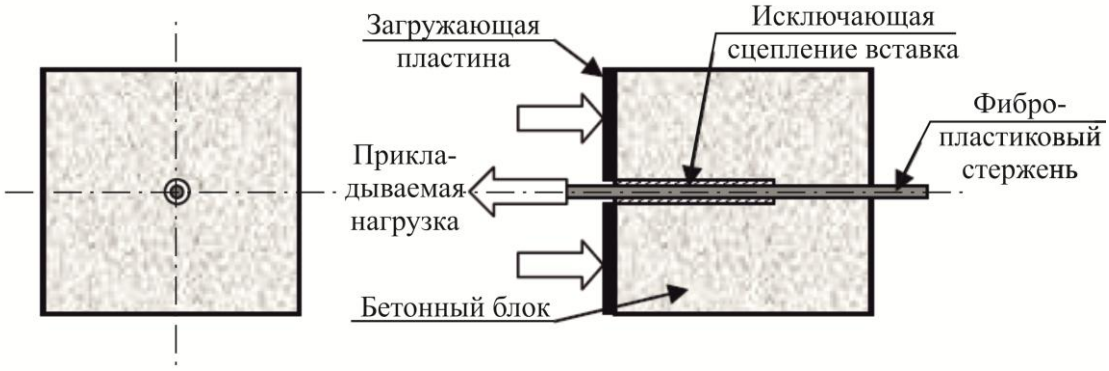


Рис. 4.1. Схема испытаний, определяющих показатели сцепления фибропластиковых стержней с омоноличивающим бетоном; адаптировано по [68]

Данный метод обычно используется в сравнительных целях и не рассматривается как достаточно обоснованный для определения характеристик, необходимых при вычислении рабочих длин армирующих стержней изгибаемых элементов.

Одной из разновидностей рассматриваемых испытаний, также применяемой для определения характеристик сцепления фибропластиковых стержней с омоноличивающим бетоном, предусматривается использование образцов в виде бетонных цилиндров, выполненных внутри тонкостенных стальных труб или колец. При этом на центральной оси цилиндрического образца, у его торца, противоположного точке приложения усилия, омоноличивается участок фибропластикового стержня. Диаметр цилиндра принимается приблизительно равным трем диаметрам стержня. При проведении подобных исследований предполагается, что усилия, передаваемые по площадке сцепления, распределяются практически равномерно.

Определение показателей сцепления в изгибаемых образцах. Результаты обычных испытаний, характеризующих показатели сцепления, являются малоприменимыми для оценки параметров напряженно-деформируемого состояния балок, усиленных фибропластиками. Разрешить некоторые несоответствия, возникающие при использовании описанных методов для назначения характеристик, учитываемых в расчетах и определяющих распределения напряжений

вдоль армирующих элементов балочных конструкций, удается при применении изгибаемых образцов соединений.

Для проведения рассматриваемых исследований используются специальные установки, имитирующие условия загружения арматурных стержней в составе опорных частей балок (рис. 4.2). В установку помещается блок основного материала конструкции с вклеенным или омоноличенным фибропластиковым стержнем, подобный описанному выше, но имеющий несимметричное расположение арматуры.

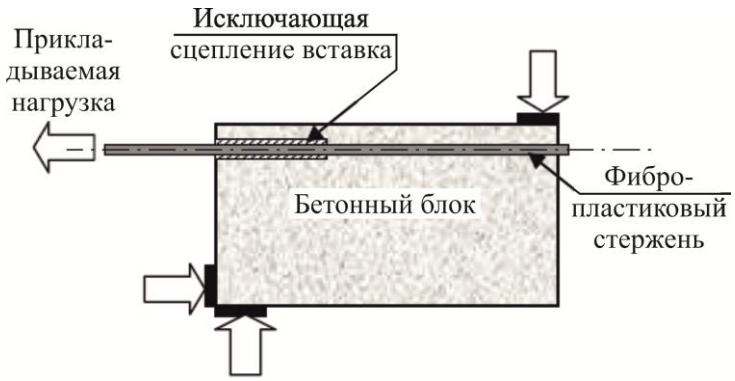


Рис. 4.2. Схема испытаний, определяющих показатели сцепления фибропластиковых стержней с омоноличивающим бетоном в изгибаемых образцах; адаптировано по [68]

Испытания на осевое растяжение. В настоящее время применяется два основных типа испытаний на центрально-осевое растяжение образцов, непрерывно армированных вклеенными или омоноличенными стержневыми фибропластиковыми элементами. В первом случае нагрузка прикладывается к выпущенным концам стержней. Во втором случае загружается непосредственно основной материал, содержащий внутри себя фибропластиковые стержни.

При испытаниях стержневые элементы располагаются по оси экспериментальных образцов, а в средней части длины последних предусматриваются симметричные надрезы, предопределяющие положение мест начального трещинообразования (рис. 4.3). Прочность сцепления фибропластиковых элементов с основным материалом определяется в соответствии с косвенными признаками, по результатам наблюдения за характером развития трещин в образце.

Испытания на осевое растяжение могут также выполняться с использованием плоских фрагментов конструкций, содержащих несколько фибропластиковых стержней. При этом пропорциональная нагрузка может прикладываться на все или только на некоторые выпущенные концы стержней.

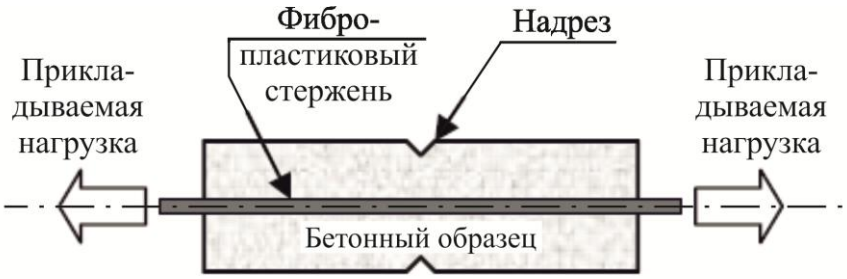


Рис. 4.3. Схема проведения испытаний на осевое растяжение фибропластиковых стержней, омоноличенных в составе бетонных образцов; адаптировано по [68]

Предполагается, что длина исследуемых образцов должна позволять формирование, по крайней мере, пяти поперечных трещин, изучение развития длины и ширины которых позволяет судить о продольной жесткости испытываемых элементов, а также о показателях сцепления арматуры с окружающим материалом.

4.2.2.6. Определение параметров сцепления фибропластиковых элементов внешнего армирования с материалами строительных конструкций

Поскольку широкое распространение для повышения несущей способности и жесткости строительных конструкций приобрели способы внешнего армирования пластинчатыми и тканевыми фибропластиковыми материалами особое значение имеют способы определения физико-механических характеристик внешних клеевых соединений.

Оценивая результаты экспериментальных исследований соединений внешнего армирования, следует учитывать то, что получаемые общие показатели их напряженного состояния, являются следствием сложной совместной работы элементов фибропластикового армирования, адгезионного заполнения шва и части основного материала конструкции, расположенной в пришовной зоне.

В виду практической важности характеристик сцепления соединений внешнего фибропластикового армирования для оценки работоспособности конструкций, разработан ряд методов соответствующих испытаний [77], условно подразделяемых на три основные группы: *испытания на сдвиг, отрыв и комбинированные испытания*. Фактическое наличие в большинстве клеевых соединений комбинаций касательных и нормальных напряжений, придают особую перспективность методам комбинированных испытаний.

Испытания на сдвиг. Поскольку элементы внешнего фибропластикового армирования наиболее часто используются в различных сопряжениях, где доминирующими являются касательные напряжения, методы испытаний клеевых соединений на сдвиг отличаются достаточным многообразием.

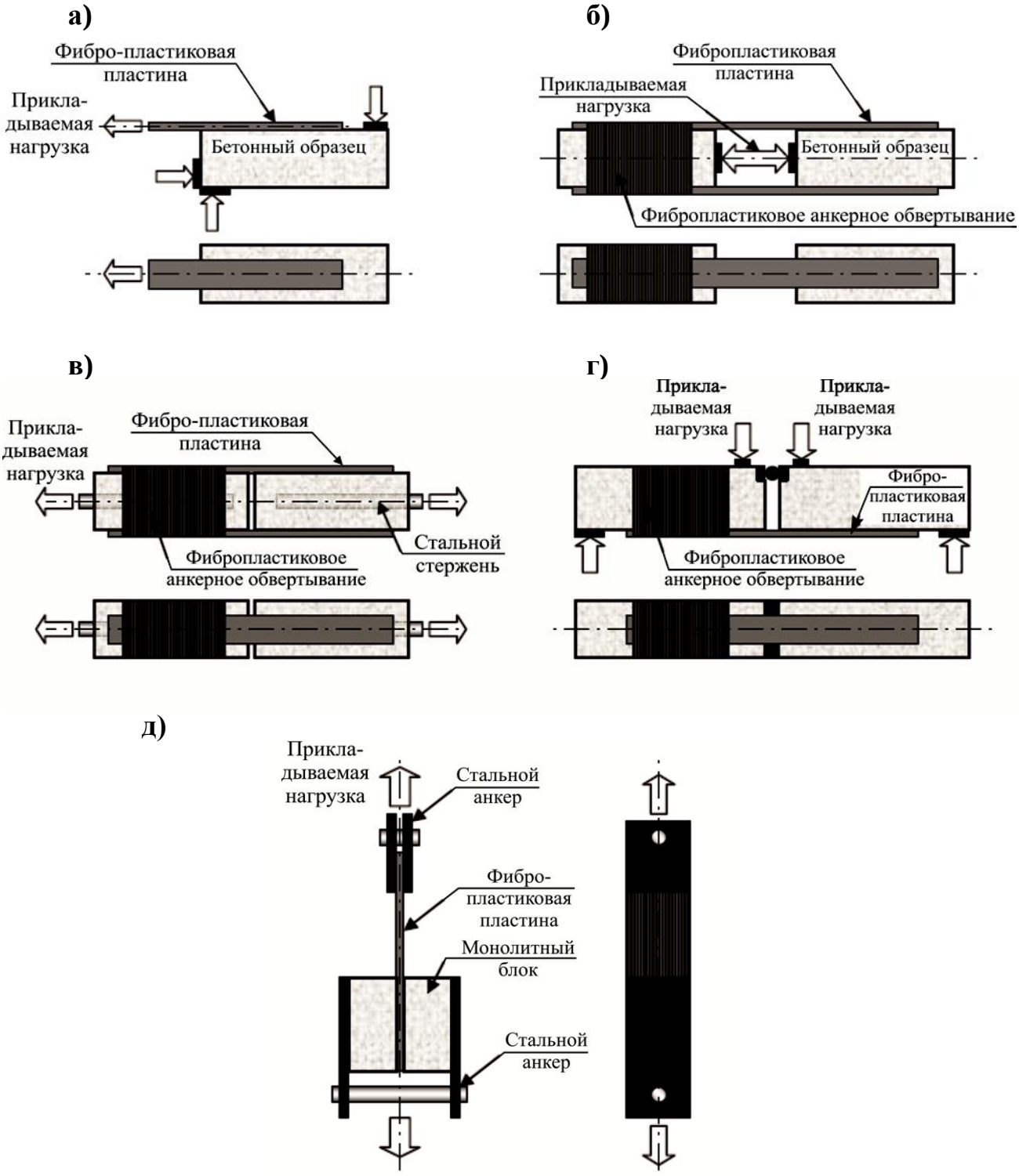


Рис. 4.4. Схемы проведения испытаний на сдвиг клеевых соединений с использованием: а — несимметричных экспериментальных образцов, б — симметричных образцов, подвергаемых внутреннему распору, в — симметричных образцов, подвергаемых внешнему растяжению, г — изгибаемых образцов, д — образцов с внутренним положением фибропластиковых элементов; адаптировано по [68]

Исследование распределения сдвигающих усилий, действующих по клеевым швам экспериментальных образцов, имитирующих характер работы конкретных соединений, осуществляется при различных формах загружений и условно подразделяется на испытания несимметричных образцов (рис. 4.4, а), симметричных образцов, подвергаемых внутреннему распору или внешнему растяжению (рис. 4.4, б, в), изгибаемых образцов (рис. 4.4, г), а также образцов с внутренним положением сдвигаемых фибропластиковых элементов (рис. 4.4, д).

Испытания на отрыв. Наибольшее распространение при определении прочности клеевых соединений, воспринимающих действие нормальных напряжений, получил метод испытаний отрывом, предусматривающий использование специального жесткого диска, приклеиваемого к поверхности фибропластика и подвергающего шов ранее изготовленного соединения действию растягивающих усилий (рис. 4.5).

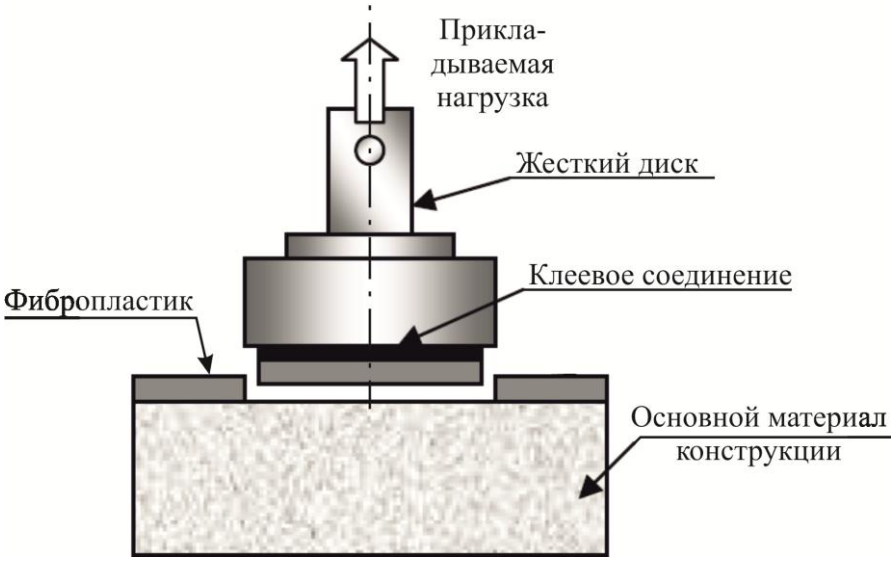


Рис. 4.5. Схемы проведения испытаний на отрыв фибропластиковых элементов от поверхности основного материала конструкции; адаптировано по [68]

Проведение рассматриваемых испытаний предваряется подготовкой экспериментальных образцов, состоящих из фрагментов поверхности основного материала строительной конструкции с выполненными на них клеевыми соединениями фибропластиковых элементов. После набора необходимой прочности тестируемыми швами, в фибропластиковых деталях дрелью, оснащенной радиальной насадкой, выполняются круговые прорези, ограничивающие участки, соответствующие размерам приклеиваемых в дальнейшем испытательных дисков. Нагрузка передается на диск, соединенный с ограниченным фрагментом фибропластика, вплоть до полного его отрыва от основного материала.

Разновидность испытаний данным методом предусматривает совмещение растягивающих и сдвигающих усилий, для чего испытательный диск подвергается одновременному отрыву и кручению вокруг своей оси.

Комбинированные испытания. Комбинированные испытания позволяют получить более точную характеристику работы клеевых соединений при внешнем фибропластиковом армировании строительных конструкций.

В настоящее время используются методики, предусматривающие подобные испытания соединений на угловое отслаивание, на работу в составе стержневых и пластинчатых шпонок, а также в составе различных одно- и двухконсольных балок. Однако следует отметить, что данные методы являются значительно более сложными и трудоемкими в сравнении с описанными выше. Обычно они используются для исследований, рассматривающих общую механику разрушений связей в клеевых швах.

4.2.2.7. Особенности испытаний соединений фибропластиков с металлическими элементами

Механизм работы и разрушения соединений фиброармированных пластиков с элементами, выполненными из большинства конструкционных материалов, в значительной степени отличается от механизма работы соединений фибропластиков с металлами. В первом случае отказ в работе соединений обычно обуславливается низкой прочностью прилежащих к ним слоев материала конструкций, а во втором — главным образом разрушением самих адгезионных швов. Кроме того на особенности работы соединений в значительной степени влияют отличия в модулях упругости, усадка и ползучесть многих конструкционных материалов (отсутствующие у стали), а также различие в реакциях на воздействия факторов окружающей среды (повышенных и пониженных температур, влаги, пара, наличия солей и т.п.).

Для проведения испытаний соединений фибропластиков с металлическими конструкциями были адаптированы различные методы, которые условно могут быть разделены на методы, предусматривающие приложение нагрузки непосредственно к фибропластиковым элементам, и методы, предполагающие загружение металлических элементов, объединенных фибропластиковыми деталями [110].

При непосредственном загружении фибропластиковых пластин могут прикладываться как сжимающие (рис. 4.6, а), так и растягивающие (рис. 4.6, б, в) усилия.

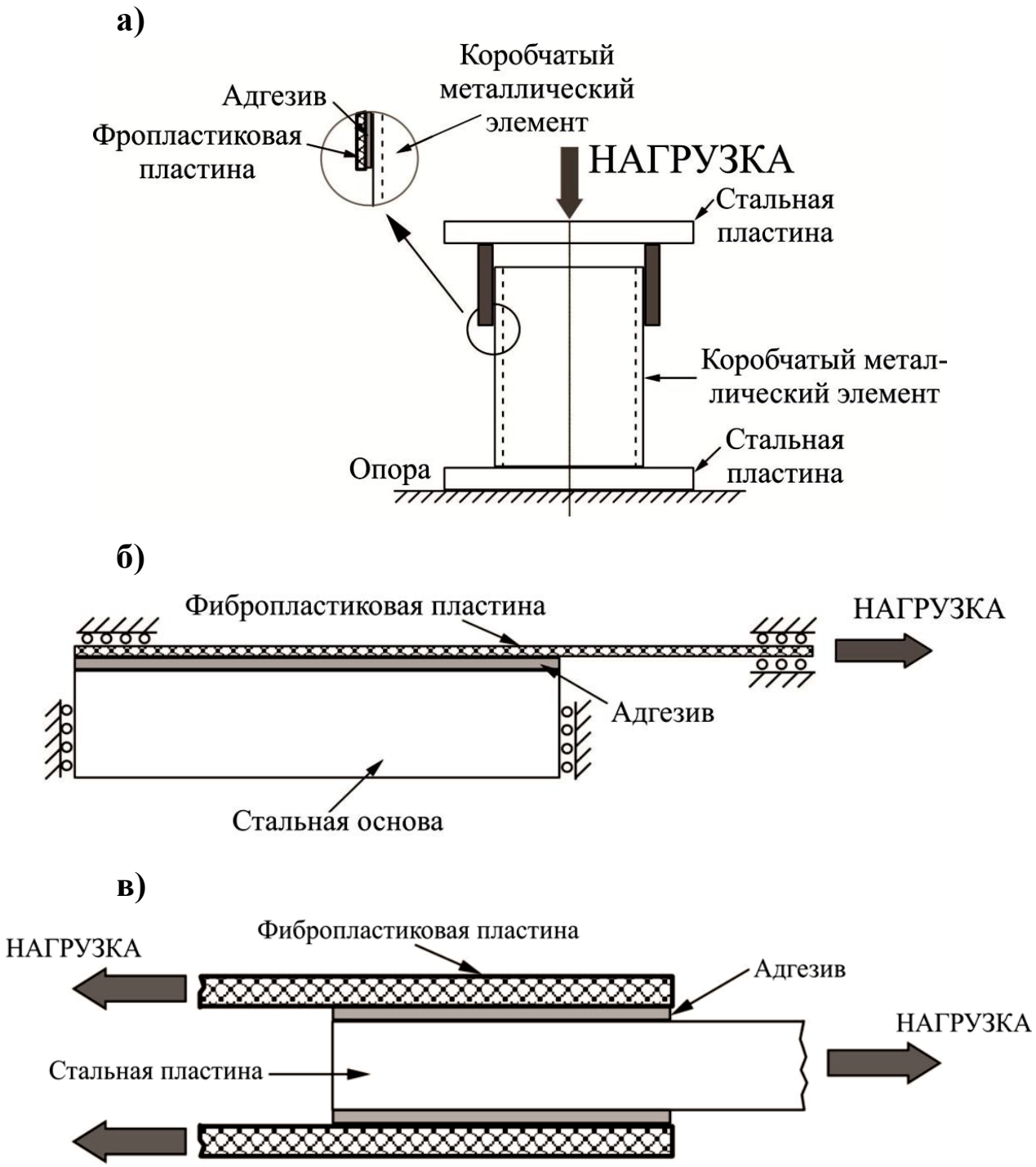


Рис. 4.6. Экспериментальные образцы соединений стали с фибропластиками, предусматривающие приложение нагрузки непосредственно к композитным элементам: а — сжимающими усилиями [111], б — растягивающими усилиями [112]; адаптировано по [110]

Испытания сжимающими усилиями [111] находят достаточно ограниченное применение, их рекомендуют только для тех соединений, в которых фибропластиковые элементы также будут испытывать сжатие (см. рис. 4.6, а). Главным недостатком приложения сжимающих усилий, также как и в описан-

ных выше соединениях с бетоном, является их способность вызывать потерю устойчивости отдельно взятых армирующих волокон, объединенных матрицей в составе единых композитных элементов. Кроме этого фибропластиковые элементы в составе металлических конструкций, как правило, используются для работы на растяжение и получение характеристик работы соединений на сжатие оказывается не актуальным.

Испытания растягивающими усилиями при исследованиях соединений фибропластиков со сталью [113, 114] находит гораздо более частую практику. Экспериментальные исследования с использованием образцов, подвергаемых одностороннему сдвигу (рис. 4.6, б), позволяют более детально наблюдать за процессами разрушения соединений, протекающими только по одной плоскости. Данный метод согласуется с описанными выше методами испытаний соединений фибропластиков с бетоном, однако требует точной настройки экспериментального оборудования, минимизирующей величину эксцентриситета приложения загружающего усилия. Еще одним существенным недостатком является его малая применимость при испытаниях соединений с армирующими тканями и лентами, правильный захват которых обычно вызывает ряд трудностей.

Испытания растягивающими усилиями, прикладываемыми к образцам с двухсторонней наклейкой композиционных материалов (рис. 4.7, а), часто используется для исследования адгезионных швов между стальными пластинами и углеродоволоконными ламинатами или армирующими тканями и лентами [115-117].

Испытания на трубчатых образцах были предложены [118, 119] для исследования соединений между стальными элементами и углеродоволоконными накладками (рис. 4.7, б), однако, в этом случае, вследствие кривизны контактных поверхностей, становится возможным использование только армирующих тканей и лент. Основную сложность испытаний на трубчатых образцах составляет неопределенность будущих мест начальных разрушений.

Развитие разрушений непосредственно по адгезионному шву в соединениях фибропластиков с металлическими элементами может протекать по шести принципиальным схемам (см. п. 6.3.2), что усложняет процесс соответствующих наблюдений. Для формирования заданных мест разрушения соединений на практике предпринимались попытки использования образцов с неравными длинами парных плоскостей сдвига [116], с последующим инструментальным наблюдением за более коротким адгезионным швом. С этой же целью у одного из парных клеевых швов могут использоваться дополнительные меха-

нические крепления или внешняя поперечно-направленная анкерующая аппликация дополнительного фибропластикового слоя.

Таким образом, на основании вышесказанного обычно рекомендуется [110] проведение испытаний соединений стальных элементов с фиброармированными композитными пластинами по схеме, представленной на рисунке 4.6, б, а с армирующими тканями и лентами — по схеме, приведенной на рисунке 4.7, а.

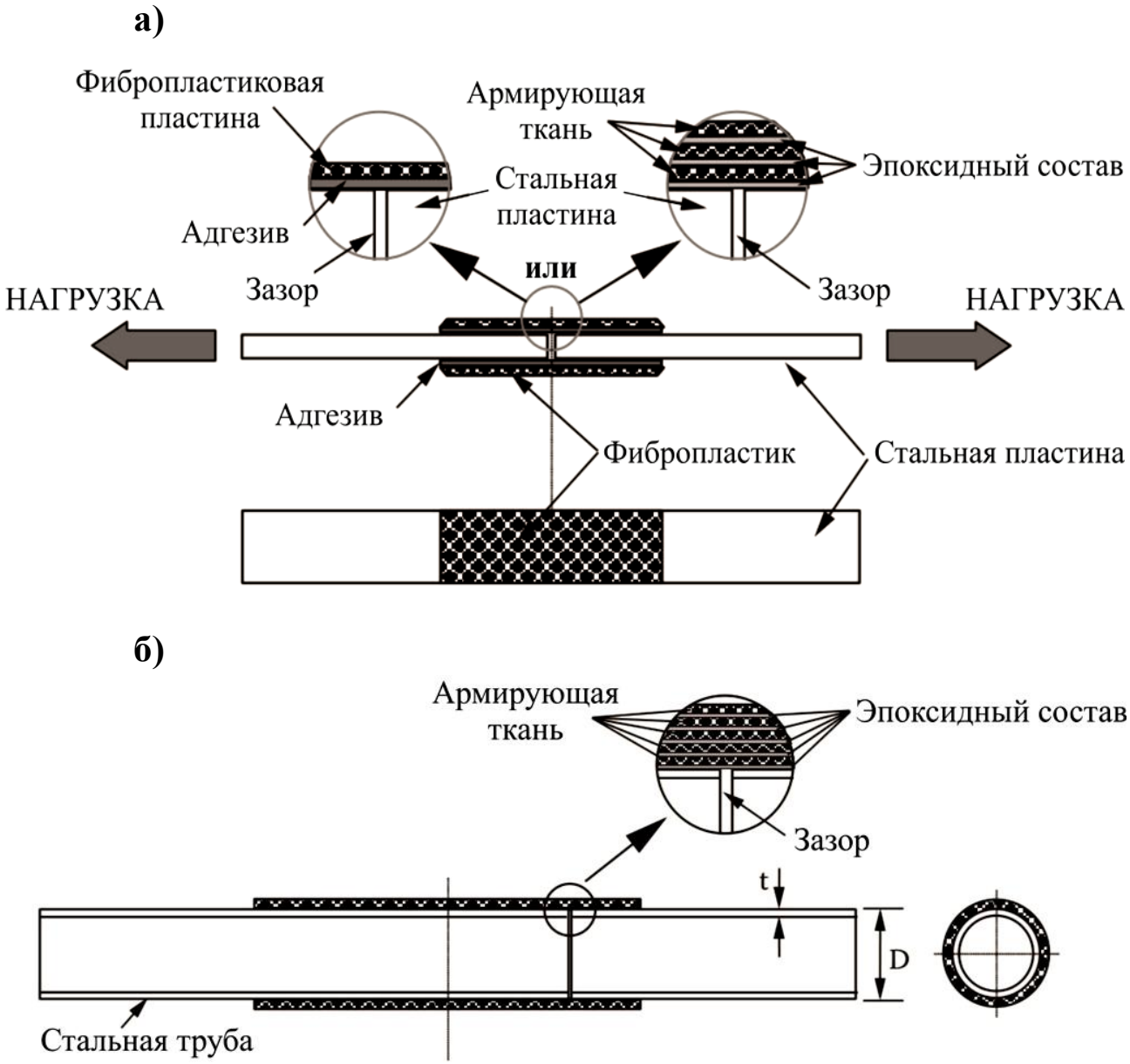


Рис. 4.7. Экспериментальные образцы соединений стали с фибропластиками, предусматривающие приложение нагрузки к стальным элементам, имеющим между собой зазор: а — пластинчатые [115-117], б — трубчатые [118-119]; адаптировано по [110]

4.3. Определение механических характеристик при длительных воздействиях

4.3.1. Общие особенности исследований при длительных воздействиях

Этап определения длительных свойств композитных материалов предусматривает исследование влияния:

- явления химической деструкции,
- факторов окружающей среды (например, последовательных циклов замораживания и нагрева),
- характера прикладываемых нагрузок (постоянных, приводящих к ползучести, или переменных, вызывающих усталость материала).

При определении влияния химической деструкции и факторов окружающей среды испытания проводятся на образцах, подвергаемых термическим и агрессивным воздействиям в течение заданного периода времени. По завершению необходимого количества циклов данных воздействий, на основании требований стандартов *ISO* и *ASTM* [50], определяются механические и физические характеристики материалов.

В случае изменения с течением времени одного из свойств, обусловленного химическим разрушением, величина характеризующего его параметра может быть определена экстраполяцией результатов краткосрочных высокотемпературных испытаний. Следует отметить, что полученные подобным образом значения не учитывают влияния напряжений или факторов окружающей среды, таких как длительное экспонирование под ультрафиолетовыми лучами или при агрессивных воздействиях кислот, щелочей, солей и т.п.

Определение прочностных параметров фибропластиковых систем в конкретных условиях окружающей среды выполняется в соответствии со специальными стандартами. Кроме того в ряде случаев используются также стандарты, разработанные для традиционных видов строительных материалов (например, влияние эффекта циклического замораживания композитов может исследоваться аналогично бетонным элементам). Следует отметить, что одним из наиболее используемых международных стандартов является *ISO EN 13687-(1…5)*, описывающий порядок циклических воздействий и процедуру определения длительных механических характеристик адгезионных связей.

Испытания на ползучесть в соответствии со стандартом *ISO 899-1:2003(E)* считаются необходимыми для оценки длительных свойств

фибропластиковых материалов воспринимающих постоянные нагрузки. В этом случае, как альтернативный, также может использоваться стандарт *ASTM D2990-01*.

Определение усталостных параметров фиброармированных пластиковых материалов, воспринимающих переменные (циклические) нагрузки, может быть произведено по стандартам *ISO 13003-2003(E)* или *ASTM D 3479-02*.

4.3.2. Методы испытаний на усталостное разрушение

Исследования на усталостное разрушение фибропластиков включают непосредственные испытания их стержней и пластин, закрепленных в захватах различных типов, а также испытания призматических и балочных элементов конструкций, использующих фибропластиковое армирование.

При непосредственных испытаниях образцов фибропластикового материала, возникает ряд сложностей, связанных с недостаточной приспособленностью традиционных захватных устройств, приводящих при действии циклических нагрузок к разрушению в анкерной зоне.

В свою очередь циклические испытания армированных фибропластиками элементов конструкций осложняются способностью основного материала воздействовать на усталостное поведение арматуры и адгезива (при его наличии) через фретинговый или фрикционный разогрев.

Испытания армированных призматических элементов. Изучение усталостных характеристик разрушения армированных фибропластиками элементов конструкций может выполняться с помощью испытаний соответствующих призматических образцов, подвергающихся растягивающим циклическим нагрузкам.

Возможная конструктивная схема применяемых призм (рис. 4.8) предусматривает использование в своем составе разделенных картонными вставками блоков основного материала конструкции с вклеенными или омоноличенными непрерывными арматурными стержнями. Верхний и нижний блоки служат анкерами для фибропластиковых стержней, в то время как средний блок является элементом, обеспечивающим экспериментальную среду в зоне предполагаемого разрушения.

При испытаниях крайние блоки размещаются в захватных устройствах, а средний подвергается исследованию циклическими напряжениями, имеющими максимальные величины, приближающиеся к временному сопротивлению материала стержней.

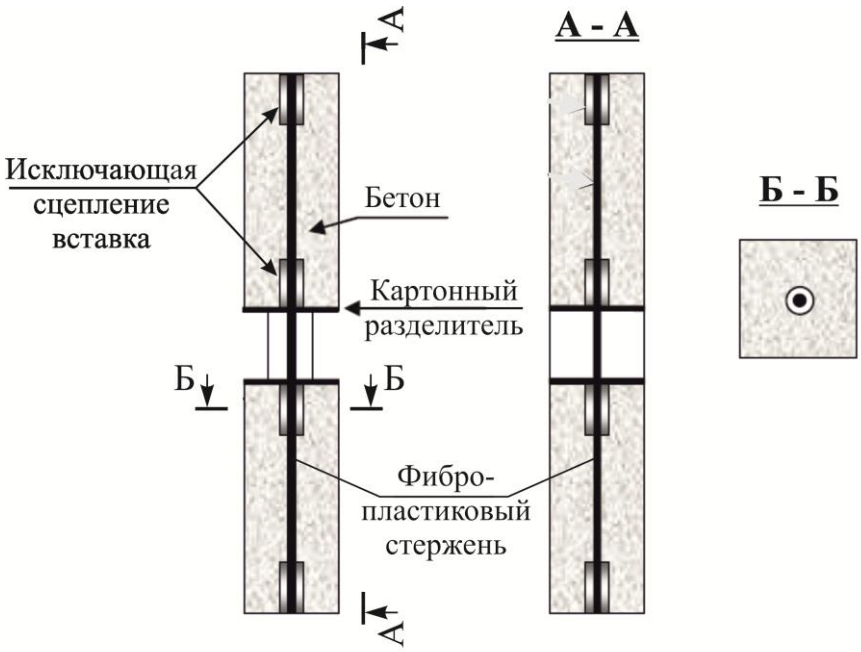


Рис. 4.8. Конструктивная схема армированных фибропластиковыми стержнями призматических образцов, используемых при испытаниях на усталостное разрушение; адаптировано по [68]

Для уменьшения концентрации напряжений и ограничения трещинообразования в материале анкерных блоков, у их торцевых граней используются прерыватели сцепления основного материала с арматурой, имеющие длину близкую пяти диаметрам соответствующих стержней. Кроме того данные блоки могут подвергаться обжатию стальными хомутами, повышающими их работоспособность (на схеме условно не показаны).

Испытания образцов фибропластиков. Определение параметров усталостного разрушения фибропластиковых материалов осуществляется при непосредственных испытаниях их образцов, выполненных в виде стержней, плоских ламинатов или арматурных секций.

Возможные схемы применяемых анкеров в этом случае зависят от типа исследуемых элементов и в разной интерпретации повторяют конструкцию анкерных блоков, используемые при схожих испытаниях армированных призматических элементов конструкций (см. рис. 4.8).

При испытаниях фибропластиковых элементов на циклическое сжатие, проблема обеспечения их устойчивости решается использованием образцов малой длины или применением специальных направляющих приспособлений.

4.3.3. Методы испытаний фибропластиковых элементов на ползучесть

При значительных величинах напряжений, действующих на протяжении длительных периодов времени, фибропластиковые материалы могут подвергаться разрушению, вызванному ползучестью. Соответствующая прочность фибропластиков зависит от их типа и определяется по результатам испытаний, осуществляемых традиционными методами, включающими различные варианты гравитационного или сжато-упругого загружения.

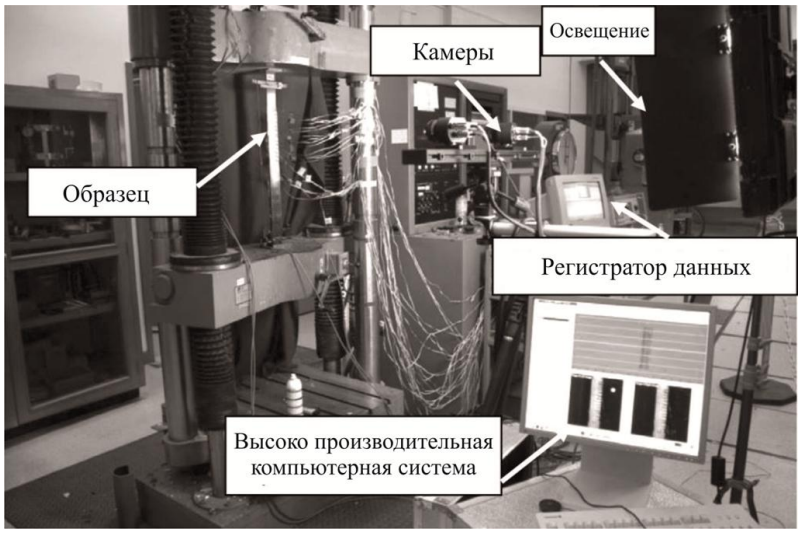
4.4. Измерение параметров напряженно-деформированного состояния в соединениях, включающих фибропластиковые элементы

Методы измерения параметров напряженно-деформированного состояния соединений конструкционных фибропластиковых систем берут за основу классический способ оценки изменений деформаций под воздействием загружающих факторов с последующим переходом к величинам внутренних усилий, осуществляемым в соответствии с показателями упругих свойств используемых материалов.

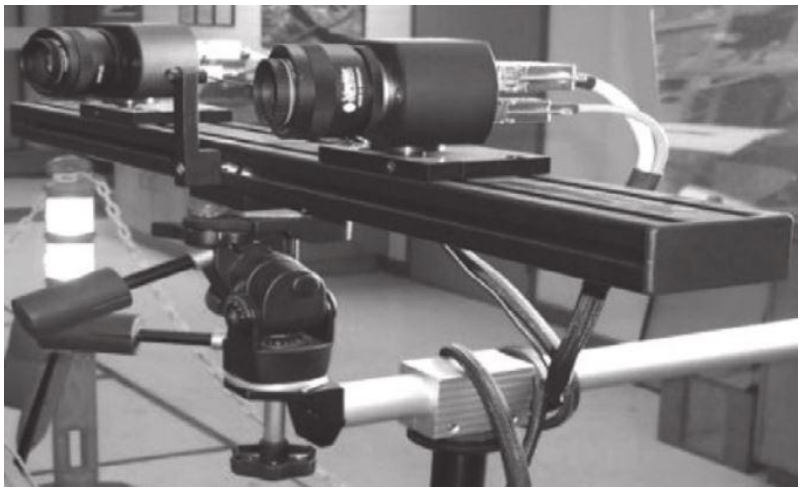
Величины относительных деформаций на поверхностях соединяемых элементов, расположенных вдоль длин адгезионных швов, в принципе могут определяться как с помощью тензометрического метода измерений, так и с применением современной фотограмметрической техники. Однако имеющие место резкие изменения величин напряжений, действующих как в адгезионных швах, так и в пришовных зонах рассматриваемых соединений, в большинстве случаев делают тензометрический метод малоэффективным. Более точную и наглядную картину параметров напряженно-деформированного состояния дает фотограмметрический метод, позволяющий фиксировать изменения относительных деформаций не в конкретных точках, а вдоль всей длины соединяемых поверхностей экспериментальных образцов и даже в пределах толщин самих адгезионных швов.

Доступные в настоящее время фотограмметрические системы (например, неконтактная система измерений *3D ARAMIS*, см. рис. 4.9), используют корреляционный метод обработки трехмерного видео изображения, получаемого высокоразрешающими цифровыми камерами. Результаты измерений такими системами в числовой, графо-спектральной и графической формах выводятся на экран компьютера.

а)



б)



в)

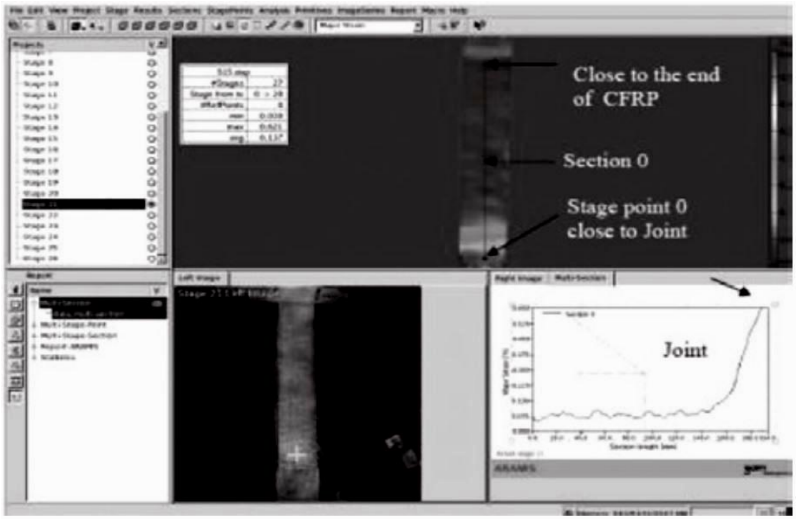


Рис. 4.9. Фотограмметрическая установка неконтактного измерения относительных деформаций *ARAMIS*: а — общий вид, б — фиксирующие цифровые камеры, в — выводимые на монитор результаты измерений; адаптировано по [110]

5. Фибропластиковое усиление бетонных и железобетонных конструкций

5.1. Области рационального использования

Как уже отмечалось выше (см. п. 1.4.3), деградация бетонных и железобетонных конструкций в ходе длительной эксплуатации, реконструкция зданий и сооружений, сопровождающаяся ростом нагрузок, действующих на их элементы, изменение нормативных требований, предъявляемых к строительным объектам в целом и к их отдельным частям (например, вследствие изменения сейсмического районирования), ошибки, допущенные при проектировании и строительстве, последствия различных чрезвычайных ситуаций (пожаров, наводнений, техногенных катастроф и т.п.) придают вопросу усиления конструкций перманентную актуальность. При этом традиционно используемые решения [20, 24-40], предусматривающие устройство различных железобетонных и металлических обойм, введение подпорных стоек, подкосов, и т.п., как правило, отличаются высокой материалоемкостью и трудоемкостью производства работ, а также требуют длительного вывода конструкций из эксплуатации.

Эффективным альтернативным способом современного восстановления и усиления бетонных и железобетонных конструкций является внешнее армирование фибропластиковыми композитами, которые позволяют практически без изменения собственного веса конструкций существенно увеличить их прочность и «живучесть» (особенно на стадии непосредственного разрушения), повысить долговечность и сейсмостойкость.

Материалы, применяемые в строительстве для дополнительного композитного армирования элементов бетонных и железобетонных конструкций, в настоящее время предлагаются производителями в виде элементов заводской готовности различных сечений (см. п.п. 3.3.1 и 3.3.2), используемых для конструкций, имеющих внешние поверхности правильной геометрической формы, а также в виде одно- и двунаправленных лент и тканей (см. п.п. 3.3.1 и 3.3.3), легко адаптируемых к сложным формам усиливаемых поверхностей. Данные технологии с успехом используются для продольного и поперечного усиления железобетонных балочных элементов (см. п.п. 5.5.3 и 5.5.4), для создания «охватывающих» обойм колон (см. п. 5.6), для эффективного усиления элементов ферм, плит, оболочек и других пространственных конструкций.

Применение внешнего фибропластикового армирования также дает возможность относительно простого в исполнении исправления отступлений, допущенных при изготовлении железобетонных конструкций (занижение сечения

и отклонение положения арматурных стержней, несоблюдения прочности бетона и т.п.), устраняет последствия разрушения бетона и коррозии арматуры, вызванных агрессивными воздействиями окружающих сред, увеличивает общую несущую способность конструкций, а также позволяет компенсировать дополнительные усилия, возникающие при росте нагрузок или изменении конструктивных схем (например, при введении дополнительных опор или устройстве отверстий и проемов).

Применение композитных материалов особенно востребовано в тех случаях, когда предъявляются требования сохранения аутентичного внешнего вида (например, элементов зданий и сооружений, имеющих историческое значение) или тогда, когда традиционные методы усиления в силу ряда причин не могут быть эффективно использованы (приводят к значительному увеличению габаритных размеров элементов конструкций, требуют длительной остановки технологического процесса или вывода сооружения из эксплуатации, вызывают сложности технологически-организационного характера и т.п.).

5.2. Нормативная база

В настоящее время в мировой практике строительства используется достаточно большое количество нормативных документов и справочных источников, отражающих свойства и характер работы конструкционных композитных материалов, а также определяющих методы их испытаний. Но, к сожалению, отечественные нормативные документы, регламентирующие подобные вопросы, отсутствуют практически полностью (за исключением отдельных стандартов, устанавливающих порядок испытания материалов), а рекомендаций, адоптированных к постсоветским строительным нормам, очень мало (главным образом разработаны в Российской Федерации).

Вопросы, относящиеся непосредственно к усилению бетонных и железобетонных конструкций с использованием фиброармированных пластиков, при практически полном отсутствии доступной отечественной литературы, находят отражение в довольно большом количестве зарубежных рекомендаций и нормативных документов [50, 78, 82, 84, 85, 120, 121]. При этом среди работ, вышедших в последние годы на постсоветском пространстве, данная проблема также имеет определенное освещение [45, 92, 96, 122-127], что в значительно степени упрощает адаптацию соответствующих методик для практического применения в Украине.

К числу наиболее широко используемых в мировой практике норм и руководств по расчету и проектированию железобетонных конструкций, использующих фибропластиковые элементы внешнего и внутреннего армирования

могут быть отнесены японские *JSCE – 1997* [86], американские *ACI 440 – 2000, 2004, 2008* [77, 78, 90] и европейские *FIP-CEB – 2001*, *CNR-DT 200/2004, 203/2006, 204/2006* [50, 75, 76].

Среди одних из первых доступных постсоветских рекомендаций, относящихся к расчету конструкций, сочетающих бетон и фибропластики, можно назвать рекомендации *Мосавтодора* (Российская Федерация) [122], посвящённые применению углеродопластиковых ламинатов, а также рекомендации для строителей, подготовленные фирмой *«Триада-Холдинг»* (Российская Федерация) [45] по результатам усилений конкретных мостовых сооружений, рассматривающие случаи использования тканевых материалов для увеличения несущей способности ригелей и стоек круглого и прямоугольного поперечных сечений. К числу практически полезных адаптированных документов, относящихся к усилению железобетонных конструкций, следует отнести и руководство, составленное *ООО «Интераква»* совместно с *НИИЖБ* (Российская Федерация) [92], описывающее вопросы использования углеродоволоконных ламинатов, а также российский свод правил [96], определяющий порядок проектирования усилений железобетонных конструкций композитными материалами.

5.3. Основные конструктивные ограничения

Важным условием надежной эксплуатации усилений строительных конструкций, выполняемых с использованием систем дополнительного армирования фибропластиками, является соблюдение конструктивных требований. При этом основные конструктивные требования, предъявляемые к подобным системам, предусматривают ограничения предельных деформаций их элементов. В соответствии с рекомендациями производителей [55] максимальные деформации фибропластиковых элементов не должны превышать 50% от деформаций, соответствующих пределу прочности используемого волоконного материала. Кроме того необходимые ограничения зависят от особенностей основного материала конструкций и общего характера его работы, а также от конкретного решения предпринимаемого усиления.

Рекомендуемые величины предельных относительных деформаций фибропластиковых элементов, используемых для усиления железобетонных конструкций без предварительного напряжения, приведены в таблице 5.1.

Указанные ограничения деформаций композитов определяют рациональность использования высокомодульных материалов (например, углеродоволоконных пластиков с модулем упругости $E = 640$ *ГПа* и предельными деформациями разрыва $\varepsilon = 0{,}4\%$) при осуществлении поперечного усиления железобетонных конструкций. Для продольного же усиления изгибаемых железобетон-

ных элементов могут использоваться более деформативные, но в тоже время более прочные фибропластики (например, углеродоволоконные пластики с модулем упругости $E = 240$ *ГПа* и предельными деформациями разрыва около $\varepsilon = 1{,}5\%$).

Таблица 5.1

Предельно допустимые относительные деформации фибропластиковых элементов систем усиления железобетонных конструкций, выполняемых без предварительного напряжения элементов; по [55]

Вид усиления	Предельно допустимая величина относительных деформаций, %
Поперечное усиление изгибаемых элементов	0,2 … 0,3
Продольное усиление изгибаемых элементов	0,6 … 0,8
Поперечное «охватывающее» усиление, ограничивающее деформирование материала сжатых элементов	0,4 … 0,6

5.4. Общие принципы использования фибропластиковых систем

Наиболее распространенные методы усиления бетонных и железобетонных конструкций дополнительным армированием фибропластиковыми элементами предусматривают:

— увеличение несущей способности изгибаемых балок и плит путём размещения композитных материалов в их растянутых зонах,
— увеличение несущей способности конструкций, воспринимающих действие поперечных сил, путем наклейки фибропластиковых элементов на приопорных участках в местах вероятного появления наклонных трещин,
— увеличение несущей способности центрально- и внецентреннорастянутых элементов продольным фибропластиковым армированием,
— увеличение несущей способности центально- и внецентренносжатых железобетонных колонн фибропластиковыми элементами, располагаемыми по их контуру (например, с помощью «охватывающего», ограничивающего поперечные деформации бетона, усиления).

При этом основной принцип проектирования рассматриваемых фибропластиковых систем предполагает размещение армирующих материалов из условия их работы на растяжение. Так в случае рассмотрения изгибаемых железобетонных элементов положение внешнего композитного усиления должно

обеспечивать совместность его деформирования с бетоном: в предельном состоянии усилия сжатой зоны конструкции должны восприниматься бетоном и сжатой стержневой арматурой, а в растянутой — стержневой арматурой и фиброармированными материалами. Усиление железобетонных колонн, сжимаемых с малым эксцентриситетом, может предполагать ограничение поперечного деформирования бетона сечений, обеспечиваемого «охватывающим» внешним армированием с поперечным направлением рабочих волокон композитов. Принципы усиления колонн, нагружаемых с существенными эксцентриситетами, предусматривают продольное армирование, уменьшающее гибкость стержней и препятствующее в предельном состоянии процессам их общей потери устойчивости.

При расчете усиленных фибропластиковыми материалами конструкций обычно используют традиционные гипотезы работы материалов (плоских сечений, отсутствия сдвигов между бетоном и элементами как внутреннего, так и внешнего армирования и т.п.). В тех случаях, когда особенности рабочих схем конструкций или направление действия суммарных сочетаний, учитываемых при расчете нагрузок, приводят к тому, что фиброармированные композиты оказываются в сжатых зонах усиливаемых элементов, их наличие обычно не учитывается.

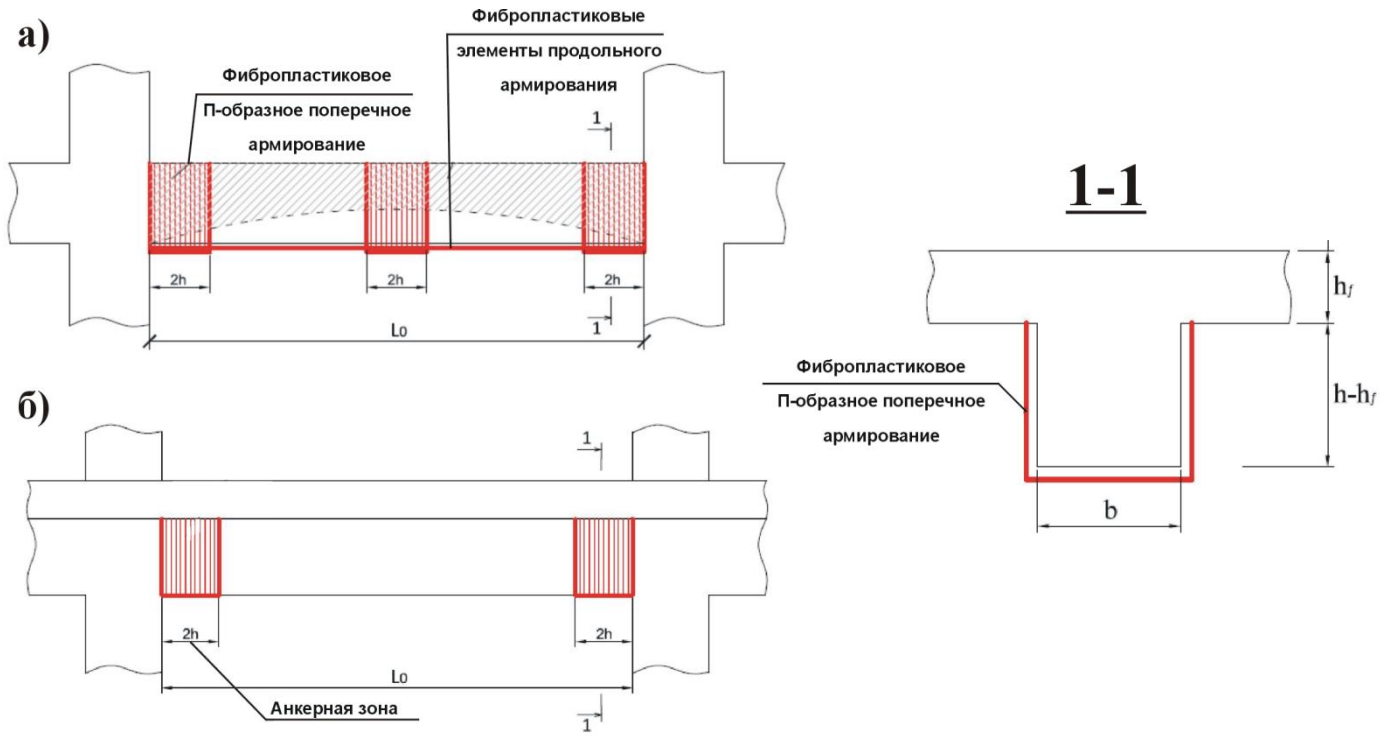


Рис. 5.1. Принципиальные схемы внешнего фибропластикового армирования железобетонных изгибаемых элементов: а — при необходимости дополнительного продольного армирования, б — при дополнительном поперечном армировании; по [128]

Усиление растянутых зон изгибаемых конструкций производится продольными элементами, анкеровка которых выполняется в местах действия наименьших растягивающих усилий (рис. 5.1, а). Приопорные зоны стержневых конструкций, воспринимающие поперечные силы, усиливаются фибропластиковыми элементами с поперечным или наклонным направлением рабочих волокон (рис. 5.1, б), потенциально способными сочетать функцию поперечного армирования с анкеровкой продольных элементов внешнего армирования, что особенно важно для многослойных его модификаций. Типичные примеры использования фибропластикового армирования для усиления изгибаемых железобетонных элементов представлены на рисунке 5.2.

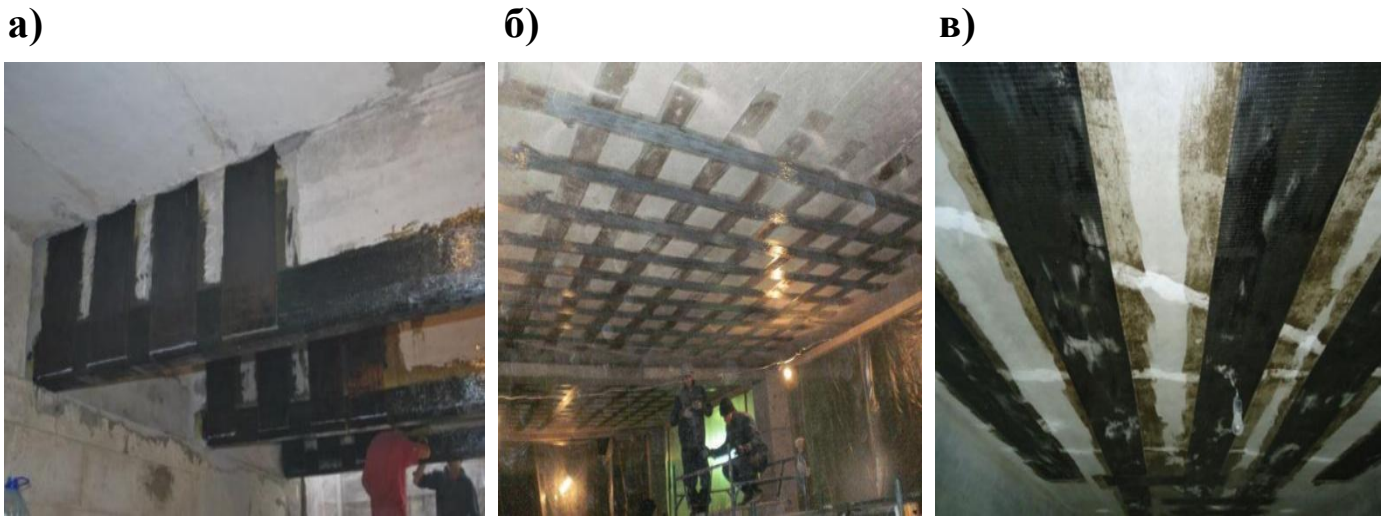


Рис. 5.2. Примеры фибропластикового усиления изгибаемых железобетонных элементов: а — балок, б, в — плит перекрытий; по [128]

В растягиваемых элементах железобетонных конструкций внутренние усилия распределяются между стальным и фибропластиковым армированием пропорционально их площадям и величинам модулей упругости. В этих случаях усиливающие составляющие наклеиваются по всей длине элементов симметрично оси растягивающих усилий вдоль линий действия нормальных напряжений, перпендикулярно поперечным трещинам бетона (рис. 5.3). При усилении внецентренно растянутых элементов применяют продольное внешнее армирование, размещаемое симметрично плоскости пары действующих сил. Примеры фибропластикового усиления растянутых элементов железобетонных ферм приведены на рисунке 5.4.

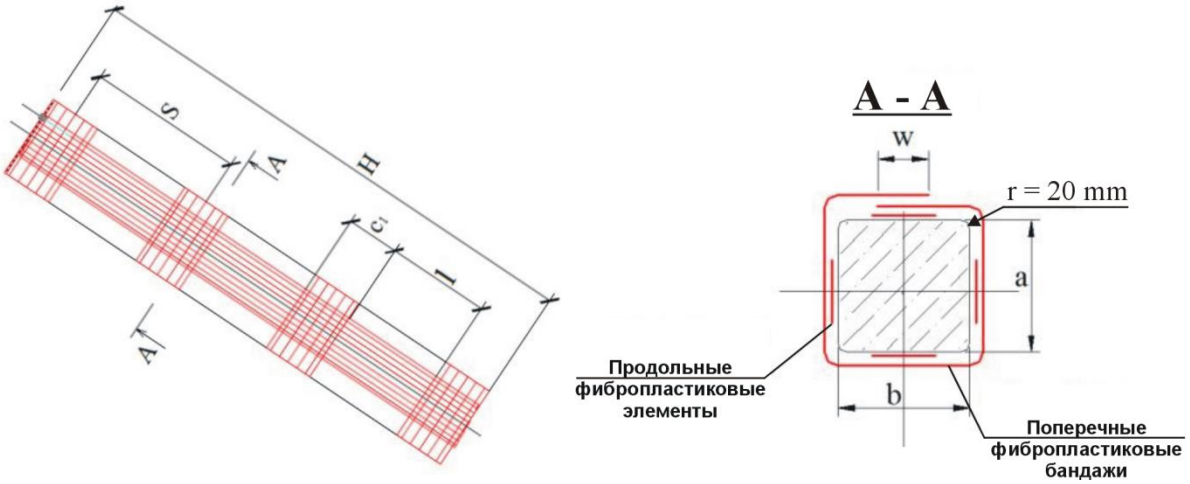


Рис. 5.3. Принципиальная схема фибропластикового внешнего армирования железобетонных растягиваемых элементов; по [128]



Рис. 5.4. Примеры усиления растянутых железобетонных элементов внешним фибропластиковым армированием: а — раскосов ферм, б — поясов подстропильных конструкций, в — узловых соединений; по [128]

При фибропластиковом усилении сжимаемых с небольшими эксцентриситетами железобетонных колонн, обычно предполагается, что действующие усилия воспринимаются сердечником бетонной части сечения (поврежденные фрагменты бетона из работы исключаются), а «охватывающие» фибропластиковые бандажи, работающие на растяжение, обжимают бетон сечения и увеличивают несущую способность его сердечника, предотвращая образование про-

дольных трещин (рис. 5.5, а). Усиление же внецентренно сжатых железобетонных колонн может осуществляться при использовании продольных фибропластиковых элементов, устанавливаемых на их гранях и ребрах, уменьшающих гибкость конструкций и препятствующих образованию поперечных трещин в бетоне (рис. 5.5, б). Типичные примеры фибропластикового усиления железобетонных колонн приведены на рисунке 5.6.

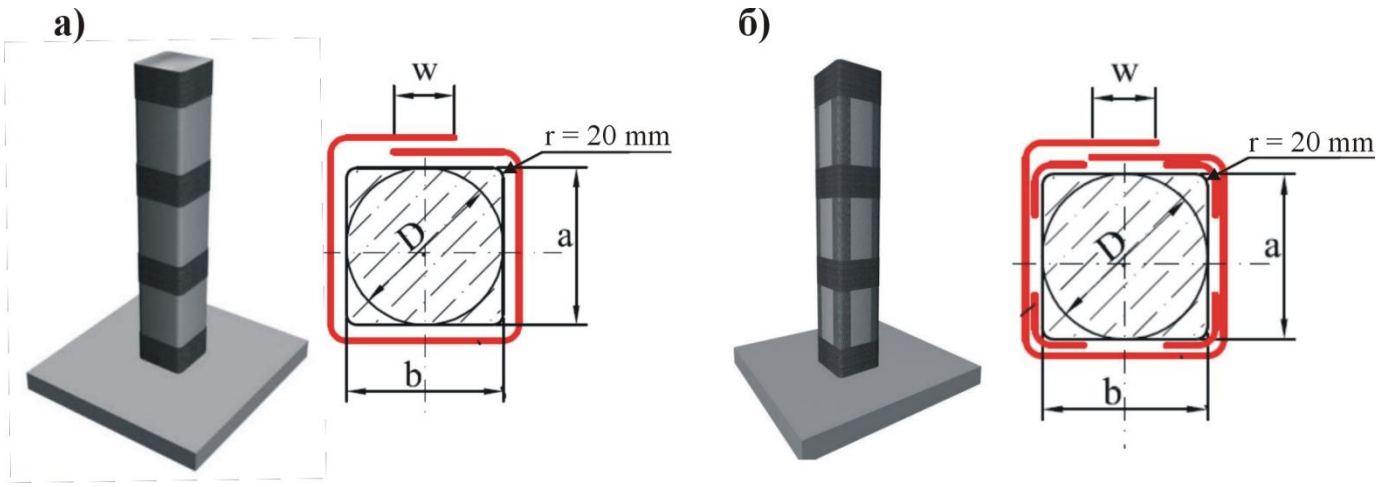


Рис. 5.5. Принципиальная схема фибропластикового внешнего армирования железобетонных колонн: а — при малых эксцентриситетах приложения нагрузки, б — внецентренно сжатых; по [128]



Рис. 5.6. Примеры фибропластикового усиления железобетонных колонн; по [128]

Фибропластиковое усиление проемов, выполняемых в существующих железобетонных конструкциях (рис. 5.7), как правило, требует осуществления предварительных расчетов методом конечных элементов, определяющих величины усилий, действующих в ослабляемых зонах, и необходимую степень дополнительного армирования. При проектировании также учитываются требова-

ния компенсации контурным армированием сечений перерезаемых арматурных стержней.



Рис. 5.7. Примеры фибропластикового усиления проемов, прорезаемых в железобетонных конструкциях; по [128]

Особенности фибропластикового усиления железобетонных конструкций, его форма, размеры и количество армирующих слоев, определяются расчетами. При этом ламинированные элементы усиления обычно устанавливаются в один слой, а фибропластики, изготавливаемые «по месту», предусматривают в своем составе количество слоев армирующих холстов и лент, ограничиваемое прочностью сцепления с поверхностью их бетонного основания и условиями отслаивания, обычно не превышающее пяти.

Обязательным условием осуществления фибропластикового усиления строительных конструкций является обеспечение возможности миграции влаги из тела бетона и материалов каменных кладок (см. п. 3.3.3.4, рис. 3.14).

5.5. Изгибаемые элементы

5.5.1. Эффективность усиления

5.5.1.1. Элементы малой длины

Исследования проф. У.Майера. Одни из первых исследований опытных балок, усиленных углеродоволоконными пластиками, проводились в Швейцарии около 25 лет назад под руководством *проф. У.Майера* [13], показавшего

высокую эффективность подобных методов для изгибаемых железобетонных конструкций.

В ходе экспериментов загружению подвергались балки с пролетом 2,0 м и прямоугольным поперечным сечением 16×30 см (гибкость $\ell/i = 34,5$), усиленные по нижним граням углеродопластиковыми элементами с сечением 0,3×200 мм. Результаты загружений двумя сосредоточенными силами, прикладывавшимися на расстоянии 0,66 м от опор (рис. 5.8), показали высокую эффективность увеличения несущей способности (25…100%) и значительное снижение (почти вдвое) прогиба таких конструкций.

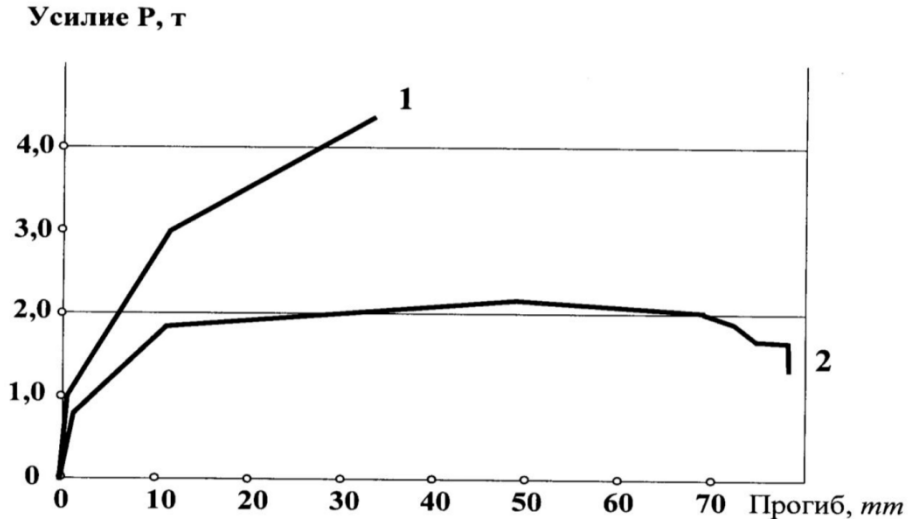
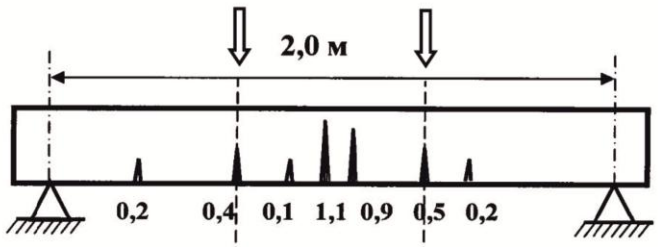


Рис. 5.8. Зависимости прогибов в середине пролетов от величин сосредоточенных сил, полученные *проф. У.Майером* при испытаниях железобетонных балок с пролетом 2,0 м и поперечным сечением 16×30 см; 1 — балки, усиленные по нижней грани углеродоволоконными элементами с сечением 0,3×200 мм, 2 — не усиленные балки; по [13]

При испытаниях усиленных образцов наблюдались разрушения, характеризовавшиеся внезапными разрывами углеродоволоконных элементов (сопровождавшимися резким треском, которому предшествовали частые негромкие потрескивания), классическим разрушением сжатой зоны бетона, непрерывным отслаиванием углеродопластиков от их концов к центу и развитием сдвиговых трещин в бетоне с вертикальным смещением их боковых поверхностей, приводившим к внезапному отслаиванию элементов усиления.

Распределение трещин в бетоне по сторонам от точек приложения нагрузок в не усиленных (случаи *а* и *б*) и усиленных (случай *в*) балках, полученное *проф. Майером*, приведено на рисунке 5.9. В соответствии с результатами экспериментов суммарная ширина раскрытия трещин в усиленных образцах снизилась в полтора раза, а порядок их распределения по длине конструкций стал более равномерным.



Максимальное раскрытие трещин			Испытания:
0,6	1,1	0,5	а) без усиления
0,3	0,3	0,25	б) разгрузка
0,4	0,5	0,3	в) с усилением

Рис. 5.9. Максимальная ширина раскрытия трещин в бетоне, полученная *проф. У.Майером* при испытаниях железобетонных балок, не имевших усиления углеродоволоконными пластиками (испытания *а, б*) и при их наличии (испытание *в*); по [13]

Сопоставление результатов экспериментов по разрушению (появлению трещин с шириной раскрытия более 1,0 мм) не усиленных и усиленных железобетонных балок продемонстрировало очевидную эффективность внешнего фибропластикового армирования изгибаемых элементов строительных конструкций.

Эксперименты института ЦНИИС (Российская Федерация). Исследования качественной картины влияния фибропластикового усиления на балки, имеющие начальные трещины, проводились в институте *ЦНИИС* (РФ) более 15-ти лет назад [129]. Испытания включали две стадии: на первой производились загружения не усиленных конструкций до появления поперечных трещин с шириной раскрытия 0,6 мм, на второй стадии поврежденные образцы балок усиливались углеродоволоконными элементами и подвергались загружению до момента начала отрыва наклеенного внешнего армирования.

В качестве экспериментальных образцов использовалось по две балки с прямоугольными сечениями 15×20 см и пролетом 0,94 м, а также 16×30 см с пролетом 3,775 м. Класс бетона образцов был не ниже В35, арматура класса А400С, установленная по верхним и нижним граням, имела диаметр 10 мм. Фибропластиковое усиление, размещавшееся по нижним граням, выполнялось углеродоволоконными ламинатами фирмы *Sika* с толщиной 1,4 мм и шириной

120 мм, характеризовавшимися прочностью на растяжение *28 000 кг/см*^{2} и модулем упругости *1 650 000 кг/см*^{2}.

Испытания образцов производили по однопролётной схеме, предполагавшей действие двух статически приложенных сосредоточенных сил (рис. 5.10).

Использовавшаяся методика эксперимента соответствовала требованиям международного стандарта *ISO 14125*.

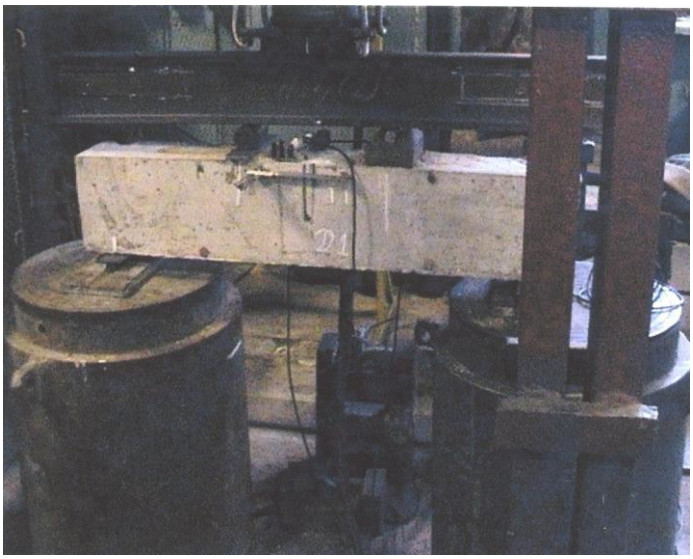


Рис. 5.10. Испытания железобетонной балки пролетом 0,94 м и сечением 15×20 см, усиленной по нижней грани углеродоволоконным пластиковым элементом, проведенные *ЦНИИС* (Российская Федерация); по [13]

Вначале испытаниям подверглись балки не усиленные углеродопластиком. При нагрузке 5 т в растянутой зоне балки, имевшей длину 0,94 м и сечение 15×20 см (эксперимент №1, рис. 5.11, а), было отмечено появление поперечных трещин с шириной раскрытия до 0,08 мм. При нагрузке 11 т раскрытие трещин достигло 0,6 мм. Не доводя до полного разрушения, балку сняли со стенда. Трещины были заинъектированы эпоксидным составом.

После этого нижняя грань конструкции была усилена накладкой из углеродопластика на адгезиве холодного отверждения. При повторных испытаниях балки с пролетом 0,96 м, нагрузка 7 т вызвала раскрытие ранее имевшихся и появление новых трещин. Разрушение произошло при нагрузке 15,3 т (раскрытие трещин составило 0,6…0,8 мм), см. рис. 5.11, а.

При испытаниях не усиленной балки пролетом 3,775 м и сечением 16×30 см (эксперимент №2, рис. 5.11, б) первая поперечная трещина появилась при нагрузке 2 т на расстоянии 25 см от середины пролёта. В дальнейшем при увеличении нагрузки поперечные трещины стали образовываться по всей длине конструкции с шагом 10…15 см. Разрушение (состояние с раскрытием трещины порядка 1 мм) наступило при нагрузке 9,8 т. После снятия нагрузки трещины частично закрылись, и их раскрытие не превышало 0,4 мм. При повторном нагружении балки, получившей фибропластиковое усиление по нижней грани сечения, новые трещины появились при нагрузке 7 т. Развитие пластических деформаций наблюдалось при нагрузке 11 т (на 33% больше по сравнению с

предыдущим испытанием, при котором данная нагрузка составляла 8 т), а разрушение произошло при 12,5 т.

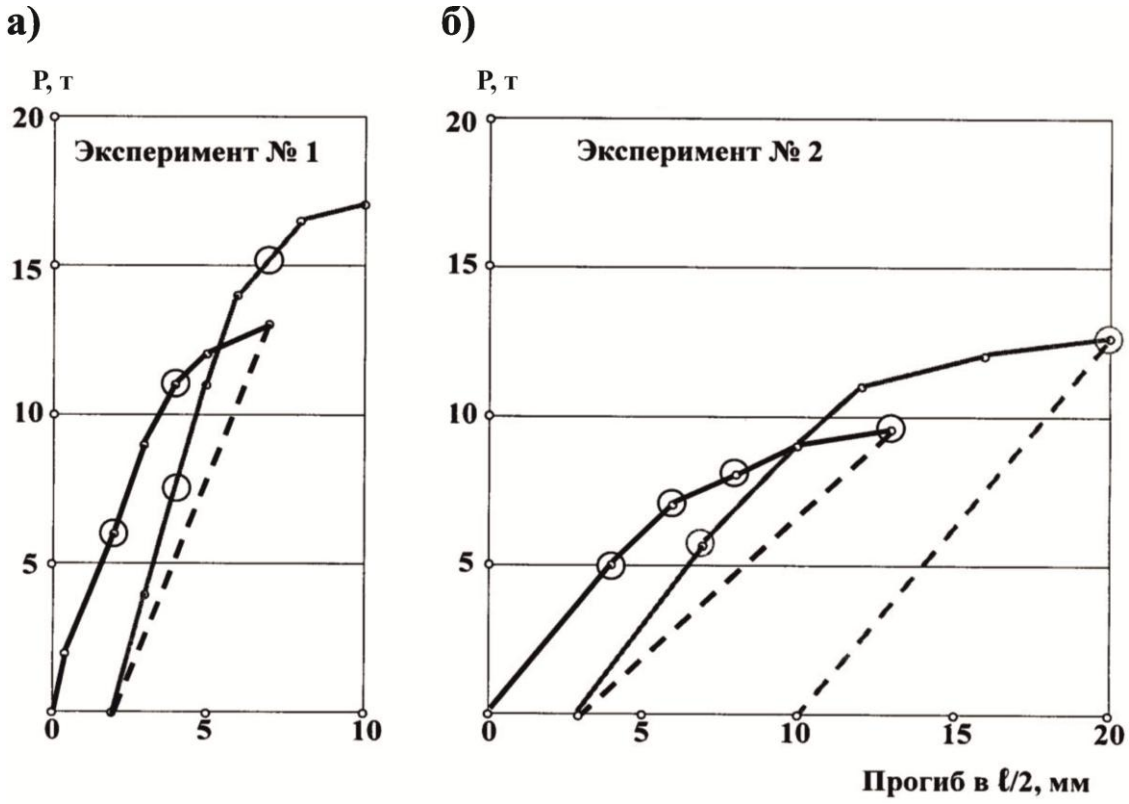


Рис. 5.11. Зависимости прогибов в середине пролетов от величин сосредоточенных сил, полученные *ЦНИИС* (Российская Федерация) при испытаниях железобетонных балок до и после усиления углеродоволоконными фибропластиками; а — балки пролетом 0,96 м и сечением 15×20 см, б — балки пролетом 3,775 м и сечением 16×30 см; по [13]

Анализ результатов исследования [13] установил зависимость эффективности усиления балок фибропластиками от их гибкости (с ростом гибкости эффективность усиления возрастает, но требуется большее количество внешнего фиброармирующего материала). Кроме того было установлено, что жесткость усиленных конструкций с трещинами близка к первоначальной жёсткости балок (см. наклон линий «усилие-нагрузка» на рис. 5.11); шаг трещин в усиленных образцах меньше, чем в не усиленных (трещины образовываются чаще, но имеют меньшую ширину раскрытия).

Эксперименты фирмы «Интераква» (Российская Федерация). Эффективность усиления бетонных изгибаемых элементов малой длины с помощью различных систем стекловолоконного и углеродоволоконного армирования изучалась фирмой *«Интераква»* более 10 лет назад [92].

В данном случае эксперименты проводились на бетонных балках с размерами 10×10×40 см (рис. 5.12) по методике определения прочности на растяже-

ние при изгибе, установленной *ГОСТ 10180*. Образцы изготавливались из бетона класса В15 и усиливались по нижним граням различными вариантами фибропластиковых элементов с длиной 40 см, отличавшимися видом армирующих волокон, структурой и степенью армирования по отношению к бетону. Расстояние между опорами экспериментальных образцов составляло 300 мм; распределительная траверса передавала нагрузку в виде двух сосредоточенных сил с межосевым расстоянием 100 мм.

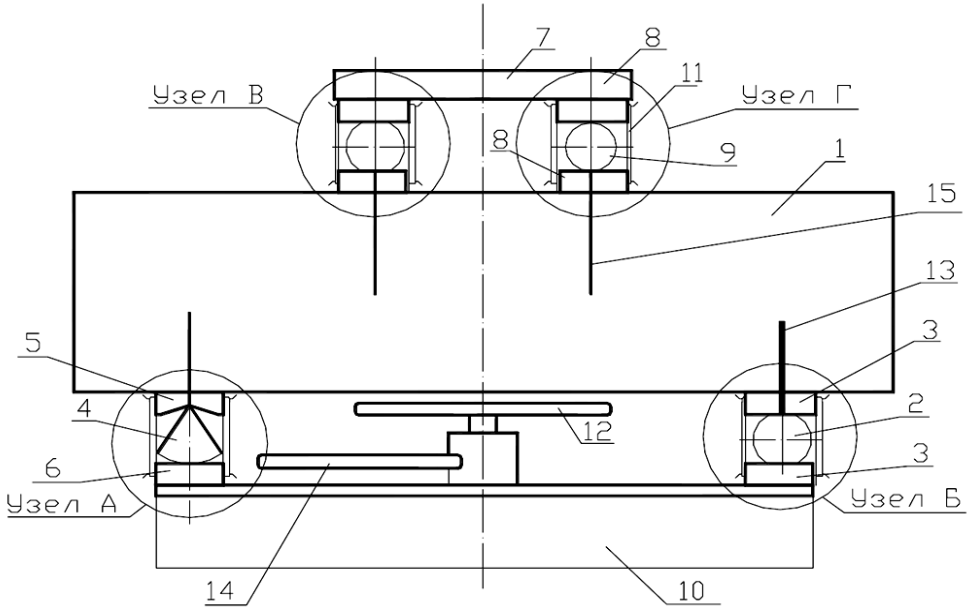


Рис. 5.12. Стенд для испытания бетонных образцов, усиленных фибропластиками, использовавшийся фирмой *«Интераква»* (Российская Федерация): *А*, *Б* — опорные узлы, *В*, *Г* — узлы приложения нагрузки распределительной траверсой; 1 — испытываемый образец, 2 — подвижная опора, 3 — опорные плиты подвижной опоры, 4 — неподвижная опора, 5, 6 — соответственно, верхняя и нижняя опорные плиты неподвижной опоры, 7 — распределительная траверса загружающего устройства, 8 — плиты нагружающего устройства, 9 — катки, 10 — опорный стол стенда, 11 — резиновый жгут временной фиксации положения, 12 — установочный столик, 13 — нижняя разметка осей образца, 14 — регулировочная ручка установочного столика, 15 — верхняя разметка осей образца; по [13]

Испытания проводили до разрушения (рис. 5.13), их результаты, выборочно приведенные в таблице 5.2, продемонстрировали, что использование фибропластикового армирования позволило повысить несущую способность бетонных изгибаемых образцов в 2,5…4,5 раза (рис. 5.14). В качестве армирующего материала наибольшую эффективность обнаружил углеродоволоконный пластик (рис. 5.15). Характер разрушения свидетельствовал о достаточной величине сцепления выбранных клеящих материалов с бетоном (отрыв усиливающих элементов происходил совместно с фрагментами бетона). Зарождение трещин в усиленных образцах наблюдалось при более высоких нагрузках, а их распространение сдерживалось полимерным композитом.

а) **б)**

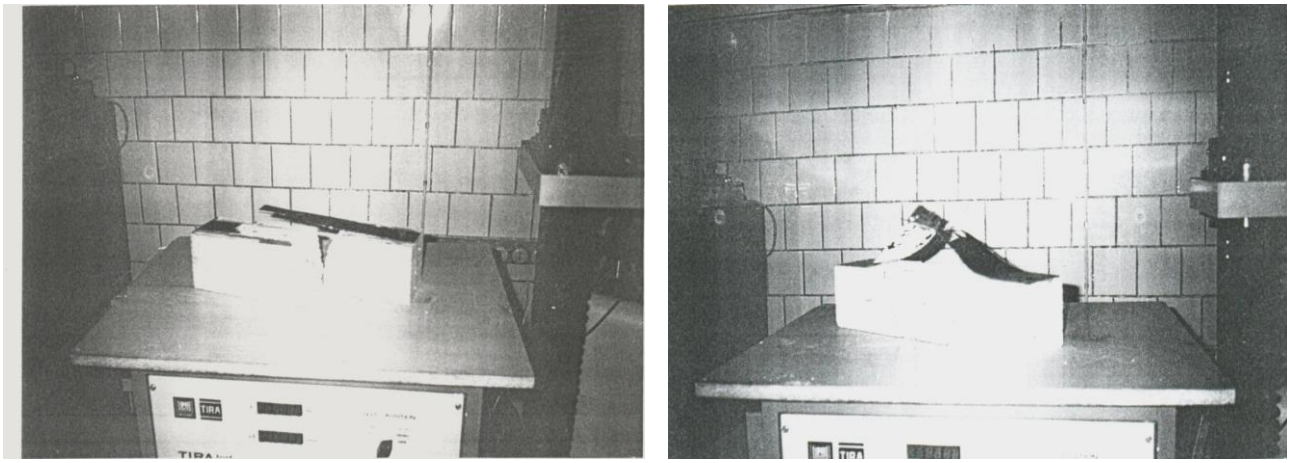


Рис. 5.13. Разрушенные при испытаниях образцов бетонных балок, усиленных фибропластиками, проводившихся фирмой *«Интераква»* (Российская федерация): а — образец, усиленный углеродоволоконным пластиком горячего отверждения, имевший степень армирования *0,19* , б — образец, усиленный углеродоволоконным пластиком горячего отверждения, имевший степень армирования *0,38*; по [13]

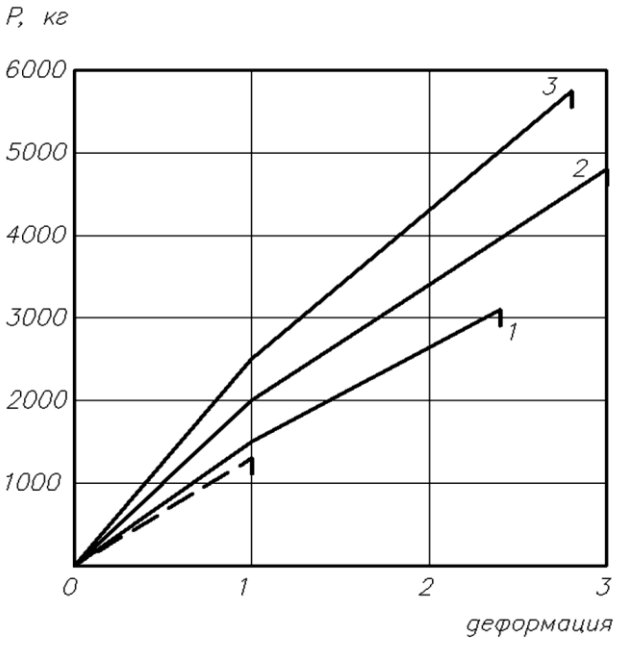


Рис. 5.14. Зависимости деформаций от нагрузки в изгибаемых бетонных образцах, усиленных углеродоволоконными пластиками, полученные фирмой *«Интераква»* (Российская Федерация): 1 — со степенью армирования 0,12 , 2 — со степенью армирования 0,19 , 3 — со степенью армирования 0,38; кривая, обозначенная прерывистой линией, соответствует образцу, не имевшему усиления; по [13]

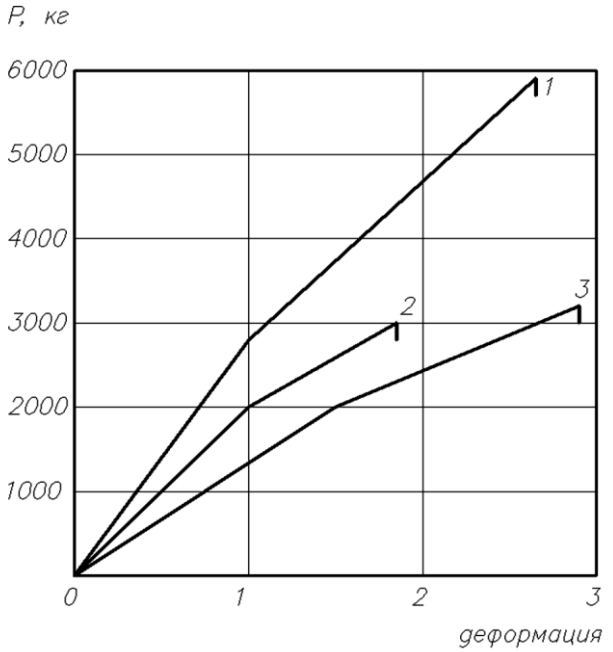
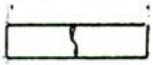
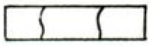
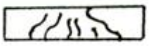
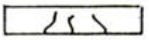
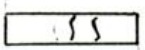
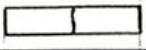


Рис. 5.15. Зависимости деформаций от нагрузки в экспериментальных образцах бетонных балок, усиленных различными видами фибропластиков, имевших ширину 8 см и включавших по два слоя соответствующей армирующей ткани, полученные фирмой *«Интераква»* (Российская Федерация): 1 — углеродоволоконный пластик, 2 — стекловолоконный пластик, 3 — арамидоволоконный пластик; по [13, 92]

При использовании фибропластикового усиления характер разрушения балок становился более безопасным. Разрушение не усиленных бетонных элементов происходило в результате быстрого развития сквозных трещин. При нагружении балок, усиленных фибропластиками, имело место постепенное накопление трещин, сдерживаемых композитом и способных частично закрываться после снятия нагрузки.

Таблица 5.2

Результаты испытаний бетонных балочных образцов, армированных фибропластиковыми элементами, полученные фирмой *«Интераква»* (Российская Федерация); по [13]

№ обр.	*Материал накладки и степень армирования*	*Нагрузка при появлении трещины, кг*	*Нагрузка при разрушении, кг*	*Характер разрушения*	*Схема расположения трещин перед разрушением*
8	Углепластик 0,12	1700	3100	Разрушение бетона в результате раскрытия одной центральной трещины	
7	Углепластик 0,19	2000	4800	Разрушение бетона в результате прорастания 4-5 трещин, разрыв накладки	
12	Углепластик (укороченная накладка) 0,19	2000	2230	Прорастание двух трещин под опорами, разрушение по одной трещине	
10	Углепластик	2100 (первая трещина)	5900	Разрушение бетона в результате раскрытия двух трещин, появившихся под опорами	
2	Углепластик (горячего отверждения 0,38	2000	Более 5900 (не разрушен)	Появилась сетка трещин, которые закрылись при снятии нагрузки	
3	Углепластик (холодного отверждения) 0,38	2900	Более 5900 (не разрушен)	Трещины закрылись после снятия нагрузки	
13	Стекло-пластик 0,18	400 (первая трещина, возможен дефект балки) 2000 (вторая трещина)	3400	Разрушение в результате прорастания трещины под опорой	
4	Стекло-пластик 0,27	2100	Более 4500 (не разрушен)	На образце 3 трещины закрылись после снятия нагрузки	
14	Органо-пластик	1700	2600	Разрушение в результате прорастания трещины под опорой	
5	Органо-пластик	2200	Более 4500 (не разрушен)	В бетоне была трещина до нагружения, при нагружении появилась вторая трещина, трещины закрылись после снятия нагрузки	
1	Без накладки	1300	1300	Разрушение по центральной трещине	

5.5.1.2. Конструкции средних и больших пролетов

Эксперименты УрГУПС (Российская Федерация). С целью оценки достигаемой эффективности усиления полноразмерных железобетонных балок *Уральским государственным университетом путей сообщения* (*УрГУПС*, Российская Федерация) совместно с *Уральским отделением Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта* (*ВНИИЖТ*, РФ) при участии *ООО «Свердловскмостострой»* (РФ) были проведены сравнительные испытания [108], при которых использовались непредварительно напряженные железобетонные балки таврового сечения длиной 12 м.

Модификации балок, не имевших усиления, а также усиленных по нижним граням углеродоволоконными холстами (рис. 5.16) и углеродоволоконными ламинатами заводской готовности (рис. 5.17) загружались сосредоточенными нагрузками. Полученные экспериментальные значения несущей способности несуиленных конструкций составили 407 кН, усиленных углеродоволоконными холстами — 625 кН, а усиленных углеродоволоконными ламинатами — 653 кН.

Результаты проведенных испытаний 12-ти метровых балок показали эффективность применения углеродоволоконных композитных систем усиления, позволившую повысить несущую способность конструкций на 53-60%.

а) **б)**



Рис. 5.16. Испытания железобетонных балок длиной 12 м, усиленных углеродоволоконными холстами, проводившиеся *УрГУПС* (Российская Федерация): а — балка в процессе испытаний, б — разрушение углеродоволоконного усиления; по [108]

а) **б)**



Рис. 5.17. Испытания железобетонных балок длиной 12 м, усиленных углеродоволоконными ламинатами, проводившиеся *УрГУПС* (Российская Федерация): а — балка в процессе испытаний, б — отслоение усиливающего ламината; по [108]

Исследования института «РОСДОРНИИ» (Российская Федерация). В 2011 году данным институтом была осуществлена программа стендовых статических испытаний железобетонных балок пролетных строений автодорожных мостов, усиленных фибропластиковыми элементами, изготавливавшимися «по месту» на основе армирующих углеродоволоконных тканей [13].

Испытания балок, длиной 12…33 м, проводились в соответствии с *ГОСТ 8829*. Характеристики средних *прочности на растяжение* и *модуля упругости*, использовавшихся армирующих углеродоволоконных однонаправленных тканей с шириной 250 мм и толщиной условного монослоя 0,128 мм (плотность ткани 230 г/м^2), определявшиеся на основе требований международного стандарта *ISO 527*, составляли, соответственно *4549,2 МПа* и *259,2 ГПа* (при заявленных производителем, соответственно, 4300 МПа и 230 ГПа).

Конструкции загружались в центре пролета условной сосредоточенной силой, распределявшейся между двумя точками приложения нагрузки, симметрично смещенными от вертикальной оси симметрии в стороны опор на 600 мм. Наступление разрушения испытываемых балок фиксировалось по первой группе предельных состояний (исчерпание прочности) непрерывным нарастанием прогибов, развитием и раскрытием трещин в бетоне при практически неизменных величинах нагрузок либо резким снижением нагрузок после достижения ими максимальных значений, а также появлением наклонных трещин с шириной раскрытия более 0,35 мм. По второй группе предельных состояний за раз-

рушение принимались случаи, когда нормальные трещины достигали ширины раскрытия 0,6 мм или достигался прогиб величиной 1/142 пролета конструкции.

Испытания балки длиной 12 м. Конструкция Т-образного сечения, возрастом 8 лет, была изготовлена в соответствии с серией 3.503.1-73 М (Союздорпроект), выпуск 1, под нагрузки класса А11 и НК-80. Балка имела высоту сечения 100 см и ширину верхней полки 169 см, армировалась 8-ю горизонтальными стержнями ∅25А400С, бетон соответствовал классу В35. Расчётный пролет балки, измеренный по осям опор, составил 11,4 м. Конструкция ранее не эксплуатировалась и не испытывалась, повреждений не имела.

Перед испытанием балку усилили наклейкой 2-х слоев углеродоволоконных однонаправленных лент, размещенных по боковым поверхностям стенки, с фиксацией их концов поперечными хомутами (рис. 5.18). Усиливающие ленты имели ширину 250 мм, что составляло 1/3 высоты стенки конструкции (750 мм).

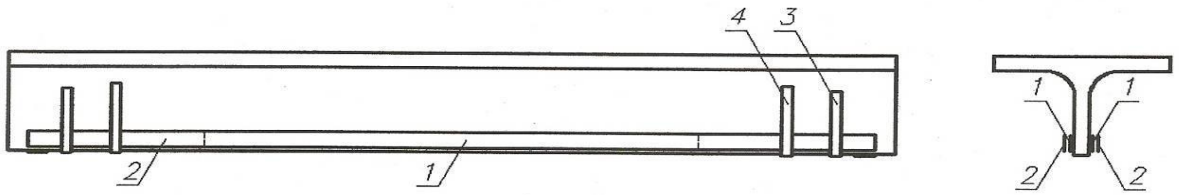


Рис. 5.18. Схема усиления лентами углеродоволоконной ткани железобетонной балки длиной 12 м, испытывавшейся «*РОСДОРНИИ*» (Российская федерация): 1 — первый слой ткани длиной 6 м, 2 — второй слой ткани длиной 11 м, 3 — поперечный хомут с длиной 1,0 м, 4 — поперечный хомут с длиной 1,4 м; по [13]

По данным расчетов авторов эксперимента [13] предельный изгибающий момент не усиленной балки, определенный по первой группе предельных состояний (по *СНиП 2.05.03-84**), должен был составить $M_{НЕУС} = 1105$ *кН×м*, а после усиления $M_{УС} = 1331$ *кН×м*. Теоретическая величина контрольной разрушающей нагрузки, определяемая условием прочности, составляла *65,3 т.с.* При этом фактическое разрушение углеродоволоконных элементов внешнего армирования балки (рис. 5.19) имело место при нагрузке *70,9 т.с.*, превышающей контрольную на 8,5%.

Установленный авторами эксперимента теоретический прогиб усиленной балки (по *СНиП 2.05.03-84*)* при контрольной нагрузке, равной в соответствии с условием жесткости *22,1 т.с.*, составлял 12 мм (приближался к прогибу не усиленной конструкции), а его измеренная фактическая величина — 8 мм (т.е. на 50% меньше), см. рис. 5.20. Значение максимального зафиксированного прогиба усиленной балки составило 112 мм (т.е. 1/102 пролета).



Рис. 5.19. Разрушение углеродоволоконных элементов внешнего армирования железобетонной балки длиной 12 м, испытывавшейся институтом «*РОСДОРНИИ*» (Российская федерация); по [13]

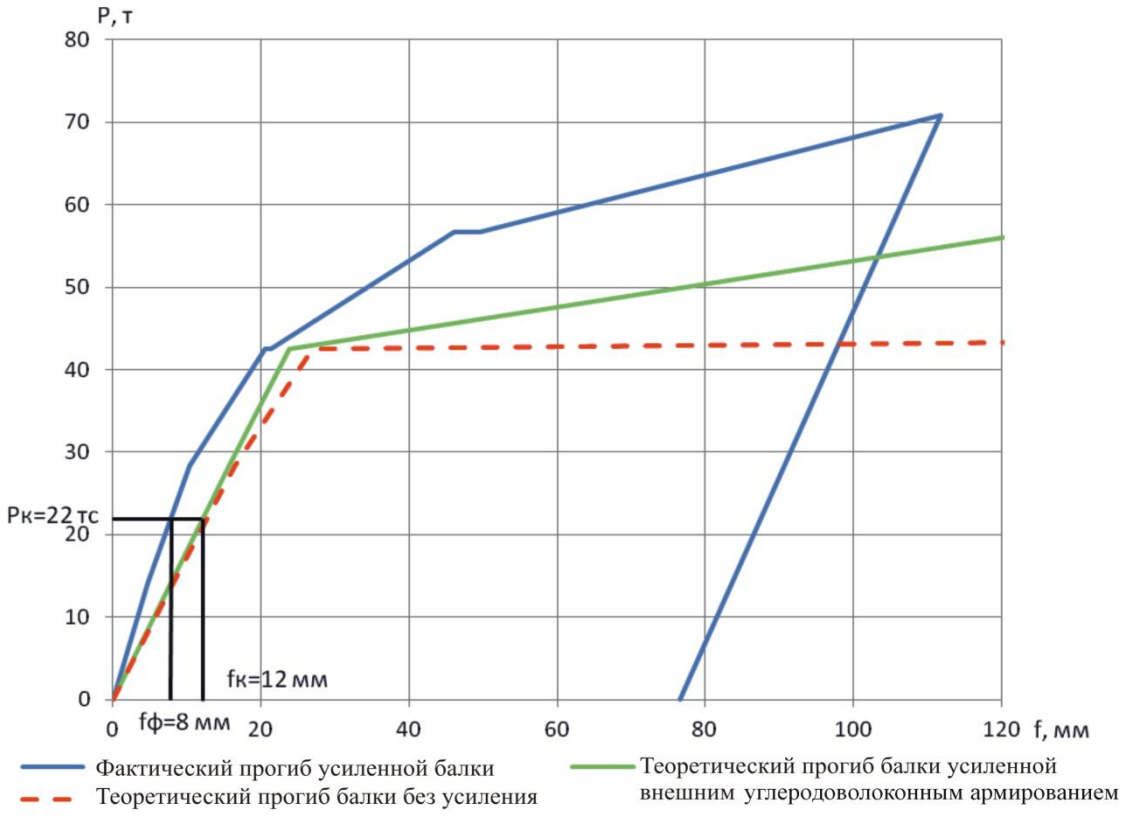


Рис. 5.20. Зависимости прогибов железобетонной балки длиной 12 м от величин действующих нагрузок, полученные институтом «*РОСДОРНИИ*» (Российская федерация); по [13]

Контрольная ширина раскрытия трещин, определенная авторами эксперимента по *ГОСТ 8829*, составила 0,022 см, что соответствовало величинам изгибающих моментов, установленных по *СНиП 2.05.03-84** в не усиленной и усиленной балке, соответственно равных $M_{cr.НЕУС}$ = *1261 кН×м* и $M_{cr.УС}$= *1403 кН×м*. Величина контрольной испытательной нагрузки для оценки усиленной балки из условия раскрытия трещин составила *46,8 т.с.*, при этом первая трещина с шириной раскрытия 0,25 мм появилась в середине пролета балки при

нагрузке *42,5 т.с.* Однако, при этом усилена углеродоволоконными тканями была только нижняя часть стенки балки, а трещины раскрывались выше (на открытой ее части), полностью смыкаясь у элементов усиления. Ширина раскрытия трещин 0,5 мм на нижней поверхности ребра имела место при нагрузке *85,1 т.с.*, в это же время на открытой боковой поверхности ребра их раскрытие достигало 0,8 мм.

В ходе данных испытаний при прогибе конструкции, приближающемся к 1/110 пролета, армирующая ткань начала растрескиваться и расслаиваться вдоль направления рабочей фибры. Разрушение боковых фибропластиковых элементов сопровождалось резким треском, подобным описанному *проф. У.Майером* (см. п. 5.5.1.1).

Осмотр нижней части боковой поверхности стенки балки, произведенный при неснятой нагрузке после разрушения элементов фибропластикового усиления, свидетельствовал о том, что поверхность бетона под армирующей тканью не получила видимых трещин, но имела рыхлую структуру. Таким образом, внешнее углеродоволоконное армирование способствовало равномерному распределению растягивающих усилий в теле бетона по длине конструкции и тем самым повышало ее трещиностойкость.

Испытания балки длиной 24 м. Конструкция была специально изготовлена для проведения испытаний в соответствии с серией 3.503.1-81, выпуск 7-1, под нагрузки класса А14 и Н14 (марка Б2400.140.123-К7.АШ-К). Балка имела высоту сечения 124,5 см и ширину верхней полки 139,5 см, армировалась предварительно напряженными пучками стальных канатов К-7 и ненапрягаемой арматурой класса А400С, бетон соответствовал классу В40. Расчётный пролет балки, измеренный по осям опор, составил 23,4 м (рис. 5.21).



Рис. 5.21. Железобетонная балка пролетного строения автодорожного моста длиной 24 м на испытательном стенде «*РОСДОРНИИ*» (Российская федерация); по [13]

На первом этапе испытаний не усиленную балку довели до условного разрушения по прогибу (составил 172 мм или 1/136 пролета) и раскрытию тре-

щин (наклонные трещины в стенке раскрылись до величины 0,5 мм). После чего конструкцию усилили наклейкой по нижней грани стенки 3-х слоев армирующей ткани, фиксируемой на концах поперечными однослойными хомутами (см. рис. 5.22). После набора прочности связующей матрицей (эпоксидным клеем) усиленную балку повторно испытали до разрушения.

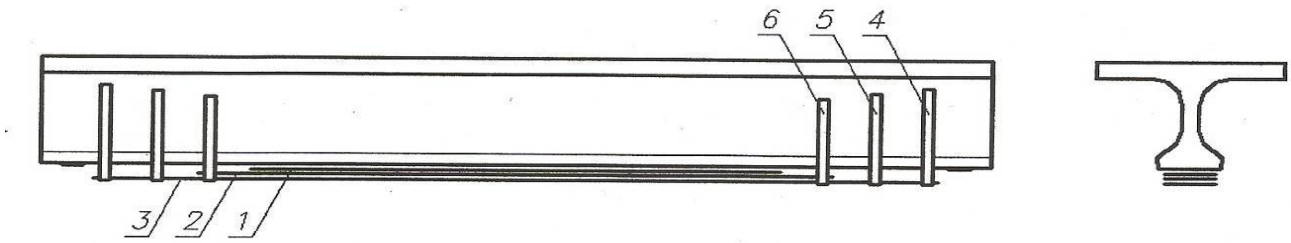


Рис. 5.22. Схема усиления лентами углеродоволоконной ткани железобетонной балки длиной 24 м, испытывавшейся «*РОСДОРНИИ*» (Российская федерация): 1 — первый слой ткани длиной 10 м, 2 — второй слой ткани длиной 16 м, 3 — третий слой ткани длиной 22 м, 4 — поперечный хомут с длиной 1,5 м, 5 — поперечный хомут с длиной 1,3 м, 6 — поперечный хомут с длиной 1,2 м; по [13]

По данным расчетов авторов эксперимента [13] предельный изгибающий момент не усиленной балки, определенный по первой группе предельных состояний (по *СНиП 2.05.03-84**), должен был составить $M_{НЕУС} = 4260$ *кН×м*, а после усиления $M_{УС} = 4418$ *кН×м*. Теоретическая величина контрольной разрушающей нагрузки, определяемая условием прочности, составляла *95,6 т.с*. При испытательной нагрузке *Р=100,4 т.с.*, превышающей контрольную величину, признаков, свидетельствующих об исчерпании несущей способности (разрушении), отмечено не было.

Установленный авторами эксперимента теоретический прогиб балки без усиления и с его наличием (по *СНиП 2.05.03-84*)* при контрольной нагрузке, равной в соответствии с условием жесткости *41,0 т.с.*, составлял 22 мм (рис. 5.23). Измеренный фактический прогиб от контрольной нагрузки не усиленной балки так же составил 22 мм.

Максимальный зафиксированный при испытании прогиб не усиленной балки составил 172 мм (т.е. 1/136 пролета), а усиленной — 186 мм (т.е. 1/125 пролета). Измеренный прогиб от контрольной нагрузки усиленной балки составил 28 мм, что обуславливалось снижением жесткости усиленной балки трещинами, образовавшимися на первом этапе испытаний при загружении конструкции до усиления.

В соответствии с полученными зависимостями усиление углеродоволоконными тканями практически не повлияло на величину прогиба в упругой зоне работы балки и сказалось только на последующих стадиях неупругого де-

формирования, а так же на увеличении величины упругого прогиба с 22 до 27 мм с соответствующим ростом нагрузки с *41 т.с.* до *49 т.с.*

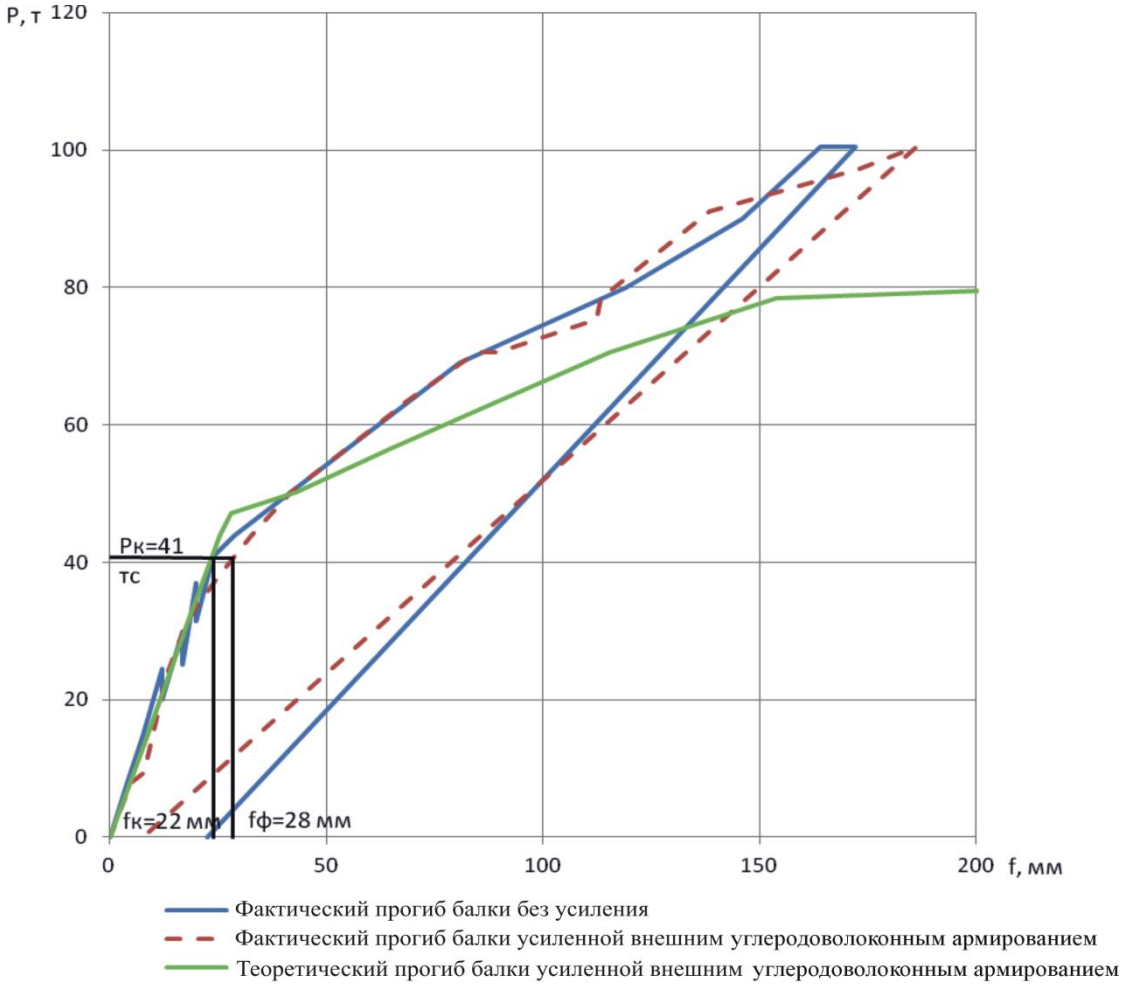


Рис. 5.23. Зависимости прогибов железобетонной балки длиной 24 м от величин действующих нагрузок, полученные институтом «*РОСДОРНИИ*» (Российская федерация); по [13]

Контрольная ширина раскрытия трещин, определенная авторами эксперимента по *ГОСТ 8829*, составила 0,014 см, что соответствовало величинам изгибающих моментов, установленных по *СНиП 2.05.03-84** в не усиленной и усиленной балке, соответственно равных $M_{cr.НЕУС}$ = *3884 кН×м* и $M_{cr.УС}$= *4440 кН×м*. Величина контрольной испытательной нагрузки для оценки усиленной балки из условия раскрытия трещин составила *63,6 т.с.*, при этом первая трещина с шириной раскрытия 0,15 мм в уровне рабочей арматуры появилась в середине пролета балки при нагрузке *62,8 т.с.*

Несмотря на то, что на первом этапе испытаний балка была доведена до условного разрушения и перед началом второго этапа на поверхности ее стенки, в зоне рабочей арматуры, сохранялись остаточные трещины с шириной раскрытия до 0,1 мм, устройство фибропластикового усиления на основе углеродоволоконных тканей повысило трещиностойкость конструкции.

Испытания балок длиной 33 м. В рамках стендовых испытаний, осуществлявшихся институтом *«РОСДОРНИИ»* (Российская Федерация) было испытано две балки длиной 33 м [13].

Балка №1. Конструкция первой балки, изготовленная в соответствии с серией 3.503.1-81 (Союздорпроект), выпуск 7-1, под нагрузки класса А11 и НК-80, имела возраст 20 лет и была вырезана по швам омоноличивания из пролетного строения моста, в составе которого эксплуатировалась 7 лет. Ее сечение имело высоту 158 см и ширину верхней полки 206 см. Армирование производилось предварительно напряженными пучками стальных проволок В-II, бетон соответствовал классу В40. Расчётный пролет балки, измеренный по осям опор, составил 32,24 м.

На первом этапе балка испытывалась без усиления. После доведения конструкции до нагрузки, близкой величине, вызывающей условное разрушение, было осуществлено ее усиление с помощью 4-х слоев углеродоволоконной ткани шириной 250 мм, наклеиваемых на нижнюю грань стенки и фиксируемых по концам поперечными хомутами из того же материала (рис. 5.24). Затем производилось повторное испытание.

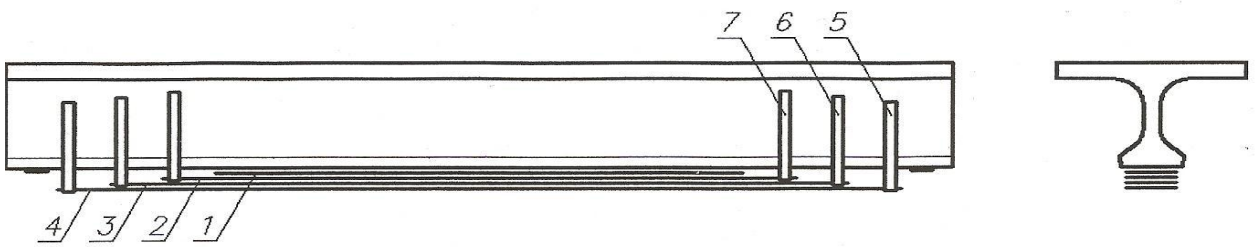


Рис. 5.24. Схема усиления лентами углеродоволоконной ткани железобетонной балки длиной 33 м, испытывавшейся институтом «*РОСДОРНИИ*» (Российская федерация): 1 — первый слой ткани длиной 12 м, 2 — второй слой ткани длиной 18 м, 3 — третий слой ткани длиной 24 м, 4 — четвертый слой ткани длиной 30 м, 5 — поперечный хомут с длиной 1,5 м, 6 — поперечный хомут с длиной 1,7 м, 7 — поперечный хомут с длиной 1,8 м; по [13]

По данным расчетов авторов эксперимента [13] предельный изгибающий момент не усиленной балки, определенный по первой группе предельных состояний (по *СНиП 2.05.03-84**), должен был составить $M_{НЕУС} = 7270$ *кН×м*. Теоретическая величина контрольной разрушающей нагрузки, определяемая условием прочности, при отсутствии усиления составляла *95,0 т.с*. На первом этапе испытаний к не усиленной балке была приложена максимальная нагрузка *Р=85,1 т.с.*, составившая 90% от контрольной разрушающей нагрузки, при этом признаков, свидетельствующих об исчерпании несущей способности (разрушении), отмечено не было.

Теоретический предельный изгибающий момент исследуемой конструкции, претерпевшей фибропластиковое усиление, составил $M_{УС}$ = *7645 кН×м*, а величина теоретической контрольной разрушающей нагрузки — *101,9 т.с*. Технические причины позволили при испытаниях приложить нагрузку только величиной *85,1 т.с*., составлявшей 84% от контрольной разрушающей. В результате признаков, свидетельствующих об исчерпании балкой несущей способности, отмечено не было.

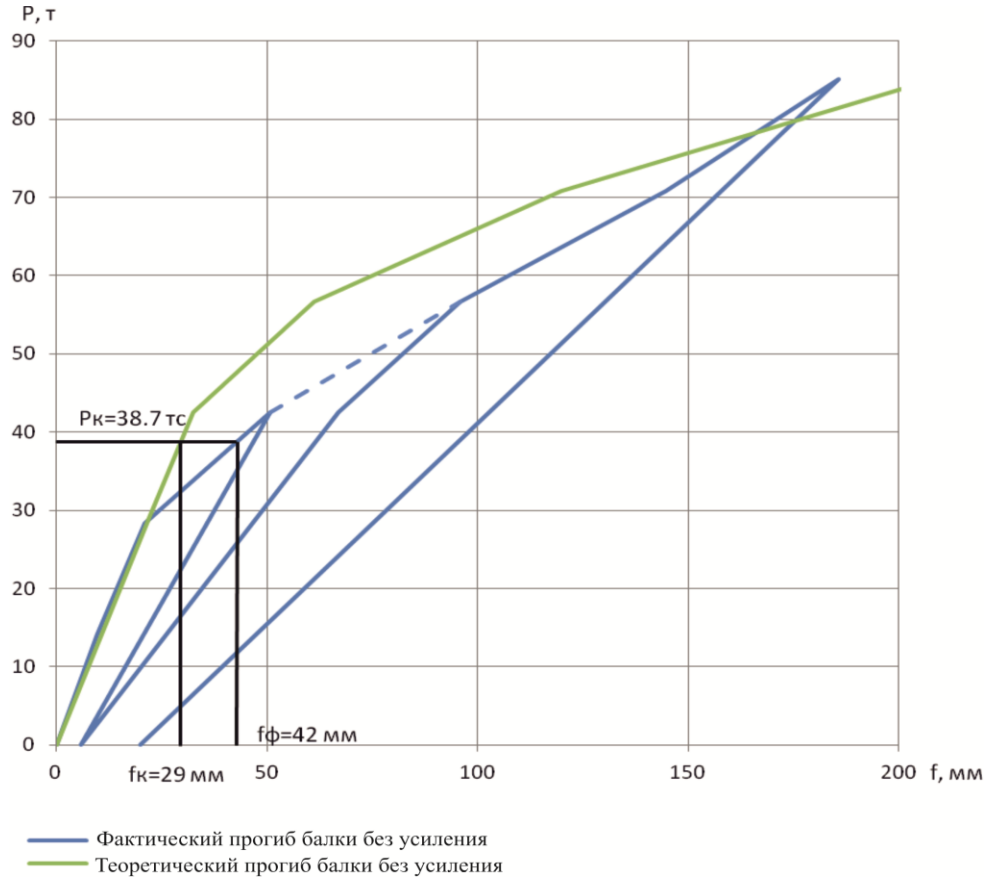
Установленный авторами эксперимента теоретический прогиб балки без усиления и с его наличием (по *СНиП 2.05.03-84*)* при контрольной нагрузке, равной в соответствии с условием жесткости *38,7 т.с.*, составлял 29 мм. Измеренный фактический прогиб от контрольной нагрузки не усиленной балки составил 42 мм, а усиленной — 54 мм, что было связано со снижением жесткости балки трещинами, образовавшимися в конструкции на первом этапе испытаний, проводившемся без усиления. В соответствии с полученными зависимостями (см. рис 5.25), усиление углеродоволоконными тканями практически не повлияло на величины прогибов в упругой стадии работы конструкции, но сказалось на последующем неупругом деформировании.

Максимальный зафиксированный при испытании прогиб не усиленной балки составил 186 мм (т.е. 1/173 пролета), а усиленной — 184 мм (т.е. 1/175 пролета). График деформирования определяет более низкую жесткость ранее испытанной и затем усиленной балки вследствие трещин, образовавшихся на первой стадии испытаний. Однако, жесткость усиленной балки на стадии работы, близкой к предельной несущей способности, была несколько повышена.

Контрольная ширина раскрытия трещин, определенная авторами эксперимента по *ГОСТ 8829*, составила 0,014 см, что отвечало величинам изгибающих моментов, установленных по *СНиП 2.05.03-84**, в не усиленной и усиленной балке равных, соответственно, $M_{cr.НЕУС}$ = *7322 кН×м* и $M_{cr.УС}$= *8100 кН×м*. Величины контрольных испытательных нагрузок для оценки балки без усиления и с его наличием из условия раскрытия трещин составили, соответственно, *57,4* и *67,6 т.с.*

Первая трещина с шириной раскрытия 0,15 мм в уровне рабочей арматуры появилась в середине пролета не усиленной балки при нагрузке *42,5 т.с.* (по факту балка имела недостаточную трещиностойкость), а усиленной — при нагрузке *56,7 т.с.* Несмотря на то, что на первом этапе испытаний балка была доведена до условного разрушения и перед началом второго этапа на поверхности ее стенки, в зоне рабочей арматуры, сохранялись остаточные трещины с шириной раскрытия до 0,05 мм, устройство фибропластикового усиления на основе углеродоволоконных тканей повысило трещиностойкость конструкции.

а)



б)

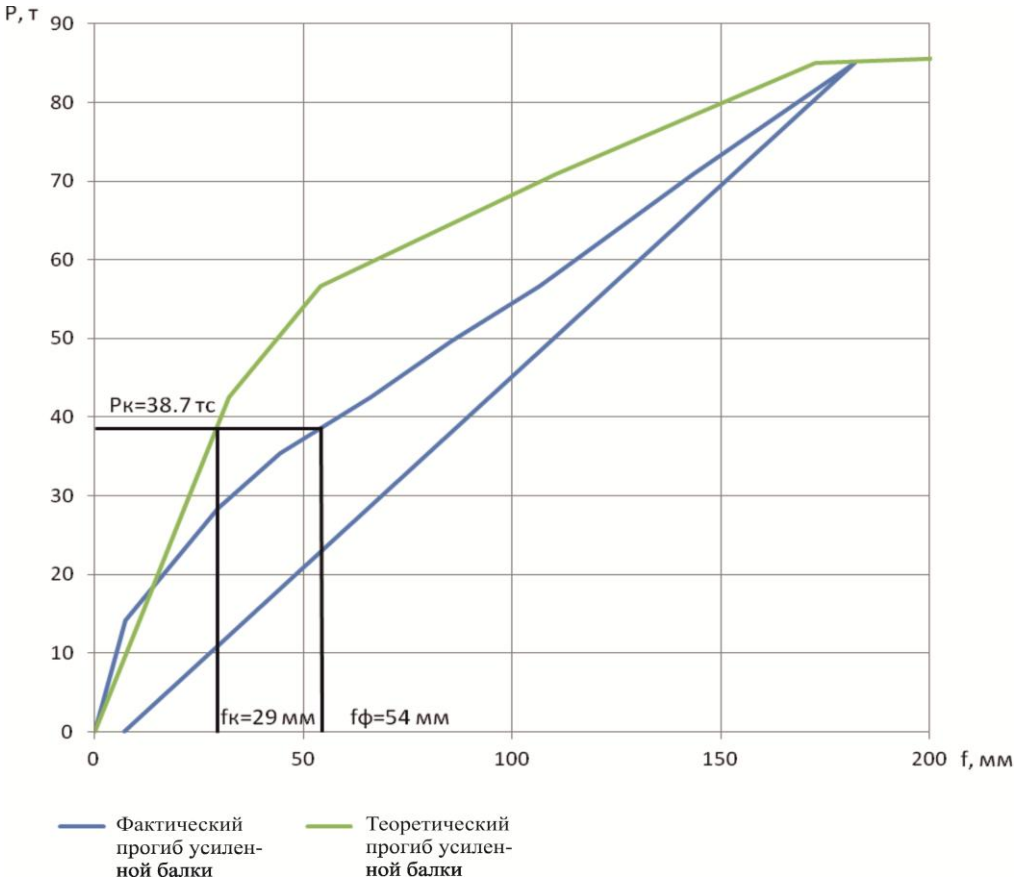


Рис. 5.25. Фактические и теоретические прогибы железобетонной балки длиной 33 м (№1), испытывавшейся институтом «*РОСДОРНИИ*» (Российская федерация): а — до усиления, б — после усиления; по [13]

*Балка №2***.** Конструкция второй балки длиной 33 м также была изготовлена в соответствии с серией 3.503.1-81 (Союздорпроект), выпуск 7-1, под нагрузки класса А11 и НК-80, имела возраст 8 лет и была вырезана по швам омоноличивания из пролетного строения моста, в составе которого эксплуатировалась 7 лет. Ее сечение имело высоту 159 см и ширину верхней полки 160 см. Армирование производилось предварительно напряженными пучками стальных проволок В-II, бетон соответствовал классу В40. Расчётный пролет балки, измеренный по центрам опор, составил 32,15 м.

Перед испытанием балки №2, было произведено ее усиление, аналогичное, выполненному на балке №1, смотри рис. 5.24.

По данным расчетов авторов эксперимента [13] предельные значения изгибающих моментов не усиленной и усиленной конструкций, определенные по первой группе предельных состояний (по *СНиП 2.05.03-84**), должны были составить, соответственно, $M_{НЕУС} = 7290$ *кН×м* и $M_{УС} = 7667$ *кН×м*.

Теоретическая величина контрольного изгибающего момента и контрольной разрушающей нагрузки, определенные условием прочности при наличии усиления, соответственно составили *10734 кН×м* и *107,2 т.с*. Технические возможности позволили при испытаниях приложить нагрузку только величиной *96,4 т.с*., составлявшей 90% от контрольной разрушающей нагрузки усиленной балки и 100% от контрольной нагрузки не усиленной балки. При этом признаков, свидетельствующих об исчерпании балкой несущей способности (разрушении), отмечено не было.

Установленный авторами эксперимента теоретический и фактический прогиб усиленной балки (по *СНиП 2.05.03-84**) при контрольной нагрузке, равной в соответствии с условием жесткости *43,4 т.с.*, составлял 33 мм (см. рис. 5.26), а максимальный зафиксированный при испытании прогиб усиленной балки составил 156 мм (т.е. 1/206 пролета). Графики теоретических прогибов усиленной и не усиленной балок свидетельствуют о том, что усиление углеродоволоконными тканями в данном случае практически не влияло на жесткость конструкции в упругой зоне ее работы, но сказывалось при неупругом деформировании.

Контрольная ширина раскрытия трещин, определенная авторами эксперимента по *ГОСТ 8829*, составила 0,014 см, что соответствовало величинам изгибающих моментов, установленных по *СНиП 2.05.03-84** в не усиленной и усиленной балке, соответственно равных $M_{cr.НЕУС} = 7390$ *кН×м* и $M_{cr.УС} = 8200$ *кН×м*. Величина контрольной испытательной нагрузки для оценки усиленной балки из условия раскрытия трещин составила *73,8 т.с.* При этом первая трещина с шириной раскрытия 0,15 мм появилась в середине пролета усиленной

балки при нагрузке *70,9 т.с.* (отличие от теоретической величины составило 4%). Таким образом, наклейка углеродоволоконных тканей повысила трещиностойкость конструкции.

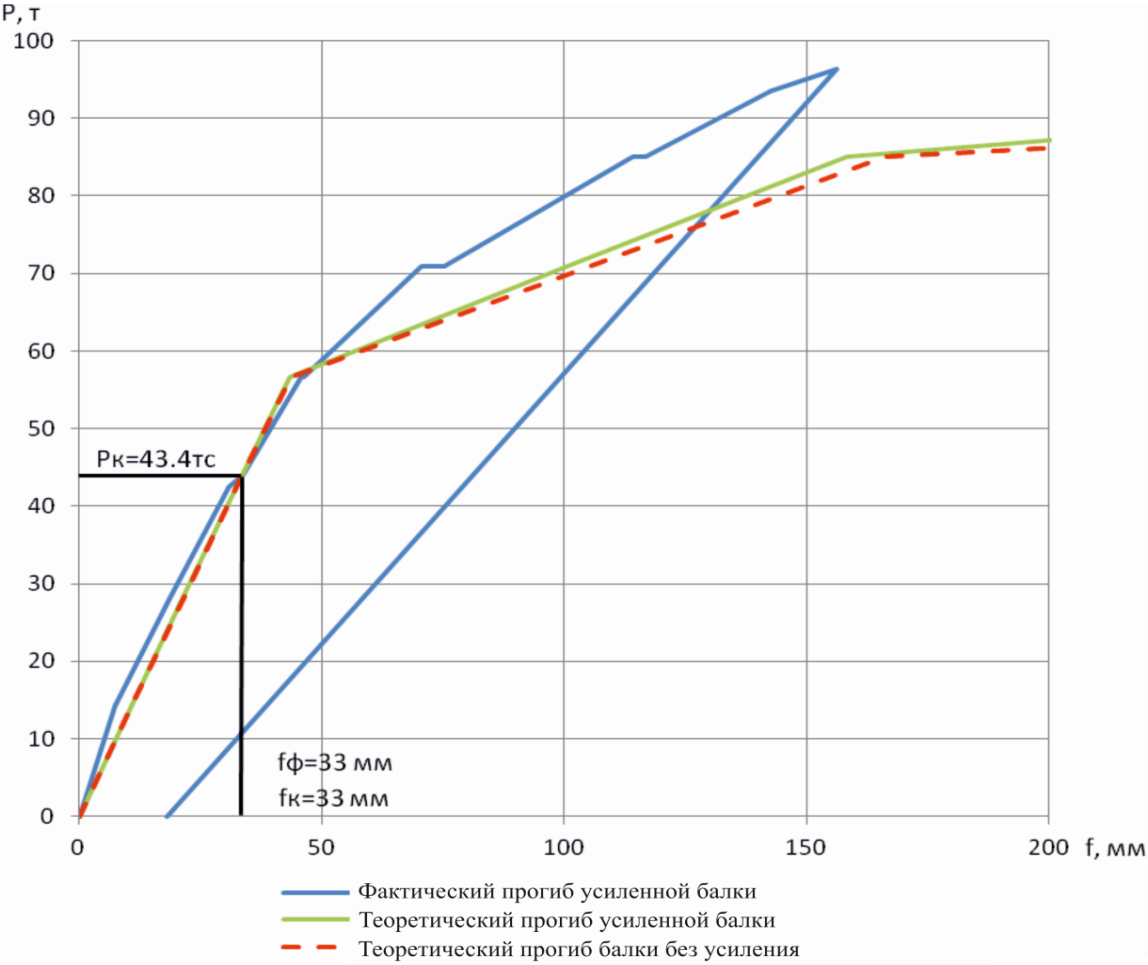


Рис. 5.26. Фактические и теоретические прогибы железобетонной балки длиной 33 м (№2), испытывавшейся институтом «*РОСДОРНИИ*» (Российская федерация); по [13]

Оценка достигнутой эффективности усиления балок. Выполненное институтом *«РОСДОРНИИ»* (Российская Федерация) [13] усиление конструкций внешним армированием углеродоволоконными однонаправленными тканями повысило их несущую способность в соответствии с величинами расчетных изгибающих моментов: для балки длиной 12 м примерно на 20%, для балки длиной 24 м — на 4% и для балок длиной 33 м — на 5%. При этом усиление практически не влияло на жесткости конструкций в упругой стадии их работы, но уменьшало деформативность при неупругой работе, после образования нормальных трещин.

Кроме этого фибропластиковое усиление балок повысило несущую способность в соответствии с условием трещиностойкости: для балки длиной 12 м

примерно на величину 10%, для балки длиной 24 м — на 15% и для балок длиной 33 м — на 10%.

Полученные результаты позволили авторам исследования [13] сделать вывод о том, что фибропластиковое усиление на основе углеродоволоконных тканей наиболее эффективно для повышения прочности балок с каркасной арматурой, а при повышении трещиностойкости — для балок, как с каркасной, так и с предварительно напряженной арматурой.

Восстановлению несущей способности поврежденных балок. Экспериментальные исследования восстановления несущей способности поврежденных железобетонных балок пролетных строений автомобильных мостов проводились совместно институтами *«РОСДОРНИИ»* и «*ЦНИИС»* (Российская Федерация) в 2008 году. Испытаниям была подвергнута П-образная балка сборно-монолитного пролётного строения моста, имеющая пролет 21 м и армирование сталью класса А400С [13].

На первом этапе испытаний нагрузка была доведена до предела упругой работы конструкции на изгиб (рис. 5.27), что соответствовало прогибу в 1/200 пролета. При этом появились первые наклонные трещины в приопорных зонах с шириной раскрытия 0,35 мм (разрушение по критерию прочности, предусмотренному *ГОСТ 8829*). После разгрузки, на втором этапе испытаний был достигнут второй критерий разрушения — по жёсткости (прогиб превысил критическое значение, составлявшее 1/142 пролета).

Перед проведением третьего этапа испытаний конструкцию усилили углеродоволоконными ламинатами, установленными в количестве 3 штуки на каждое ребро балки (по одному снизу и по боковым сторонам нижней части ребер). Ширина использовавшихся ламинатов составляла 120 мм, что соответствовало 1/6 высоты стенки (рис. 5.28).

После усиления, на третьем этапе загружения было зафиксировано полное восстановление несущей способности балки: диаграмма результатов испытания полностью повторила предыдущую диаграмму (см. рис. 5.27). При этом за состояние, соответствующее разрушению конструкции, было принято наступление отрыва концевого участка нижнего усиливающего ламината, проходившее по защитному слою бетона (рис. 5.29). Высота и количество наклеенных на стенку ламинатов оказались достаточными для восстановления надёжной работы балки.

Отрыв нижнего усиливающего ламината произошёл при прогибе балки, близком к 200 мм, т.е. при 1/100 пролета. На концах ламинатов, наклеенных на вертикальных поверхностях, в момент отрыва нижнего усиливающего элемен-

та, также появились начальные трещины по контактным поверхностям «клей-бетон», что определяло состояние, предшествующее их отрыву.

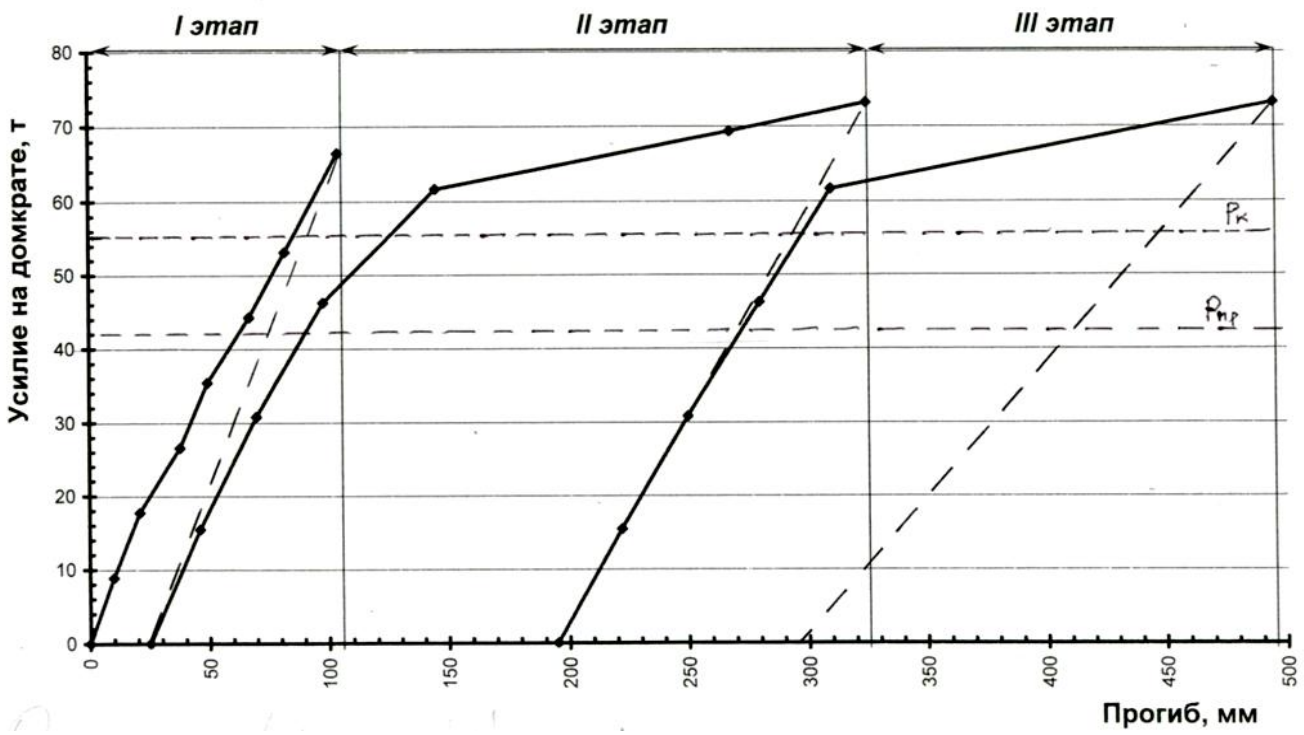


Рис. 5.27. Зависимость прогибов от нагрузки в П-образной железобетонной балке сборно-монолитного строения автомобильного моста, имеющей пролет 21 м, до (этапы 1 и 2) и после (этап 3) усиления стенок углеродоволоконными ламинатами, в соответствии с результатами, полученными при совместных исследованиях институтов *«РОСДОРНИИ»* и *«ЦНИИС»* (Российская Федерация): $P_{пр}$ – уровень проектной нагрузка, $P_к$ — уровень контрольной нагрузки; по [13]

а) **б)**



Рис. 5.28. Вид П-образной железобетонной балке сборно-монолитного строения автомобильного моста, имеющей пролет 21 м, использовавшейся при совместных исследованиях институтов *«РОСДОРНИИ»* и *«ЦНИИС»* (Российская Федерация): а – до усиления (после 1-го и 2-го этапов загружений балка соответствовала условиям разрушения), б — после наклейки углеродоволоконных ламинатов (до 3-го этапа загружений); по [13]



Рис. 5.29. Отрыв концевого участка нижнего ламината углеродоволоконного усиления П-образной железобетонной балки сборно-монолитного строения автомобильного моста, использовавшейся при совместных исследованиях институтов *«РОСДОРНИИ»* и *«ЦНИИС»* (Российская Федерация); по [13]

Результаты описанных исследований свидетельствуют о практической возможности восстановления работоспособности разрушенных изгибаемых железобетонных балочных конструкций при помощи композиционных материалов. Анализ полученных данных позволил авторам эксперимента [13] утверждать об эффективности применения для восстановления балок с пролетом 21 м аналогичных решений, использующих фибропластики на основе однонаправленных армирующих тканей, но при наличии вертикально направленных анкерных хомутов, расположенных без пропусков на приопорных участках стенки конструкции, имеющих длину порядка 1,2…1,5 м.

5.5.2. Монтаж и анкеровка фибропластиковых систем

5.5.2.1. Эффективная длина адгезионных соединений и их расчетная модель

Наклейка с использованием эпоксидных адгезионных составов фибропластиковых элементов по длине растянутых граней изгибаемых бетонных и железобетонных конструкций позволяют существенно повысить несущую способность и жесткость последних. При этом особенностью усиления изгибаемых железобетонных элементов является то, что армирующая сталь характеризуется упругопластической работой, а моноволоконные фибропластики демонстрируют практически идеально-упругое поведение.

Экспериментальное изучение работы клеевых соединений фибропластиковых ламинатов с железобетонными конструкциями, проводившиеся в *Брауншвейгском техническом университете* (*TU Braunschweig*, Германия), определили их эффективную длину [54, 55, 130-134]. Так максимальная передача нагрузки обеспечивается при длинах адгезионных соединений, воспринимающих сдвигающие усилия, составляющих около 300 мм. Дальнейшее увеличение ука-

занных длин не способствует росту соответствующей несущей способности соединений (см. рис. 5.30).

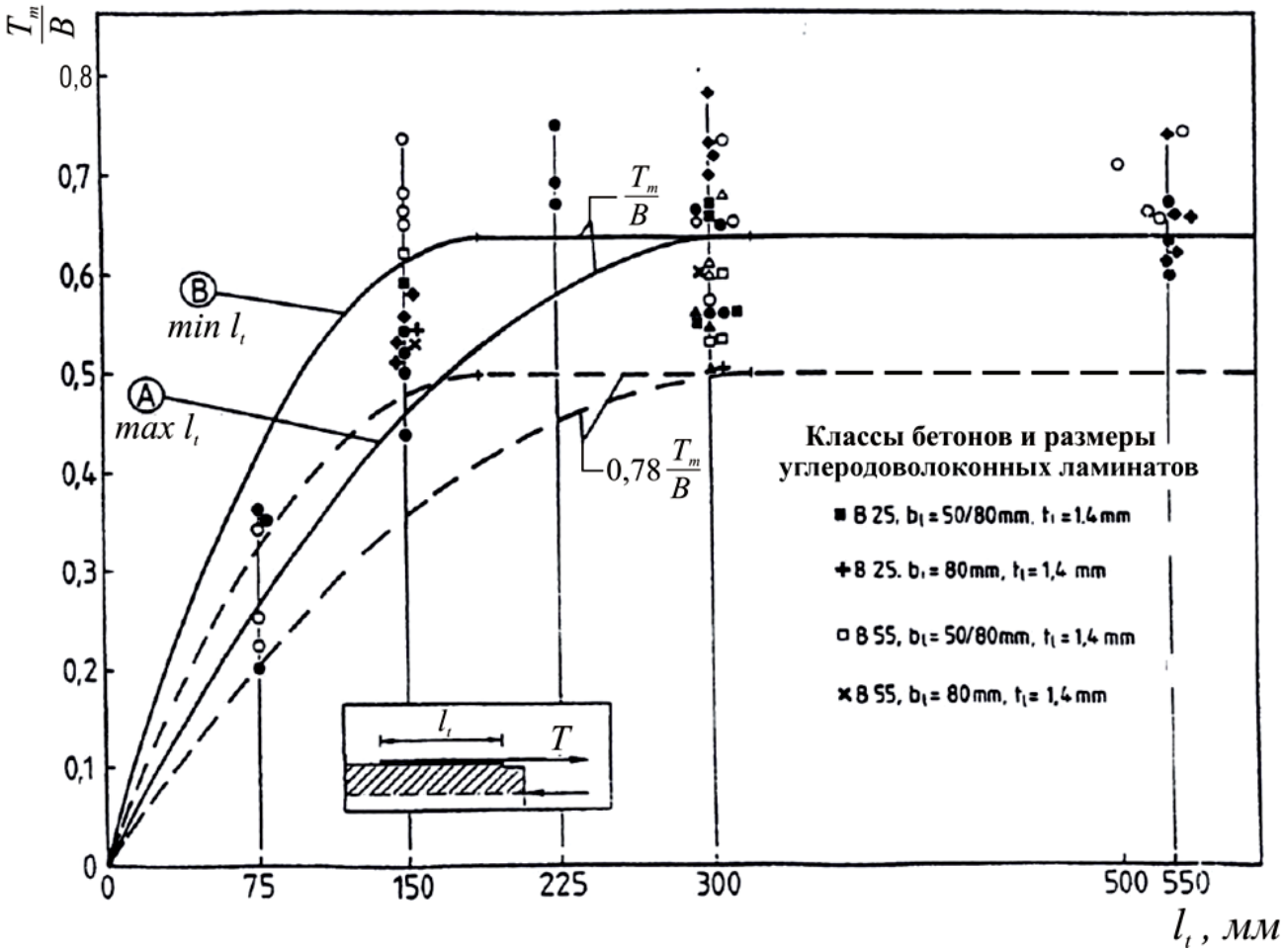


Рис. 5.30. Зависимости разрушающих усилий от длин клеевых соединений углеродоволоконных ламинатов с бетоном, полученные в *Брауншвейгском техническом университете* (*TU Braunschweig*, Германия); адаптировано по [54, 55]

Традиционная расчетная модель адгезионного соединения фибропластикового усиления изгибаемых железобетонных элементов основывается на нелинейной механики разрушений и может быть использована для большинства упругих материалов. Предполагается, что усилия передаются в соединении между поперечными или наклонными трещинами. Проверка степени анкеровки конца ламината (точка *E* на рис. 5.31) должна быть выполнена при развитии кривой изгибающих моментов в сторону положительных величин, при этом, остаточная прочность фибропластика в точке *E* ограничивается теоретической несущей способностью клеевого соединения. В случае развития кривой изгибающих моментов в сторону отрицательных величин (момент на опоре), ламинат анкеруется в зоне действия нулевых моментов с соответствующим смещением рабочего участка длины соединения.

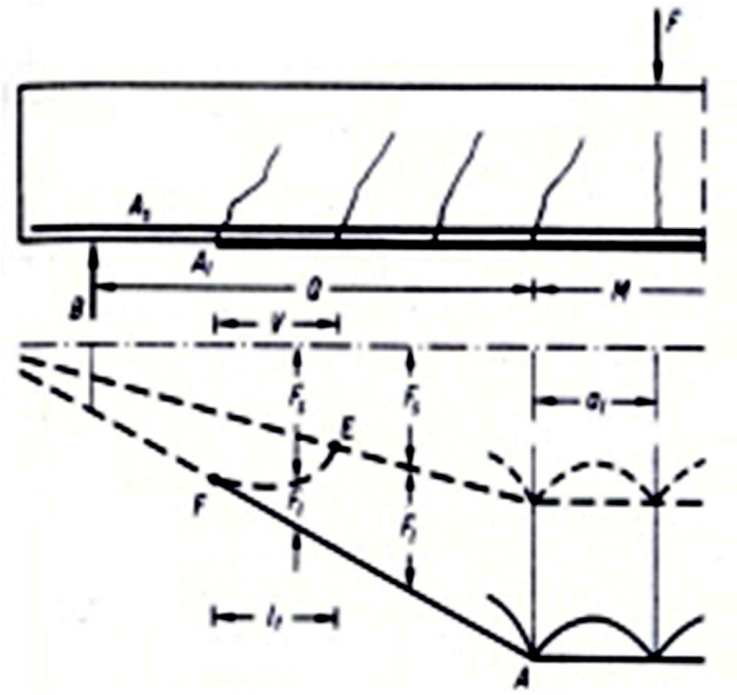


Рис. 5.31. Расчетная схема фибропластикового усиления железобетонной балки; по [54]

Трещины в бетоне изгибаемых элементов, вызванные действием максимальных моментов (зона *M*, рис. 5.31), ограничивают степень усиления конструкции, зависящую от способности клеевого соединения передавать действующие усилия.

В зоне *Q* (рис. 5.31), с возрастающими в сторону опоры поперечными силами, по швам соединений происходит соответствующий рост сдвигающих напряжений, определяющий дополнительное условие, ограничивающее степень достигаемого усиления конструкций.

На участках клеевых швов, расположенных у концов фибропластиковых элементов внешнего армирования (зона *V*, рис. 5.31), наблюдается скачек нормальных напряжений, действующих поперек оси конструкции, что часто приводит к необходимости дополнительной анкеровки фибропластиковых элементов.

Таким образом, размещение продольных элементов фибропластикового усиления, из условий обеспечения работоспособности адгезионных соединений, требует выведения их концов за пределы усиливаемых зон на длину, не меньшую 200 мм. При этом увеличение данной длины за пределы 300 мм является неэффективны.

При многослойной конструкции элементов усиления, изготовленных «по месту», каждый последующий слой принимается короче предыдущего на длину анкеровки, что позволяет снизить концентрацию внутренних напряжений и уменьшить вероятность расслаивания по их концам.

Условие анкеровки усиливающих композитных элементов также определяет требование выведения в неразрезных изгибаемых конструкциях внешнего фибропластикового армирования за точки нулевых моментов на расстояние не меньшее 200 мм (обычно до 300 мм).

5.5.2.2. Дополнительная анкеровка фибропластиковых элементов

В случае расположения концов фибропластиковых элементов на сжатых участках усиливаемых поверхностей изгибаемых конструкций, их дополнительное крепление обычно не требуется. При резких же изменениях эпюр моментов, определяющих наличие растягивающих напряжений на усиливаемых гранях балок, прочность клеевых соединений на концах фибропластиковых продольных элементов часто оказывается недостаточной.

При недостаточной собственной несущей способности адгезионных соединений может использоваться их дополнительное крепление, для реализации которого обычно применяется два основных способа дополнительной анкеровки: *металлическими пластинами* или *поперечным фибропластиковым армированием*.

Анкеровка металлическими пластинами. При дополнительной анкеровке концов элементов усиления, осуществляемой с помощью металлических пластин (рис. 5.32), последние наклеиваются на поверхность фибропластиков с дальнейшим креплением болтовыми соединениями к основному материалу (рис. 5.33). Испытания таких анкерных узлов демонстрируют практическую возможность многократного увеличения усилий, передаваемых между фибропластиковыми элементами и материалом строительной конструкции [55].

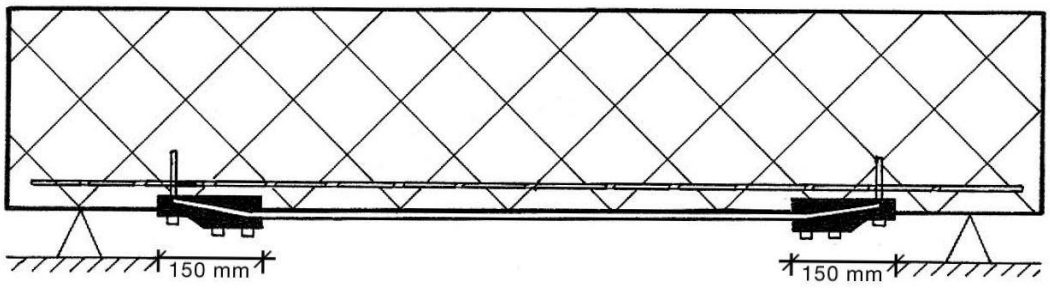


Рис. 5.32. Анкеровка фибропластиковых элементов металлическими пластинами; по [54]



Рис. 5.33. Один из вариантов решения узла крепления анкерной пластины элемента фибропластикового усиления изгибаемой конструкции; по [54, 55]

Университет Фрибура (*HTA University of Fribourg*, Швейцария) провел обширные исследования пластинчатых креплений предварительно отвержденных ламинированных элементов усиления изгибаемых железобетонных конструкций [54]. При этом были специально разработаны анкерные устройства, использующие в качестве крепежных элементов алюминиевые пластины, прижимающие углеродоволоконные ламинаты к поверхности бетона. Проведенные эксперименты (рис. 5.34) позволили уточнить характер работы и разрушения подобных соединений, а также допустимые нагрузки, соответствующие различным классам бетона. Отказ всех испытывавшихся образцов определялся разрушением бетона (рис. 5.35), прочностные свойства которого являлись определяющими для несущей способности данных соединений. Так при классе бетона B25 работоспособность узлов крепления ламинатов, имевших различные поперечные сечения, характеризовалась предельной величиной прикладываемого усилия, составлявшей 150…190 кН (рис. 5.36).

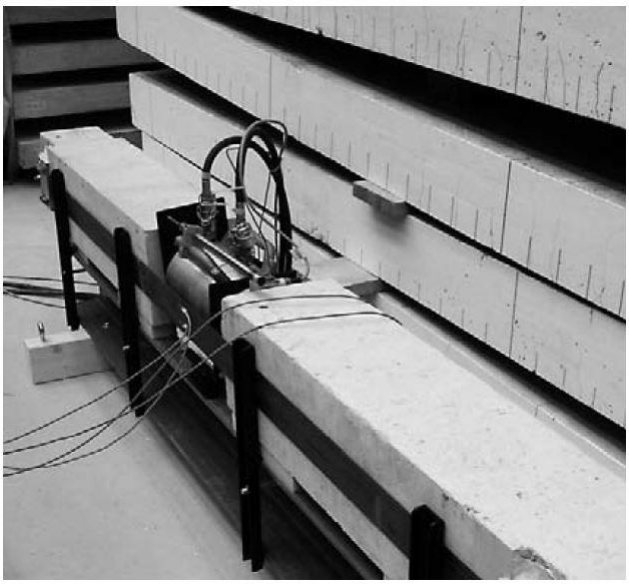


Рис. 5.34. Испытания пластинчатых анкерных устройств фибропластикового усиления железобетонных конструкций, проводившиеся в *Университете Фрибура* (*HTA University of Fribourg*, Швейцария); по [54]

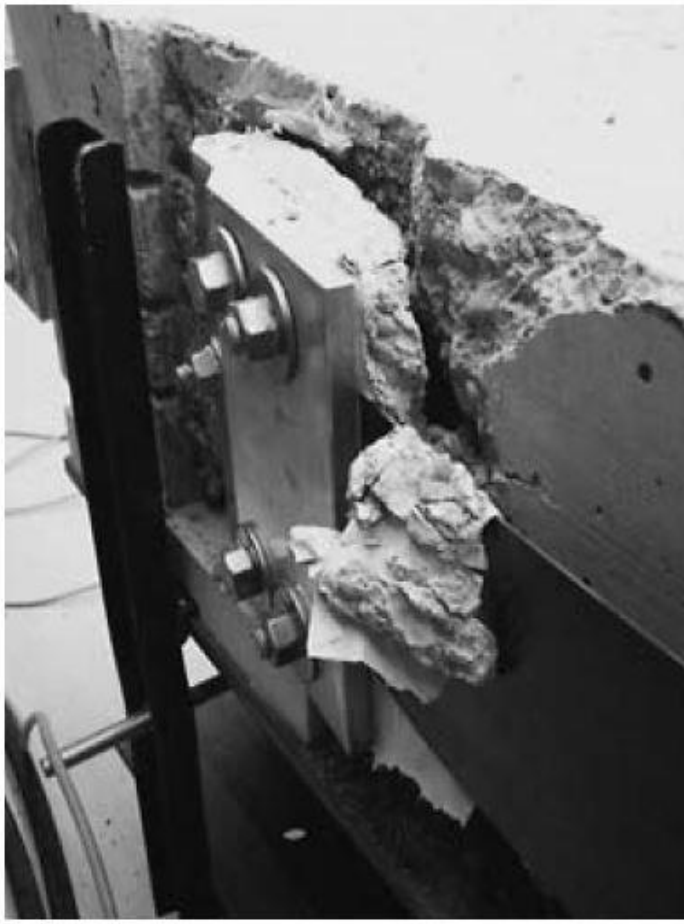


Рис. 5.35. Разрушение бетона в зоне пластинчатых анкерных устройств сопряжения углеродоволоконного ламината с железобетонным элементом; по [54]

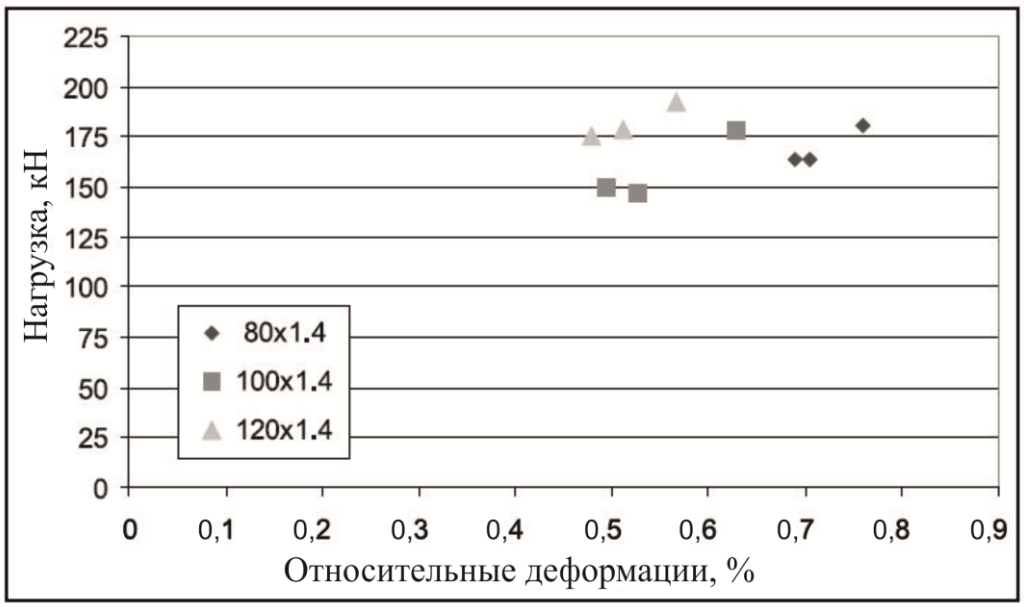


Рис. 5.36. Результаты испытаний пластинчатых анкерных устройств углеродоволоконных ламинатов усиления изгибаемых железобетонных элементов, выполненных из бетона класса В25 (размеры сечений углеродоволоконных ламинатов приведены в таблице, расположенной на графике); адаптировано по [54]



Рис. 5.37. Испытания анкерных креплений углеродоволоконных ламинатов, использующих стальные пластины; по [54]

Полученные там же результаты испытаний образцов, предусматривавших наличие групп соединительных пластин (рис. 5.37), свидетельствуют об эффективности данных соединений при придании предварительного напряжения фибропластиковым элементам усиления железобетонных конструкций.

Анкеровка поперечным фибропластиковым армированием. Связи, реализуемые поперечным фибропластиковым армированием, обычно изготавливаются обвертыванием концов анкеруемых элементов с помощью армирующих

лент или полотен, покрываемых в проектном положении матричными составами. Такие, размещаемые на поверхности конструкций, вертикальные или наклонные элементы крепления, могут изготавливаться из одного или нескольких кусков армирующего материала (рис. 5.38). Их преимуществом является сочетание анкерной функции с дополнительным поперечным армированием, необходимым в зонах с преобладающими поперечными силами.

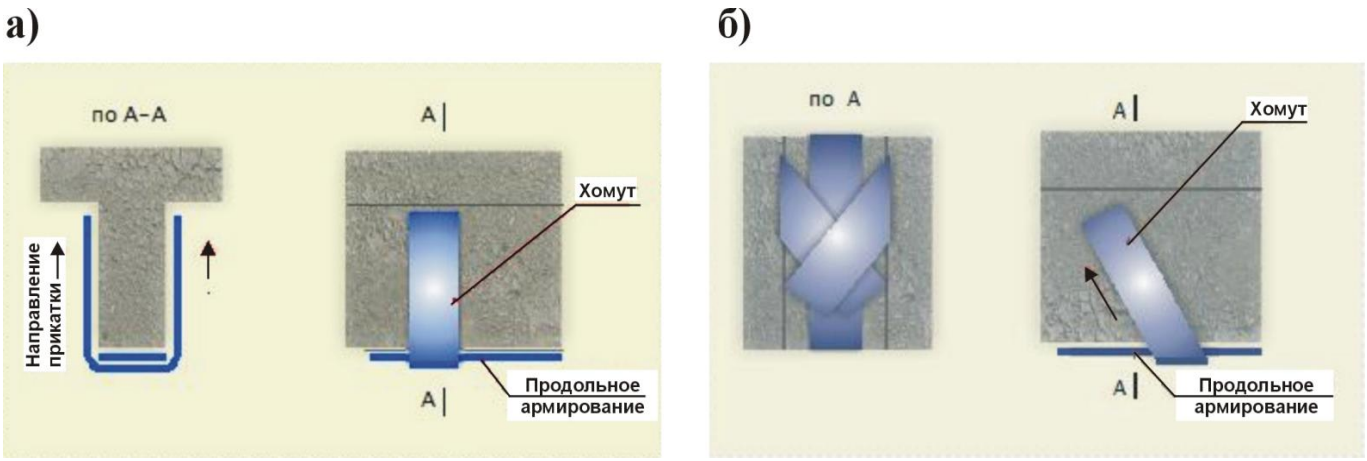


Рис. 5.38. Анкеровка продольных элементов усиления поперечным фибропластиковым армированием: а, б — соответственно, вертикальными и наклонными хомутами; по [128]

Экспериментальные исследования усиленных железобетонных балок, выполненных с подобной дополнительной вертикальной анкеровкой концов продольных элементов внешнего фибропластикового армирования (рис. 5.39), проводились в *Университете Лиссабона* (*The University of Lisbon*, Португалия). При этом результаты испытаний показали, что наличие таких креплений позволяет повысить общую несущую способность усиленных изгибаемых железобетонных конструкций на 20% [54, 55].



Рис. 5.39. Экспериментальные исследования железобетонных балок, усиленных в растянутой зоне фибропластиковыми элементами, имеющими дополнительную анкеровку поперечным композитным армированием, проводившиеся в *Университете Лиссабона* (*The University of Lisbon*, Португалия) [54, 55]

При недостаточной несущей способности анкеров в виде элементов поперечного фибропластикового армирования, также могут использоваться дополнительные элементы адгезионной анкеровки, изготавливаемые в виде специальных прядей (рис. 5.40), один конец которых (жесткий стержень) заанкеривается в бетоне, а второй (распушенный «венчик») вклеивается в матрицу усиливающего фибропластикового элемента.

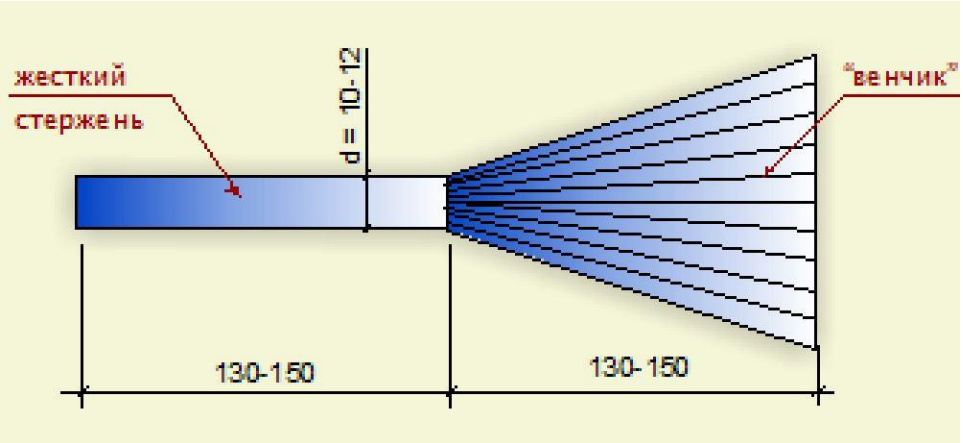


Рис. 5.40. Заготовка адгезионного анкерного устройства; по [128]

Заготовки таких адгезионных анкерных устройств могут быть изготовлена из отрезков армирующей ленты или ткани длиной 250-300 мм, у которых на одной половине длины вынимается поперечная нить, а на другой — осуществляется последовательная пропитка адгезивом, сворачивание в продольный стержень и фиксация формы дополнительными нитяными скрутками. По окончании процесса полимеризации заготовки таких адгезионных анкеров готовы для дальнейшего использования.

При наличии сложностей анкеровки адгезионных анкеров в теле бетона, но возможности выполнения сквозных отверстий в элементах конструкций (например, в стенках балок), могут использоваться различные схемы подобных анкеров с двусторонними «венчиками». В этих случаях длины жестких частей анкеров (так называемых «жестких стержней», см. рис. 5.40) принимаются соответствующими глубине сквозных отверстий в теле конструкций, а расположенные по одному их концу «венчики» вклеиваются в матрицы усиливающих фибропластиковых элементов, «венчики» же других концов равномерно распределяются по окружностям отверстий с противоположной стороны конструкций и приклеиваются к поверхности бетона (рис. 5.41).



Рис. 5.41. Крепление конца двустороннего адгезионного анкера на поверхности конструкции; по [135]

5.5.2.3. Размещение фибропластиковых элементов в штрабах

Фибропластиковые ламинированные элементы заводской готовности могут также использоваться для усиления бетонных, каменных и деревянных конструкций путем вклейки в предварительно выполненные штрабы [54, 55, 136-139]. На строительных площадках такие штрабы прорезаются в основном материале конструкций с помощью дисковых насадок электрическими турбинами на ширину, превышающую толщину соответствующих пластин ламината на 1,5…2 мм, и глубину на 1…3 мм большую их ширины. Штрабы заполняются адгезионным составом с последующим вдавливанием в них фибропластиковых ламинированных элементов (рис. 5.42).

а)



б)



в)



Рис. 5.42. Усиление железобетонных конструкций фибропластиковыми ламинатами, размещаемыми в штрабах: а — прорезка штраб, б — очистка внутренних поверхностей штраб, в — заполнение штраб ламинатом и адгезионным составом; по [54, 55]

Работа углеродоволоконных ламинатов, вклеенных в штрабы железобетонных изгибаемых конструкций, исследовалась *Мюнхенским техническим университетом* (*TU Munich*, Германия). Результаты испытаний (рис. 5.43) показали не только хорошую однородную связь между фибропластиком и бетоном, но и возможность полного использования несущей способности ламинированных волокон до сдвигового разрушения клеевых связей между ламинатом и основным материалом конструкции [54, 55].

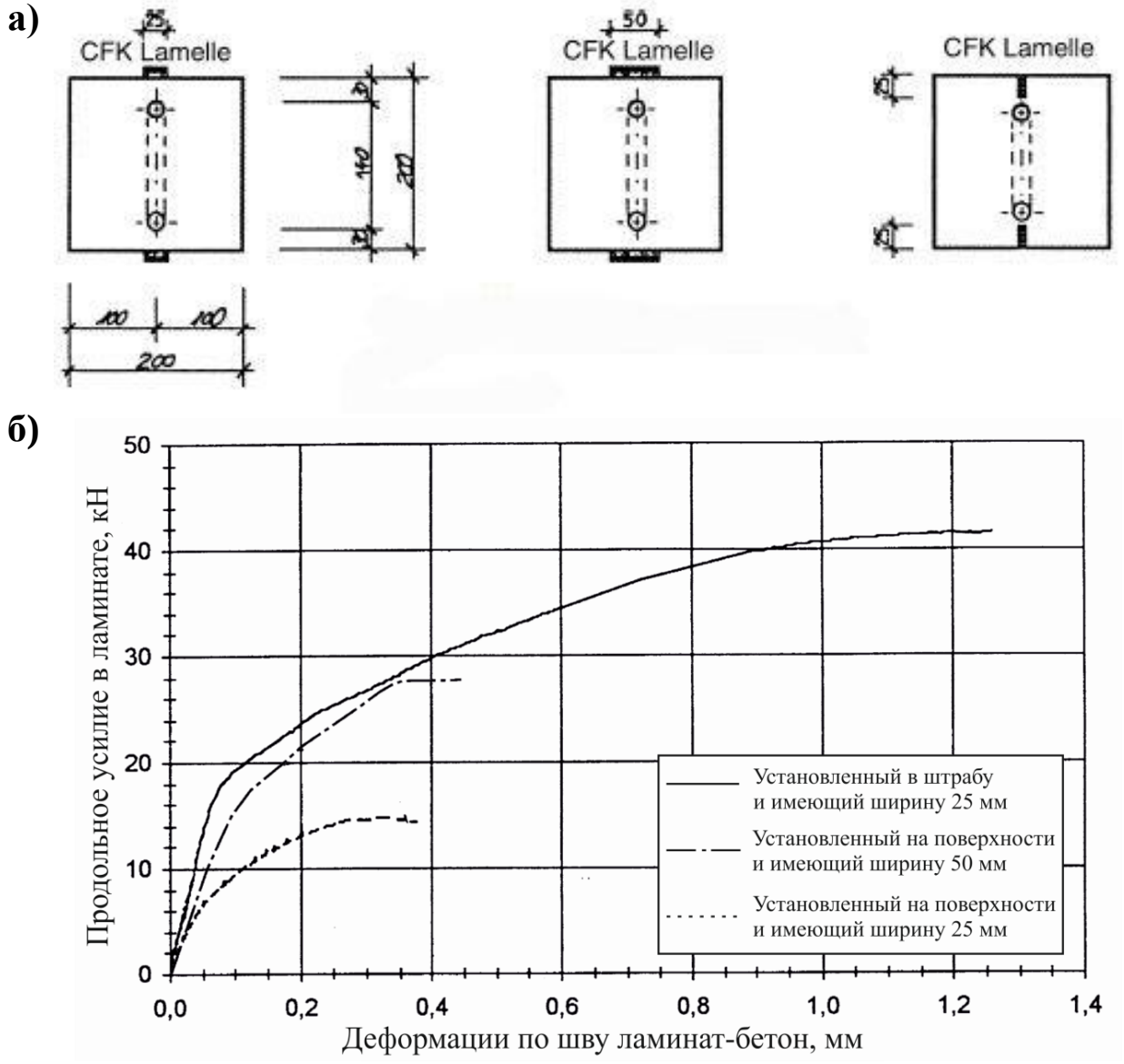


Рис. 5.43. Сравнительные испытания усилений железобетонных элементов углеродоволоконными ламинатами с толщиной 1,4 мм, размещаемыми на поверхности и в штрабах изгибаемых образцов: а — сечения экспериментальных образцов, б — зависимость деформаций по адгезионному шву от продольных усилий в ламинатах; адаптировано по [54, 55]

Полученные экспериментальные зависимости между усилиями и деформациями по швам «ламинат-бетон» свидетельствуют о гораздо большей пла-

стичности работы соединений, предусматривающих использование внутренних штраб. В этом случае работа соединений ламинатов приближается к работе стальной арматуры, заключенной в бетон. Продольная жесткость данных соединений при небольших уровнях действующих нагрузок превышает продольную жесткость соединений с ламинатами, размещенными на внешних поверхностях конструкций. Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о том, что при анкерной длине, составляющей 25 см, углеродоволоконные ламинаты, установленные в штрабы, обеспечивают в три раза большую несущую способность в сравнении с ламинатами того же поперечного сечения, размещенными непосредственно на поверхности испытываемых элементов [55].

Многочисленные исследования показывают, что работа клеевых соединений с внешним расположением усиливающих элементов, отличается достаточной хрупкостью. При этом деформации углеродоволоконных ламинатов, предшествующие разрушению соединений по швам «ламинат-бетон», обычно не превышают 0,3 мм. Деформирование же стержней стальной арматуры, заключенной в бетон, может доходить до 1 мм. В результате наблюдается значительное перераспределение усилий между внешним фибропластиковым армированием и внутренней стальной арматурой. Таким образом, внешние соединения, работоспособность которых во многом зависит от свойств основного материала усиливаемой конструкции и, особенно, от его поверхностной прочности, способны обеспечить относительно более низкую передачу нагрузки фибропластиковым элементам усиления. В отличие от них, соединения с использованием штраб, при наличии практической возможности их применения, демонстрируют большую конструктивную целесообразность.

5.5.3. Продольное усиление

При продольном усилении изгибаемых бетонных и железобетонных элементов фибропластиковыми системами могут использоваться три основных метода:

— усиление предварительно отвердженными ламинатами заводской готовности, располагаемыми на внешних поверхностях конструкций,
— поверхностное усиление одно- и двунаправленными армирующими лентами и полотнами,
— усиление ламинатами, размещаемыми во внутренних штрабах, прорезаемых в основном материале конструкций.

5.5.3.1. Внешнее усиление ламинатами заводской готовности

Испытания усиленных железобетонных балок, проводившиеся в *Брауншвейгском техническом университете* (*TU Braunschweig*, Германия), демонстрируют зависимость разрушений внешних клеевых соединений фибропластиковых ламинатов с бетоном от величин собственных деформаций ламинатов и пластических деформаций армирующей стали конструкций [54, 130-134]. При этом наблюдавшиеся разрушения соединений внутреннего стального армирования с окружающим бетоном, начинали протекать при продольных деформациях ламинатов внешнего усиления, составляющих приблизительно 0,65%, что в 5,7 раз больше относительных деформаций, соответствующих площадке текучести арматурной стали. Разрушение же самих железобетонных балок проходило при удлинении ламинатов внешнего армирования, составлявшем 1,3%.

Испытания на изгиб тонких железобетонных плит, выполненные в *Университете Фрибура* (*HTA University of Fribourg*, Швейцария) [54], показали, что начальные частичные отслоения углеродопластиковых ламинатов возможны при деформациях 0,6…0,7%. В связи с этим было определено ограничение придельных деформаций ламинированных фибропластиков в составе изгибаемых железобетонных конструкций, составившее $\varepsilon = 0{,}6…0{,}8\%$ и в дальнейшем вошедшее в рекомендации, признанные международной практикой проектирования строительных конструкций [78, 83].

Примеры эффективного усиления изгибаемых бетонных и железобетонных конструкций фибропластиковыми ламинатами заводской готовности приведены в п.п. 5.5.1.1 и 5.5.1.2.

5.5.3.2. Внешнее усиление армирующими лентами и полотнами

Для изгибаемых бетонных конструкций, основной материал которых отличается низкой поверхностной прочностью (до 1,5 МПа), или в случаях незначительных требований, предъявляемых к выполняемым усилениям, могут использоваться решения, основанные на применении армирующих лент и полотен (обычно углеродоволоконных). Примеры эффективного повышения несущей способности изгибаемых конструкций, усиливаемых холстовыми армирующими материалами, приведены в п.п. 5.5.1.1 и 5.5.1.2.

Применение лент и полотен позволяет увеличить площадь поверхности, передающей нагрузку между фибропластиковыми элементами и основным материалом конструкции, в 5…10 раз, что важно при возможной недостаточной прочности используемых соединения. Обычно при подобном армировании прочность усиливаемых поверхностей ограничивается минимальной величиной, равной 1,0 МПа.

5.5.3.3. Усиление ламинатами, размещаемыми во внутренних штрабах

Исследования работоспособности углеродоволоконных ламинатов, вклеенных в штрабы железобетонных конструкций, проводились *Мюнхенским техническим университетом* (*TU Munich*, Германия). Для определения возможной степени усиления, были проведены сравнительные испытания железобетонных балок [54, 55], имевших пролет 2,5 м и различные поперечные сечения (рис. 5.44), усиленных углеродоволоконными ламинатами заводской готовности, размещаемыми как на растянутых гранях конструкций, так и во внутренних штрабах. Каждый из экспериментальных образцов усиливался либо одной внешней ламинированной пластиной, имеющей сечение 50×1,2 мм, либо двумя ламинатами, размещаемыми в штрабах и имеющими сечение 25×1,2 мм. Модуль упругости и предел прочности ламинированных углеродопластиков составляли, соответственно, *164 ГПа* и *2700 МПа*. Нагрузка прикладывались к балкам в серединах пролетов в виде сосредоточенных сил.

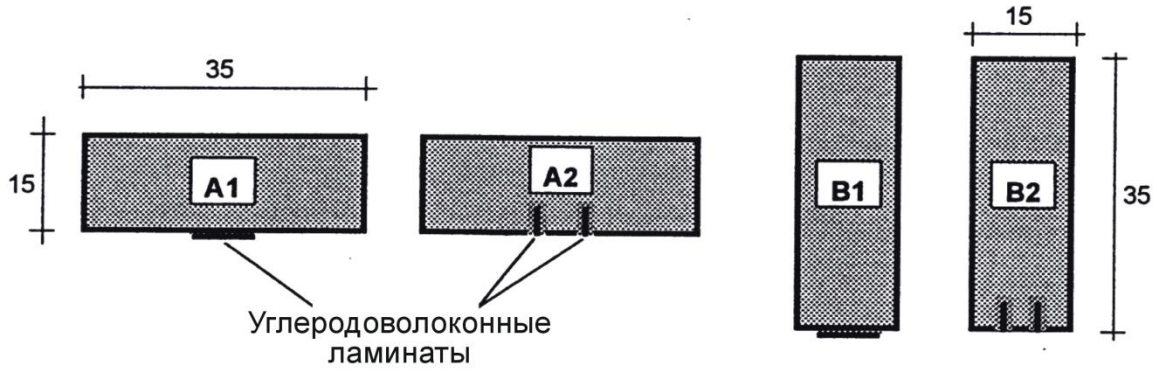


Рис. 5.44. Поперечные сечения испытывавшихся в *Мюнхенским техническим университетом* (*TU Munich*, Германия) железобетонных балок, имевших усиление углеродоволоконными ламинатами, размещенными на поверхностях их растянутых граней и во внутренних штабах; адаптировано по [54, 55]

При испытаниях всех образцов с внешним усилением (рис. 5.44, схемы *A1* и *B1*), разрушение происходило вследствие отслаивания фибропластиковых ламинатов. Разрушение образцов с горизонтальной формой сечения, усиленных ламинатами, расположенными в штабах (рис. 5.44, схема *A2*), обуславливалось разрывом фибропластиковых элементов. В образцах с сечениями вертикальной формы, усиленных внутренне расположенными ламинатами (рис. 5.44, схема *B2*) и отличавшихся слабым стальным поперечным армированием, разрушение происходило по наклонным сечениям и определялось действием поперечных сил.

При испытаниях балок, имевших горизонтальную форму поперечного сечения (рис. 5.44, схемы *A1* и *A2*) и характеризовавшихся практически одинако-

вой жесткостью, несущая способность была увеличена более чем в два раза за счет внутреннего размещения армирующих ламинатов (рис. 5.45, а), что обуславливалось более полным использованием продольной прочности углеродного фибропластика. Балки с вертикальной формой сечения (рис. 5.44, схемы *B1* и *B2*) демонстрировали практически одинаковые зависимости между нагрузкой и деформациями (рис. 5.45, б), также отличавшиеся значительно более полным использованием прочностных свойств углеродоволоконных ламинатов, размещенных во внутренних штрабах.

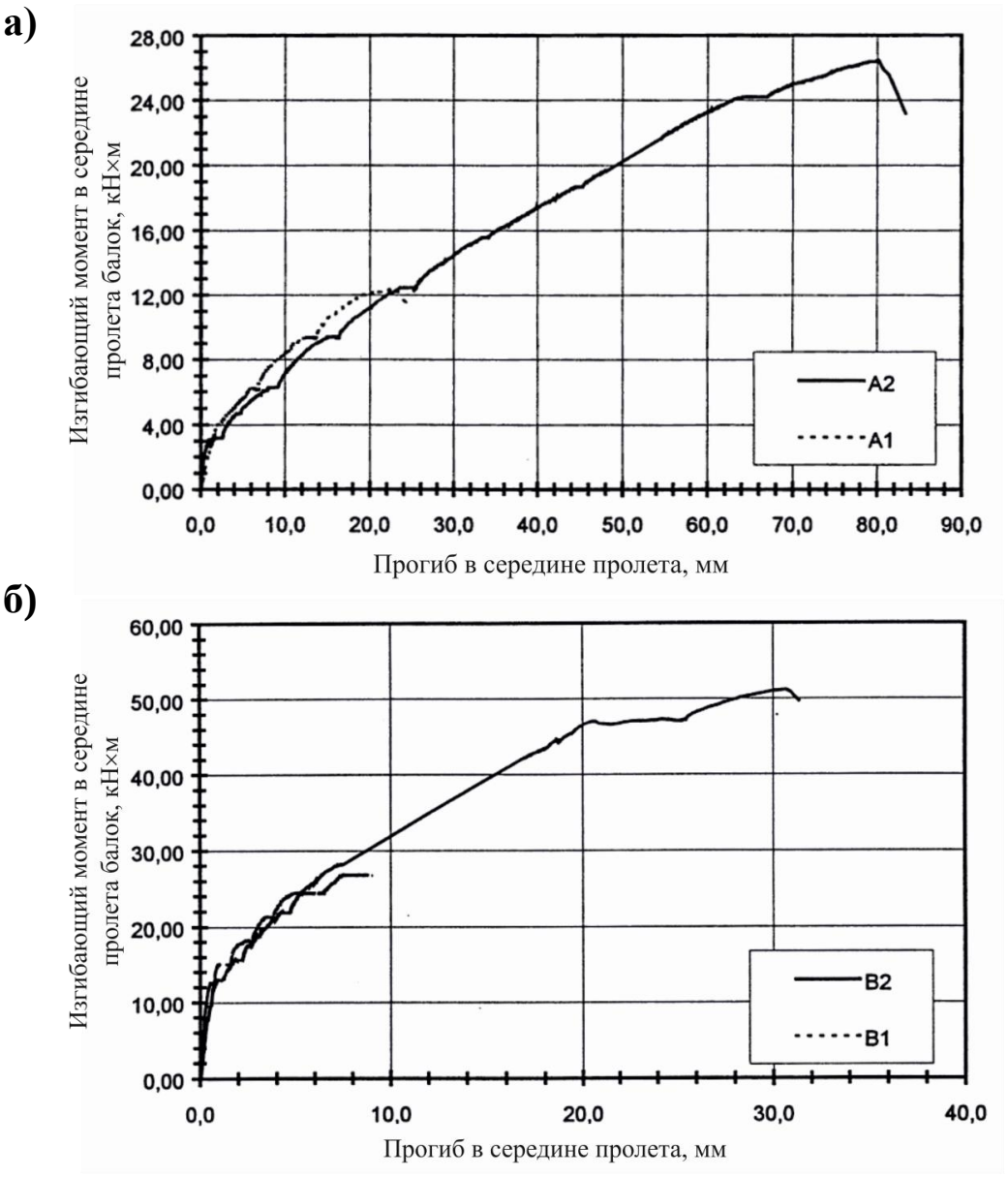


Рис. 5.45. Зависимости прогибов железобетонных балок, усиленных углеродоволоконными ламинатами, от величин изгибающих моментов, действующих в серединах их пролетов: а — балок с горизонтальной формой поперечного сечения (схемы *A1* и *A2* на рис. 5.44), б — балок с вертикальной формой поперечного сечения (схемы *B1* и *B2* на рис. 5.44); адаптировано по [54, 55]

К преимуществам выполнения усилений фибропластиковыми ламинатами, размещаемыми в штрабах, можно отнести более полное вовлечение композитного армирования в общую работу конструкций, позволяющее в большей степени использовать его высокие прочностные свойства и, как следствие, снизить площадь сечения вводимого материала (для углеродоволоконных ламинатов на 25…30%). В этих случаях поверхностная прочность основного материала усиливаемой конструкции становится менее важной, что позволяет производить фибропластиковое армирование, например, малопрочных каменных кладок. Прорезка штраб характеризуется большей простатой и экономичностью, чем требуемое выравнивание и подготовка поверхностей под внешнее усиление. Немаловажным является также то, что размещаемые в штрабах фибропластиковые элементы имеют большую защиту от случайных механических повреждений и вандализма, а также от тепловых воздействий в случае пожара.

При усилении изгибаемых железобетонных конструкций углеродоволоконными ламинатами, устанавливаемыми в штрабах, относительные деформации фибропластиковых элементов ограничиваются величиной $\varepsilon_{limit} = 0{,}8…1{,}0\ \%$.

5.5.3.4. Усиление с использованием предварительного напряжения

При усилении железобетонных конструкций с использованием фибропластиковых элементов достаточно частой рекомендацией является придание последним предварительного напряжения в процессе монтажа.

Предварительно напряженные углеродоволоконные ламинаты во многих случаях являются экономически обоснованной альтернативой традиционным способам усиления при повышении несущей способности недостаточно армированных железобетонных конструкций. При этом действие внешнего предварительного напряжения уменьшает усилия в элементах внутреннего стального армирования, способствует уменьшению ширины раскрытия трещин и снижает деформативность конструкций.

Передача нагрузки от предварительно напряженных фибропластиковых элементов к строительной конструкции обычно обеспечивается стальными анкерными пластинами, приклеиваемыми по их концам и дополнительно фиксируемыми болтами, располагаемыми поперек направления оси элементов усиления. В качестве менее надежной альтернативы, призванной исключить отслоение ламинатов в анкерных зонах, может также использоваться дополнительное внешнее армирование поперечно направленными высокомодульными углеродоволоконными лентами.

В настоящее время разработан и запатентован целый ряд систем, позволяющих осуществлять предварительное напряжение фибропластиковых лами-

натов. В качестве примера рассмотрим систему, разработанную компанией *S&P Clever Reinforcement Company AG* (Швейцария) [54, 55].

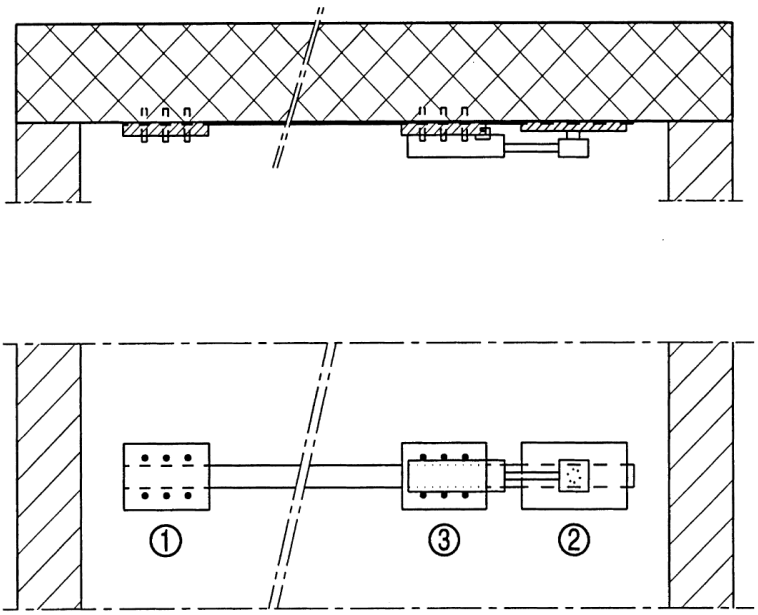


Рис. 5.46. Схема системы предварительного напряжения углеродоволоконных ламинатов, разработанная компанией *S&P*: 1 — неподвижный анкер, 2 — подвижный анкер, 3 — силовой блок (гидравлический домкрат): по [54]

При применении систем предварительного напряжения производству работ по непосредственному монтажу напрягаемых элементов предшествует тщательное выравнивание усиливаемых поверхностей конструкций специальными растворами. Используемое рассматриваемой системой оборудование включает подвижный и неподвижный анкеры, а также силовой блок (гидравлический домкрат). Неподвижный анкер (поз. 1, рис. 5.46), выполненный в виде стальной пластины, надежно крепится к поверхности бетона 4…6 болтами, при этом между пластиной данного анкера и бетоном вклеивается один из концов монтируемого ламината. Подвижный анкер (поз. 2, рис. 5.46) представляет собой пакет из двух стальных пластин, стянутых болтами и содержащих между собой вклеенный второй конец элемента усиления. Подвижный анкер крепится к силовому блоку системы (поз. 3, рис. 5.46), надежно закрепленному 4…6 болтами над поверхностью конструкции на расстоянии около 5 мм, так чтобы между его опорной плитой и бетоном обеспечивалось свободное перемещение напрягаемого элемента. Усилия, создающие предварительное напряжение, передаются силовым блоком на подвижный анкер, после чего фибропластиковый ламинат, предварительно покрытый эпоксидным клеящим составом, прижимается опорной плитой силового блока. Далее выполняется склеивание по всей длине ламината при помощи предварительно нанесенного адгезива. После набора требуемой прочности продольным швом, подвижный анкер и силовой блок (без опорной плиты, сохраняемой в виде стационарного анкера) демонтируются. Свободный конец ламината, крепившийся к подвижному анкеру, обрезается.

а) **б)**



Рис. 5.47. Монтаж элементов системы предварительного напряжения углеродоволоконных ламинатов, усиливающих железобетонную балку: а — пластины подвижного анкера, б — силового блока; по [54]

Для определения эффективности применения методов предварительного напряжения в отношении фибропластиковых элементов, усиливающих изгибаемые конструкций, в *Университете Фрайбурга* (*University of Freiburg*, Швейцария) была проведена серия сравнительных испытаний [54]. Исследовалась работа железобетонных плит, усиленных углеродоволоконными ламинатами, установленными без предварительного напряжения и с его использованием. Испытываемые плиты имели сечение 1,00×0,22 м и пролет 6,00 м (рис. 5.48); характеристики их армирования и используемого фибропластикового усиления приведены в таблице 5.3.

а) **б)**

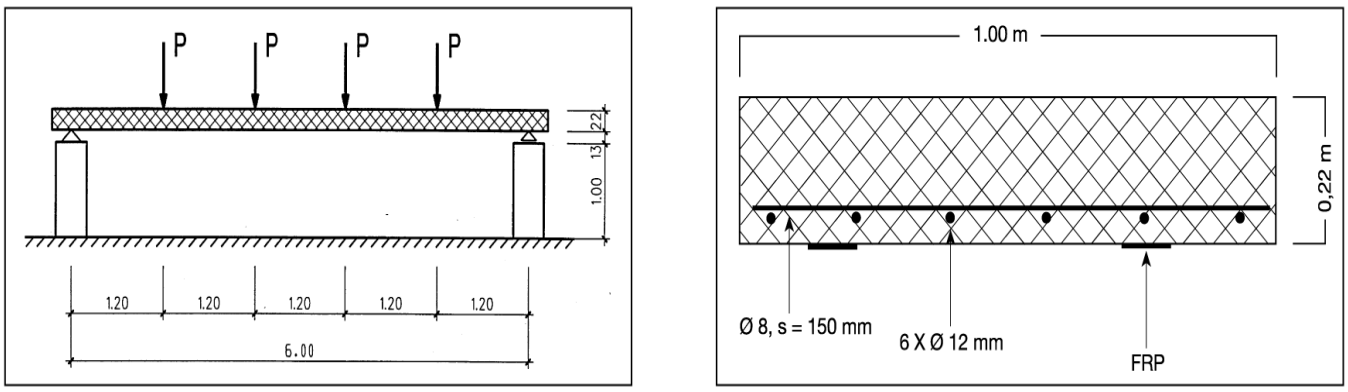


Рис. 5.48. Плиты, испытывавшиеся в *Университете Фрайбурга* (*University of Freiburg*, Швейцария) для определения эффективности предварительного напряжения фибропластиковых элементов: а — схема загружения, б — поперечное сечение (FRP — фибропластиковый ламинат); по [54]

Таблица 5.3

Характеристики внутреннего стального и фибропластикового внешнего армирования железобетонных плит, испытывавшихся в *Университете Фрайбурга* (*University of Freiburg*, Швейцария); по [54]

Плита	Армирование, мм		Фибропластиковый ламинат	Предварительное напряжение фибропластика, Н/мм^2	Усилие предварительного напряжения фибропластика, кН
	Продольное	Поперечное			
LC1 RC	6∅12	∅8, шаг 150 мм	—	—	—
LC5 FRP	6∅12	∅8, шаг 150 мм	2 углеродоволоконных ламината с сечением 80×1,2 мм (модуль упругости 164 ГПа, предел прочности 2700 МПа)	—	—
LP2 FRP	6∅12	∅8, шаг 150 мм		640	2×61=122
LP4 FRP	6∅12	∅8, шаг 150 мм		960	2×92=184

Испытания плит (рис. 5.49), усиленных предварительно напряженными углеродоволоконными ламинатами, продемонстрировали значительное снижение их прогибов и уменьшение ширины раскрытия поперечных трещин. Благодаря доминированию сил предварительного напряжения, трещинообразование не прослеживалось вплоть до максимальных расчетных нагрузок. При этом значительное увеличение получила общая несущая способность конструкций (рис. 5.50, табл. 5.4). Плиты, усиленные фибропластиком без предварительного напряжения, показали рост несущей способности, составивший 32%. Образцы, усиленные предварительно напряженными фибропластиковыми элементами, показали рост несущей способности 82 и 93% при величинах предварительного напряжения, составлявших, соответственно, 640 и 960 Н/мм^2 (т.е. 0,4 и 0,6%).

Таблица 5.4

Результаты испытаний железобетонных плит, усиленных углеродоволоконными ламинатами, установленными без предварительного напряжения и с его использованием, проведенных в *Университете Фрайбурга* (*University of Freiburg*, Швейцария); по [54]

Плита	Фибропластиковый ламинат	Деформации предварительного напряжения, %	Разрушающая нагрузка, кН	Разрушающий изгибающий момент, кН×м	Несущая способность, %
LC1 RC	—	—	16,4	82,6	100
LC5 FRP	2 углеродоволоконных ламината с сечением 80×1,2 мм (модуль упругости 164 ГПа, предел прочности 2700 МПа)	—	24,0	109,4	132
LP2 FRP		0,4	35,3	150,1	182
LP4 FRP		0,6	37,9	159,4	193

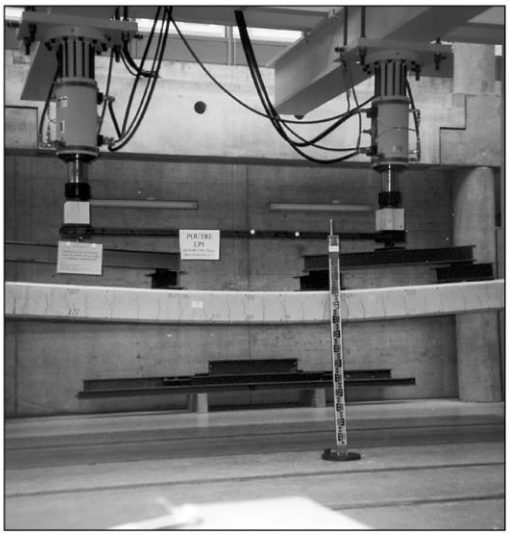


Рис. 5.49. Испытания плит, усиленных предварительно напряженными углеродоволоконными ламинатами; по [54]

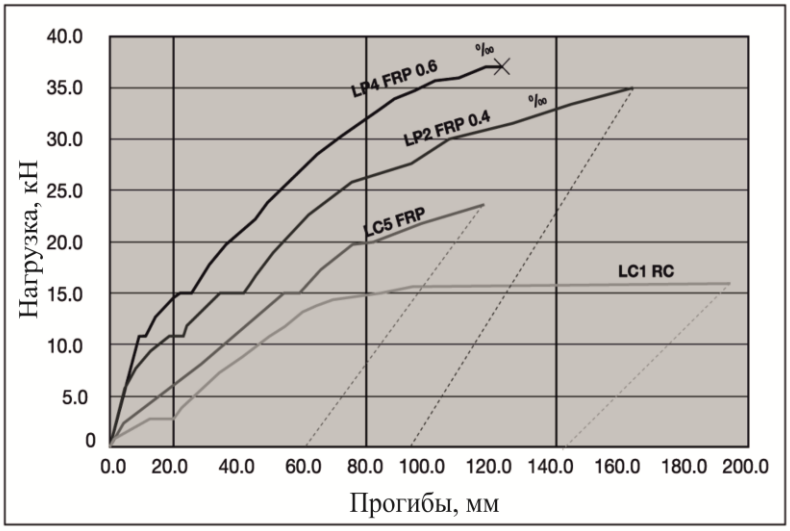


Рис. 5.50. Зависимости прогибов от прикладываемых нагрузок, полученные при сравнительных испытаниях плит, усиленных углеродоволоконными ламинатами; по [54]

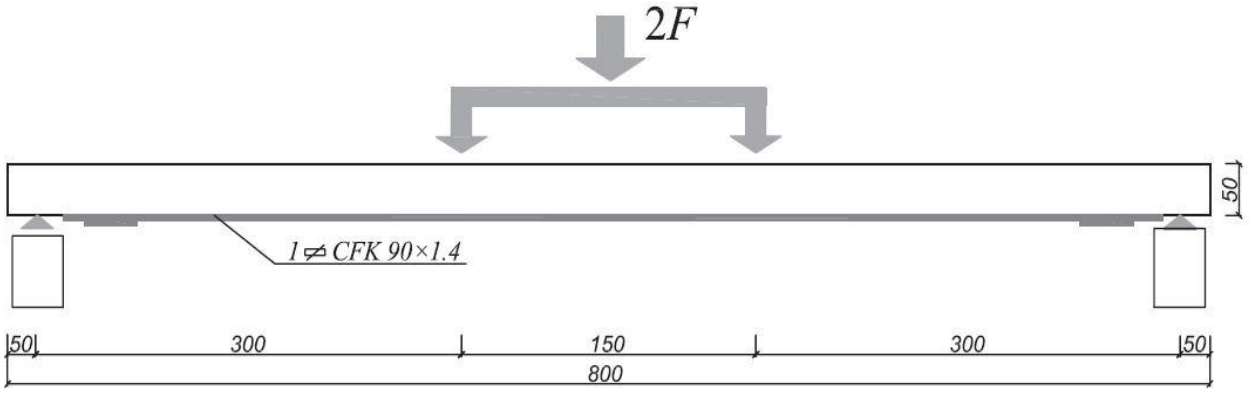
Программа исследования особенностей напряженно-деформируемого состояния железобетонных балок, усиленных предварительно напряженными углеродоволоконными ламинатами была также осуществлена в *Политехническом университете Силезии* (*Politechnika Śląska; Silesian University of Technology*, г. Гливец, Польша) [54, 140]. В ходе проведенных испытаний сравнивалась работа железобетонных балок с сечением 0,25×0,50 м и длиной 8,0 м, усиленных одиночными углеродоволоконными ламинатами (модуль упругости *E=165 ГПа*, предел прочности *2700 МПа*) с сечениями 9,0×0,14 см, установленными как без предварительного напряжения, так и с его применением (рис. 5.51, табл. 5.5).

Таблица 5.5

Характеристики внутреннего стального и фибропластикового внешнего армирования железобетонных балок, испытывавшихся в *Политехническом университете Силезии* (*Politechnika Śląska*, Польша) [54, 140]

Балка	Стальное армирование, мм	Фибропластиковое внешнее армирование	Деформации предварительного напряжения фибропластика, %	Усилие предварительного напряжения фибропластика, кН	Предварительные напряжения фибропластика, Н/мм^2
B5 RC	6∅16 (расчетное сопротивление 340 Н/мм^2)	—	—	—	—
B4 C-FRP		Углеродоволоконный ламинат с сечением 90×1,4 мм (модуль упругости 165 ГПа, предел прочности 2700 МПа)	—	—	—
B1 C-FRP 0,3%			0,3	62	495
B6 C-FRP 0,6%			0,6	125	990

а)



б)

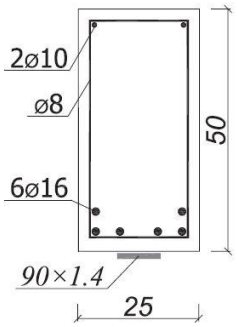


Рис. 5.51. Балки, испытывавшиеся в *Политехническом университете Силезии* (*Politechnika Śląska*, Польша) для определения эффективности предварительного напряжения фибропластиковых элементов: а — схема загружения, б — поперечное сечение (размеры железобетонных элементов приведены в см; CFK — углеродоволоконный ламинат); по [54, 140]

Балки, усиленные внешним углеродоволоконным армированием (рис. 5.52), продемонстрировали значительное увеличение прочности и жесткости, а также заметное уменьшение ширины раскрытия трещин в бетоне. Характер разрушения предварительно напряженных балок отличался большей пластичностью (рис. 5.53).

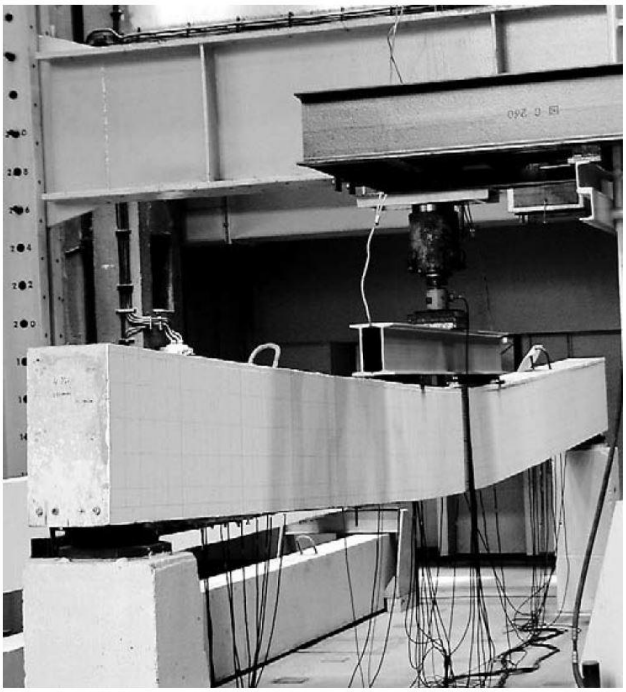
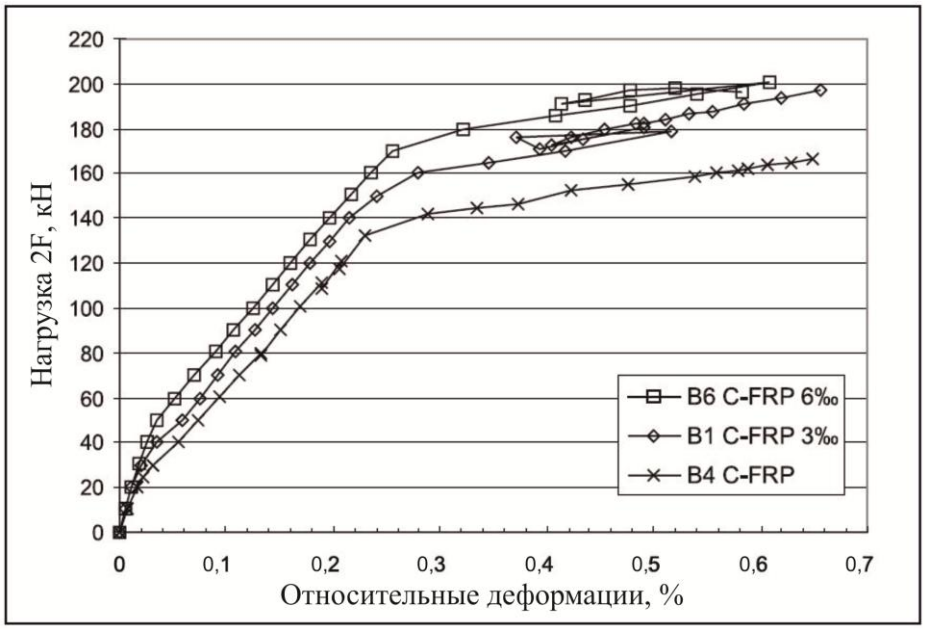


Рис. 5.52. Испытания балок, усиленных предварительно напряженными углеродоволоконными ламинатами, проведенные в *Политехническом университете Силезии* (*Politechnika Śląska*, Польша); по [54, 140]

а)



б)

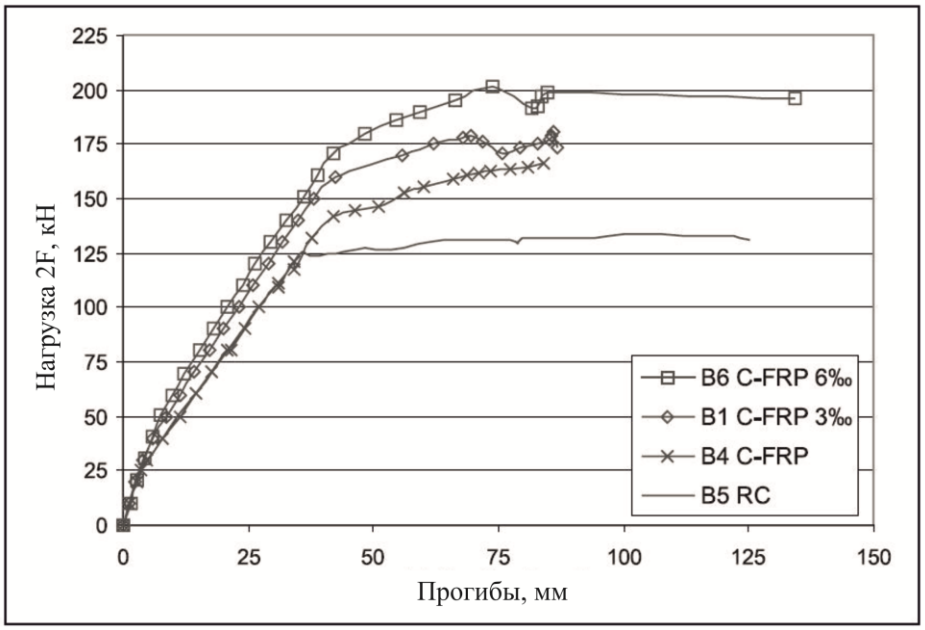


Рис. 5.53. Графики зависимости нагрузки и деформаций в балках, усиленных углеродоволоконными ламинатами, испытывавшихся в *Политехническом университете Силезии* (*Politechnika Śląska*, Польша): а — зависимость нагрузки и относительных деформаций в углеродоволоконных ламинатах, б — зависимости нагрузки и прогибов; по [54, 140]

Рост несущей способности балок, усиленных без предварительного напряжения, составил около 33%. Для балок, усиленных углеродоволоконными ламинатами, установленными с предварительными напряжениями, отвечавшими относительным деформациям 0,3 и 0,6%, рост несущей способности составил, соответственно, 42 и 58% (см. табл. 5.6).

Таблица 5.6

Результаты испытаний железобетонных балок, усиленных углеродоволоконными ламинатами, установленными без предварительного напряжения и с его использованием, проведенных в *Политехническом университете Силезии* (*Politechnika Śląska*, Польша) [54, 140]

Балка	Фибропластиковый ламинат	Разрушающая нагрузка, кН	Разрушающий изгибающий момент, кН×м	Несущая способность, %
B5 RC	—	122,0	204,1	100
B4 C-FRP	Углеродоволоконный ламинат с сечением 90×1,4 мм (модуль упругости 165 ГПа, предел прочности 2700 МПа)	166,2	270,4	133
B1 C-FRP 0,3%		178,6	289,0	142
B6 C-FRP 0,6%		201,6	322,7	158

Экспериментальные исследования железобетонных балок подтвердили высокую эффективность придания им предварительного напряжения внешним армированием углеродоволоконными ламинатами.

В предельном состоянии, определяемом условиями первой группы, ограничение относительных деформаций предварительно напряженных углеродоволоконных ламинатов, усиливающих изгибаемые конструкции, составило величину $\varepsilon_{limit} = 1{,}0…1{,}2\ \%$.

5.5.4. Поперечное усиление



Рис. 5.54. Усиление поперечного армирования железобетонных балок углеродоволоконными лентами; по [54, 55]

Усиление изгибаемых железобетонных элементов часто требует увеличения поперечного армирования, что может быть достигнуто использованием однонаправленных высокомодульных углеродоволоконных лент, располагаемых на поверхностях конструкций (рис. 5.54). Подобные решения позволяют перераспределить действующие поперечные усилия между бетоном, внутренним стальным и внешним фибропластиковым армированием. Эффективность дан-

ного метода подтверждается серией испытаний, проведенных в *Потсдамском техническом университете* (*Potsdam TU*, Германия) [54, 141].

В тех случаях, когда усиление осуществляется в отношении железобетонных конструкций, несущая способность которых под действием поперечных сил не обеспечена, внешнее поперечное фибропластиковое армирование реализуется с анкеровкой в сжатой зоне. При непосредственном примыкании к усиливаемым балкам железобетонных плит, последние могут прорезаться с дальнейшим выполнением полного обвертывания сжатой зоны конструкции армирующими лентами (рис. 5.55). Анкеровка также может устраиваться и в стенке балки, на 150 мм выше ее нейтральной оси (рис. 5.56), с креплением, определяемым расчетом в соответствии с величинами действующих нагрузок.

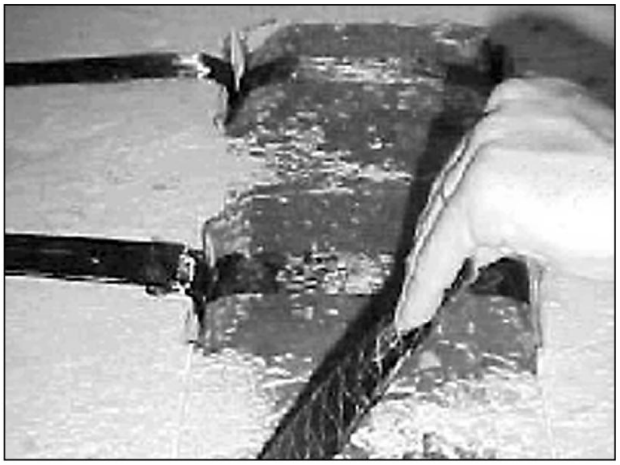


Рис. 5.55. Обвертывание сжатой зоны железобетонной балки углеродоволоконными лентами, пропускаемыми через прорези, выполненные в примыкающих плитах (вид сверху); по [54, 55]

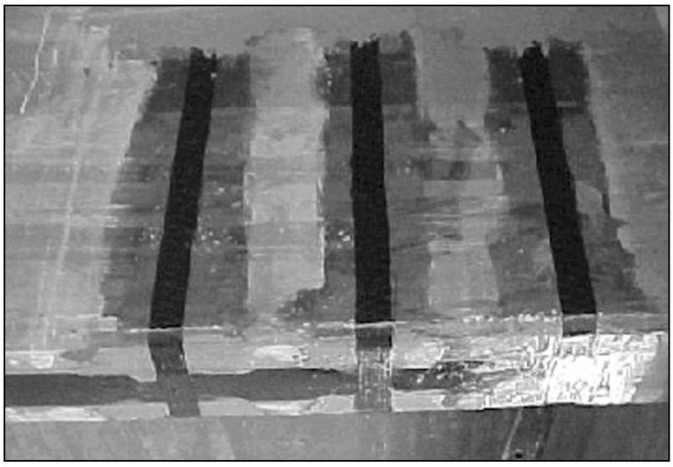


Рис. 5.56. Анкеровка поперечно расположенных углеродоволоконных лент в стенке железобетонной балки; по [54, 55]

При способности существующего внутреннего стального армирования и бетона конструкции совместно воспринимать действие предполагаемых поперечных сил, внешнее поперечное композитное армирование назначается с длиной, гарантирующей только требуемую анкеровку элементов продольного фибропластикового усиления и может не иметь специального крепежа своих концов. В ряде таких случаев (при незначительных величинах длин требуемой анкеровки) элементы поперечного усиления также могут не доводиться до сжатой зоны конструкции, а охватывать только зоны размещения продольной стальной арматуры (рис. 5.57).

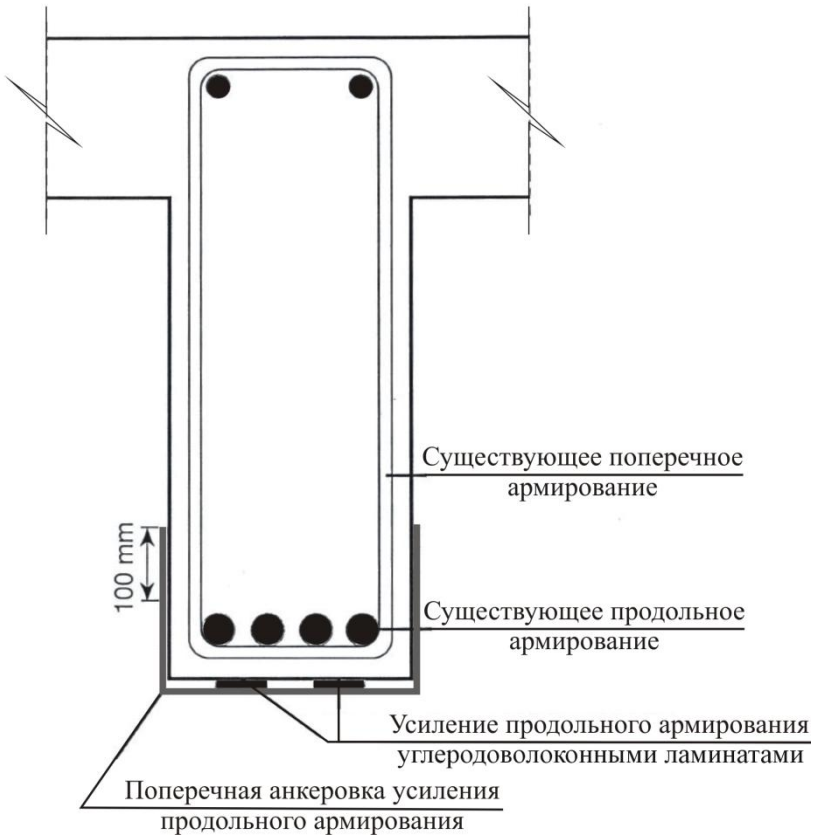


Рис. 5.57. Допустимая анкеровка при незначительной расчетной длине поперечного усиления продольного фибропластикового армирования железобетонной балки; адаптировано по [55]

Степень необходимого поперечного усиления внешним фибропластиковым армированием определяется величиной дополнительного поперечного усилия ΔV, превышающего соответствующую несущую способность конструкции. Поскольку элементы внутреннего и дополнительного внешнего армирования должны работать в составе единой упругопластической системы, требуется обеспечение совместности их деформаций. Исходя из этого, продольные деформации поперечного углеродоволоконного усиления ограничиваются относительной величиной $\varepsilon_{limit} = 0{,}2\%$.

Определение требуемого сечения дополнительного внешнего поперечного армирования, осуществляемого композитными элементами и приходящегося на единицу длины конструкции, может выполняться на основании процедур, предусмотренных современными европейскими нормами [54, 142]:

$$A_{w,erf} = \frac{\Delta V}{0{,}9 d_f \sigma_{fd}}\ , \tag{5.1}$$

где: $0{,}9d_f$ — приближенное значение величины плеча внутренней пары сил в изгибаемом элементе постоянного сечения, соответствующее действующему изгибающему моменту (d_f — рабочая высота поперечного сече-

ния изгибаемого элемента, т.е. расстояние от наиболее сжатой грани сечения до центра тяжести растянутой арматуры),

σ_{fd} — напряжения в элементах внешнего поперечного армирования, ограниченные величиной предельно допустимых деформаций:

$$\sigma_{fd} = \varepsilon_{limit} \cdot E_{fd} \tag{5.2}$$

(ε_{limit} — предельно допустимые относительные деформации внешнего поперечного армирования, составляющие для углеродоволоконных пластиков величину *0,2%*, E_{fd} — модуль упругости элементов внешнего поперечного армирования).

Армирующие ленты и полотна, используемые для наружного поперечного усиления, размещаются в проектном положении обычно непосредственно на строительной площадке. Вследствие несовершенств технологического процесса крайне низкая собственная жесткость данных материалов может способствовать снижению величины модуля упругости конечного фибропластика, что заставляет производителей систем усиления рекомендовать использование при расчетах данного параметра снижающий коэффициент *1,2* [54].

Требование значительного ограничения продольных деформаций элементов наружного поперечного усиления изгибаемых железобетонных конструкций делает оправданным использование в этом случае высокомодульных армирующих материалов, позволяющих более полно раскрывать прочностные свойства фибропластиков. Опыт производства соответствующих работ [54] свидетельствует о том, что конструктивные решения подобных усилений более предпочтительны при использовании однонаправленных углеродоволоконных лент и полотен, характеризующихся повышенными значениями модуля упругости $E=400…600$ *ГПа*. Немаловажным фактором при выборе подобных материалов, является также то, что внешние фибропластиковые системы при практическом применении отличаются гораздо более низкой трудоемкостью, нежели громоздкие традиционные системы стального усиления, что, несмотря на высокую исходную стоимость высокомодульных фиброматериалов, определяет экономичность их конечного использования.

5.6. Колонны

Обертывание железобетонных колонн фибропластиковыми материалами с поперечной ориентацией волокон создает ограничение деформаций в направлениях, перпендикулярных осям конструкций, приводя к увеличению их общей несущей способности. При росте сжимающих нагрузок такие обоймы испытывают растяжение, сдерживая развитие поперечных деформаций в сечениях уси-

ливаемых элементов. Подобное внешнее армирование увеличивает общую пластичность бетонных сечений, приводит к отсрочке деформаций работающей на сжатие продольной арматуры, а также способствует усилению ее продольных нахлесточных соединений.

В определенных случаях некоторый эффект в отношении стержней железобетонных колонн также может иметь продольное фибропластиковое армирование, уменьшающее их гибкость и препятствующее в предельном состоянии процессам потери общей устойчивости.

Данные конструктивные решения хорошо себя зарекомендовали для повышения сейсмостойкости колонн, опор мостов и тому подобных элементов (см. раздел 8).

5.6.1. Эффективность усиления

С целью оценки достигаемой эффективности усиления полноразмерных центрально сжатых железобетонных колонн с использованием внешнего углеродоволоконного армирования *Уральским государственным университетом путей сообщения* (*УрГУПС*, Российская Федерация) совместно с *Уральским отделением Всероссийского научно-исследовательского института железнодорожного транспорта* (*ВНИИЖТ*, РФ) при участии *ООО «Свердловскмостострой»* (РФ) были проведены испытания колонн высотой 2,5 м [108].

При экспериментах, определявших общую несущую способность конструкций, разрушению подвергались контрольные (неусиленные) образцы колонн (рис. 5.58, а), колонны, усиленные по всей внешней поверхности «охватывающим» внешним армированием углеродоволоконными холстами (рис. 5.58, б), образцы колонн с продольным внешним армированием углеродоволоконными ламинатами заводской готовности (рис. 5.58, в), а также колонны, усиленные продольными углеродоволоконными ламинатами с дополнительным поперечным армированием хомутами из углеродоволоконных холстов (рис. 5.58, г).

Полученные при сравнительном эксперименте средние величины сопротивлений сжатию неусиленных колонн составили 19 МПа, усиленных «охватывающим» внешним армированием углеродоволоконными холстами — 28 МПа, усиленных различными модификациями постановки продольных углеродоволоконных ламинатов — 25 МПа. Достигнутая эффективность увеличения несущей способности составила 30-50%.

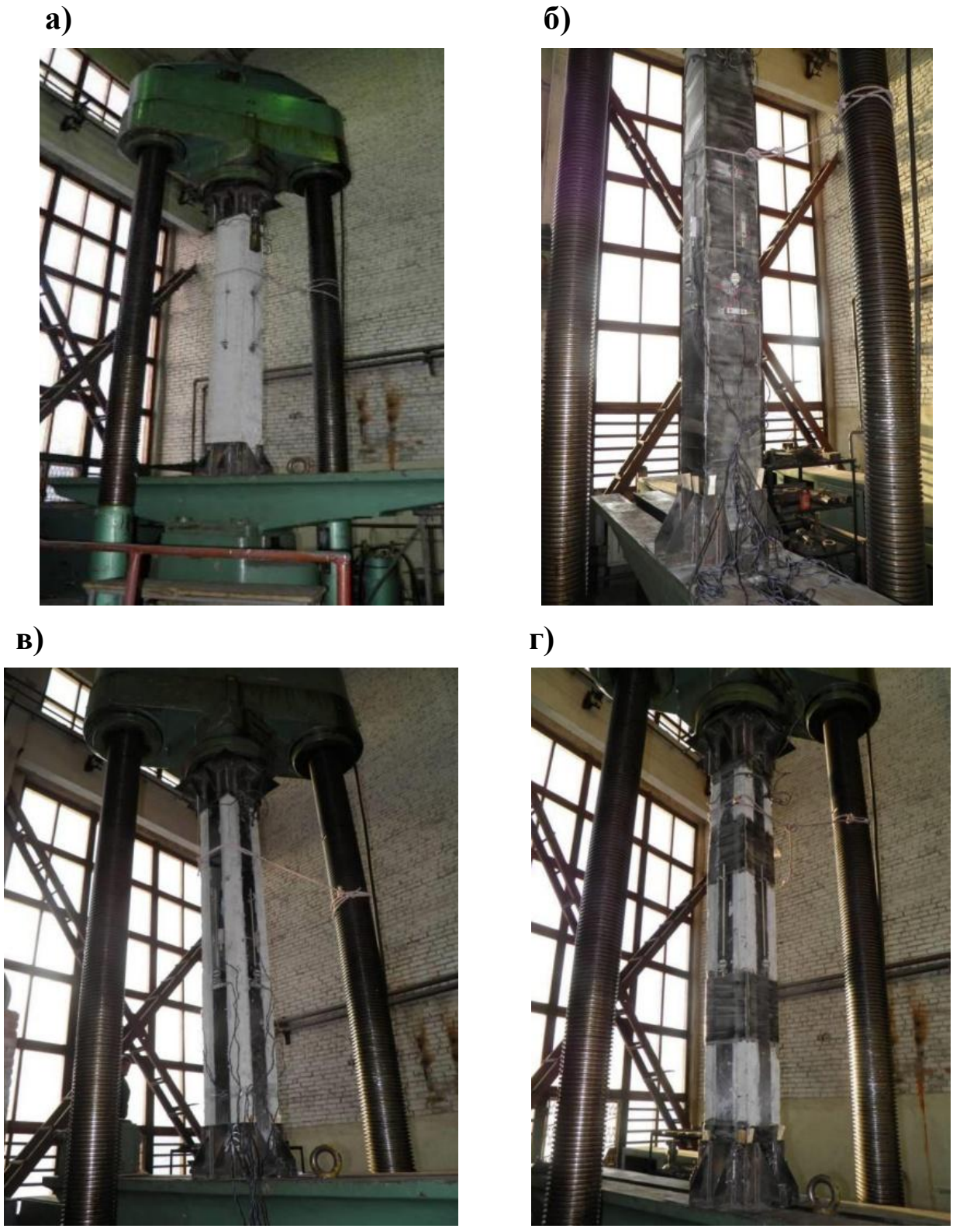


Рис. 5.58. Сравнительные испытания железобетонных колонн длиной 2,5 м, проведенные *Уральским государственным университетом путей сообщения* (*УрГУПС*, Российская Федерация): а — без усиления, б — усиленных «охватывающим» внешним армированием углеродоволоконными холстами, в — усиленных продольным внешним армированием углеродоволоконными ламинатами, г — усиленных продольными углеродоволоконными ламинатами и поперечными хомутами из углеродоволоконных холстов; по [108]

5.6.2. Монтаж и анкеровка фибропластиковых систем

Эффективное увеличение несущей способности сжатых элементов может быть достигнуто дополнительным внешним армированием сплошными фибропластиковыми обоймами, предусматривающими поперечное расположение рабочих волокон. Прочность поверхности основного материала конструкции в этом случае имеет второстепенное значение.



Рис. 5.59. Разрушение железобетонных колонн, усиленных сплошными поперечными обоймами, выполненными из однонаправленных углеродоволоконных полотен с применением эпоксидных матриц только в зоне непосредственной нахлестки усиливающих волокон; по [54, 55]

Изучением влияния параметров сцепления, имеющих место при подобных усилениях, занимался технический университет города *Гент* (*TU Gent*, Бельгия), проведший соответствующие натурные испытания [54, 55, 104], при которых железобетонные колонны усиливались сплошными поперечными обоймами, выполненными из однонаправленных углеродоволоконных полотен, включавших два варианта применения эпоксидных матриц: по всей площади усиления и только в зоне непосредственной нахлестки волокон. Полученные результаты экспериментов на продольное сжатие таких образцов (рис. 5.59) продемонстрировали практически одинаковые результаты. Таким образом, было доказано отсутствие необходимости применения матриц по всей площади поверхностей рассматриваемых обойм. В этих случаях необходимые длины клеевых соединений нахлестки поперечных волокон определяются расчетом в соответствии с характеристиками применяемых матричных составов, но не принимаются менее величин, рекомендуемых производителями систем усиления (табл. 5.7).

Таблица 5.7

Рекомендуемая минимальная длина клеевого соединения нахлестки волокон поперечных обойм усиления железобетонных колонн; по [54]

Системы усиления	Минимально допустимая длина клеевого соединения в направлении волокон
Полотнами и лентами углеродных волокон	150 мм
Полотнами и лентами арамидных волокон	120 мм
Полотнами и лентами стекловолокна	100 мм

5.6.3. Центрально сжатые колонны

Усиление сжатых железобетонных элементов внешним фибропластиковым поперечным армированием ведет к развитию сложного напряженного состояния, обуславливаемого ограничением поперечных деформаций бетона, что определяет существенный рост несущей способности подобных конструкций.

В этих случаях для надежной работы элементов внешнего армирования необходим их плотный контакт с поверхностями конструкций, а величина адгезионного сцепления фибропластиков с бетоном имеет второстепенное значение.

Внешнее фибропластиковое армирование наиболее эффективно для колонн с круглыми и прямоугольными поперечными сечениями, при соотношении сторон последних (h/b) не более 1,5 (при соотношении сторон более 2 такое усиление не рекомендуется), а также при наибольшей ширине прямоугольных сечений, не превышающей 900…1000 мм.

5.6.3.1. Общая оценка напряженно-деформированного состояния

Внешнее ограничивающее армирование создает трехосевое напряженное состояние материала центрально сжатых железобетонных колонн, характеризуемое действием напряжений, перпендикулярных направлению нагружения. Рост максимальной поперечной прочности конструкции в этом случае обеспечивается при использовании низкопластичных материалов внешнего усиления. Армирующие волокна, особенно углеродные, обладающие повышенным модулем упругости и демонстрируют линейно-упругую работу вплоть до разрушения, в полной мере соответствуют этому требованию.

Рассмотрим центрально сжатую железобетонную колонну круглого поперечного сечения, имеющую сплошное внешнее поперечное армирование углеродоволоконными материалами, в соответствии с принципами, изложенными в

[55]. При центральном приложении нагрузки N возникает продольное напряжение σ_z . При ограничении поперечных деформаций внешним армированием, также возникают сопутствующие перпендикулярные напряжения σ_x , направленные к центру колонны (рис. 5.60). Максимальная величина напряжений σ_x , воспринимаемая углеродоволоконным усилением, может быть определена как

$$\sigma_x = \frac{f_{FRP}\, t_{FRP}}{r} \ , \qquad (5.3)$$

где: f_{FRP} — сопротивление растяжению углеродоволоконного полотна, Н/мм^2,
t_{FRP} — толщина углеродоволоконного полотна, мм,
r — радиус сечения колонны.

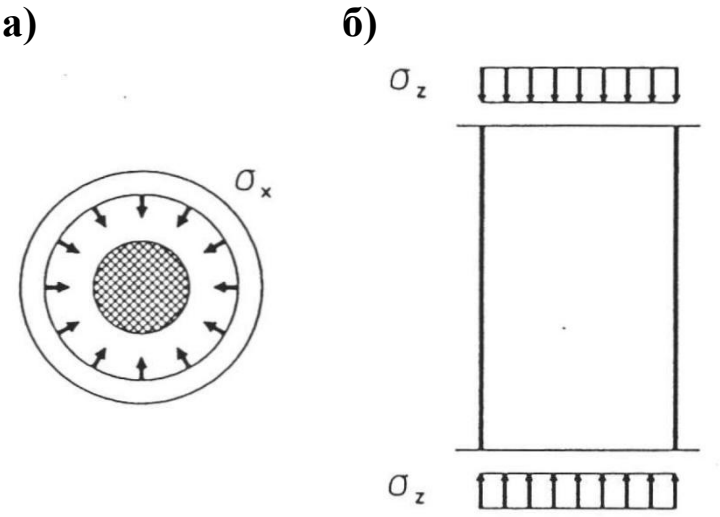


Рис. 5.60. Расчетная схема центрально загруженной колонны, усиленной внешним поперечным фибропластиковым армированием: а — поперечное сечение, б — продольная схема; по [55]

Внешнее ограничивающее усиление создает трехосевое напряженное состояние. При ограничении поперечных деформаций железобетонной колонны, прочность сжатого бетона может быть увеличена до [55]:

$$f_{C\,FRP} = f_C + 4\sigma_x \ , \qquad (5.4)$$

где: $f_{C\,FRP}$ — сопротивление бетона при ограничивающем усилении поперечно расположенным фибропластиком, Н/мм^2,
f_C — осевая прочность бетона, Н/мм^2,
σ_x — напряжения, перпендикулярные направлению действующей нагрузки, вызванные ограничением поперечных деформаций сечения углеродными волокнами.

Соответствующие продольные деформации сжатия стержня колонны составят

$$\varepsilon_{cc} = \varepsilon_{c0}\left[1 + 5\left(\frac{f_{C\,FRP}}{f_c} - 1\right)\right], \tag{5.5}$$

где: $\varepsilon_{c0} = \frac{f_c}{60}$. (5.6)

5.6.3.2. Расчет методом Ванг Янг-Чина

Рассматриваемый ниже метод расчета [54, 143] был разработан профессором Ванг Янг-Чином в *Кентерберийском Университете* (Новая Зеландия) в период 1996…2000 годов. Теоретическое исследование основывалось на результатах экспериментов профессоров Престли и Сейбола, проведенных в *Университете Сан Диего* (США) [144-148]. Сравнительный анализ свидетельствует о близости данной расчетной модели и положенных в основу результатов испытаний, выводам, полученным в исследованиях *Гентского технического университета* (Бельгия) [54].

Оценка взаимосвязи осевых усилий и деформаций. Рассматриваемое сечение железобетонных колонн, усиленных внешним поперечным фибропластиковым армированием, представлено на рисунке 5.61.

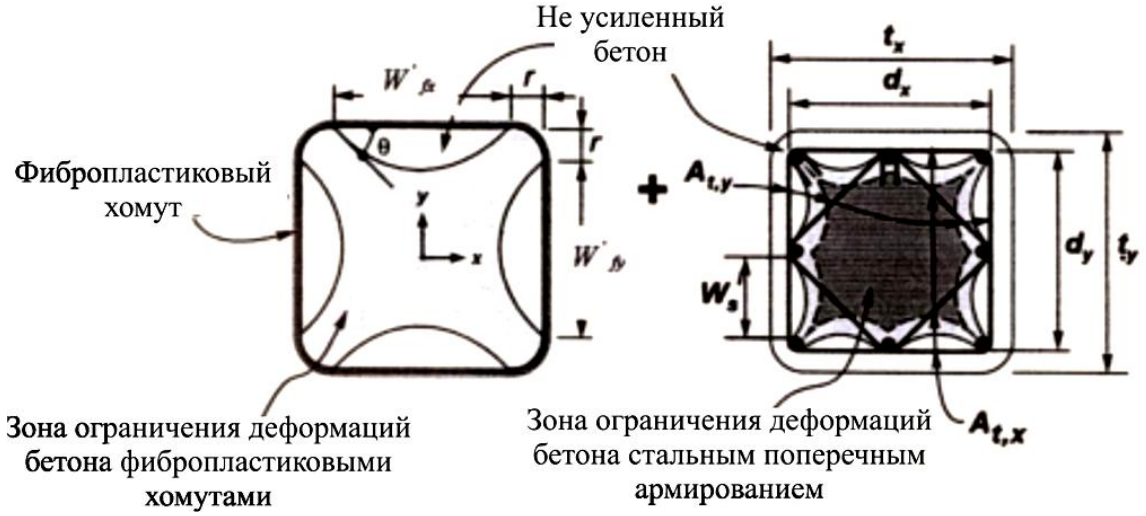


Рис. 5.61. Расчетная схема прямоугольного поперечного сечения колонны, усиленной внешним фибропластиковым поперечным армированием; адаптировано по [54]

Сжимающее усилие, воспринимаемое усиленной фибропластиком «короткой» железобетонной колонной, может быть определено как

$$N = N_s + N_c, \tag{5.7}$$

т.е. равным сумме сжимающих усилий, воспринимаемых, соответственно, продольной арматурой и бетоном

$$N_s = f_s A_s \,, \tag{5.8}$$

$$N_c = N_{c0} + N_{cc,f} + N_{cc,fs} = f_{c0} A_{cu} + f_{cc,f} A_{cf} + f_{cc,fs} A_{c,fs} \,, \tag{5.9}$$

где: A_s, f_s — соответственно, площадь сечения и напряжения продольной арматуры,

N_{c0} — нагрузка, воспринимаемая не усиливаемым участком сечения бетона,

A_{cu}, f_{c0} — соответственно, площадь не усиливаемого участка сечения бетона и действующие на нем напряжения,

$N_{cc,f}$ — нагрузка, воспринимаемая участком сечения бетона, усиленным внешним фибропластиковым поперечным армированием,

A_{cf}, $f_{cc,f}$ — соответственно, площадь участка сечения бетона, усиленного внешним фибропластиковым поперечным армированием, и действующие на нем напряжения,

$N_{cc,fs}$ — нагрузка, воспринимаемая участком сечения бетона, совместно усиленным внешним фибропластиковым и внутренним стальным поперечным армированием колонны,

$A_{c,fs}$, $f_{cc,fs}$ — соответственно, площадь участка сечения бетона, совместно усиленного внешним фибропластиковым и внутренним стальным поперечным армированием колонны, а также действующие на нем напряжения.

Предельно допустимое сжимающее усилие, воспринимаемее усиленной колонной, подобно формуле (5.7), составит

$$N_n = N_{cn} + N_{sn} \,, \tag{5.10}$$

где: N_{cn}, N_{sn} — усилия, воспринимаемые бетоном и продольной арматурой в предельном состоянии сжатия колонны.

Основу расчета составляет положение о том, что предельное состояние в центрально загруженной колонне соответствует 1% продольных деформаций. Для величины коэффициента Пуассона, консервативно принимаемой на данной стадии загружения $\nu = 0{,}5$, поперечные деформации, соответствующие рассматриваемой величине продольных, составят 0,5%.

Работа продольной арматуры рассматривается как упруго-пластичная, характеризуемая сопротивлением стали, определенным по площадке текучести. Усилия N_{cn}, воспринимаемые бетоном в предельном состоянии, являются результирующей напряжений, действующих в трех условных частях сечения (см. рис. 5.61). При величине продольных деформаций, равной 1%, напряжения в не усиленном бетоне достигают предела прочности f'_c, после чего деградируют до остаточной прочности, равной $0{,}3f'_c$. Таким образом, в соответствии с (5.8) и (5.9), может быть получено

$$N_{sn} = f_{sy}\, A_s\,, \tag{5.11}$$

$$N_{cn} = 0{,}3f'_c\ A_{cu} + f'_{cc,f}\, A_{cf} + f'_{cc,fs}\, A_{c,fs}\ , \tag{5.12}$$

где: $f'_{cc,f}$, $f'_{cc,fs}$ — сопротивления сжатию бетона, достигаемое, соответственно, при усилении поперечным фибропластиковым армированием и при совместной работе внешнего фибропластикового и внутреннего поперечного армирования,

A_{cu} , A_{cf} , $A_{c,fs}$ — площади рабочих участков сечения бетона, определенные с учетом влияния поперечного армирования (см. пояснения к формуле (5.9)),

f_{sy} , A_s — соответственно, сопротивление по площадке текучести стали и поперечное сечение продольной арматуры.

Несущая способность, определенная формулой (5.10), при проектировании ограничивается в соответствии с возможными отличиями в свойствах материалов, приближенностью некоторых предпосылок расчетной модели, имеющим место продольным изгибом стержня колонны, а также в связи с возможным снижением несущей способности вследствие длительного действия приложенных нагрузок. Продольная нагрузка с учетом необходимых ограничений составит

$$N_{nd} = \frac{0{,}67}{\gamma_{mc}} N_{cnk} + \frac{N_{sn}}{\gamma_{ms}}\,, \tag{5.13}$$

$$N_{nd} = \frac{0{,}778}{\gamma_{mc}} N_{cnc} + \frac{N_{sn}}{\gamma_{ms}}\,, \tag{5.14}$$

где: γ_{mc} , γ_{ms} — коэффициенты надежности, соответственно, по материалу бетона и стали,

N_{cnk} , N_{cnc} — воспринимаемые бетоном сжимающие усилия, определенные в соответствии с прочностью материала, полученной при испытаниях кубических и цилиндрических образцов,

N_{sn} — сжимающее усилие, воспринимаемое армирующей сталью.

При величинах коэффициентов надежности, принимаемых $\gamma_{mc} = 1{,}5$, $\gamma_{ms} = 1{,}15$, выражения (5.13) и (5.14) примут вид

$$N_{nd} = 0{,}447N_{cnk} + 0{,}87N_{sn}\,, \tag{5.15}$$

$$N_{nd} = 0{,}525N_{cnc} + 0{,}87N_{sn}\,. \tag{5.16}$$

При расчетной осевой нагрузке N^*, действующей на стержень колонны, условие обеспечения несущей способности примет вид

$$N_{nd} \geq N^*\,. \tag{5.17}$$

Сжимающее усилие N_c, воспринимаемое бетоном, является результирующей усилий, воспринимаемых тремя условными частями сечения (рис. 5.61). Общее осевое напряженно-деформируемое состояние центрально сжатой колонны, усиленной внешним поперечным фибропластиковым армированием, может быть получено при наличии соответствующих параметров всех рассматриваемых участков сечения бетона и продольной арматуры.

Площадью части сечения, усиленной стальным поперечным армированием, в большинстве случаев при практическом усилении можно пренебречь.

Площадь сечения бетона, не усиленного внешним фибропластиковым поперечным армированием, может быть определена как

$$A_{cu} = A_{cc,f} - A_{e,f} \,, \tag{5.18}$$

где: $A_{cc,f}$, $A_{e,f}$ — соответственно, общая площадь сечения бетона и площадь бетона, эффективно усиливаемая поперечным фибропластиковым армированием.

В случае колонны с прямоугольным сечением, общая площадь бетона и площадь бетона, эффективно усиливаемая поперечным фибропластиковым армированием, составят

$$A_{cc,f} = t_x t_y - A_s - (4 - \pi)\, r^2 \,, \tag{5.19}$$

$$A_{e,f} = t_x t_y - \frac{w'^2_{fx} - w'^2_{fy}}{3} \tan\theta - A_s - (4-\pi) r^2 \,. \tag{5.20}$$

Размеры сечения колонны, используемые в формулах (5.19) и (5.20), приведены на рисунке 5.61.

Площадь сечения бетона, эффективно усиливаемая при поперечном фибропластиковом армировании, ограничивается соотношением общих размеров сечения колонны: длина большей стороны сечения не должна превышать удвоенной длины меньшей стороны, т.е.

$$w'_{f\mathrm{x}} \le 2w'_{f\mathrm{y}} \,, \tag{5.21}$$

где: $w'_{f\mathrm{x}}$ — большая сторона сечения.

В случае колонны, имеющей круглое сечение (рис. 5.62), выражения (5.19) и (5.20) примут вид

$$A_{cc,f} = A_{e,f} = \frac{\pi D^2}{4} - A_s \,, \tag{5.22}$$

где: D — общий диаметр колонны.

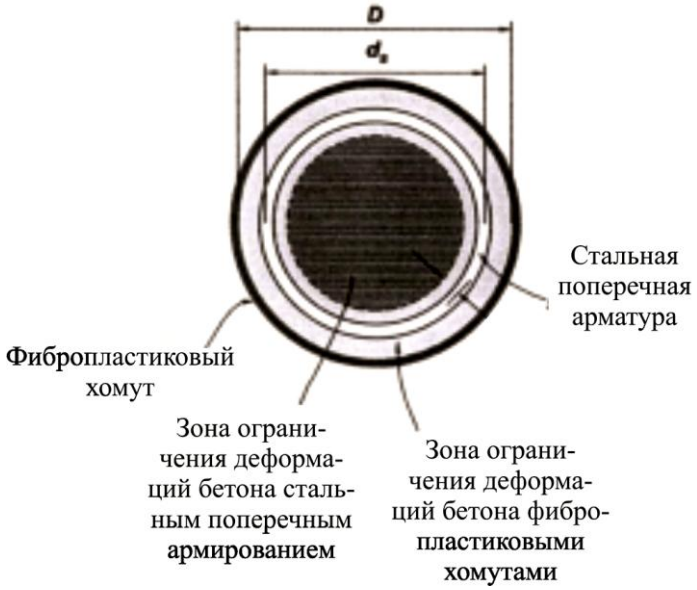


Рис. 5.62. Расчетная схема круглого поперечного сечения колонны, усиленной внешним фибропластиковым поперечным армированием; адаптировано по [54]

Таким образом, для колонн круглого сечения, площадь бетона, не получающая усиление внешним фибропластиковым поперечным армированием, отсутствует. Эффективность усиления подобных колонн выше, чем у колонн прямоугольного сечения.

Определение несущей способности усиленного бетона. Сопротивление усиленного бетона при сжатии, в соответствии с формулой профессора Мэндера [148, 149], составит

$$f'_{cc} = k_c f'_c , \tag{5.23}$$

где: f'_c — прочность бетона, полученная при испытаниях цилиндрических образцов материала,

k_c — коэффициент усиления бетона.

Коэффициент усиления бетона k_c зависит от двухосевого напряженного состояния, обуславливаемого наличием бокового давления, вызванного ограничением поперечных деформаций. Его величина выражается как

$$k_c = \alpha_1 \alpha_2 , \tag{5.24}$$

где: α_1 — увеличивающий коэффициент, учитывающий трехосевое напряженное состояние, характеризуемое наличием равных двухосевых напряжений, вызванных ограничением поперечных деформаций,

α_2 — понижающий коэффициент, учитывающий возможные отклонения от модели с равными двухосевыми напряжениями.

Для коэффициентов α_1 и α_2 профессор Мэндер [148-149] предложил следующие выражения

$$\alpha_1 = 1{,}25\left[1{,}8\sqrt{1+7{,}94\frac{F_1}{f_c'}}-1{,}6\frac{F_1}{f_c'}-1\right], \tag{5.25}$$

$$\alpha_2 = \left[1{,}4\frac{f_1}{F_1}-0{,}6\left(\frac{f_1}{F_1}\right)^2-0{,}8\right]\sqrt{\frac{F_1}{f_c'}}+1, \tag{5.26}$$

где: F_1 , f_1 — соответственно, максимальные и минимальные боковые напряжения, вызванные ограничением поперечных деформаций.

Определение бокового давления. Для расчета коэффициента усиления бетона необходимы величины бокового давления, вызванного ограничением поперечных деформаций. Порядок определения бокового давления, учитывающий наличие упругого внешнего фибропластикового и внутреннего стального поперечного армирования в колоннах прямоугольного и круглого сечений, приводится ниже.

Колонны прямоугольного сечения. Боковые напряжения, обусловленные наличием внешнего фибропластикового поперечного армирования, в направлении осей *x* и *y*, составят

$$f_{l,fx} = \rho_{fx} f_f , \tag{5.27}$$

$$f_{l,fy} = \rho_{fy} f_f , \tag{5.28}$$

где: f_f — напряжения в элементах внешнего сплошного фибропластикового поперечного армирования,

ρ_{fx}, ρ_{fy} — величины, зависящие от размеров сечения колонны и толщины внешнего сплошного фибропластикового армирования:

$$\rho_{fx} = 2\frac{t_f}{t_y} , \tag{5.29}$$

$$\rho_{fy} = 2\frac{t_f}{t_x} \tag{5.30}$$

(t_f — толщина слоя внешнего сплошного фибропластикового поперечного армирования, t_x, t_y — геометрические размеры поперечного сечения колонны).

Напряжения в элементах внешнего сплошного фибропластикового поперечного армирования могут быть найдены в соответствии с величинами поперечных деформаций. Предполагая величину коэффициента Пуассона, равной $\nu = 0{,}5$, и наличие продольных деформаций, характеризуемых величиной 1%, можно получить поперечные деформации, составляющее 0,5%. Таким образом, напряжения во внешнем сплошном фибропластиковом армировании определятся формулой

$$f_f = 0{,}005E_f / \gamma_{mE}\,, \qquad (5.31)$$

где: E_f — модуль упругости фибропластикового материала,

γ_{mE} — коэффициент надежности по величине модуля упругости, принимаемый в соответствии с рекомендациями производителей систем усиления [54] для однонаправленных углеродоволоконных фибропластиков, равным 1,1…1,2 , а для стекловолоконных двунаправленных — 1,5…1,8.

Колонны круглого сечения. Боковые напряжения, обусловленные наличием внешнего фибропластикового поперечного армирования, составят

$$f_{l,f} = \rho_f f_f\,, \qquad (5.32)$$

где: f_f — напряжения в элементах внешнего сплошного фибропластикового поперечного армирования, определяемые формулой (5.31),

ρ_f — величина, зависящая от диаметра сечения колонны и толщины сплошного фибропластикового армирования:

$$\rho_f = 4\frac{t_f}{D} \qquad (5.33)$$

(t_f — толщина слоя сплошного фибропластикового поперечного армирования, D — диаметр поперечного сечения колонны).

Данные фибропластиковые усиления используются для гарантирования требований коэффициентов надежности, учитываемых при расчете по первой группе предельных состояний. Однако подобные обоймы, выполненные в отношении колонн с прямоугольным поперечным сечением, принимают ограниченное участие в работе, рассматриваемой в период нормальной эксплуатации, т.к. незначительные продольные деформации конструкций не позволяют внешнему фибропластиковому армированию в достаточной степени вступить в совместную работу с бетоном.

5.6.3.3. Предварительное напряжение элементов поперечного усиления

Для увеличения несущей способности колонн с прямоугольным поперечным сечением, достигаемого без значительных продольных деформаций их стержней, армирующие элементы фибропластикового поперечного усиления могут подвергаться предварительному напряжению, что приводит и к улучшению характеристик, определяющих нормальные условия эксплуатации конструкций. Использование предварительного напряжения позволяет достигнуть большого уровня усиления, способствует ограничению существующих в бетоне трещин, а также предотвращает преждевременную ломку волокон на углах се-

чения колонн. Перспективным видом армирования в этом случае является арамидоволоконное.

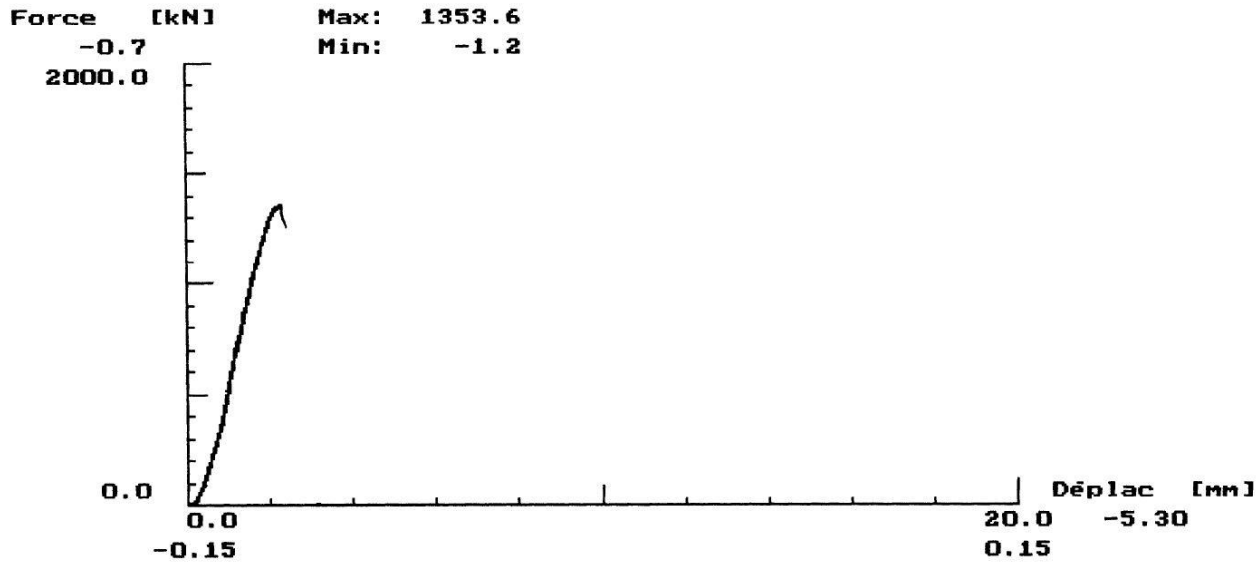


Рис. 5.63. Испытания в *Университете Фрибура* (*HTA University of Fribourg*, Швейцария) железобетонных колонн, усиленных предварительно напряженными арамидоволоконными хомутами, концы которых анкеруются внешними аппликациями двунаправленных ламинатов; по [54]

Работоспособность узлов крепления концов предварительно напряженных фибропластиковых хомутов, усиливающих продольно нагруженные железобетонные конструкции, может гарантироваться с помощью внешних аппликаций двунаправленными ламинатами (рис. 5.63). Исследования подобных соединений, анкерующих арамидоволоконные предварительно напряженные ремни усиления колонн, были проведенные в *Университете Фрибура* (*HTA University of Fribourg*, Швейцария). Результаты испытаний продемонстрировали то, что используемые узлы были способны выполнять свои функции вплоть до разрыва элементов внешнего усиления конструкций [54].

В *Университете Фрибура* также были проведены сравнительные испытания на центральное сжатие бетонных образцов, имевших сечение 20×20 см (со скруглением углов радиусом 2,5 см) и длину 65 см, выполненных без усиления, а также усиленных предварительно напряженными арамидоволоконными лентами [54]. Не усиленные образцы демонстрировали разрушение при средней нагрузке 1353 кН (рис. 5.64, а). Образцы, подвергнутые усилению предварительно напряженными арамидоволоконными лентами (с модулем упругости *E = 120 ГПа* и пределом прочности *2900 МПа*), передававшими усилия обжатия из расчета 200 кН на погонный метр длины элемента (рис. 5.65), были способны воспринимать среднюю продольную нагрузку, составляющую 1718 кН (рис. 5.64, б).

а)



б)

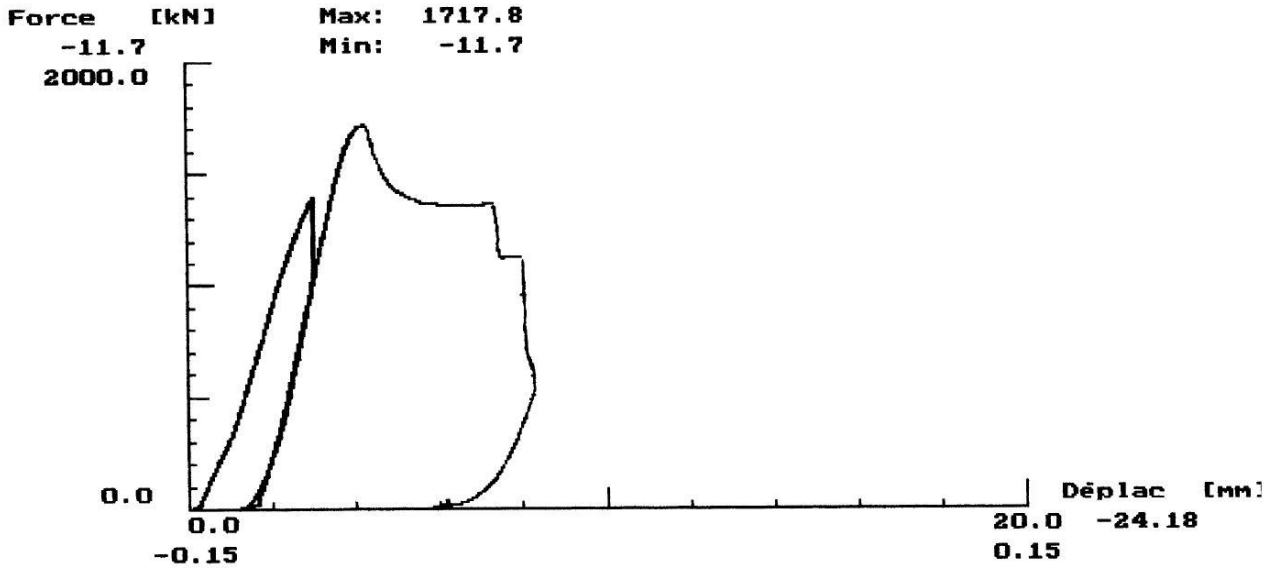


Рис. 5.64. Зависимости продольных деформаций от нагрузки в центрально сжимаемых бетонных образцах колонн, испытывавшихся в *Университете Фрибура* (*HTA University of Fribourg*, Швейцария): а — образцы без усиления (разрушение при нагрузке 1353 кН), б — образцы, поперечно усиленные арамидоволоконными лентами, получившими предварительное напряжение из расчета 200 кН на метр длины стержня колонны (разрушение при нагрузке 1718 кН); по [54]

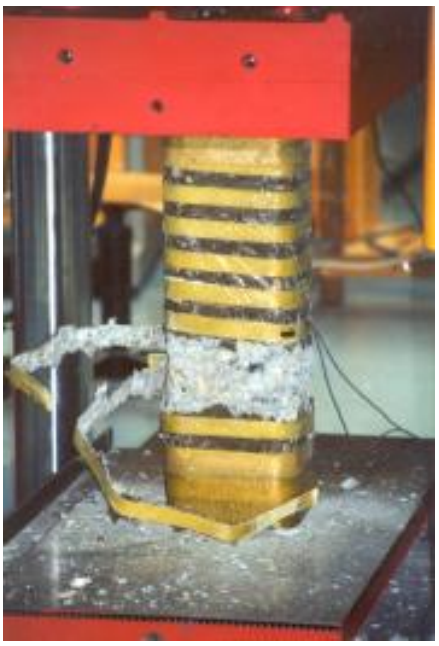


Рис. 5.65. Разрушение бетонного образца, усиленного предварительно напряженной арамидоволоконной лентой; по [54]

Несущая способность усиленных экспериментальных образцов, в сравнении с не усиленными, была увеличена на 27%. При этом разрушения протекали без существенного роста продольных деформаций.

5.6.4. Колонны, воспринимающие сочетания изгибающих моментов и продольных сил

В случае совместного действия изгибающих моментов и продольных сил может использоваться усиление железобетонных колонн, сочетающее два типа армирования: дополнительные продольные силы воспринимаются внешним поперечным фибропластиковым армированием (см. выше), а изгибающие моменты — продольно располагаемыми ламинатами.

Воспринимающие изгибающие моменты продольные ламинаты заводской готовности могут наклеиваться до устройства дополнительного поперечного армирования, размещаясь непосредственно на поверхности конструкций или вводясь во внутренние штрабы, прорезаемые в теле бетона.

5.6.5. Усиление колонн, имеющих коррозионные разрушения стального армирования

Стальное армирование колонн, получившее коррозионные разрушения, может быть дополнено фибропластиковыми элементами, способными восстанавливать проектную несущую способность конструкций.

С этой целью при производстве ремонтных работ удаляются поверхностные слои бетона, имеющие нарушенную структуру, очищенная арматура по-

крывается специальной цементно-эпоксидной матрицей, производится восстановление поверхности бетона и устраивается фибропластиковое усиление, покрываемое впоследствии защитными слоями паропроницаемых материалов [54].

Применение фиброволоконных ламинатов, размещаемых в продольных штрабах, обеспечивает эффективную передачу усилий между усиливающими элементами и основным материалом конструкции, позволяющую максимально использовать несущую способность вводимого фиброармирования. Пример продольного усиления изгибаемой колонны, получившей коррозионные разрушения арматуры, приведен на рисунке 5.66.

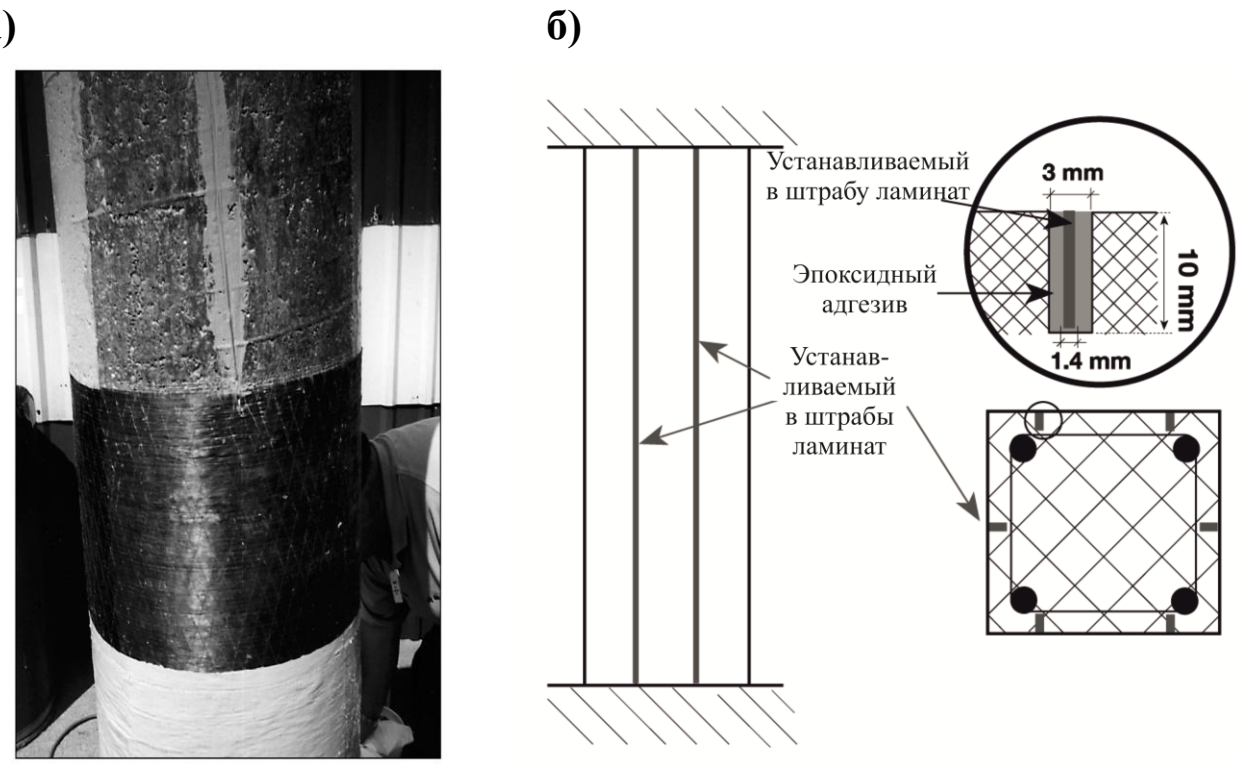


Рис. 5.66. Усиление колонн фибропластиковыми ламинатами, размещаемыми в продольных штрабах: а — общий вид усиления колонны круглого поперечного сечения, б — схема усиления колонны прямоугольного поперечного сечения; адаптировано по [54, 55]

Замена поврежденного коррозией поперечного армирования может осуществляться с помощью углеродоволоконных однонаправленных поперечных полотен, установка которых допускается с шагом A (рис. 5.67), не превышающим $0{,}8$ диаметра круглого сечения усиливаемой колонны или $0{,}8$ меньшей стороны ее прямоугольного сечения [54]. Максимальный интервал между внешними элементами поперечного фибропластикового армирования также не должен превышать требуемого шага поврежденных стержней стальной поперечной арматуры.

а) б)

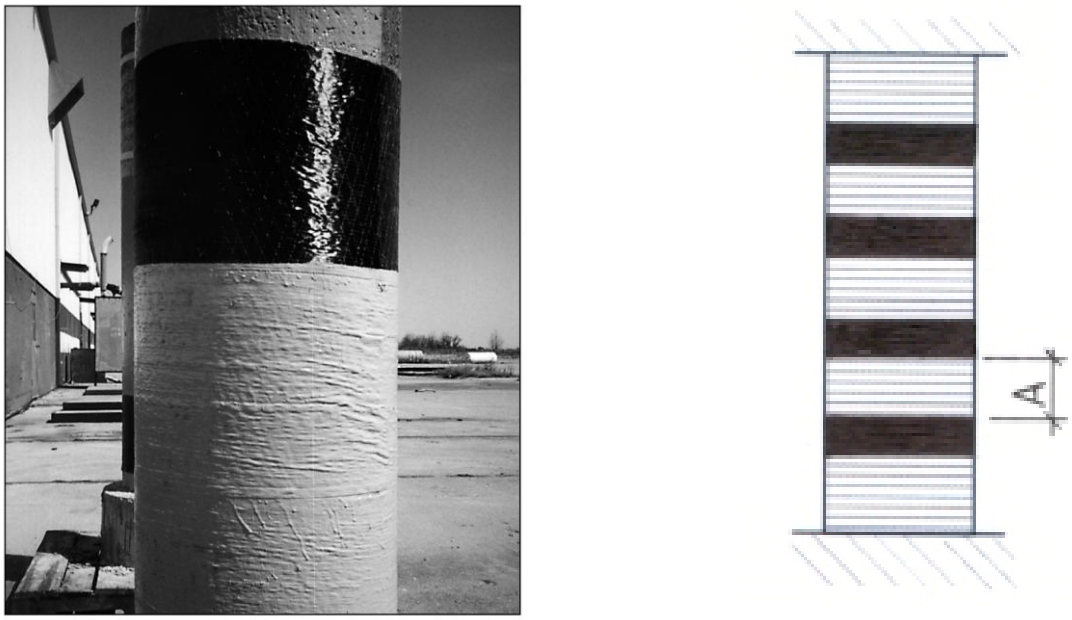


Рис. 5.67. Усиление поперечного армирования колонны углеродоволоконными однонаправленными полотнами: а — общий вид с частично нанесенным защитным слоем, б — схема усиления; по [54]

5.7. Надежность и долговечность усилений бетонных и железобетонных конструкций

5.7.1. Влияния агрессивных сред

Исследования Уральского и Московского государственных университетов путей сообщения (Российская Федерация). Исследования агрессивных влияний окружающих сред на соединения бетонных и железобетонных конструкций с элементами внешнего фибропластикового армирования, проводившиеся *Уральским* и *Московским государственными университетами путей сообщения* [108] с использованием бетонных кубиков, имевших размеры ребер 100 мм, и углеродоволоконных холстов, наклеенных при помощи эпоксидного адгезионного состава, и подвергшихся процессам 12-ти кратного циклического замораживания (до минус 50°С) и оттаивания после насыщения образцов 5%-ным раствором хлорида натрия (по ГОСТ 10060.2-95), показали отсутствие негативного воздействия описанных воздействий на несущую способность данных соединений, разрушения которых проходили по материалу поверхностных слоев бетона (рис. 5.68). Аналогичные испытания на разрыв фибропластиковых элементов, изготовленных из углеродоволоконных холстов и эпоксидных матриц, подвергнутых циклическим процессам замораживания и оттаивания после насыщения 5%-ным раствором хлорида натрия, выполненные названными уни-

верситетами, также показали отсутствие существенных изменений их прочностных и деформативных характеристик (рис. 5.69).

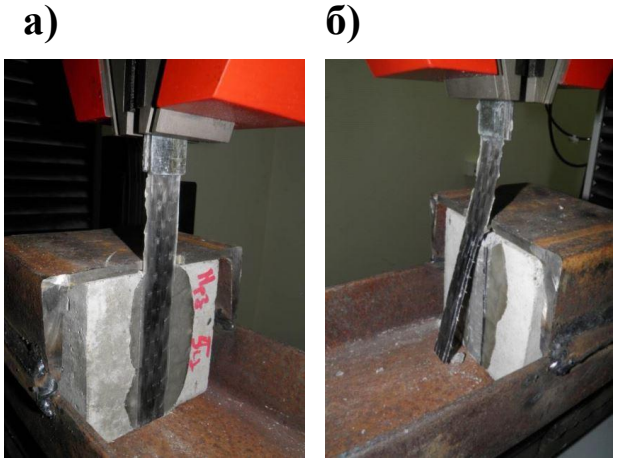


Рис. 5.68. Испытания адгезионных соединений бетонных кубиков с углеродоволоконными холстами по окончании процессов циклического замораживания: а — до разрушения, б — после разрушения; по [108]

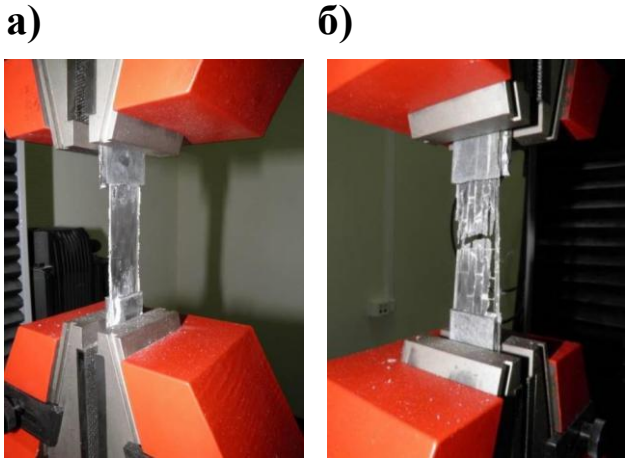


Рис. 5.69. Испытания фибропластиковых элементов, изготовленных на основе углеродоволоконных холстов и эпоксидных матриц по окончании процессов циклического замораживания: а — до разрушения, б — после разрушения; по [108]

Продолжением данных исследований явились испытания железобетонных балочных элементов, имевших размеры 1550×120×220 мм и усиленных по растянутым граням углеродоволоконными лентами, установленными в два слоя с использованием эпоксидного адгезива [108]. Образцы балок также подвергались циклическим процессам 12-ти кратного замораживания (до минус 50°С) и оттаивания после насыщения в течение 96-ти часов 5%-ным раствором хлорида натрия (по третьему ускоренному методу определения морозостойкости ГОСТ 10060.2-95). Результаты испытаний на изгиб (рис. 5.70) парой сосредоточенных сил P продемонстрировали фактическую изменчивость несущей способности образцов, получивших дополнительное внешнее армирование, находящуюся в пределах доверительного интервала измерений (табл. 5.8).

Определение стойкость фибропластиковых элементов на основе углеродного волокна и эпоксидных матриц к действию положительных и отрицательных температур, выполнявшееся авторами описываемого исследования [108] при испытаниях на разрыв образцов в условиях температурных камер, показало практическое отсутствие изменения их прочности при температурах –60°С…+30°С, с падением этого показателя на 30% при температуре +60°С, и более чем на 50% при температуре +90°С.

Таблица 5.8

Сравнительные величины разрушающих сил *P*, приложенных к железобетонным балкам, усиленным по растянутым граням углеродоволоконными композитами, полученные по окончании процессов циклического замораживания; по [108]

№№	Количество циклов замораживания	Разрушающие силы *P*, кН	Увеличение несущей способности, %
Неусиленные балки			
1	0	61	—
Балки, усиленные углеродоволоконными композитами			
1	0	118	93
2	4	113	85
3	5	125	105
4	8	122	100
5	12	126	107

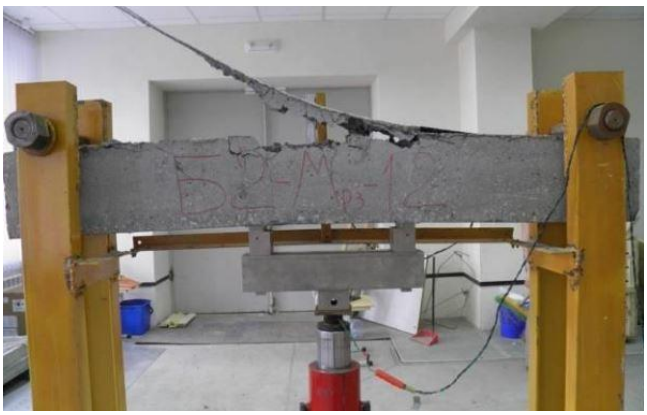


Рис. 5.70. Разрушение железобетонной балки, усиленной по растянутой грани углеродоволоконными лентами, установленными в два слоя с использованием эпоксидного адгезива, по окончании процессов циклического замораживания; по [108]

Аналогичные испытания железобетонных балок с размерами 1550×120×220 мм (рис. 5.71), усиленных по растянутым граням двумя слоями углеродоволоконных лент, установленных на эпоксидном адгезиве, также проводившиеся в условиях температурных камер с приложением пары сосредоточенных сил *P*, обнаружили незначительную изменчивость величины их несущей способности при температурах –60°С…+30°С с резким падением данного показателя при достижении 60°С (рис. 5.72, табл. 5.9).

Характер разрушения усиленных балок зависел от температуры окружающей среды: при отрицательных температурах конструкции разрушались по бетону (с отслоением защитного слоя и обнажением арматуры, см. рис. 5.71, а), а при температурах выше +60°С — в результате разрывов и отслоений композитного материала (рис. 5.71, б).

а) **б)**



Рис. 5.71. Разрушения железобетонных балок, усиленных двумя слоями углеродоволоконных лент, установленных на эпоксидном адгезиве: а — при температуре окружающей среды минус 50°С, б — при повышенных температурах; по [108]

Таблица 5.9

Сравнительные величины разрушающих сил *P*, приложенных к железобетонным балкам, усиленным по растянутым граням углеродоволоконными композитами, при различных температурах окружающей среды, по [108]

№ №	Температура, °С	Разрушающие силы *P*, кН	Увеличение несущей способности, %
Неусиленные балки			
1	+15…+22	61	—
Балки, усиленные углеродоволоконными композитами			
1	–60	123	102
2	–30	121	98
3	0	131	115
4	+15…+22	118	93
5	+60	105	72
6	+90	58	–5

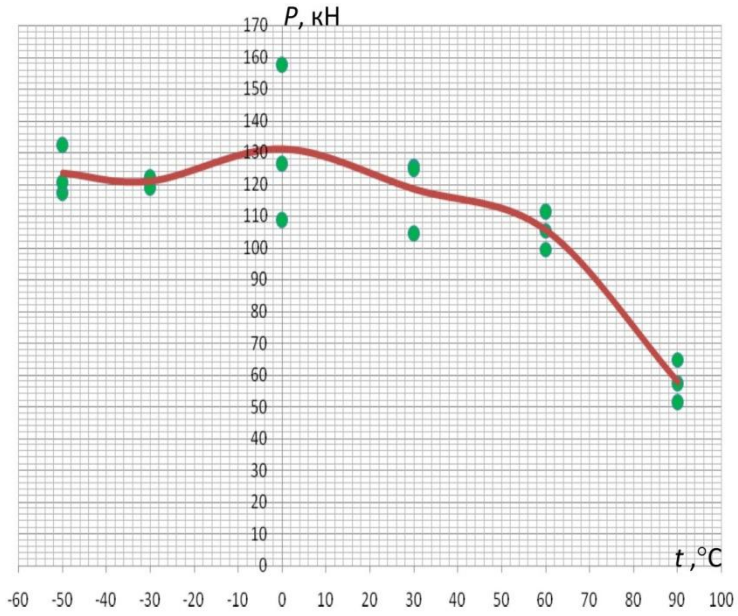


Рис. 5.72. Зависимость величин разрушающих нагрузок для железобетонных балок, усиленных углеродоволоконными композитами, от температур окружающей среды; по [108]

Исследования агрессивного влияния окружающей среды, проводившиеся *Уральским* и *Московским государственными университетами путей сообщения* [108], показали отсутствие негативных воздействий циклических замораживаний и оттаиваний на адгезию эпоксидных составов к поверхности бетона, а также на прочностные и деформативные характеристики углеродоволоконных композитов на основе эпоксидных матриц. Процессы циклического замораживания и оттаивание железобетонных образцов, усиленных углеродоволоконными эпоксидными композитами, также не приводили к падению их несущей способности. При этом композитные материалы выполняли для поверхностей конструкций защитную функцию, увеличивая сопротивляемость бетона морозному разрушению.

Тем же исследованием было установлено влияние температур окружающей среды на характер разрушения образцов железобетонных конструкций, усиленных композитами на основе углеродных волокон и эпоксидных матриц: при отрицательных температурах подобным балочным элементам было присуще разрушение по бетону защитного слоя арматуры, а при температурах более +60°С — в результате разрыва и отслоения элементов усиления. Применение же углеродоволоконного усиления исследовавшихся железобетонных балок в температурном диапазоне –60°С…+60°С приводило к увеличению несущей способности на 93-115%.

Исследования института «РОСДОРНИИ» (Российская федерация). В рамках научно-практической программы по внедрению внешнего фибропластикового армирования для усиления конструкций железобетонных пролетных строений автомобильных мостов институт *«РОСДОРНИИ»* исследовал эффективность усиления бетонных образцов, подвергаемых воздействиям отрицательных температур [13]. При испытаниях, проводившихся с учетом *ГОСТ 10180* и ставивших своей целью проверку морозостойкости и прочности сцепления армирующих холстов с бетоном при отрицательных температурах, использовались неармированные балки с размерами 10×10×40 см, изготовленные из бетонов класса В30…В35.

Бетонные образцы (рис. 5.73) были разделены на три группы: образцы без усиления, испытывавшиеся при комнатной температуре (группа 1); образцы, усиленные по растянутой грани фибропластиковыми элементами, имевшими ширину 100 мм и включавшими один слой углеродоволоконной ткани, подвергавшиеся испытаниям при комнатных температурах (группа 2); образцы, усиленные подобно группе 2, но подвергавшиеся испытаниям при отрицательных температурах (группа 3). Образцы группы 3 предварительно выдерживались в морозильной камере при температуре минус 36°С в течение 4 часов. Результаты соответствующих испытаний, проводившихся при скорости нагружения 0,2…0,6 МПа/сек, приведены в таблице 5.10.

Таблица 5.10

Результаты испытаний при различных температурах бетонных изгибаемых элементов, усиленных по нижним граням углеродоволоконными пластиками, полученные *«РОСДОРНИИ»* (Российская Федерация); по [13]

№№ образцов	Разрушающее усилие, кг		
	Группа 1: образцы без усиления, температура проведения испытаний +20°С	**Группа 2: образцы с усилением, температура проведения испытаний +20°С**	**Группа 3: образцы с усилением, температура проведения испытаний -36°С**
1…3	1350, 1450, 1500	—	—
4…6	—	2800, 2950, 3000	—
7…9	—	—	2950, 3000, 3100

Испытания продемонстрировали, что прочность усиленных углеродоволоконными пластиками бетонных изгибаемых элементов не зависит от влияния пониженных температур окружающей среды. Наблюдавшиеся разрушения происходили вследствие образования наклонных трещин в бетоне, которые

достигая композита, распространялись по контактной плоскости «бетон-клей». Применение углеродоволоконного усиления изгибаемых бетонных образцов в температурном диапазоне –36°С…+20°С приводило к увеличению несущей способности на 100-118%.

а) **б)**



в)



Рис. 5.73. Бетонные образцы, усиленные по растянутым граням углеродоволоконными пластиками, подвергавшиеся изгибу при различных температурах в рамках исследований *«РОСДОРНИИ»* (Российская Федерация): а — образец на этапе предварительного нанесения адгезионного состава, б — образец на этапе наклейки углеволоконного холста, в — характерное разрушение усиленных образцов, полученное в ходе испытаний; по [13]

Анализ состояния контактных поверхностей образцов после отрыва композитов свидетельствовал об их разрушении, происходившем по наклонным

сечениям. Армирующие ткани в ходе испытаний отрывались от одной из образовывающихся половин разрушающихся образцов, но при этом сохраняли свою целостность. Разрушение адгезионных соединений проходило по бетону.

5.7.2. Выносливость

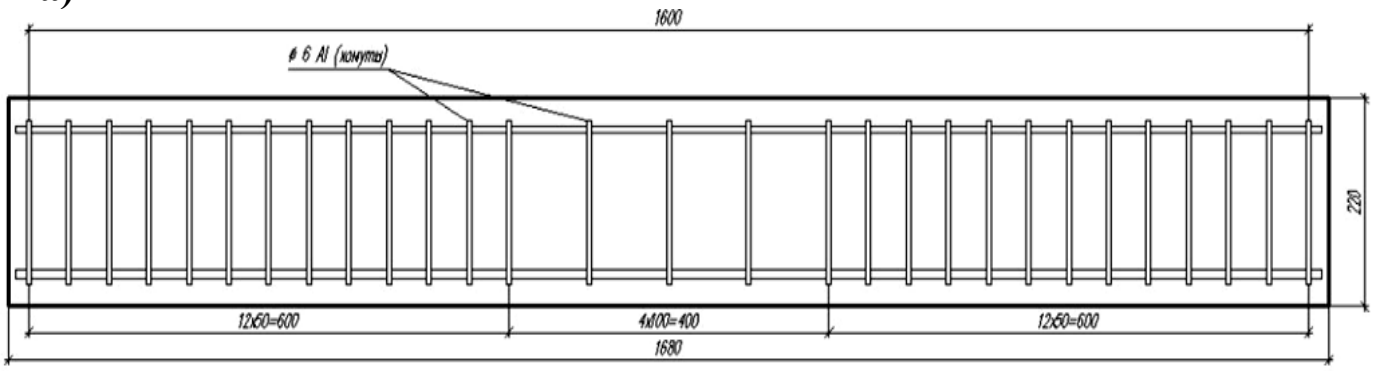
Экспериментальные исследования выносливости фибропластиковых систем внешнего армирования железобетонных конструкций проводились в *Сибирском государственном университете путей сообщения* (Российская Федерация) [108]. При испытаниях использовались образцы железобетонных балок с размерами 160×220×1680 мм, изготовленные из бетона класса прочности В30 (рис. 5.74). Для усиления балок применялись углеродоволоконные холсты *FibARM Tape 530/300* (прочность на растяжение 4300 МПа, модуль упругости 245 ГПа, расчетная толщина монослоя 0,294 мм) и ламинаты *FibARM Lamel 14/100* (прочность на растяжение 2800 МПа, модуль упругости 165 ГПа, площадь сечения 140 мм^2), компании *«Композит»* (Российская Федерация). Рассматривалась сравнительная выносливость образцов без усиления (серия А0, рис. 5.76, а), а также усиленных наклейкой холстов по растянутым граням (серия А1, рис. 5.76, б), усиленных U-образными холстовыми обоймами нижних граней с вертикальными хомутами (серия А2, рис. 5.76, в), усиленных ламинатами, наклеенными по растянутым граням, с наклонными холстовыми хомутами (серия А3, рис. 5.76, г).

Каждая серия балок включала 7 образцов, из которых 3 испытывались статической нагрузкой до разрушения, а 4 — динамической при различных уровнях максимального нагружения (45, 55, 65 и 75% от средней несущей способности при статических испытаниях) и коэффициенте асимметрии напряжений $\rho = 0{,}3$.

Разрушение балок, не имевших усиления (серия А0), при статических испытаниях происходило по нормальным сечениям вследствие раскрытия поперечных трещин. При динамических испытаниях причиной разрушения данных конструкций являлся разрыв стержней продольной рабочей арматуры.

Балки, усиленные наклейкой углеродоволоконных холстов по нижним граням (серия А1, рис. 5.76, б), при действии статических нагрузок разрушались в середине пролета по причине отслоения внешнего композитного армирования, сопровождавшегося разрушением защитного слоя бетона (рис. 5.75, а). Динамические же нагрузки вызывали предшествующий разрыв продольных стержней растянутой арматуры (наблюдался после 85% общего количества циклов загружения) с последующим отслоением композиционного материала.

а)



б)

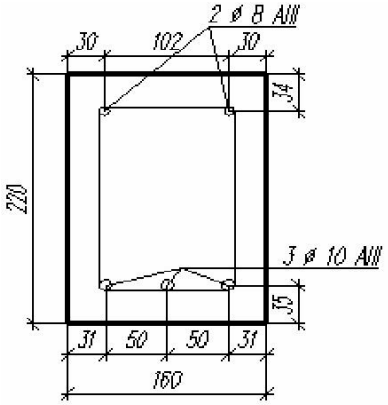


Рис. 5.74. Железобетонные балки, использовавшиеся *Сибирском государственным университетом путей сообщения* (Российская Федерация) при исследовании выносливости фибропластиковых систем; по [108]

Балки, усиленные U-образными углеродоволоконными холстовыми обоймами с вертикальными хомутами (серия А2, рис. 5.76, в), при действии статических нагрузок демонстрировали разрушение, определявшееся в середине пролета разрывом и отслоением продольного композитного усиления (рис. 5.75, б), а при динамических — разрывом продольного стержневого армирования (наблюдалось после достижения 85% общего количества циклов загружения) с последующим отслоением материала композитного усиления.

а) **б)** **в)**



Рис. 5.75. Разрушения железобетонных балок, усиленных углеродоволоконными композитами, при статических нагрузках, полученные в *Сибирском государственном университете путей сообщения* (Российская Федерация): а — с наклеенными холстами (серия А1), б — с наклеенными U-образными обойм и вертикальными хомутами (серия А2), в — с продольными ламинатами и наклонными хомутами (серия А3); по [108]

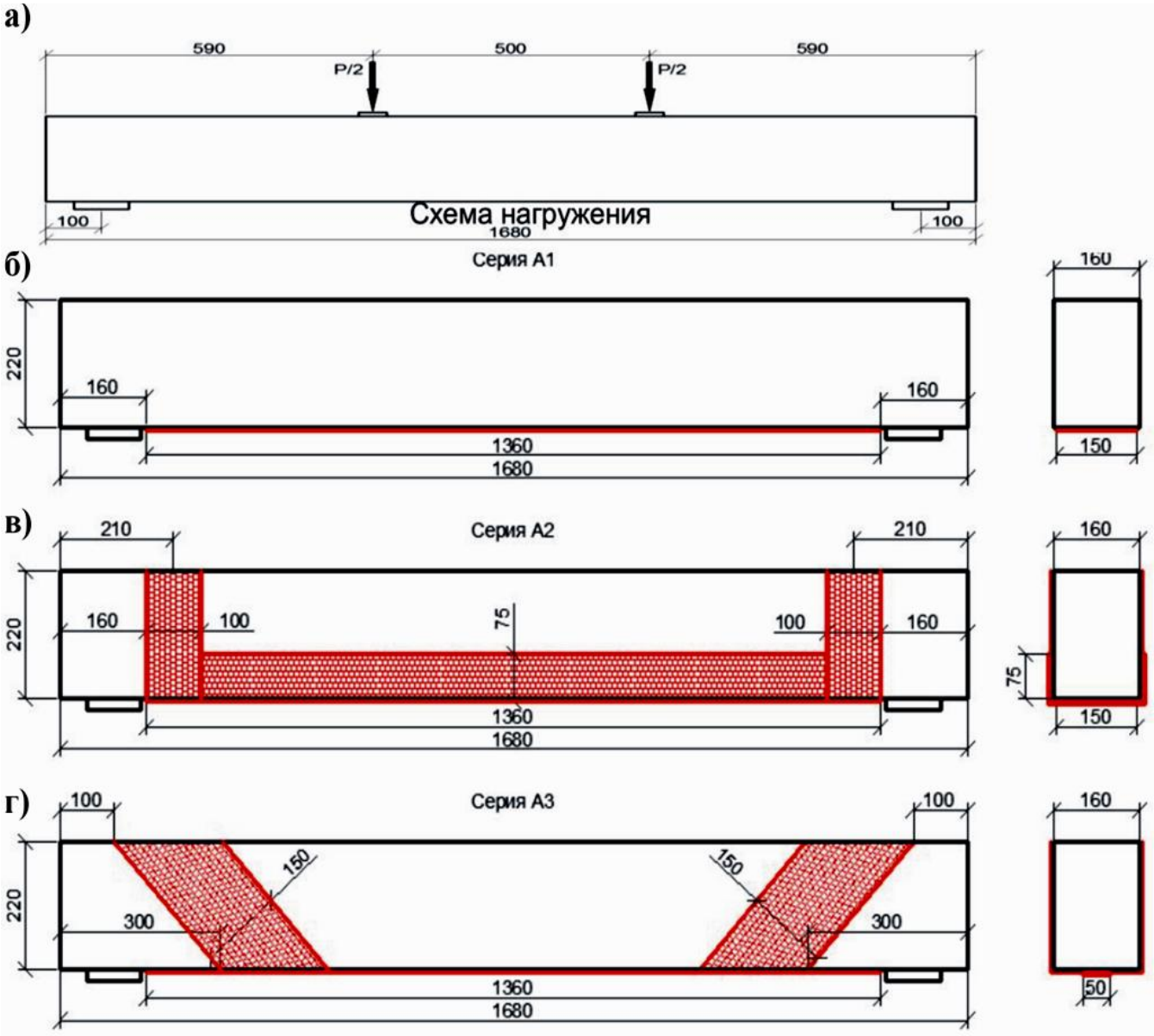


Рис. 5.76. Схемы углеродоволоконного усиления железобетонных балок, использовавшиеся при исследовании выносливости фибропластиковых систем в *Сибирском государственном университете путей сообщения* (Российская Федерация): а — без усиления (серия А0, схема приложения нагрузки), б — наклейкой холстов по растянутой грани (серия А1), в — наклейкой U-образных холстовых обойм по нижним граням с вертикальными хомутами (серия А2), г — ламинатами, наклеенными по растянутым граням, с наклонными холстовыми хомутами (серия А3); по [108]

Образцы балок, получивших внешнее армирование в виде углеродоволоконной ламината и наклонных холстовых хомутов (серия А3, рис. 5.76, г), при статических испытаниях разрушались в результате отслоения фибропластиковых элементов в середине их пролета (рис. 5.75, в), а при динамических — аналогично серии А2, из-за отслоения материала усиления с предшествующим ему разрывом стержней растянутой арматуры, происходившим после достижения 85% общего количества циклов загружения.

Исследование *Сибирского государственного университета путей сообщения* [108] установило, что при композитном внешнем армировании углеродоволоконными материалами железобетонных конструкций наряду с увеличением общей несущей способности достигается значительное повышение усталостного ресурса последних (см. рис. 5.77), составлявшее при экспериментах 3 и более раз. Определенный порядок разрушения усиленных углеродоволоконными пластиками железобетонных балок, воспринимающих динамические нагрузки, предусматривал разрыв стержней рабочей арматуры после достижения 85% общего количества циклов загружения, приводящий к снижению жесткости балок и увеличению их деформаций, сопровождаемых начальным «протрескиванием» адгезионного шва и расширением трещин, с последующим отслоением усиливающего композитного материала и полным разрушением конструкции.

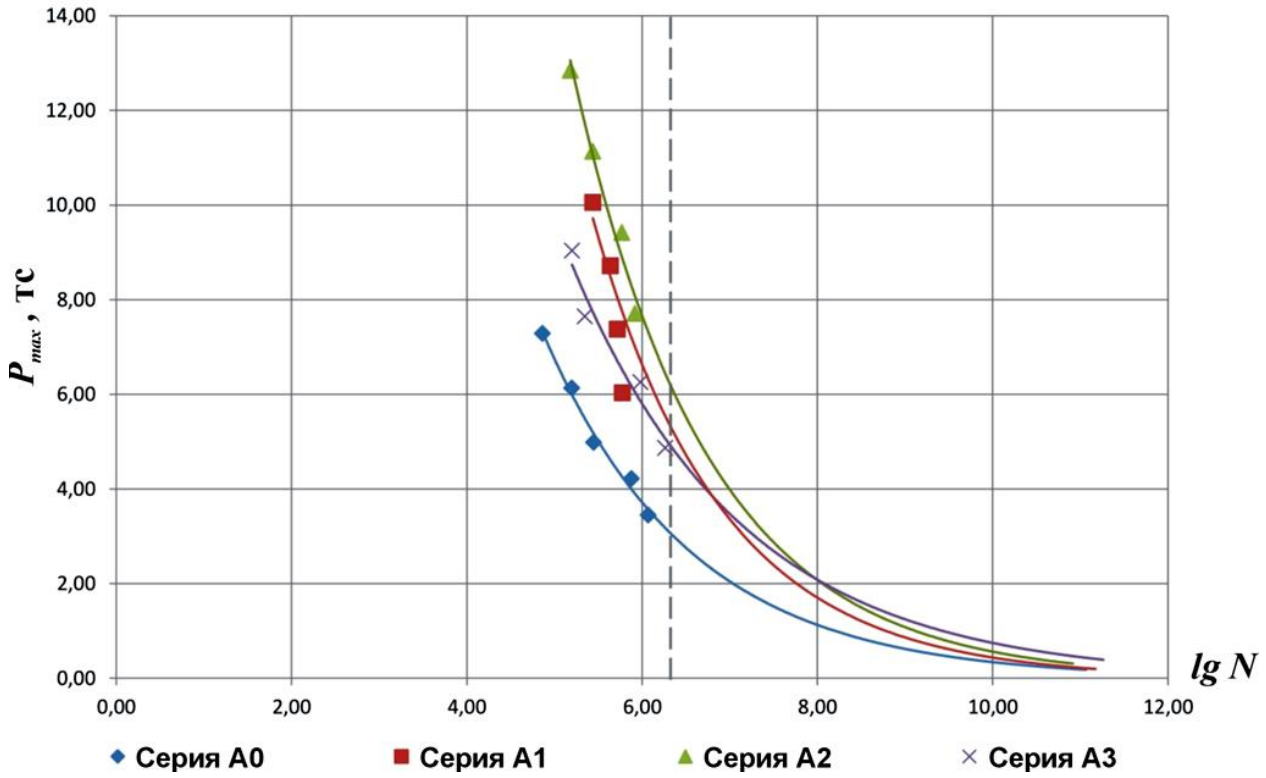


Рис. 5.77. Кривые усталостной работы железобетонных балок, усиленных углеродоволоконными композитами, серии балок смотри на рис. 5.76; по [108]

5.8. Результаты мониторинга эксплуатируемых конструкций

Для оценки надежности эксплуатации фибропластиковых усилений железобетонных конструкций рассмотрим результаты соответствующего монито-

ринга некоторых их образцов, проводившегося институтом *«РОСДОРНИИ»* (Российская Федерация) [13].

Путепровод по ул. Шарикоподшипниковской в г. Москве подвергся ремонту в 2001 г., включавшему усиление 4 железобетонных предварительно-напряжённых балок пролетом 24 м (в двух пролётах по 2 балки), двух ригелей опор длиной 10 м и трёх стоек высотой 6 м. Усиление было вызвано необходимостью пропуска по путепроводу тяжёлого транспортного средства общей массой 252 т.

После 6 лет эксплуатации техническое состояние балок и усиливающих фибропластиковых элементов (4 ряда сдвоенных углеродоволоконных ламинатов шириной 80 мм) было удовлетворительным. Отслоения, отрывы, разрывы и следы непроклеев отсутствовали. Восемь ламинатов с прочностью около 800 МПа и общей площадью сечения около 9 $см^2$, имеющие модуль упругости 2×10^5 МПа позволили исключить появление трещин в бетоне при проходе транспортного средства повышенной грузоподъемности и увеличили несущую способность балок на величину изгибающего момента 20 т×м (соответствующая грузоподъёмность увеличилась примерно на 20%).

Мониторинг конструкций показал хорошую работоспособность усилений углеродопластиковыми ламинатами ригелей опор, воспринимающих изгибающие моменты, а также усилений углеродоволоконными холстами стоек опор. Однако техническое решение, повышающее несущую способность сечений ригелей опор по поперечной силе и предусматривающее использование листовых материалов, оказалось не столь долговечным: при мониторинге в 2007 г. высокопрочные пластины оказались разорваны в двух пролётах ригелей, а раскрытие трещин составило 1,5 мм. Трещины проходили и по клеевому шву между усиливающими пластинами и бетоном. По мнению авторов обследования [13], причиной разрыва углеродопластиковых элементов явилось не воздействие эксплуатационной нагрузки, а коррозия прилежащей арматуры ригеля. При более позднем осмотре, еще через четыре года, изменений в состоянии наклеенных армирующих тканей не произошло.

Мост через речку Химка (г. Москва) усиливался углеродоволоконными предварительно напряженными ламинатами в 2002 году. Согласно расчетам, при предварительном натяжении ламинатов усилием 8 т.с., в них могли возникать растягивающие усилия до 300 МПа. Это соответствовало дополнительному изгибающему моменту в пролетном строении, приближающемуся к 22 т×м (составляло около 25% от доли изгибающего момента, приходящейся на временную нагрузку).

По истечению девяти лет эксплуатации было отмечено хорошее состояние элементов усиления [13]. Дефекты в ламинатах и выравнивающем слое отсутствовали. Отрывов концевых участков фибропластиковых элементов от бетона не было обнаружено. Опыт применения технологии усиления напрягаемыми ламинатами и дальнейший мониторинг конструкций показал целесообразность таких решений при расчётных пролётах в пределах 10…15 м.

Путепровод у аэропорта «Домодедово» (г. Москва) усиливался с использованием углеродоволоконных холстов в 2002 году. Усиление было произведено в связи с недостаточной толщиной защитного слоя железобетонных балок и появлением вертикальных трещин в бетоне. Мониторинговое обследование, проведенное в 2010 году, подтвердило оправданность принятых конструктивных решений: дефекты в фибропластиковых элементах, изготовленных на основе углеродоволоконных холстов, обнаружены не были [13].

Мост через реку Киржач (Российская федерация, автомагистраль М-7) подвергся усилению в 2002 году. При выполнении работ производилась наклейка базальтоволоконных холстов длиной 16,76 м на стенки балок, а также усиление их нижних граней углеродоволоконными ламинатами, установленными как без предварительного напряжения, так и с его использованием. Продольная стыковка ламинатов выполнялась в середине пролетов конструкций.

С целью определения эффективности усиления мост несколько раз осматривался сотрудниками института *«РОСДОРНИИ»* [13]. Техническое состояние балок пролетных строений, спустя 5 лет после их усиления базальтоволоконными холстами, подтвердило целесообразность подобных решений для зон действия максимальных опорных реакций, а также для повышения трещиностойкости защитного слоя железобетонных конструкций. Однако принятое решение по усилению балок с использованием технологии предварительного напряжения углеродоволоконных ламинатов, предусматривающее расположение натяжного устройства по оси балки, не оправдало себя как с технологической, так и с эстетической точки зрения. Все приспособления для натяжения ламинатов на балках вскоре были демонтированы; участки ламинатов, расположенные в средней части пролетов (где были расположены натяжные устройства) подверглись удалению с последующей компенсацией дополнительной наклейкой аналогичных элементов, устанавливаемых без натяжения. Таким образом, были получены балки, усиленные в середине пролёта тремя углеродоволоконными ламинатами с сечением 120×1,2 мм и модулем упругости 2×10^5 МПа. При величине изгибающих моментов в середине пролёта усиленных конструкций около 130 т×м, на углеродоволоконные ламинаты передавалось усилие 15

т×м, соответствующее 11…12% и исключающее появление поперечных трещин в бетоне.

Осмотр сооружения ещё через 4 года (в 2011 г.) установил отсутствие изменений в техническом состоянии усиленных конструкций.

Мост через реку Нерская (Российская федерация, автомобильная дорога Москва – Егорьевск) был усилен фибропластиковыми элементами на основе углеродоволоконных холстов и лент в 2001 году. Эксплуатация моста подтвердила эффективность применения углеродопластиковых ламинатов в пролёте длиной свыше 10 м [13]. Оправдало себя применение углеродопластиковых холстов в зоне максимальных поперечных сил, где дефектов и повреждений не было обнаружено.

Железнодорожный мост через канал им. Москвы (Российская федерация, Октябрьская железная дорога) усиливался углеродоволоконными ламинатами в 2004 году. Последующий мониторинг конструкций подтвердил рациональность применения подобных ламинатов без предварительного напряжения при пролётах длиной свыше 10 м [13].

Мост через реку Оку (Российская федерация, автомагистраль М-4 «Дон») был усилен в 2003 году углеродоволоконными ламинатами с сечением 1,2 $см^2$, примененными для разгрузки анкерных участков пучковой арматуры в концевом блоке рамы (рамно-шарнирной конструкции). При усилении крайних блоков были поставлены маячки, контролируемые деформометром. Измерение положения маячков спустя 4 года показало, что ламинаты включились в совместную работу с напряжённой арматурой рамы моста [13].

Мост через реку Протву (Российская федерация, автомагистраль М-3 «Украина») в 2003 году получил усиление подвесных пролётных строений (крайних балок пролетом 11,0 м) углеродопластиковыми ламинатами с целью обеспечения соответствия конструкций возросшим величинам пропускных нагрузок. С целью улучшения пространственной работы сооружения углеродоволоконными ламинатами усиливались также диафрагмы. Для повышения трещиностойкости защитного слоя бетона на стенки балок основных пролетных строений наклеивались базальтоволоконные холсты.

Определенное осмотрами сооружения в 2007 и 2011 годах техническое состояние усиливающих ламинатов подвесных пролётов, а также состояние самих балок пролётных строений не обнаружило существенных дефектов и повреждений [13]. Трещины в балках и отслоения ламинатов отсутствовали. Не было также обнаружено значительных повреждений базальтоволоконных холстов, хотя и имелись локальные шелушения окрасочного поверхностного слоя и

незначительные отслоения концов армирующих тканей на их оголенных участках.

Все описанные выше сооружения располагаются в строительно-климатическом районе со среднесуточными отрицательными температурами воздуха не ниже минус 40°С. В течение 6…10 лет эксплуатации на данных объектах отсутствовали признаки разрушения армирующих тканей и связующих эпоксидных матриц. Тем не менее, фиксировались поверхностные повреждения прикромочных участков усиливающих материалов, обуславливаемые неудовлетворительными условиями эксплуатации (не проводились плановые очистки, нанесения окрасочных слоев или поверхностных матричных слоев).

5.9. Общие технологические принципы производства работ

Усиление бетонных и железобетонных конструкций дополнительным фибропластиковым армированием, как уже отмечалось выше, может предусматривать использование армирующих лент, холстов и тканей (рис. 5.78, а, б), пластинчатых ламинированных элементов заводской готовности (рис. 5.78, в, г) и гибких сеток (рис. 5.78, д, е). Кроме того возможно применение метода размещения фибропластикового армирования во внутренних штрабах, выполняемых в теле конструкций, общее технологическое описание которого приведено в п. 5.5.2.3 (рис. 5.81, з, к).

В настоящем пункте рассмотрим общие технологические принципы производства работ по усилению бетонных и железобетонных конструкций системами внешнего армирования (т.е. с использованием холстовых материалов, ламинатов и гибких сеток), примеры практического использования которых приведены на рисунке 5.79.

Решения по ремонту и усилению конструкций, как правило, являются индивидуальными, имеющими свою специфику. Однако имеются и общие рекомендации по такому усилению [45, 54, 55]. Например, в большинстве случаев предварительная (перед устройством фибропластикового усиления) подготовка поверхности железобетонной конструкции должна включать инъектирование трещин, защиту оголённого арматурного каркаса, нанесение *праймера* (состава предварительной подготовки) на бетон, а также восстановление повреждённого бетона полимерными составами перед приклейкой композита. Только после качественного выполнения работ по подготовке контактных поверхности может осуществляться непосредственное усиление.

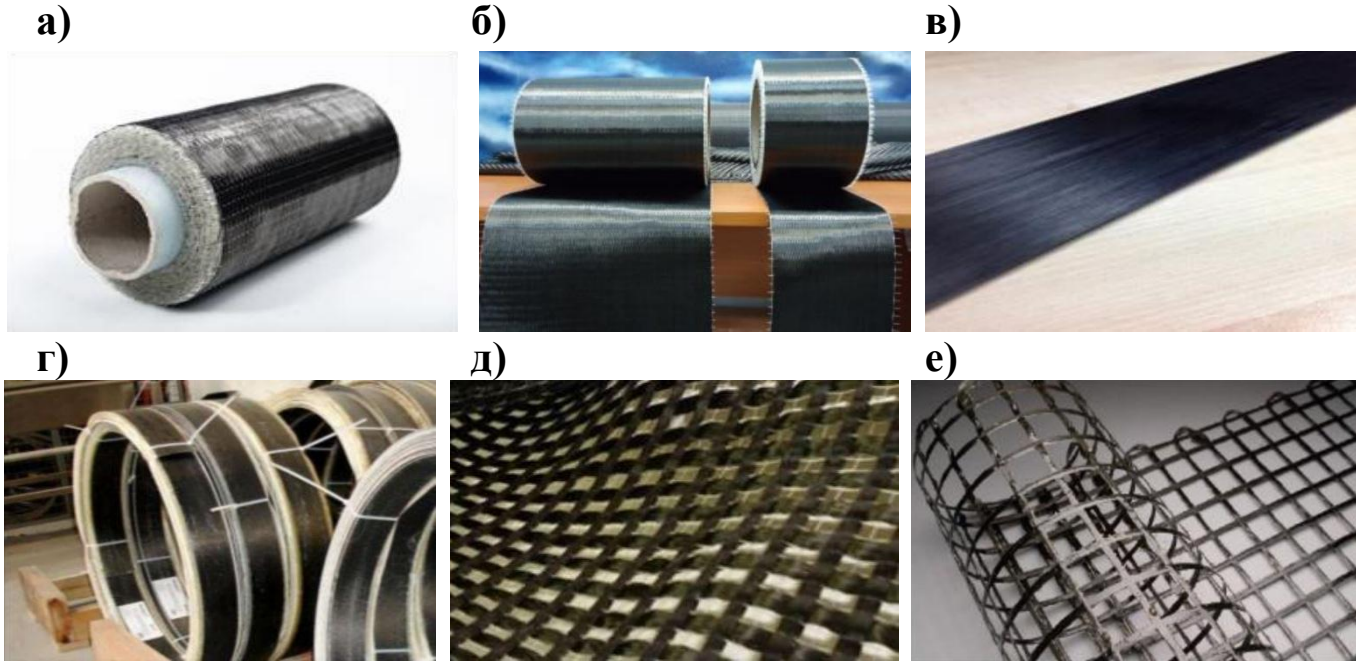


Рис. 5.78. Армирующие фиброматериалы: а, б — холсты и ленты, в, г — ламинированные элементы заводской готовности, д, е — модификации гибких сеток; по [41, 44]



Рис. 5.79. Усиление железобетонных перекрытий внешним фибропластиковым армированием; по [41]

В зависимости от выбранного типа армирующей основы фибропластиковых элементов внешнего усиления варьируются и технологические особенности соответствующего производства работ.

Системы усиления, изготавливаемые по «месту» с использованием армирующих лент, холстов и тканей, требуют предварительной разметка рабочих поверхностей конструкций, выделяющей зоны размещения внешнего армирования. Обозначенные рабочие зоны очищаются от загрязнений и поврежденных фрагментов материала конструкции (рис. 5.80, а), их поверхности выравниваются, обеспыливаются и обезжириваются. Подготавливаются заготовки армирующих лент, холстов или тканей (рис. 5.80, б), смешиваются адгезионные

составы. Для обеспечения качественной адгезии по швам соединения, последовательно наносится грунтовочный слой (рис. 5.80, в) и слой адгезива (рис. 5.80, г). Затем раскатывается армирующий материал (рис. 5.80, д) и выполняется его прикатка валиками. Для полной пропитки армирующего материала наносится внешний «запечатывающий» матричный слой (рис. 5.80, е). Далее, при необходимости, может осуществляться наклейка последующих слоев армирующего материала (рис. 5.80, ж). По наружному «запечатывающему» слою, до окончания полимеризации, распыляется песок, улучшающий его дальнейшее сцепление с защитным покрытием (рис. 5.80, з). Окончательной отделке рабочих поверхностей предшествует устройство внешней огнезащиты (рис. 5.80, к).

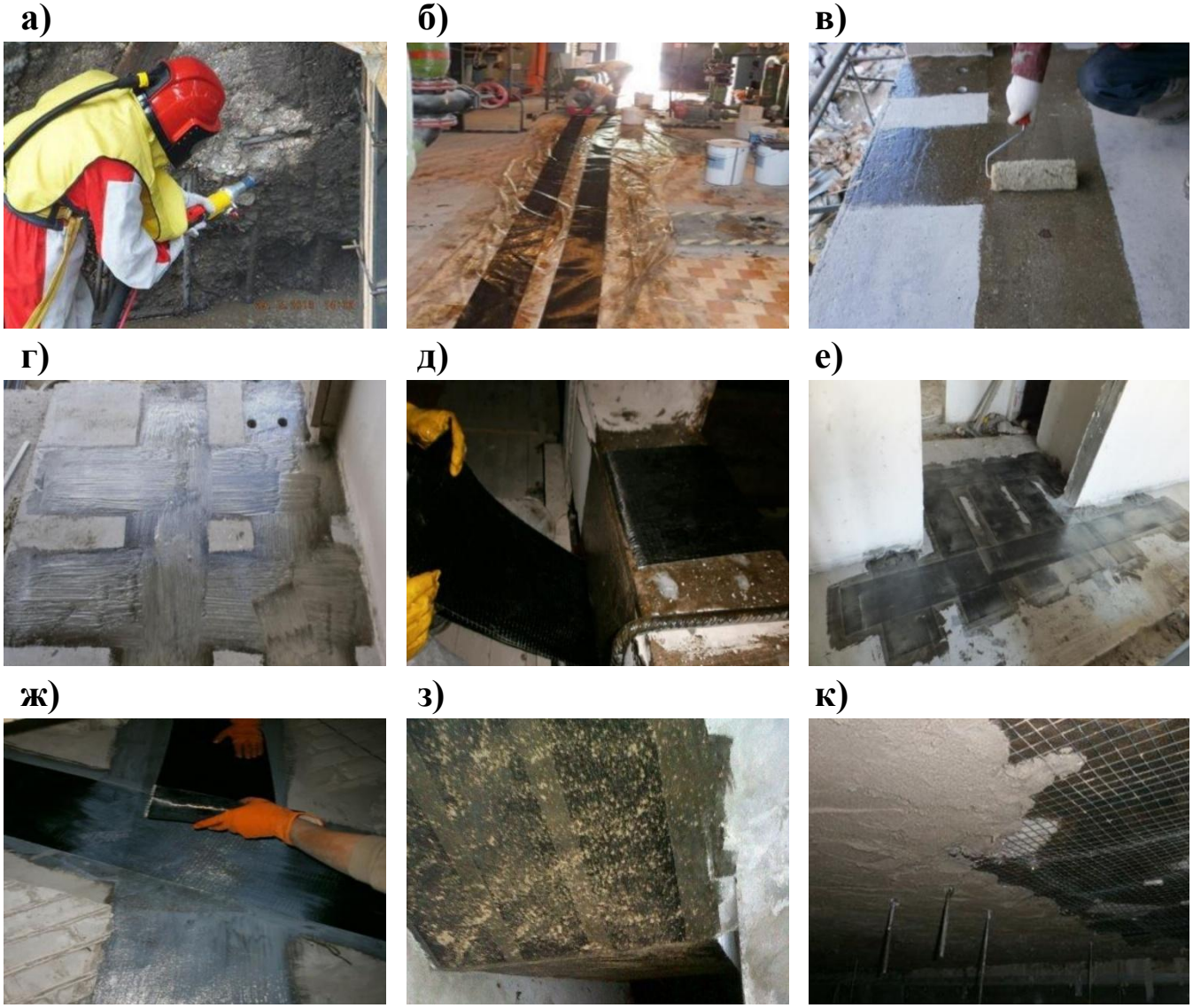


Рис. 5.80. Устройство систем фибропластикового усиления строительных конструкций, изготавливаемых «по месту»: а — подготовка рабочих поверхностей, б — заготовка армирующего материала, в — нанесение грунтовочного слоя, г — нанесение слоя эпоксидного адгезива, д — раскатка армирующего материала, е — нанесение внешнего «запечатывающего» слоя адгезива, ж — наклейка последующих слоев армирующего материала, з — распыление песка по наружному «запечатывающему» слою, к — устройство огнезащитного покрытия; по [41]

Системы усиления, изготавливаемые с использованием пластинчатых ламинированных элементов заводской готовности, на первых этапах своего устройства требуют выполнения тех же операций по разметке и очистке рабочих поверхностей, что и системы на основе лент и тканей. Существенным отличием является гораздо более жесткие требования к выравниванию поверхностей (рис. 5.81, а), обычно производимому шлифовкой выступающих фрагментов материала конструкции (рис. 5.81, б) и заполнением специальными растворами, имеющихся в нем углублений (рис. 5.81, в). При подготовке пластинчатых заготовок нужной длины, необходимо также предусмотреть их тщательную очистку от пыли (рис. 5.81, г). Адгезионный состав в данном случае наносится на монтажную поверхность (рис. 5.81, д) и ламинированный фибропластиковый элемент (рис. 5.81, е), после чего последний устанавливается в проектное положение и прижимается (рис. 5.81, ж).

Гибкие армирующие сетки применяются для усиления бетонных, железобетонных и каменных конструкций, имеющих большие площади внешних поверхностей. В этом случае на очищенные монтажные поверхности выполняется набрызг слоя ремонтного состава (рис. 5.82, а), для чего возможно использование растворонасосов и воздушных компрессоров. Далее по свеженанесенному слою раскатывается и вдавливается армирующая сетка (рис. 5.82, б) и осуществляется последующий набрыз финишного слоя вяжущего (рис. 5.82, в). В случае установки нескольких слоев сеток, между нанесениями ремонтных слоев предусматривается технологический перерыв, составляющий, в зависимости от свойств вяжущего состава, от 1 до 3 суток.



Рис. 5.81. Монтаж систем фибропластикового усиления, использующих ламинированные элементы: а — контроль выравнивания рабочих поверхностей, б — шлифовка выступающих фрагментов, в — заполнение углублений на рабочей поверхности, г — очистка от пыли армирующих элементов, д — нанесения адгезива на монтажную поверхность, е — нанесение адгезива на ламинированную пластину, ж — размещение армирующего элемента в проектном положении, з, к — размещение армирующих пластин во внутренних штрабах; по [41]



Рис. 5.82. Усиление строительных конструкций гибкими сетками: а — начальный набрызг ремонтного состава, б — раскатка и вдавливание армирующих сеток, в — набрызг финишного слоя; по [41]

6. Фибропластиковое усиление металлических конструкций

Реальные технологии усиления строительных металлических конструкций фибропластиковыми материалами появилась практически на 20 лет позже, чем аналогичные методики, применяемые в отношении строительных систем, выполненных из других видов конструкционных материалов. Объясняется это значительно более высокими прочностными показателями, меньшим количеством конструкционных недостатков и более простыми методами возможного усиления металлических конструкций. Немаловажное влияние при этом оказал и более сложный характер работы элементов, сочетающих металл и фибропластики. Тем не менее, рассматриваемые в данном разделе методы находят нарастающее применение в современном строительстве (особенно в отношении конструкций, представляющих историко-культурную ценность).

Непродолжительный период изучения и, что не менее важно, практического применения подобных решений определил серьезный недостаток соответствующей рекомендационной базы расчетов и проектирования. Последний момент требует более глубокого рассмотрения метало-фибропластиковых конструкций в составе отдельного обобщающего исследования. В настоящей же работе остановимся только на общих вопросах, связанных с особенностями работы и применения фибропластиковых усилений в составе металлических конструкций.

6.1. Современные тенденции и области рационального использования

Также как и в случае усиления железобетона, необходимость реабилитации металлических конструкций обычно определяется дефектами проектирования или физическим износом их несущих элементов, а также изменением действующих эксплуатационных требований. При этом в ряде ситуаций усиление фибропластиковыми композитами показывает более предпочтительные результаты. Выбор этих материалов часто диктуется необходимостью сохранения функциональности и максимальной аутентичности конструкций, составляющих историко-культурное наследие. Кроме того, многие металлические элементы строительных конструкций, возводившихся в конце 19-го – начале 20-го века, демонстрируют хрупкость при ударных и температурных воздействиях, а длительные сроки их эксплуатации приводят к существенной коррозионной и усталостной повреждаемости материалов. Традиционные способы усиления таких

конструкций внешними накладками, устанавливаемыми на сварке или болтах, часто оказываются неприменимыми в связи с недопустимостью сварки сталей, использовавшихся в тот период времени, а также невозможностью ослабления болтовыми отверстиями сечений элементов, демонстрирующих крайне хрупкий характер работы. Эффективным решением данных проблем является внешнее фибропластиковое армирование.

Таким образом, фиброармированные полимеры, исключительно удобные для усиления и ремонта существующих конструкций, находят возрастающее применение и при усилении металлических несущих элементов. При этом фибропластиковое усиление металлических конструкций, являясь активно развивающимся методом, в настоящее время уже имеет достаточно много примеров удачного осуществления, в качестве которых могут служить проекты восстановления мостов и элементов конструкций различных сооружений (см. п. 6.7), реализованные в западной Европе и северной Америке [6, 106]. При этом в виду новизны данной технологии, практических рекомендаций по ее осуществлению достаточно мало.

Фиброармированные полимерные материалы, размещаемые на внешних поверхностях металлических элементов, позволяют существенно увеличения их прочности и жесткости, дают возможность восполнить материал, утраченный вследствие коррозии, повышают общую выносливость строительных конструкций при циклических нагрузках, а также обеспечивают потенциальную возможность изменения условий эксплуатации.

Элементы фибропластикового усиления имеют значительно меньшие габаритные размеры и вес в сравнении со стальными, а также не подвержены коррозии. Высокая продольная прочность фиброармированных пластиков, особенно при их предварительном напряжении, хорошо компенсирует механические свойства низкопрочностных сталей, находивших применение в первых металлических конструкциях. Немаловажным в выборе этих материалов является также то, что технология их практического использования часто оказывается относительно более простой и требующей меньшего времени вывода конструкций из активной эксплуатации.

Фибропластиковое усиление металлических конструкций обычно осуществляется с целью повышения или восстановления прочности несущих элементов, работающих на растяжение или изгиб, а также для повышения их сопротивляемости процессам усталости материалов. Как отмечают современные рекомендации [6, 106, 110], в настоящее время также существуют исследования, отражающие возможность повышения и восстановления несущей способности тонкостенных сжатых металлических элементов. Однако количество сущест-

вующих работ, поднимающих данный вопрос с теоретической и экспериментальной точек зрения, пока незначительно и не позволяет определить надежные процедуры расчета подобных комплексных элементов.

Усиление металлоконструкций фибропластиками выполняется как с помощью армирующих тканей, пропитываемых матричными составами непосредственно по месту усиления (рис. 6.1), так и с применением элементов заводской готовности, приклеиваемых в проектном положении (рис. 6.2).

а) **б)**



Рис. 6.1. Усиление криволинейных поверхностей металлических конструкций фибропластиками, изготовленными на основе углеродоволоконных армирующих тканей «по месту»: а — изогнутых стальных двутавровых балок здания *Бутс Билдинг* в городе *Ноттинхем* (*Boots Building, Nottingham*, Великобритания), по [6], б — труб нефтепровода в *Дэйкюинг* (*Daqing*, Китай), по [110]

а) **б)**

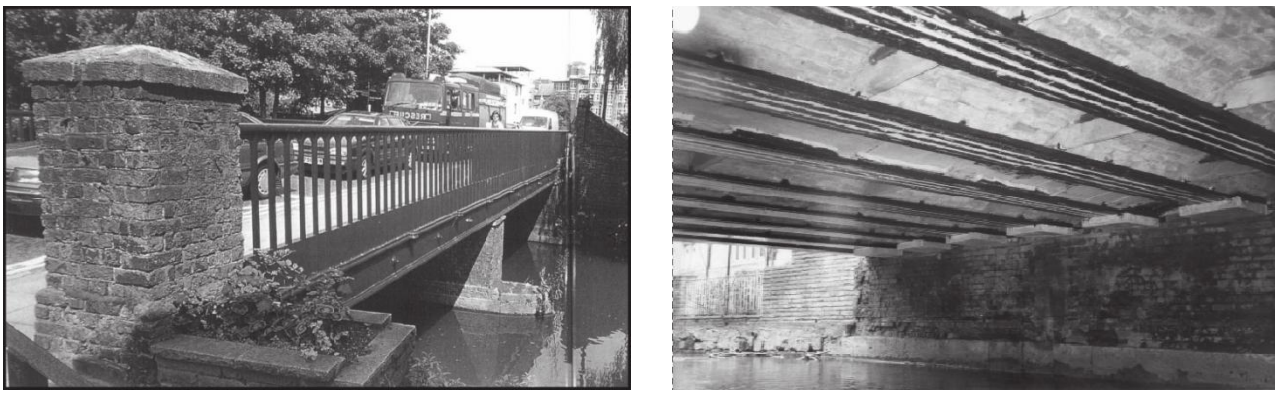


Рис. 6.2. Усиление металлических балок автомобильного моста *Хайт Бридж* в городе *Оксфорд* (*Hythe bridge, Oxford*, Великобритания), выполненное углеродоволоконными пултрузированными ламинатами заводской готовности, установленными с использованием предварительного напряжения и с применением механических креплений концевых участков: а — общий вид моста, б — положение углеродоволоконных ламинатов на нижних гранях металлических балок; по [79]

При выборе типа армирующей фибры, используемой в сочетаниях с металлами, наибольшее предпочтение отдается углеродным волокнам, демонстрирующим величины модулей упругости равные или превосходящие аналогичные показатели сталей. В значительно меньшей степени с этой целью используются арамидные и стеклянные волокна, находящие применение обычно в сочетании с предварительным напряжением при незначительных величинах внутренних усилий элементов конструкций.

Первоначально развитие технологий фибропластикового усиления в строительстве фокусировалось на бетонных и железобетонных конструкциях. Распространение же данных методов на металлические конструкции относится к последним годам прошедшего тысячелетия. При этом в отличие от железобетонных конструкций, в отношении усиления которых фиброармированными пластиками в настоящее время сформировалась достаточно серьезная и обширная теоретическая база, аналогичная модернизация металлических конструкций сталкивается если не с полным отсутствием соответствующих нормативно-рекомендательных документов, то с существенной их нехваткой. Меньшее количество конструкционных недостатков строительных сталей, в сравнении с железобетоном, и более простые традиционные пути усиления, выполненных из них элементов, замедлили практически на 20 лет широкое внедрение фибропластиков как эффективного средства реабилитации металлических конструкций. Существующие в мире рекомендации по расчету и проектированию строительных конструкций, сочетающих металл и фиброармированные материалы, имеют весьма ограниченное число и охватывают далеко не все случаи возможного загружения элементов [6, 106, 110, 150-156].

Отечественные же публикации по тематике сочетания фибропластиков с металлическими конструкциями, равно как и публикации в близких по теоретико-экспериментальной культуре строительства странах постсоветского пространства, пока единичны и имеют относительно незначительную практическую ценность. К их числу могут быть отнесены отдельные обоснования актуальности проведения соответствующих исследований, выполненные в статьях Капустиной Е.П. и Аненковой М.В. [157], общие описания, сопровождаемые фрагментами переведенных текстов итальянских рекомендаций [106], исполненные группой Овчиникова И.И., Овчиникова И.Г., Чеснокова Г.В., Титаева К.В., Покулаев К.В. [158, 159], а также отдельные работы Якупова А.У., Шайталова Н.В., Кучерюка В.Н. [160]. Кроме того некоторые теоретико-экспериментальные исследования подобных конструкций проводились на кафедре Металлических, деревянных и пластмассовых конструкций Одесской государственной академии строительства и архитектуры [161-173].

Проблему практического внедрения рассматриваемых решений осложняют принципиальные отличия в характере работы и разрушений усилений металлических конструкций от, например, железобетонных (в первом случае разрушение обычно происходит по адгезионному шву, во втором — по бетону вокруг него), а также невозможность применения в чистом виде решений, успешно опробованных в авиастроении и космонавтике, что объясняется существенными отличиями в размерах сечений несущих элементов, характере действующих внутренних усилий, величинах и продолжительности прикладываемых нагрузок, невозможности эмпирического подхода с проведением множественных серий экспериментальных исследований полномасштабных элементов строительных конструкций и особенностями применения более дешевых армирующих и, что особенно важно, матрично-адгезионных материалов. Тем не мене с начала 2000-х годов сочетания металла и внешнего фибропластикового армирования (особенно высокомодульного) находит стремительно возрастающее использование в строительстве.

6.2. Специфические особенности

Металлические конструкции, усиленные фибропластиками, являются потенциальными объектами действия циклических напряжений, обусловленных термическими воздействиями окружающих сред. Обычно такие влияния относительно незначительны, однако в условиях сложных температурных режимов эксплуатации конструкций, оказывают негативное воздействие на их работоспособность. При подобных условиях, для снижения опасности отслаивания усиливающих элементов, рациональным является использование дополнительные механических связей, устанавливаемых в наиболее нагруженных зонах соединений.

Кроме того фибропластиковое усиление элементов, подверженных усталостному разрушению, а также находящихся под действием усилий предварительного напряжения, должно учитывать возможность протекания несвойственных металлическим конструкциям процессов ползучести, имеющих место в адгезионных соединениях, для локализации которых возможно также введение в их состав дополнительных механических связей.

Одним из наиболее важных требований, предъявляемых к усиливаемым фибропластиками металлическим конструкциям (еще более важным, чем в других случаях), является необходимость обеспечения качества контактных поверхностей их соединений. При наличии загрязнений и коррозионных повреждений основной материал конструкции подлежит тщательной очистке, восстанавливающей присущий ему профиль внешней поверхности.

Особенности принятых конструктивных решений должны также учитывать возможность случайных повреждений фибропластиковых усилений при нестандартных эксплуатационных условиях.

6.3. Соединений фибропластиков с металлическими элементами

6.3.1. Отличия в работе

Как отмечалось выше, существующая теоретическая база, относящаяся к работе бетонных и железобетонных конструкций, имеющих внешнее фибропластиковое армирование, не может иметь широкого распространения при рассмотрении работы металлических конструкций, усиленных фибропластиковыми элементами, в связи с существенными отличиями в механизме работы и разрушения соответствующих им соединений.

Разрушения соединений с поверхностями бетонных и железобетонных конструкций главным образом обуславливаются низкой прочностью прилежащего бетонного слоя, в то время как в соединениях с металлическими поверхностями данный процесс проходит непосредственно по адгезионному шву [6, 106, 110]. Кроме того, шести-восьми кратное отличие модулей упругости бетона и стали существенно влияет на распределение напряжений в прилежащих к шву зонах материала усиливаемой конструкции и фибропластиковых элементов.

Влияние условий эксплуатации (повышенных и пониженных температур, влаги, пара, наличия солей, а также циклирования названных факторов) на работоспособность соединений в этих конструкциях также является различным. Бетону присущи усадка и ползучесть, отсутствующие у металлических элементов.

Отличия коэффициентов термического расширения углеродоволоконных пластиков и бетона могут создавать значительные дополнительные напряжения по шву соединения элементов при колебаниях температур. Различие данных коэффициентов для углеродоволоконных пластиков и стали еще более существенны и в гораздо большей степени могут усложнять процесс работы соединений.

Немаловажной особенностью применения углеродных волокон при усилении металлических конструкций является также то, что при их прямом контакте с металлами имеет место процесс гальванической коррозии материалов, для исключения которого требуется принятие специальных конструктивных решений. В качестве практического решения данной проблемы в состав швов,

отделяющих углеродные волокна от металлов, вводят стабилизирующие их минимальные толщины элементы. С этой целью может использоваться введение тонкого слоя стекловолокна между металлической основой соединения и фиброармированным пластиком, обеспечиваемое, например, путем предварительной наклейки соответствующей ткани на подготавливаемую поверхность усиливаемого элемента или добавлением измельченного волокна в состав вяжущей массы.

Таким образом, работа соединений фиброармированных пластиков с металлическими элементами в значительной степени отличается от работы их соединений с бетоном [110, 174-176].

Характер работы соединений фибропластиков со сталью в настоящее время изучен в ряде экспериментальных и теоретических работ [113, 177-182]. Негативное воздействие на несущую способность рассматриваемых соединений могут также оказывать повышенные температуры и динамические воздействия [183, 184].

6.3.2. Возможные схемы разрушения

Возможные схемы разрушения адгезионных соединений металлических и фиброармированных композитных элементов, испытывающих растягивающие усилия, включают (рис. 6.3):

— разрушение адгезионного шва по поверхности металлического элемента,
— когезионное разрушение (непосредственное разрушение адгезионного слоя), см. рис. 6.4, б,
— разрушение адгезионного шва по поверхности фиброармированного пластика,
— расслоение фибропластика (отделение части волокон от матрицы), см. рис. 6.4, а,
— непосредственный разрыв фибропластикового элемента, см. рис. 6.4, в,
— переход стали в текучее состояние.

Порядок разрушения фибропластиковых элементов, изготовленных на основе армирующих тканей и лент, зависит, главным образом, от прочности их волокон [110, 119, 177].

Последовательность разрушения фибропластиковых ламинированных пластин во многом определяется толщиной адгезионного слоя и свойствами материала [110, 113, 181].

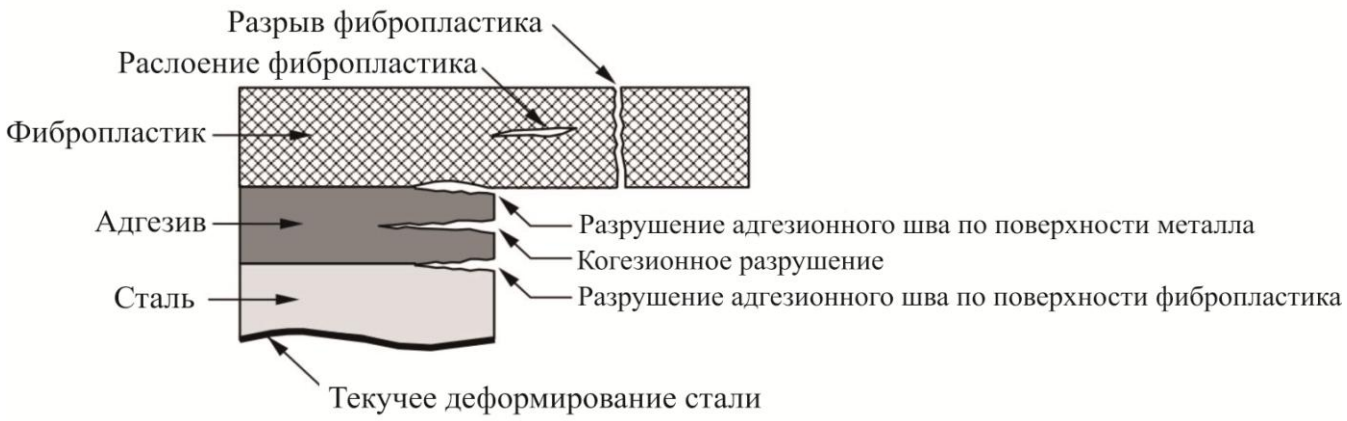
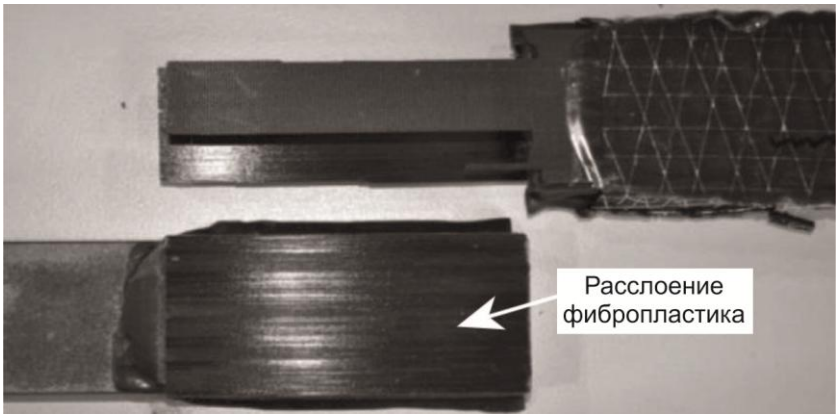
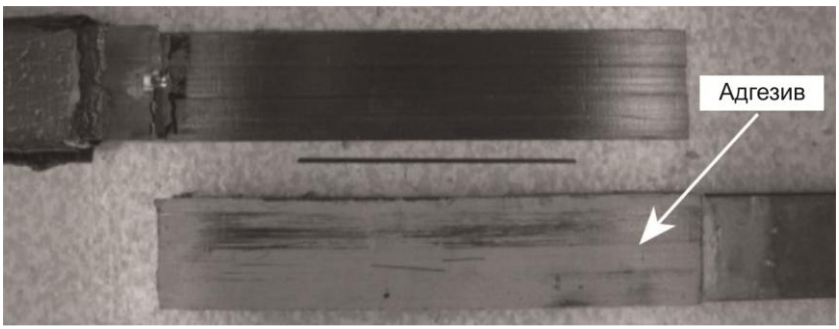


Рис. 6.3. Возможные варианты разрушения адгезионных соединений металлических и фиброармированных композитных элементов; адаптировано по [110]

а)



б)



в)

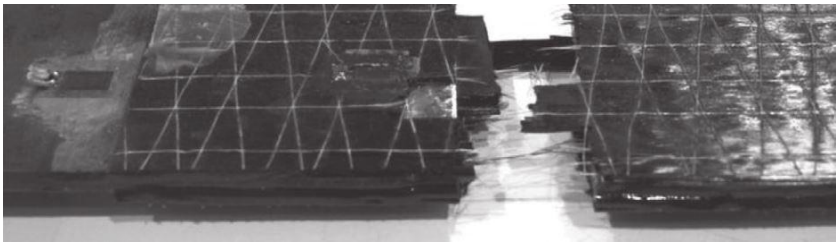


Рис. 6.4. Разрушенные образцы двухсторонних соединений углеродоволоконных пластиков со стальными пластинами: а — расслоение фибропластика, б — разрушение адгезионного слоя, в — разрыв композита; по [110]

Разрушение рассматриваемых соединений вследствие процесса текучести стали наблюдается довольно редко и только при наличии соответствующих элементов малых толщин.

6.3.3. Анализ напряженного состояния

Анализ напряженного состояния адгезионных соединений фибропластиков с металлами сопряжен с рядом специфических особенностей, включающих наличие концентраций касательных и «отрывающих» (действующих перпендикулярно плоскости шва) напряжений, проявляющихся в местах геометрических прерываний соединений, таких как концы усиливающих пластин (элементов внешнего армирования), дефекты (неплотности) адгезионных швов или трещины в материале металлической основы соединений.

Для прочностного анализа адгезионных соединений в настоящее время используется два основных метода, базирующихся на рассмотрении упругих деформаций и соответствующих им напряжений, а также на предположениях механики разрушений.

Анализ, берущий за основу положения механики разрушений, удобен своим абстрагированием от детального исследования распределения упругих напряжений в адгезионном соединении, рассматривая работу однородных, единообразно усиленных фибропластиками металлических элементов. Однако данный метод не позволяет учитывать в должной мере температурные эффекты и возможную переменность сечений элементов.

Более предпочтительным с этих точек зрения является использование линейно-упругого анализа работы адгезионных соединений, определяющего порядок распределения касательных и «отрывающих» напряжений по их длине. Данный подход, рассмотренный с позиций практического применения в ставшей уже классической работе *CIRIA C595* [6], берет за основу выводы, изложенные в [185]. Вариантные решения линейно-упругого анализа адгезионных соединений также находят место в ряде трудов, к которым относятся [186-188].

Характерные примеры распределения касательных и «отрывающих» (перпендикулярных плоскости шва) напряжений, действующих в адгезионном соединении предварительно напряженного углеродоволоконного фибропластика, размещенного на поверхности чугунной балки, имеющие место при различных комбинациях постоянных и временных нагрузок, а также вследствие термических эффектов, представлены на рисунке 6.5 [6]. Важность фактора термического эффекта при анализе работы адгезионных соединений в данном случае подчеркивается тем, что максимальные касательные напряжения, действующие при постоянной нагрузке (П), включающей величину необходимого предвари-

тельного напряжения, достигают величины 20 Н/мм^2, при совместном действии постоянной и временной нагрузок (П+В) — составляют 23 Н/мм^2, а при постоянной и «температурной» нагрузках (П+Т) — превышают 33 Н/мм^2. Таким образом, в рассматриваемом примере увеличение напряжений в адгезионном шве, вызванные временной нагрузкой, оказываются гораздо менее существенными чем те, что определялись термическими деформациями.

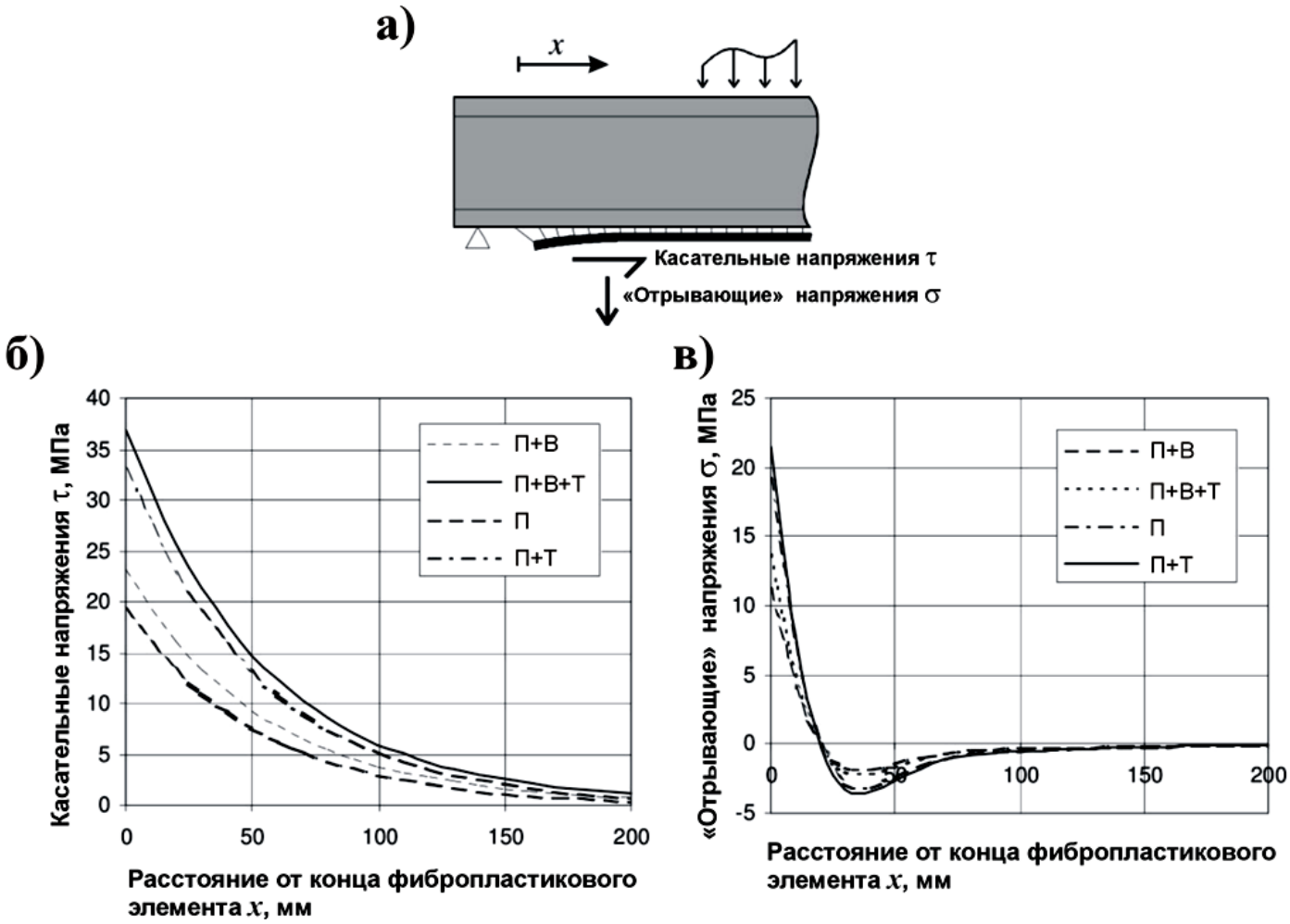


Рис. 6.5. Распределение касательных и «отрывающих» напряжений в адгезионном соединении предварительно напряженного углеродоволоконного фибропластика с чугунной балкой: а — расчетная схема, б — касательные напряжения, б — «отрывающие» напряжения; П — постоянные нагрузки, состоящие из действовавших при усилении, а также возникших при предварительном напряжении фибропластикового элемента, В — временные нагрузки, Т — нагрузки, вызванные влиянием термического эффекта; адаптировано по [6]

При теоретическом превышении приведенной величины, совместно действующих касательных и «отрывающих» напряжений, предела прочности адгезионного соединения, могут использоваться различные конструктивные способы снижения концентрации напряжений, такие как перенос местоположения

концов усиливающих пластин (элементов внешнего армирования) в менее загруженные зоны, изменение контактной ширины или геометрической формы концов элементов усиления. Однако, в тех случаях, когда для снижения степени концентрации напряжений используются решения, предусматривающие клиновидную разделку концов усиливающих элементов или местное утолщение окончаний адгезионных слоев, даже мельчайшее повреждение адгезионного материала может привести к неуправляемому процессу отслоения фибропластикового усиливающего элемента.

Метод линейно-упругого анализа адгезионных соединений, являясь наглядным и удобным для инженерной оценки, тем не мене имеет ряд недостатков, основными из которых является далеко не полное соответствие работы адгезивов идеально упругому материалу, а также не учет влияния дефектов соединений.

6.3.4. Конструктивные решения

Разрушение адгезионных соединений, будучи одной из главных проблем усиления металлических конструкций фибропластиками, явилось предметом довольно большого числа экспериментальных исследований [106]. Разрушение соединений по шву композит-металл в большинстве случаев наблюдаются в зонах с геометрическими нарушениями непрерывности, где имеет место существенная концентрация напряжений в адгезионном слое, обуславливаемая передачей значительных усилий от металлической основы внешним фибропластиковым элементам [189, 190]. Обычно подобное отмечается по концам композитных усилений, а также в местах образования трещин в материале металлической основы.

Наиболее часто используемые решения, позволяющие уменьшить опасность отслаивания композитных элементов в подобных соединениях, предусматривают разделку концов усиливающих элементов со скосом в 45° и односторонним заострением крайней кромки (см. рис. 6.6, а-б), как это делается в аэронавтике [191, 192]. Кроме того в местах возможной концентрации напряжений рекомендуется дополнительная анкеровка поперечными армирующими холстовыми накладками (в случае соответствующей возможности — полная поперечная обмотка конструкции) или устройство механических связей, использующих внешние обжимающие элементы (например, пластины, аналогичные применяемым при предварительном напряжении железобетонных конструкций, см. п. 5.5.2.2) [193].

В случае отсутствия механических креплений, длины анкерных зон фибропластиковых элементов усиления металлических конструкций рекомендуется

назначать не менее 200 мм. При невозможности обеспечения этого условия используется описанная выше разделка концов фибропластиковых элементов, призванная уменьшить концентрацию нормальных и касательных напряжений в наиболее нагруженных зонах клеевых соединений. Некоторые варианты соответствующих конструктивных решений представлены на рисунке 6.6.

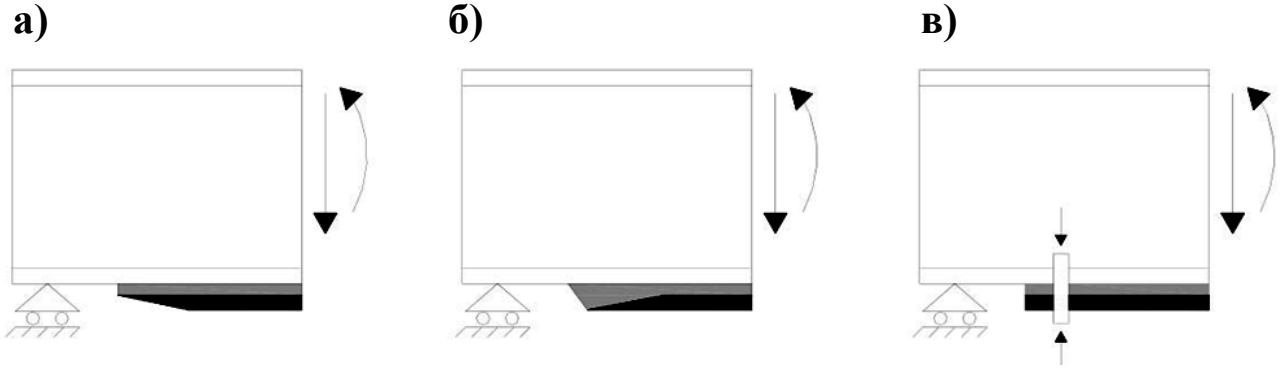


Рис. 6.6. Конструктивные решения анкерных зон элементов фибропластиковых систем усиления, уменьшающие концентрацию отслаивающих напряжений: а, б — предусматривающие уменьшение толщин фибропластиковых элементов, б — предусматривающие механическое обжатие; по [106]

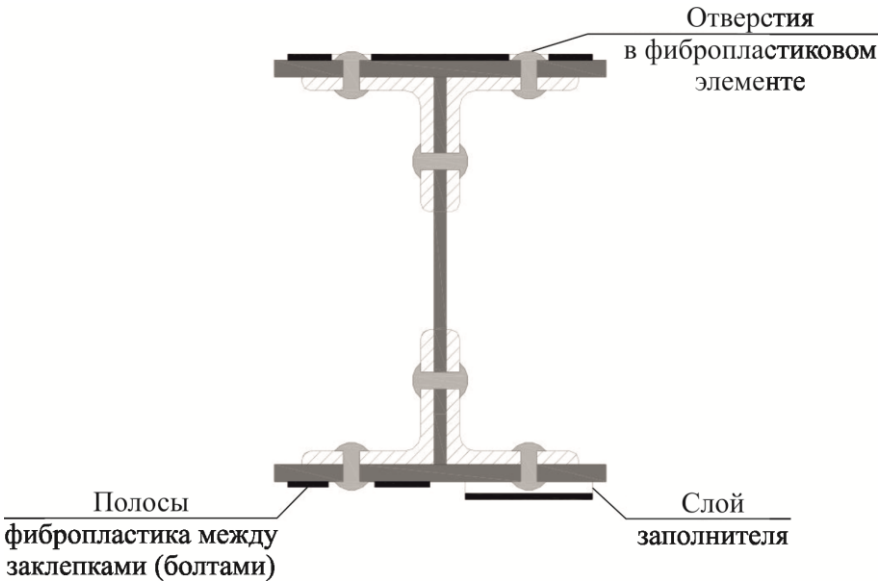


Рис. 6.7. Возможные конструктивные решения размещения фибропластиковых элементов усиления на поверхности болтовых (заклепочных) конструкций; адаптировано по [106]

Дополнительные сложности также вызывает усиление существующих металлических конструкций, использующих болтовые или заклепочные соединения, не позволяющие размещать фибропластиковые элементы по всей рабочей поверхности. В подобных случаях (рис. 6.7) приходится предусматривать от-

верстия в элементах усиления (соответственно уменьшая расчетную ширину сечения фибропластиков), производить усиление отдельными полосами или устанавливать усиливающие элементы на специальные выравнивающие слои полимерных материалов (в последнем случае обеспечение необходимой прочности выполняемых соединений становится несколько затруднительным).

6.3.5. Проблема гальванической коррозии

Долговечность адгезионных соединений фибропластиков с металлами также во многом определяется потенциально возможной проблемой гальванической коррозии, часто являющейся следствием взаимодействия между некоторыми видами армирующих волокон (наиболее часто углеродными) и сталью [194-197]. Однако, в общем случае, адгезионный слой системы фибропластикового усиления, отделяющий армирующие волокна от основного материала конструкции, выступает как изолятор, препятствующий данному процессу. Тем не менее, при нарушении параметров его толщины, существует реальная возможность разрушения материала конструкции.

Для предотвращения гальванических процессов в состав швов, отделяющих углеродные волокна от металлов, вводят стабилизирующие их минимальные толщины элементы, в качестве которых используются стекловолоконные, арамидоволоконные и виниловые ткани малой толщины (обычно около 0,1…0,3 мм) или мелкорубленые волокна данных видов, вводимые в состав адгезионных растворов в процессе смешивания [198-201].

Кроме того рекомендуется избегать использования в соединениях гидролизных смол, выделяющих гидроксильные ионы при обработке антиобледенительными растворами или в условиях морской эксплуатации при наличии щелочных воздействий (pH > 7) [189, 190, 202-204].

Наличие изолирующих волокон, исключающих прямой контакт углерода с металлами, обычно находит учет в расчетах в качестве отдельных армирующих слоев фибропластиковых элементов или посредствам применения обобщающих параметров механических характеристик рассматриваемых адгезионных соединений.

6.4. Современные исследования работы фибропластиковых усилений металлических конструкций

Проводимые в мире исследования усилений металлических конструкций, предусматривающих внешнее армирование фибропластиками элементами, обычно фокусируются на повышении несущей способности, жесткости, пла-

стичности, долговечности в условиях повышенной агрессивности окружающих сред, а также выносливости при циклических нагрузках.

Результаты испытаний различных видов усиленных металлических элементов (включая пролетные строения мостов и колонны) подчеркивают эффективность подобных решений. При этом важнейшими факторами, оказывающими влияние на работу конструкций, являются свойства используемых адгезивов и особенности подготовки усиливаемых поверхностей металлических элементов. Рассмотрим некоторые результаты существующих исследований, определяющих характер работы изгибаемых, циклически загружаемых, а также сжатых элементов.

6.4.1. Изгибаемые элементы

В настоящее время известны результаты ряда экспериментальных исследований стержневых конструкций, воспринимающих изгибающие моменты, проведенных как с целью определения возможности усиления поврежденных металлических элементов, так и свидетельствующих о перспективном увеличении несущей способности неповрежденных образцов металлических балок [6, 106, 110]. При этом в большинстве случаев находили использование углеродоволоконные фибропластики, изготавливавшиеся по месту на основе армирующих тканей и лент, а также соответствующие ламинаты заводской готовности, устанавливавшиеся с использованием эпоксидосодержащих адгезивов или бикомпонентных смол на стальные или чугунные изгибаемые элементы. Кроме того существует некоторый опыт применения усилений в виде мультинаправленных арамидоволоконных аппликаций, использовавшихся в отношении чугунных балок.

Результаты испытаний изгибаемых элементов, усиленных фиброармированными пластиками, свидетельствуют о существенном снижении эффективности данных решений при приложении нагрузок до набора адгезивом расчетной прочности [106].

Ряд испытаний проводился на искусственно поврежденных стальных балках, материал которых по растянутым граням был доведен предварительными загружениями до состояния текучести, а сами конструкции получали остаточные деформации [205]. Эффективное восстановление несущей способности подобных образцов, имевших различную степень текучести материала, осуществлялось с использованием углеродоволоконных ламинатов различной толщины. Подобные же экспериментальные исследования усиленных стальных балок также проводились и при искусственных надрезах средних частей их растянутых полок [206]. Кроме того существует некоторый опыт испытаний угле-

родопластиковых усилений поврежденных балок, демонтированных из состава конструкции эксплуатируемого моста [207].

При испытаниях усилений балок, выполненных с использованием фиброармированных пластиков, рассматривалась и возможность использования припрегов. Были проведены некоторые эксперименты с металлическими балками, усиленными гибридными углеродо-стекловолоконными системами припрегов, устанавливавшимися на металлическую основу по дополнительному адгезионному слою [208]. Слой стекловолокна между углердоармированным слоем и сталью не только препятствовал гальванической коррозии, но и способствовал перераспределению касательных напряжений в адгезионном слое, увеличивая несущую способность соединений. При данных испытаниях балок, имевших коробчатое сечение, осуществлялось предварительное искусственное повреждение растянутых полок надрезом на половину толщины последних.

Испытания на изгиб комбинированных стале-фибропластиковых балок, не имеющих повреждений, описаны в [209, 210]. Указанные исследования анализируют поведение конструкций в период набора прочности адгезионными составами при различных стадиях загружений.

6.4.2. Цилиндрические конструкции

Теоретические исследования напряженного состояния двухслойных стенок металлических цилиндрических резервуаров, испытывающих начальное внутреннее давление и усиливаемых внешними слоями предварительно напряженных фибропластиковых элементов, приводятся в работах [211-214]. Результаты исследований свидетельствуют о перспективности рассматриваемых методов повышения несущей способности металлических конструкций, а также о существенном влиянии на параметры их напряженного состояния температурных эффектов, обуславливаемых значительными отличиями в величинах коэффициентов температурного деформирования металлов и фибропластиков.

Теоретическому рассмотрению работы цилиндрических металлических конструкций, усталостные дефекты которых компенсируются предварительно напряженными фибропластиковыми элементами, посвящена работа [215].

6.4.3. Циклически загружаемые элементы

Исследования действия циклических нагрузок, прикладываемых к усиленным фиброармированными пластиками металлическим конструкциям, рассматриваются в работах [216-221]. Полученные результаты указывают на гораздо больший предел выносливости фибропластиковых усилений в сравнении с аналогичными показателями наиболее распространенных сталей, позволяя та-

ким образом сделать допущение о том, что соединения углеродоволоконных пластиков со сталью, при наличии в адгезивном шве только упругих деформаций, не являются наиболее уязвимыми деталями с точки зрения общей выносливости конструкций [106].

6.4.4. Сжатые элементы

В настоящее время существует результативный опыт усиления сжатых стальных стоек трубчатого сечения со сплошным внешним армированием поперечно направленным углеродоволоконным пластиком [222]. Аналогичные стальные опоры моста, заполненные бетоном и усиленные описанным выше образом, исследованы в работе [223]. Усиления фибропластиковыми ламинатами тонкостенных профилей проанализировано в исследовании [224].

6.5. Осуществление усилений металлических конструкций фибропластиками

Практическое осуществление проектов фибропластикового усиления металлических конструкций включает четыре основных этапа [6]: *оценка состояния усиливаемых конструкций и выбор необходимых фибропластиковых материалов, разработка проектных схем усиления, монтаж внешнего фибропластикового армирования, а также дальнейшее техническое обслуживание усиленных конструкций*.

Отдельного подчеркивания требует то, что фибропластиковое усиление, являясь новой и быстроразвивающейся технологией, в отношении металлических конструкций имеет ряд существенных теоретических и практических неопределенностей, заставляющих в настоящее время осуществлять предварительное экспериментальное подтверждение применяемых технических решений.

6.5.1. Выбор систем усиления

Процесс развития строительных технологий способствовал созданию большого числа строительных объектов, сочетающих разные формы конструкций, выполненные из различных металлических материалов, часть из которых в настоящее время требует усиления.

Так многие исторические здания и сооружений включают в свой состав конструкции, изготовленные из чугуна или стали, содержащие различные дефекты в идее сколов, трещин, коррозионных повреждений и т.п. При этом подобные металлические элементы в большинстве случаев не пригодны для сва-

ривания, а повышенные требования к аутентичному внешнему виду не позволяют вносить в их состав громоздкие болтовые накладки или изменять общую конструктивную схему. В этих случаях одним из наиболее эффективных способов усиления признано внешнее фибропластиковое армирование.

Решение о выборе фибропластиковых систем усиления металлических конструкций обычно обуславливается необходимостью сохранения их первоначального внешнего вида, а также технико-экономической целесообразностью, определяемой упрощением процесса монтажа и снижением затрат на его осуществление, превышающим начальную стоимость используемых материалов. При этом в ряде случаев решающее значение имеет влияние используемых методов усиления на окружающую среду и, особенно, на конечную целостность конструкций зданий и сооружений, составляющих историческое наследие.

Отечественные и международные нормы проектирования металлических конструкций, имея давнюю историю своего создания, хорошо проработаны и способны обеспечить решение абсолютного большинства задач, стоящих перед современным строительством. В тоже время, столь же надежные документы, рассматривающие сочетания металлических и фибропластиковых элементов, практически отсутствуют, что при выборе фибропластиковых систем усиления заставляет учитывать возможную необходимость осуществления предварительного экспериментального обоснования принимаемых конструктивных решений.

К числу немногих практически полезных рекомендаций, позволяющих сделать выбор в пользу фибропластиковых систем усиления, могут быть отнесены [6, 106, 110, 150-154, 225]. Особенности же осуществления адгезионных соединений, являющихся наиболее слабым звеном подобных технологий, нашли отражение в [226, 227]. Самостоятельное применение фибропластиков в строительстве рассматривается в [228, 229].

6.5.2. Подбор совместимых материалов

Ключевым шагом, предшествующим разработке конструктивных схем внешнего армирования металлических конструкций, является определение общей совместимости применяемых материалов с усиливаемыми поверхностями, учитывающее конкретные особенности эксплуатации конструкций.

В качестве материалов, составляющих монтажные поверхности усиливаемых металлических конструкций, могут иметь место чугун, кованное железо и сталь. Данные материалы обладают достаточно рознящимися свойствами: чугун хрупок и демонстрирует характеристики плохо сопоставимые с пластичными сталями, сами же стали, использовавшиеся при создании конструкций исто-

рических зданий и сооружений, очень часто демонстрируют характеристики, сильно отличающиеся от современных.

Опыт успешного усиления фибропластиками металлических конструкций включает достаточно широкий их ряд, охватывающий стойки и балки пролетных строений мостов, кольцевые элементы пазух сводов, парапетные и фонарные столбы, выполненные из чугуна, а также прокатные и составные балки пролетов мостов, трубопроводы, конструкции оффшорных сооружений и судов, изготовленные из стали. Примеры практического усиления элементов исторических конструкций, выполненных из кованного железа, в настоящее время отсутствуют в виду недостаточного понимания влияния рассматриваемых решений на послойную структуру этого материала [6]. Тем не менее, исследования путей фибропластикового усиления конструкций с внешними поверхностями из кованного железа ведутся достаточно активно [153].

Составляющие фибропластиковых систем усиления могут быть разделены на две основные части: фиброармированные полимерные материалы и адгезивы, используемые для соединения с существующими конструкциями.

В большинстве случаев для усиления металлических элементов, эффективность которого зависит от величины модуля упругости вводимого материала, используются фибропластики на основе углеродного волокна. Арамидоволоконные фибропластики находят свое место при необходимости создания соединений, обладающих изоляционными свойствами. Стекловолоконные материалы обычно используются в комбинации с углеродным волокном (например, для внешней защиты систем усиления).

При решении практических задач усиления металлических строительных конструкций наиболее часто применяются адгезивы на основе эпоксидных смол. В случае использования углеродных армирующих волокон, для исключения процессов гальванической коррозии, возникающих при прямом их контакте с металлом, в состав адгезионного слоя обычно вводятся защитные прослойки нейтральных стеклянных или виниловых волокон.

Фибропластиковые составляющие систем усиления металлических конструкций могут быть заводской готовности (различные типы ламинатов) или выполненными по месту с использованием холстовых армирующих материалов.

В системах, использующих предварительно изготовленные фибропластиковые элементы, существует четкое разделение между усиливающим материалом и адгезивом. В фибропластиках, выполняемых «по месту», монтажный адгезив исполняет также функцию матричного полимера, насыщающего пространство между волокнами и участвующего в формировании усиливающего

элемента. В последнем случае отсутствует четкое разделение между адгезивом и матрицей армирующего материала.

6.5.3. Проектирование

Этап проектирования является важной частью процесса фибропластикового усиления металлических конструкций и включает в себя стадии выбора *концептуального решения*, а также *детальной разработки* [6].

6.5.3.1. Концептуальное решение

При выборе концептуального решения фибропластикового усиления могут преследоваться различные конечные цели (рис. 6.8). Усиление изгибаемых конструкций, ставящее целью снижение нормальных или касательных напряжений, как правило, увеличивает местную устойчивость их составляющих частей. Повышение жесткости увеличивает общую устойчивость продольно загруженных элементов. Несущая способность соединений элементов может быть повышена применением местных фибропластиковых аппликаций. Уменьшая величины действующих в усиливаемых элементах напряжений, внешнее фибропластиковое армирование увеличивает выносливость конструкций, воспринимающих циклические нагрузки. Предварительно напряженные фибропластиковые накладки демонстрируют способность эффективно «перекрывать» усталостные трещины в металле, образовавшиеся в местах концентрации напряжений (например, у отверстий болтовых и заклепочных соединений).

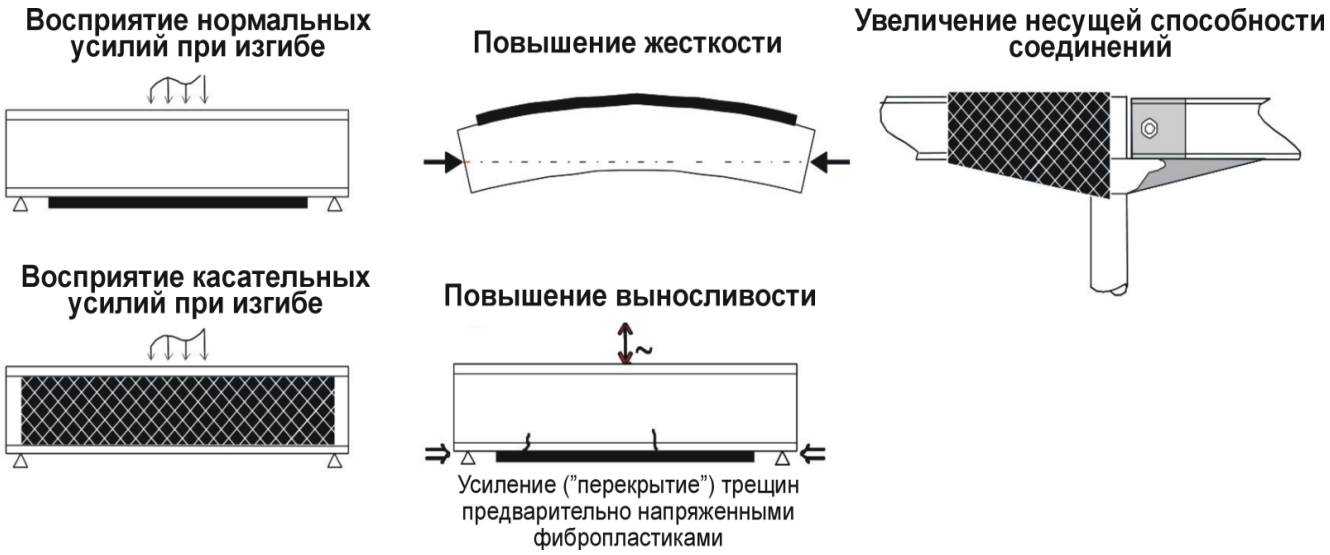


Рис. 6.8. Внешнее фибропластиковое армирование, продлевающее сроки эксплуатации металлических конструкций; адаптировано по [6]

Использование предварительно напряженных фибропластиковых элементов внешнего армирования обнаруживает свою предпочтительность при усилении конструкций из чугуна, отличающихся хрупкостью и очень часто воспринимающих постоянные растягивающие напряжения, существенные в сравнении с общим сопротивлением материала растяжению. Наличие предварительного напряжения, хотя и требует специальных анкерных устройств, позволяет перераспределить постоянные напряжения от чугунных элементов фибропластиковым материалам, что при его отсутствии становится возможным только за счет использования высокомодульного внешнего армирования (например, фибропластиками на основе ультра высокомодульных углеродных волокон).

Стальные строительные конструкции в абсолютном большинстве случаев обладают пластичностью, допускающей применение более низкомодульных фибропластиков, устанавливаемых без предварительного напряжения. Перераспределение напряжений между элементами таких систем обеспечивается при достижении усиливаемым материалом состояний, близких к границе текучести.

Перспективным направлением применения рассматриваемых систем также является использование внешнего армирования для повышения общей и местной устойчивости нематериалоёмких элементов из стальных гнутых тонкостенных профилей.

Качественное кованое железо, используемое в составе элементов исторических конструкций, также демонстрирует достаточную пластичность, однако при этом склонно к расслаиванию (см. выше, п. 6.5.2). В подобных случаях фибропластиковое усиление может сочетаться с использованием дополнительных болтовых и заклепочных соединительных элементов, препятствующих данному процессу.

6.5.3.2. Детальная разработка систем усиления

Детальная разработка систем усиления металлических конструкций (см. рис. 6.9) должна учитывать особенности их рабочих схем, материалов и проектных параметров (например, коэффициентов ответственности и т.п.), а также возможные воздействия окружающих сред (такие как переменность рабочих температур и влажности). Названные факторы определяют количественные характеристики усиливающего материала и условия проверок адгезионных соединений, учитывающих влияние динамических воздействий, а также воздействий приводящих к эффекту усталости материалов. Финальная стадия детальной разработки систем усиления предусматривает решение вопросов противопожарной и антивандальной защиты конструкций.

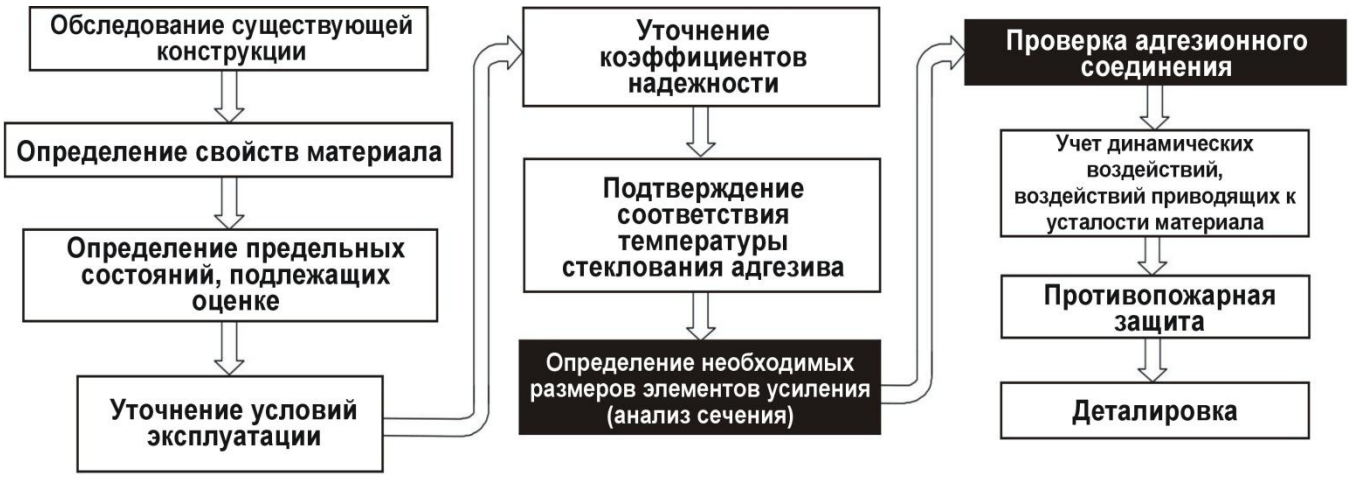


Рис. 6.9. Обзор процесса проектирования фибропластиковых систем усиления металлических конструкций; адаптировано по [6]

Расчет фибропластиковых систем усиления металлических конструкций предусматривает учет не только способности усиливаемых элементов воспринимать внешние силовые воздействия, но и влияния так называемых температурных эффектов, сопряженных с существенными разницами в величинах коэффициентов термического расширения фибропластиков и металлов. Изменения температуры окружающей среды может приводить к значительным дополнительным термическим напряжениям, догружающим элементы данных систем и адгезионные соединения. Во многих случаях влияние циклических температурных деформаций, приводящее к ограничению работоспособности адгезионных соединений, может иметь определяющий эффект на общую несущую способность систем усиления.

Комплексный анализ систем фибропластикового усиления должен учитывать совместную работу всех их компонентов: существующих конструкций, усиливающих фиброармированных материалов и расположенных между ними адгезионных соединений. При этом работа именно адгезионных соединений зачастую определяет несущую способность рассматриваемых систем и окончательный выбор их конструктивных решений.

Анализ сечений элементов призван определить минимальные поперечные размеры вводимых фибропластиковых составляющих, удовлетворяющих условиям требуемой прочности и жесткости усиливаемых конструкций. Его выполнение, основывающееся на традиционной гипотезе плоских сечений, должно учитывать начальные напряжения, действующие в конструкциях на момент монтажа усиливающих элементов. Наличие предварительного напряженно-деформированного состояния не усиленной конструкции требует пошагового анализа работы ее элементов до и после введения фибропластиковых составляющих.

Используемое при расчетах предположение о совместности работы усиливающих фибропластиков и металлических элементов конструкций определяется отсутствием сдвига по адгезионному соединению, расположенному между ними. Таким образом, важное значение имеет проверка прочности последнего.

6.6. Особенности монтажа, эксплуатации и технического обслуживания фибропластиковых систем усиления металлических конструкций

6.6.1. Порядок монтажа

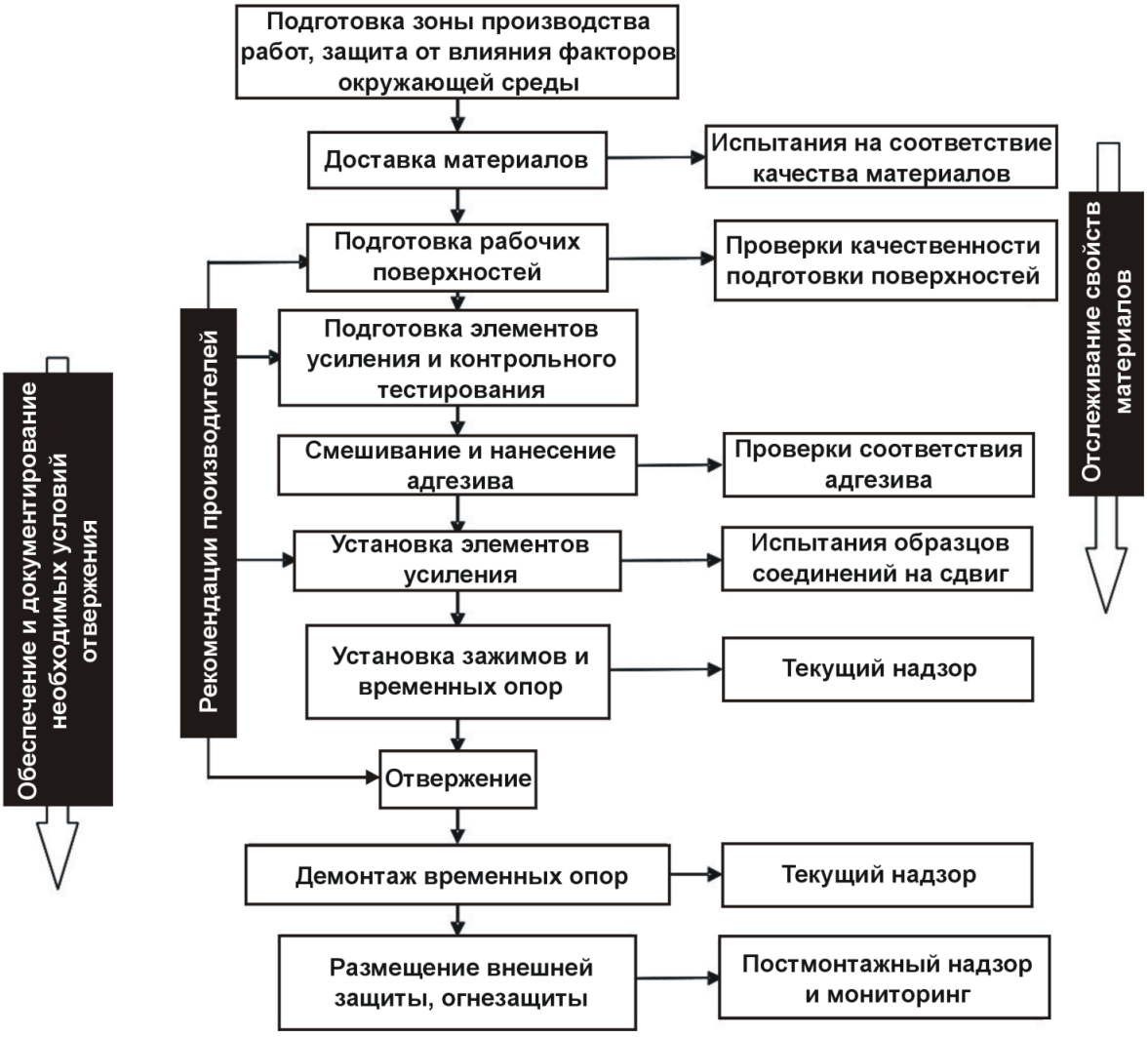


Рис. 6.10. Процесс монтажа внешнего фибропластикового усиления металлических конструкций; адаптировано по [6]

Качественный монтаж крайне важен для обеспечения работоспособности систем внешнего фибропластикового усиления металлических конструкций. Правильное планирование соответствующих работ, обеспечение необходимым оборудованием, создание нормативных условий производства работ (темпера-

туры, влажности и отсутствия пылевого загрязнения окружающей среды) и, особенно, должная подготовка производственного персонала являются определяющими для качественного монтажа.

Рекомендованный порядок выполнения работ [6], обобщенный на рисунке 6.10, включает, в том числе, и контрольные процедуры, гарантирующие правильность осуществления монтажных работ.

6.6.2. Подготовка поверхностей усиления

Правильная подготовка усиливаемых поверхностей является одним из главных требований, обеспечивающим необходимые адгезионные связи между фибропластиковыми композитами и материалом основы металлических конструкций.

Подготовка соответствующих поверхностей усиления включает следующие этапы [106]:

— полную очистку, удаляющую грязь, слои предыдущей окраски, слои основного материала конструкции, имеющие нарушенную структуру, а также шлаки, окалину и продукты коррозии. С особой осторожностью очищаются поверхности хрупких материалов (чугуна, «старых» сталей и т.п.), при этом исключаются возможные ударные воздействия рабочим инструментом или механизмами (например, ударными дрелями),
— обезжиривание рабочих поверхностей металлических конструкций растворителями, тщательно подбираемыми из соображения исключения распространения («расплывания») жирового загрязнения, обычно поставляемыми производителями систем усиления,
— абразивную обработку, с возможным применением сухой или влажной пескоструйной очистки, обнажающей химически активную поверхность основного материала конструкции (очистку продуктов шлифования рекомендуется выполнять с использованием только воды),
— высушивание подготавливаемых поверхностей: в тех случаях, когда по окончании абразивной обработки и очистки обрабатываемая поверхность металлических элементов остается влажной, требуется немедленное ее высушивание, исключающее возможное образование поверхностных слоев окиси или ржавчины,
— протравливание кислотными растворами, используемое для удаления слоев окисей с поверхностей элементов, изготовленных из гальвани-

зированных или нержавеющих сталей, сопровождаемое последующей нейтрализацией продуктов химической реакции,

— грунтовку, применяемую для обеспечения совместимости подготавливаемых металлических поверхностей с фибропластиковыми материалами. Первый слой адгезионных смол наносится максимально быстро после очистки рабочей зоны (для металлических элементов рекомендуется его выполнение в период, не превышающий двух часов),

— заполнение неровностей: незначительные неровности заполняются грунтовочными составами и последующими слоями адгезионных смол, существенные дефекты поверхности (например, вызванные сильной коррозией или механическими повреждениями), выравниваются специальными пастами.

6.6.3. Контроль качества в процессе устройства систем усиления

Контроль качества в процессе устройства систем фибропластикового усиления металлических конструкций может производиться *частично разрушающими* и *неразрушающими* методами [106].

При использовании фибропластиковых элементов заводской готовности механические характеристики композитов гарантируются фирмой-производителем. Аналогичные параметры фибропластиковых элементов, изготавливаемых непосредственно по месту усиления, требуют определения при проведении специальных лабораторных испытаний. Кроме того, в независимости от способа изготовления фибропластиковых систем, производятся испытания их образцов на отслаивание от поверхностей усиливаемых конструкций.

При поведении частично разрушающих испытаний отдельно готовятся контрольные зоны поверхности конструкции, усиленные фиброармированными композитами [106]. Общая площадь контрольных зон принимается не меньшей 0,5% площади усиливаемой поверхности и не менее 0,1 м^2. Данные зоны делятся на фрагменты с размерами 500×200 мм, в пределах которых производится размещение испытываемых элементов фибропластикового усиления. Тестируемые образцы выполняются из материала и по технологии, соответствующих применяемой системе усиления конкретной конструкции, в условиях, отвечающих реальному производству работ. Контрольные зоны равномерно распределяются по поверхности конструкции так, чтобы проведение предварительных испытаний не ухудшало дальнейшую работоспособность усиливаемых элементов.

Частично разрушающие методы. Испытания на отрыв и сдвиг выполняются при определении адгезионной прочности соединений фибропластиков со строительными конструкциями. Частично разрушающее тестирование производится на контрольных образцах, по возможности вне зон критического усиления. Количество тестов назначается из расчета: одно испытание на 5 $м^2$ усиливаемой поверхности, но не менее 2-х испытаний каждого типа [106].

Испытания на отрыв позволяют адекватно оценивать подготовку усиливаемой поверхности и контролировать совместимость выбранного адгезива с основным материалом конструкции. Выполняются с использованием круглой стальной пластины, имеющей толщину и диаметр не менее, соответственно, 20 и 40 мм. При этом фибропластиковое усиление предварительно по кругу обрезается цилиндрическим сверлом, вращающимся со скоростью более 2500 оборотов в минуту. Особое внимание уделяется исключению разогрева композитных элементов в процессе обрезки.

Испытания на сдвиг дают возможность судить о качестве соединения фибропластиков с основным материалом конструкции. Проведение данных испытаний становится возможным только при доступности передачи нагрузки на фрагмент фибропластика в его плоскости, без появления нормальных напряжений, направленных перпендикулярно адгезионному шву.

Испытания на отрыв при кручении выполняются с помощью специального оборудования, передающего на соединение крутящий момент. С этой целью могут использоваться круглые стальные пластины, аналогичные применяемым при обычных испытаниях на отрыв, нагрузка на которые, направленная перпендикулярно плоскости шва, прикладывается одновременно с вращением пластины вокруг своей оси.

Неразрушающие методы. В настоящее время разработаны многообразные неразрушающие методы, позволяющие выявлять различные виды дефектов соединений фибропластиков с элементами металлических конструкций. На практике неразрушающие методы обычно применяются для выявления пустот в адгезионном слое. Однако по сей день не существует подобных тестов, способных идентифицировать ослабления несущей способности сформировавшихся клеевых связей, обусловленные наличием коррозии или жира на усиливаемых поверхностях строительных конструкций.

Неразрушающее тестирование может использоваться для определения однородности соединений композитных элементов и предусматривает исследование их контактных поверхностей различными приборами, минимальная раз-

решающая способность которых зависит от особенностей конкретного изучаемого фрагмента (см. табл. 6.1).

Рассмотрим ниже некоторые существующие неразрушающие методы контроля соединений фибропластиковых элементов систем усиления строительных конструкций.

Таблица 6.1

Допустимая минимальная разрешающая способность приборов, используемых для неразрушающего тестирования соединений фибропластиков с металлическими конструкциями; по [106]

Передача касательных напряжений по шву	**Возможные виды тестируемых фибропластиковых усилений**	**Неразрушающее тестирование**	**Шаг производимых измерений**	**Минимальная разрешающая способность (размеры выявляемых дефектов)**
Отсутствует	Охватывающие усиления, за исключением зон нахлесток однослойных аппликаций	Необязательное	250 мм	3,0 мм
Слабая	Центральные зоны обширных в плане усилений строительных конструкций	Необязательное	250 мм	3,0 мм
Умеренная	Центральные зоны продольных усилений изгибаемых элементов	Рекомендуемое	100 мм	0,5 мм
Критическая	Анкерные зоны; нахлестки армирующих слоев; различные усиления элементов, воспринимающих действие поперечных сил; зоны размещения дополнительных механических креплений; зоны со значительными неровностями и трещинами материала усиливаемой конструкции	Требуемое	50 мм	0,1 мм

Высокочастотные ультразвуковые исследования позволяют определять дефекты соединений, местные отслаивания, а также присутствующие пустоты в адгезионном слое, изменяющие время прохождения ультразвуковых волн. Использование данного метода возможно при наличии специально настроенного оборудования и подготовленного персонала.

Исследования вынужденными акустическими колебаниями позволяют определять дефекты подобно ультразвуковым исследованиям, отличаясь от них использованием более низких импульсных частот.

Исследования акустической эмиссии позволяют выполнить оценку внутренних повреждений элементов, воспринимающих нагрузки, путем прослушивания и фиксации шумов, генерируемых в процессе образования трещин или отслаиваний, распространяющих упругие волны. Методы акустической эмиссии относится к пассивным, активизирующим сигнальные системы в случае возникновения и развития соответствующих дефектов. Данные исследования являются эффективными для выявления дефектов, как в составе самих композитных элементов усиления, так и при фиксации процессов их отслаивания от основного материала строительной конструкции.

Термографические исследования позволяют фиксировать незначительные температурные отличия на поверхности конструкций, выделяя места прерывания тепловых потоков, соответствующие положению пустот в материале композитов или адгезивов. Данный метод может применяться как при пассивном, так и при активном контроле дефектов, основываясь на естественном изменении температуры окружающей среды или на искусственном нагреве и охлаждении поверхностей элементов. Подобные исследования эффективны только для фибропластиковых систем, отличающихся низкой температурной проводимостью, и обычно малоприменимы при использовании углеродных или металлических армирующих волокон. При этом важным ограничением является то, что разогрев конструкций, используемый при термографических исследованиях, не должен превышать температуру стеклования элементов обследуемых фибропластиковых систем усиления.

6.6.4. Эксплуатация

Также как и любые строительные конструкции, металлические элементы, претерпевшие фибропластиковое усиление, требуют контроля технического состояния, как по окончании производства работ, так и через регулярные промежутки времени в течение всего срока их эксплуатации. При этом должны контролироваться нормативные условия эксплуатации, выявляться потенциальные дефекты и производиться необходимые ремонтные работы.

Усиленные фибропластиками металлические конструкции подвергаются мониторингу, проводимому в обычном порядке. Важным при освидетельствовании таких конструкций является привлечение специалистов, имеющих специальную подготовку в отношении использования фибропластиковых систем усиления [106], способных правильно оценить опасность возникающих дефектов (например, незначительного начального отслаивания в адгезионном слое, особенно у концов усиливающих элементов, признаков деградации матриц композитов и гальванической коррозии металлических поверхностей по сторо-

нам адгезионных соединений, механических повреждений фибропластиковых материалов, дефектов крепежных элементов, пропускаемых через усиливающие элементы и т.п.).

При инспекциях могут использоваться неразрушающие способы приборного обследования конструкций. Однако при этом следует учитывать то, что в настоящее время отсутствуют универсальные методы такого контроля, позволяющие судить обо всех возможных дефектах рассматриваемых усилений.

6.6.5. Техническое обслуживание

Композитные фиброармированные материалы обычно не требуют специального технического обслуживания. При процессе утраты их поверхностных матричных слоев, происходящем вследствие абразивных воздействий или под влиянием факторов окружающей среды, повреждения могут быть восстановлены нанесением совместимых смол.

Рекомендуется осуществлять периодическое обновление окраски конструкций до появления признаков ее разрушения, что призвано снизить необходимость соответствующей зачистки поверхностей при техническом обслуживании [106]. Дальнейшее проведение пескоструйной очистки усиленных конструкций должно предусматривать мероприятия по адекватной защите фибропластиковых элементов.

6.7. Примеры фибропластикового усиления металлических конструкций

Усиление металлических конструкций исторических сооружений фибропластиковыми элементами в настоящее время производится относительно часто, поэтому рассмотрим только некоторые, наиболее известные их примеры.



Рис. 6.11. Лондонский м*ост Тауэр Бридж* (*Tower Bridge*, Великобритания); по [54]

***Мост Тауэр Бридж* (*Tower Bridge*, Великобритания).** Одним из наиболее известных объектов, подвергнутых подобному усилению, является мост *Тауэр бридж* в Лондоне (рис. 6.11). По истечении многих лет эксплуатации ряд металлических элементов моста включали трещины и пораженные коррозией участки поверхности несущих элементов, потребовавшие соответствующего восстановления, осуществленного с использованием фибропластиков, изготавливавшихся по месту на основе углеродоволоконных полотен *S&P C-Sheet 240* [54].

В настоящее время в северной Америке и западной Европе усилению углеродоволоконными пластиками подверглась достаточно большая группа исторических мостов с комбинированными конструкциями пролетных частей, сочетающими металлические балки или фермы с каменными или бетонными настилами. Остановимся на некоторых из них более подробно.

***Мост Тикфорд Бридж* (*Tickford Bridge*, Великобритания)** [230] был построен с использованием чугунных элементов в 1810 году *Томасом Вилсаном* возле города *Ньюпорт Пагнелл* (*Newport Pagnell*) и представляет собой сооружение, состоящее из шести ажурных пролетных конструкций длиной 18,29 м, поддерживающих с помощью поперечных арок, пролетом 7,2 м, каменный настил (рис. 6.12). Мост, испытывающий интенсивное автомобильное движение, подвергся фибропластиковому усилению с использованием углеродоволоконных армирующих тканей в 1999 году. При этом преследуемая цель предполагала снижение величин напряжений, действующих в чугунных элементах. Выбор способа реабилитации моста диктовался возможностью быстрого усиления криволинейных поверхностей его несущих конструкций. Для исключения возможных процессов гальванической коррозии металла в швы между внешним углеродным армированием и основным материалом конструкций помещались тонкие листы полиэстера. В общей сложности на несущие элементы было нанесено по 14 слоев армирующей ткани, а полученные толщины фибропластиковых элементов усиления составили около 10 мм. Цвет использовавшихся материалов соответствовал естественному цвету существующих конструкций, что позволило добиться практической незаметности внесенных изменений.



Рис. 6.12. Мост *Тикфорд Бридж* (*Tickford Bridge*, *Newport Pagnell*, Великобритания), чугунные конструкции которого претерпели усиление углеродоволоконными фибропластиками на основе армирующих тканей; по [6]

***Мост Хайт Бридж* (*Hythe Bridge, Oxford*, Великобритания)** [231] был построен в 1874 году над рекой *Темза* и состоит из двух пролетов, каждый из которых имеет длину в свету 7,8 м (см. рис. 6.2). Пролетное строение моста состоит из 8 перевернутых Т-образных чугунных балок и каменного настила, выполненного в виде поперечных арочных сводов, поддерживающих дорожное полотно. В 2000-м году, с целью исключения появления дополнительных растягивающих напряжений в балках при повышении автодорожной нагрузки до 400 кН, мост претерпел фибропластиковое усиление (рис. 6.13) [106]. Чугунные балки моста были предварительно напряжены углеродоволоконными ламинатами заводской готовности (по 2 штуки по сторонам сечения). Также при усилении использовались армирующие углеродоволоконные ткани.



Рис. 6.13. Усиление перевернутых Т-образных чугунных балок моста *Хайт Бридж* (*Hythe Bridge, Oxford*, Великобритания), поддерживающих каменные арочные своды, выполненное предварительно напряженными углеродоволоконными фибропластиками; по [106]

При создании предварительного напряжения применялись неподвижные и подвижные анкерные устройства, домкраты и жесткие рамы. Неподвижные анкерные устройства использовались для гарантирования необходимого соединения композитных элементов с поверхностью конструкций и принимали на себя усилия, вызванные значительной концентрацией напряжений по концам ламинированных пластин. Усилия предварительного напряжения передавались на фибропластиковые элементы подвижными анкерными устройствами, соединенными с домкратами, рамы которых фиксировались болтами на поверхностях конструкций. Набор прочности адгезионными соединениями происходил после придания необходимой величины предварительного напряжения усиливающим

элементов. Примененная технология обеспечила точную выверку величин напряжений, передаваемых отдельными ламинатами.

***Мост Слэттокс Кэнал Бридж* (*Slattocks Canal Bridge*, Великобритания)** [231] был построен в 1936 году над каналом *Рочдэйл Кэнал* (*Rochdale Canal*). Его однопролетная конструкция, с длиной между опорами 7,6 м, включает 12 стальных двутавровых балок, нижние грани которых были усилены в 2000 году двумя пластинами углеродоволоконных ламинатов толщиной 4 мм и шириной 100 мм (рис. 6.14). В результате удалось добиться увеличения полезной нагрузки на мост с 170 до 400 кН [106].



Рис. 6.14. Усиление стальных двутавровых балок моста *Слэттокс Кэнал Бридж* (*Slattocks Canal Bridge*, Великобритания) углеродоволоконными ламинатами; по [106]

***Мост Кинг Стрит Бридж* (*King Street Bridge, Mold,* Великобритания)** [232] был построен в 1870 году как железнодорожный. Впоследствии претерпел переоборудование и эксплуатируется для пропуска автомобильного транспорта. Конструкция сооружения включает 6 чугунных балок, поддерживающих каменный настил, выполненный в виде поперечных арочных сводов с пролетами до 2,0 м. В ходе реконструкции, проведенной в 1900 году, пролеты балок были уменьшены с 8,9 м до 5,9 м путем устройства дополнительных опор. Фибропластиковое усиление конструкций, проведенное в 2000 году, позволило восстановить первоначальный дизайн сооружения. На нижние грани балок было установлено по две пластины углеродоволоконных ламинатов с шириной 170 мм и толщиной 33 мм. Ламинированные пластины заводской готовности располагались в продольном направлении (рис. 6.15), в то время как в поперечном направлении между ними и основным материалом конструкций были размещены тонкие прослойки стекловолоконных ламинатов, призванные исключить галь-

ваническую коррозию материала. Усиление конструкций производилось в их рабочем положении с использованием шурупов. Полезная нагрузка на мост была увеличена до 400 кН [106].



Рис. 6.15. Усиление чугунных балок автодорожного моста *Кинг Стрит Бридж* (*King Street Bridge, Mold*, Великобритания), поддерживающих каменный арочный настил, выполненное с помощью пластин углеродоволоконных ламинатов; по [6]

***Мост Эктон Бридж* (*Acton Bridge, London,* Великобритания)** [233, 234], являясь железнодорожным мостом лондонского метро, имел конструкцию, включающую деревянный настил, опертый на стальные балки. Усиление, осуществленное в 2000 году, преследовало цель снижения напряжений в пролетных частях балок от эксплуатационных нагрузок примерно на 25%, что повышало общую выносливость этих конструкций, подвергавшихся интенсивным циклическим нагружениям, и позволяло продлить срок эксплуатации всего сооружения. Усиливающие углеродоволоконные элементы были размещены на растянутых полках несущих балок. Дальнейший мониторинг конструкций в процессе эксплуатации подтвердил эффективность примененного решения.

***Мост Короны* (*Corona Bridge*, Италия)** [235-240], построенный в 1850-1851 годах, состоит из трех чугунных арок с пролетами по 4 м. Данное сооружение было первым чугунным пешеходным мостом, построенным в *Венеции*. При реставрации 2001 года, для защиты от дальнейшего разрушения несущих элементов, а также для снижения уязвимости к термическим и случайным ударным воздействиям, чугунные арки и декоративные элементы были усилен-

ны арамидными трехнаправленными тканями и моноориентированными армирующими лентами. Усиление осуществлялось по боковым поверхностям арок с использованием вяжущих смол серого цвета, позволивших сохранить аутентичный внешний вид конструкций (рис. 6.16).



Рис. 6.16. Усиление чугунных арок *моста Короны* (*Corona Bridge*, Италия) арамидоволоконными тканями и лентами; по [106]

***Автомобильный мост Кристин Крик Бридж* (*Christina Creek Bridge, Delaware*, США)** [241], отличающийся комплексной стале-железобетонной конструкцией пролетного строения, претерпел фибропластиковое усиление в 2000 году. При этом факультетом транспорта *Делаварского университета* (*Department of Transport of the University of Delaware*, США), разработавшим проект данного усиления, преследовались вполне научные цели исследования работы усилений в составе конструкций, не имеющих повреждений. Конечной целью было изучение эффективности использования фибропластиковых композитов в составе широко распространенных в США комплексных стале-железобетонных сооружений. Кроме этого решались дополнительные задачи получения подтверждения долговечности применяемых адгезивов, подвергающихся воздействиям реальных условий эксплуатации, а также определения усталостных свойств клеевых соединений.

Конструкция моста, состоящая из трех балок пролетом 35 м, была усилена углеродоволоконными ламинатами заводской готовности длиной по 1,5 м, последовательно установленными по нижним граням растянутых полок стальных элементов в количестве 6 параллельных полос на каждую балку (рис. 6.17). Соединялись ламинаты в шахматном порядке, а их концы, для уменьшения концентрации напряжений в клеевом шве, разделывались под косой стык, выполняемый под 45°. Устанавливались ламинаты по двухкомпонентному адгези-

ву, наносимому пульверизаторным способом. Исключение гальванической коррозии достигалось размещением стекловолоконной ткани в составе клеевого шва между углеродоволоконным ламинатом и усиливаемой поверхностью.



Рис. 6.17. Усиление нижних граней комплексных стале-железобетонных балок автомобильного моста *Кристин Крик Бридж* (*Christina Creek Bridge, Delaware*, США) углеродоволоконными ламинатами; по [106]

Принятое решение позволило увеличить расчетную жесткость конструкций на 11,6% и уменьшить их фактическую деформативность на 10% [106].

***Сооружение станции Шадвел лондонского метро* (*Shadwell Station, London Underground,* Великобритания).** Чугунные распорные стойки несущих конструкций одного из туннелей станции *Шадвел* лондонского метро [106, 242, 243], включавшие 18 элементов крестообразного сечения (рис. 6.18), были усилены наклейкой на их поверхностях 26 слоев высокомодульной углеродоволоконной ткани. Достигаемая эффективность усиления оценивалась при предварительных испытаниях аналогичных стоек, а полученные результаты свидетельствовали о повышении несущей способности конструкций примерно на 40% [106].



Рис. 6.18. Усиление чугунных распорных стоек несущих конструкций сооружения станции *Шадвел* лондонского метро (*Shadwell Station, London Underground*, Великобритания) с помощью фибропластиков на основе 26-ти слоев углеродоволоконной ткани; по [6]

7. Фибропластиковое усиление деревянных конструкций

7.1. Современные тенденции

Вопросы расчета и проектирования строительных конструкций, предусматривающих внешнее армирование древесины фибропластиковыми элементами (впрочем, как и металло-фибропластиковых конструкций), изучены гораздо хуже, чем вопросы внешнего и внутреннего армирования композитными материалами бетонных, железобетонных и каменных конструкций. Международно-признанные практические рекомендации на эту тему в настоящее время отсутствуют. В качестве документа, делающего попытку некоторого обобщения накопленной теоретико-практической базы, может быть назван [105], являющийся, по признанию его авторов, только первым шагом к формированию необходимых рекомендаций.

Применению внешнего армирования древесины фиброкомпозитными материалами предшествовало использование различных техник усиления, направленных на увеличение прочности и жесткости деревянных элементов и характеризовавшихся разной степенью эффективности [244-254]. С этой целью применялись различные элементы из модернизированной древесины, из стальных и алюминиевых стержней и пластин, устанавливаемых как без предварительного напряжения, так и с его использованием. Позже достаточно широкое внедрение получили клееные деревянные конструкции, армированные стальными и фибропластиковыми стержнями, устанавливаемыми в процессе изготовления строительных элементов. Несмотря на то, что данные техники усиления давали вполне приемлемые результаты, только некоторые из них нашли относительно широкое распространение и коммерциализацию. Тому множество причин, включающих сложности массового изготовления, высокую стоимость, лимитированность эффективного применения, необходимость наличия специально подготовленного персонала и т.п. Сдерживающим фактором также являлась ограниченная распространенность практических рекомендаций по безопасному и эффективному использованию таких технологий, в необходимой степени учитывающих изменчивость свойств материалов и соединений при длительной эксплуатации.

С этих точек зрения, фиброармированные композитные материалы обладают рядом преимуществ [255], являясь удобными при монтаже и практически универсально применимыми как при усилении существующих конструкций, так и при изготовлении новых, обеспечивают простое и эффективное решение

многих технических проблем. Данные преимущества в последние десятилетия повлекли достаточно быстрое и относительно широкое внедрение техники усиления фиброармированными пластиками железобетонных, бетонных и каменных конструкций.

Аналогичное распространение рассматриваемых технологий в отношении деревянных конструкций сдерживается двумя основными факторами, к которым относится фактическое отсутствие соответствующих норм и рекомендаций расчета, а так же, как это не прискорбно признавать, существующее снижение практического интереса к древесине, как к конструкционному материалу. Сужающийся рынок деревянных конструкций вбирает инновации гораздо медленнее, в большей степени акцентируясь на необходимости усиления и восстановления уже существующих образцов. В тоже время деревянные конструкции, используемые в различных комбинациях с фибропластиковыми усиливающими элементами, обладают преимуществами древесины (например, низким весом и относительно высокой приведенной жесткостью) и могут быть лишены ряда ее недостатков (например, выраженной механической гетерогенности или наличия выраженных начальных дефектов).



Рис. 7.1. Пример усиления элементов деревянных стропильных систем фибропластиковми ламинатами заводской готовности, наклеиваемыми на внешних поверхностях конструкций; по [135]

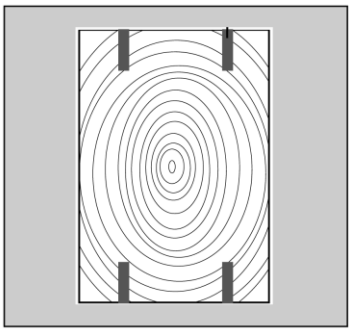


Рис. 7.2 Пример усиления сечения деревянного элемента фибропластиковми ламинатами заводской готовности, размещаемыми во внутренних штабах

Для усиления деревянных конструкций в настоящее время достаточно широко используются фибропластики на основе как стеклянных, так и углеродных волокон. При этом применяются одно- и двунаправленными армирующими лентами и полотнами, размещаемыми на поверхностях конструкций, а также фибропластиковыми ламинатами заводской готовности, наклеиваемыми на их внешние поверхности (рис. 7.1) или во внутренние штрабы (рис. 7.2).

Внедрение решений, сочетающих древесину с фиброармированными пластиками, также несколько усложняется особенностями данных материалов, к которым относятся различное деформирование при температурно-влажностных воздействиях, а также отличающееся поведение при воздействиях огня.

7.2. Области рационального использования

Теоретически почти все проблемы, возникающие при использовании деревянных строительных конструкций, могут быть решены соответствующим введением фиброармированных композитных элементов. На практике же, наиболее часто применяются наименее сложные решения, предусматривающие простое увеличение расчетных характеристик конкретных сечений элементов, отсутствие модификации которых привело бы к компромиссу при проектировании всей конструкции. В большинстве случаев достигаемые при таком вмешательстве результаты вполне компенсируют высокую начальную стоимость фибропластиковых материалов.

Усиление деревянных строительных конструкций фиброармированными пластиками наиболее эффективно при восстановлении работоспособности поврежденных элементов (т.е. при реабилитации конструкций), а также при увеличении несущей способности и жесткости неповрежденных конструкций, к эксплуатации которых предъявляются новые, повышенные требования.

Наибольшее распространение рассматриваемые методы нашли в отношении деревянных элементов, воспринимающих преимущественный изгиб (балки, отдельные элементы рам и ферм с внеузловой нагрузкой). В этих случаях системы усиления могут включать армирующие пластины, ткани и ленты различных композитных основ, устанавливаемы в соответствии с критериями увеличения прочности, жесткости и пластичности деревянных элементов.

Еще одним направлением эффективного использования фибропластиковых элементов является повышение пространственной жесткости отдельных конструкций и целых сооружений. Многие исторические деревянные сооружения, сохранившиеся в относительно неплохом состоянии, обладают довольно низкой пространственной жесткостью и неспособны воспринимать существенные горизонтальные воздействия, что особенно опасно в сейсмических рай-

онах. Решение указанной проблемы становится возможным без увеличения веса и толщины конструкций путем простого раскрепления плоских настилов полов и каркасов стен перекрестными системами связевых фибропластиковых элементов, выполняемых с использованием армирующих лент или ламинатов [256-259].

Результативное использование фибропластики находят и при усилении соединений деревянных элементов, снижая риск их разрушения под действием напряжений, перпендикулярных направлению волокон древесины. Кроме того использование фиброармированных пластиков позволяет снизить габариты соединений деревянных конструкций и увеличить их выносливость при действии циклических нагрузок. В настоящее время практика проектирования имеет много примеров подобных решений, предусматривающих передачу осевых, изгибающих и сдвигающих усилий.

Существуют и некоторые ограничения при использовании композитных усилений в отношении деревянных конструкций. Так при внешнем охватывающем армировании сжатых деревянных элементов (в отличие от бетонных стоек, для которых получают эффективное усиление) достижение долгосрочного увеличения несущей способности существенно осложняется процессами усадки и набухания древесины, протекающими при возможных температурно-влажностных воздействиях. По этой причине эффективность охватывающего поперечного армирования деревянных элементов фибропластиковыми материалами считается сомнительной [105]. Более того, охватывающее усиление, как правило, оказывается не приемлемым для деревянных конструкций исторических сооружений (в отличие от бетонных, каменных и металлических конструкций), поскольку значительно искажает их аутентичный внешний вид и плохо поддается неразрушающему демонтажу.

Не рекомендуется также использование усилений композитными материалами в отношении соединений деревянных конструкций, податливая работа которых является необходимой для восприятия или компенсации температурно-влажностных деформаций древесины.

7.3. Специфические особенности

Выбор типа фибропластикового усиления, его геометрии, а также приемлемых схем соединений, как правило, оказывается невыполнимым по отдельности, а требует общего решения на этапе комплексного проектирования. При этом на практике принятие необходимого конструктивного решения может столкнуться с рядом специфических сложностей. Остановимся ниже на наиболее важных из них.

Соединения. Фиброармированные пластиковые материалы могут соединяться с древесиной с применением различных типов соединений, включающих гвоздевые, болтовые, а также использующих шурупы или адгезивы. Принятый тип соединений определяет характер передачи усилий, конечную жесткость всей конструкции и особенности эксплуатации, входящих в нее материалов.

Наиболее частое использование при усилении деревянных конструкций фибропластиками находят адгезионные соединения. Причина тому в их универсальности и хорошей совместимости полимерных матриц композитов с наиболее распространенными адгезионными растворами. При этом получение качественного соединения древесины с фибропластиками требует учета ряда требований, среди которых одним из главных является адекватная подготовка соединяемых поверхностей.

В целом, обеспечение качества адгезионных соединений композитов с древесиной требует выполнения следующих условий:

— адгезив должен иметь способность впитываться в нужном объеме в поверхность древесины и обладать реологическими свойствами, подобными свойствам склеиваемых материалов,
— поверхность древесины должна иметь подготовку, обеспечивающую ее ровность и однородность,
— толщина адгезионного слоя должна быть оптимальной в соответствии с рекомендациями производителей.

В то время как первое и третье требования выполняются простым подбором адгезива, тип которого совместим с древесиной, а также соблюдением указаний его производителя, второе требование может вызвать определенные сложности (особенно при усилении существующих конструкций, имеющих интенсивные загрязнения или неровности поверхностей).

Древесина. Неоднородность и анизотропия, характеризующие древесину, влияют на выбор и расположение соединений с усиливающими элементами. Древесина, имея четкую ориентацию своих волокон (обычно в направлении близком оси несущего элемента), демонстрирует относительно низкую сопротивляемость действию напряжений, направленным поперек им. Влияние этих напряжений должно минимизироваться выбором соответствующих конструктивных форм соединений. Проектирование усилений также требует предварительной оценки конкретных особенностей усиливаемой древесины, таких как ее сорт, наличие пороков, влажность и степень сохранности.

При выборе конструктивных схем усилений и расчете деревянных элементов, находившихся в длительной эксплуатации или имеющих существенные

несовершенства, следует учитывать то, что рассмотрение их по умолчанию как однородных с постоянными поперечными сечениями, является не всегда оправданным. Более того, наличие чрезмерных пороков и несовершенств древесины может привести к непредсказуемой реакции соединений с фиброкомпозитами.

Фиброармированные пластики. Комплексная структура фиброкомпозитных материалов является следствием ее оптимизации производителями для достижения необходимой совместной работы входящих в нее составляющих. В связи с технологическими особенностями изготовления, такие материалы чаще всего выпускаются в виде тонких плоских элементов, в большинстве случаев вполне приемлемых для осуществления решений по усилению деревянных элементов. При этом при выборе таких конструктивных решений требуется учет того, что композитные элементы, включающие в состав армирующие волокна, ориентированные в определенном направлении, прекрасно воспринимают растягивающие, а при определенных условиях и сжимающие усилия, действующие в направлении осей их волокон, но неспособны воспринимать напряжения, действующие поперек им. И наоборот, композиты с разнонаправленными волокнами, обычно изготавливаемые в составе нескольких слоев последних, отличаются работоспособностью в нескольких, задаваемых при ориентировании волокон, направлениях.

Долговечность. Долговечность усилений деревянных элементов и их узлов является важным аспектом применения фибропластиков, во многом определяемым использованием адгезивных соединений. Адгезивы, отличающиеся высокими показателями работоспособности в момент изготовления соединений, не обязательно сохраняют их с течением времени (особенно при наличии агрессивных условий эксплуатации). Принимая во внимание, что древесина при эксплуатации демонстрирует значительные температурно-влажностные деформации, адгезив может рассматриваться совместимым с ней только при наличии способности адоптироваться к подобным деформациям, позволяющей минимизировать риск разрушения соответствующих соединений с течением времени [260-262]. Кроме того, при применении предварительного напряжения, длительная эффективность усиления становится возможной только при способности используемых соединений сохранять требуемые параметры напряженного состояния всей системы.

Проблема долговечности рассматриваемых систем усиления в определенной степени может решаться путем обеспечения их надлежащей защиты. Например, путем контроля условий эксплуатации или, при наличии соответствующей возможности, адаптацией конструктивного решения соединений либо

всей системы усиления, обеспечивающей необходимую косвенную защиту. Аналогичного результата можно также достичь подбором материалов (пусть и более дорогих), обладающих хорошей сопротивляемостью физическим и химическим воздействиям.

Огнестойкость. Независимо от термостойкости самих волокон, являющихся основой соответствующих фибропластиков, данный показатель определяется характеристиками связующих матриц используемых для изготовления композитных материалов. Большинство «недорогих» систем фибропластикового усиления, широко применяемых в строительстве, включают связующие смолы, демонстрирующие потерю большинства механических свойств при температурах около 60…100°С, что делает данные системы в целом крайне чувствительными к воздействиям огня. Дополнительную опасность представляют адгезивы, применяемые для соединений с древесиной и имеющие в большинстве случаев температуру стеклования также около 60…100°С.

На практике указанная проблема, с учетом высоких термоизоляционных свойств самой древесины, решается использованием внешней термозащиты элементов фибропластикового усиления. Как правило, в качестве элементов такой термической защиты используются дополнительные внешние слои древесины, покрывающие усиливающие фибропластики и придающие конструкции вполне эстетичный внешний вид.

Тем не менее, не смотря на существующие системы термической защиты, при проектировании следует учитывать то, что в тех случаях, когда системы фибропластикового усиление являются необходимыми для восприятия характеристических значений, учитываемых при пожаре нагрузок, их отказ может вызвать мгновенное и полное разрушение строительной конструкции.

Поведение в предельном состоянии. Одной из важных особенностей использования фибропластикового усиления строительных конструкций является их поведение при зарождающемся разрушении.

Разрушение деревянных элементов обычно наблюдается в местах скопления природных или приобретенных дефектов древесины, в большинстве случаев осложняясь наличием дополнительных касательных напряжений, и часто имеет хрупкий характер. Композитные же материалы, обладая высокой прочностью, демонстрируют практически линейно-упругую работу вплоть до разрушения. Благодаря чему в изгибаемых деревянных элементах, при размещении фиброкомпозитного усиления в растянутой зоне, возникает возможность «мобилизации» дополнительных усилий в сжатой зоне с образованием в ней локальных пластических деформаций, предшествующих разрушению растяну-

той зоны и таким образом позволяющих достигнуть повышения «живучести» конструкции.

7.4. Общие требования

При усилении фибропластиками элементов новых деревянных конструкций качество используемых материалов поддается четко регламентированному контролю, а дальнейшая работоспособность самих конструкций в значительной степени гарантируется выполнением требований существующих нормативов и рекомендаций. В тех же случаях, когда усиление затрагивает конструкции уже находившиеся в эксплуатации и, как следствие, приобретшие определенные дефекты, существующая рекомендательная база оказывается «несколько» ограниченной. В связи с чем, рассмотрим некоторые общие требования к процессу усиления подобных конструкций.

Предварительная оценка сохранности конструкций. Определение фактических характеристик древесины [263-276], ее типа и степени деградации, сопровождаемое изучением причин протекающих процессов, может быть важным не только для идентификации дальнейшей несущей способности усиливаемых элементов, но и условий в которых данное усиление будет осуществляться. Оно уточняет наличие воздействий веществами, потенциально опасными для системы усилений, и позволяет прогнозировать длительную эффективность предпринятых мероприятий.

Объективная оценка величин параметров напряженно-деформированного состояния является одним из наиболее важных факторов при выборе типа необходимого усиления. При этом рассмотрению подлежит как общая работа конструкции, учитывающая наличие составляющих, выполненных из различных материалов, так и работа отдельно взятых элементов и их соединений.

В отдельных случаях, при окончательном выборе способа усиления, немаловажное значение имеет оценка влияния вносимых изменений на общий облик конструкции и на ее историко-культурную ценность [277-280].

Оценка применимости фибропластикового усиления. Доступность производства работ является одним из основных условий применимости усилений несущих элементов фибропластиками. В ряде случаев пространственное положение деревянных элементов вызывает определенные сложности при устройстве таких систем, а иногда делает даже невозможным как предварительное обследование, так и последующий мониторинг конструкций.

Несмотря на относительную простоту непосредственного монтажа большинства композитных систем, производство работ по усилению требует полной

разгрузки соответствующих деревянных элементов. Решения, осуществляемые без предварительной разгрузки, обычно эффективны только при возможном догружении конструкций и практически не влияют на уже сложившиеся величины напряжений. С другой стороны, полное или частичное разгружение существенно усложняет процесс производства работ, а иногда делает его невозможным.

Условия дальнейшей работы древесины, предназначенной для восприятия напряжений, передаваемых композитными элементами, зависящие от типа предполагаемого вмешательства, состояния, размеров и положения усиливаемых участков поверхности, также определяют возможность применения фибропластиков. Участки поверхности древесины, предназначенные для размещений подобного внешнего армирования, должны быть представлены хорошо сохранившимся материалом, не подвергшимся бактериальному, грибковому и другим формам биотических и абиотических разрушающих воздействий. Кроме того, для предотвращения возможных усадки и набухания древесины, вызывающих дополнительные напряжения в зоне формируемого шва, влажность усиливаемого участка поверхности должна приближаться к средней влажности древесины всего элемента, в свою очередь соответствующей общим температурно-влажностным условиям эксплуатации конструкции.

Применение фибропластиков оправдывается при максимальном исключении концентрации напряжений по плоскостям соединения с усиливаемыми поверхностями, для чего используются различные конструктивные методы, позволяющие вовлекать в передачу усилий большие площади поверхностей древесины.

Выбор типа усиления. Выбор наиболее приемлемого типа усиления является одним из важнейших решений, основывающемся на результатах предварительного обследования и уточнения условий эксплуатации конструкции. При его принятии принимаются во внимание размеры и прочностные характеристики древесины усиливаемых элементов, геометрические и типологические характеристики доступных систем усиления, параметры напряженно-деформируемого состояния до и после усиления конструкций. Немаловажными факторами также являются совместимость используемых материалов, температурно-влажностные условия дальнейшей эксплуатации, устойчивость к химическим и физическим воздействиям, допустимость «видимости» установленных элементов усиления, определяемая эстетико-психологическими требованиями. Учтены должны быть и экономико-технологические показатели, такие как требуемое время производства работ, потребность в подготовительных работах и квалифицированном персонале, стоимость реализации усиления.

При выборе конструкции системы усиления оценке подлежат также альтернативные варианты повышения несущей способности или жесткости. Как указывают различные источники (например, [105]), наличие возможности использования фибропластикового усиления не всегда означает, что это является наилучшим решением. Традиционные методы, применяемые при усилении деревянных конструкций, очень часто оказываются вполне конкурентоспособными и экономически более оправданными.

Эффективность принятого конструктивного решения фибропластикового усиления должна подтверждаться теоретическими расчетами, выполняемыми на стадии проектирования, а также испытаниями пробных образцов основных элементов и соединений, использующих рабочую древесину, композиты и адгезивы [263- 276].

Обеспечение надежности фибропластиковых усилений. При рассмотрении вопросов надежности фибропластиковых систем необходимо учитывать наличие различий между деформационными свойствами древесины, композитов и используемых механических или адгезионных связей. Например, излишняя жесткость адгезива, ведущая к появлению внутренних напряжений в древесине (особенно при гигрометрических воздействиях), может способствовать дополнительному раскрытию существующих или появлению новых трещин в основном материале конструкции.

Надежность систем фибропластикового усиления обеспечивается:

— выбором совместимых материалов и конструкций соединений,
— ограничением величин действующих напряжений в элементах и соединениях,
— надлежащим изготовлением, защитой и обслуживанием.

Правильное ограничение величин действующих напряжений в процессе проектирования позволяет увеличить надежность дальнейшей эксплуатации конструкций. Физические и механические различия между существующими типами применяемых волокон, смол и конечных композитов также требуют оценки в каждом конкретном случае. При усилении деревянных конструкций не существует фиброармированных композитов, оптимальных для всех видов решаемых задач. В то время как углеродное волокно является менее подверженным воздействиям окружающей среды и явлению ползучести, арамидные волокна демонстрируют большую устойчивость к импульсным воздействиям. Стекловолокно легко адаптируется к деформациям древесины благодаря своему низкому модулю упругости и высокой величине предельных деформаций,

таким образом, уменьшая риск отслаивания и разрушения соединений на ранних стадиях приложения нагрузок.

Соответствующий подбор материала может обеспечить эффективность усилений даже в исключительных условиях. Однако это не дает полной гарантии его надежности при отсутствии необходимых защитных мероприятий. Многие факторы, к числу которых относят химико-физические, механические (удары, вандализм) и температурные (высокие температуры, огонь) воздействия, способствуют деградации фиброармированных материалов. Тем не менее, простая адаптация отдельных деталей конструкций, предусматривающая защиту композитов внешними слоями древесины, позволяет эффективно бороться против названных воздействий и исключает необходимость дополнительного привлечения других видов материалов.

Использование фибропластиковых систем в строительстве, и в частности при усилении деревянных конструкций, требует наличия специально подготовленного технического персонала. Общая результативность усилений зависит от всех технологических этапов производства работ, которые подлежат системному контролю. Соблюдение параметров окружающей среды при осуществлении усилений (температуры, влажности, отсутствия пыли и т.д.) является необходимым требованием обеспечения надежности соединений. Ограничение отклонений гигрометрических характеристик внешней среды в процессе эксплуатации также способствует эффективному сохранению усиленных конструкций.

Реализация усилений. Наличие трещины в древесине, свидетельствующих о процессе ее усушки, для строительных конструкций обычно является вполне допустимым явлением. При этом содержание усушечных трещин ограничивается только в отдельных случаях. Наклейка же на древесину стержней и пластин препятствует расширению таких трещин и на практике ведет к развитию сложного напряженного состояния, обуславливаемого ограничением естественных деформаций материала [250, 254, 260, 261].

Реализация усилений деревянных конструкций композитными материалами не должна вызывать процессов длительной механической или биологической деградации древесины. Любые усиливающие вмешательства должны предполагать сохранение необходимого взаимообмена между древесиной и окружающей средой, исключающего накопление влаги. По этой причине при усилении конструкций фибропластиками рекомендуется сохранять открытыми концы деревянных элементов, избегая их полной заделки, а также требуется обеспечение максимального вентилирования внешних поверхностей таких конструкций, препятствующего накоплению влаги.

7.5. Особенности взаимной работы материалов

Физико-механические характеристики фиброармированных композитных материалов и основанных на них систем усиления детально изложены выше в разделах 2 и 3. В данном пункте проанализируем взаимосвязанные с рассматриваемыми усилениями особенности работы самой древесины, а также применяемых с этой целью адгезивов.

7.5.1. Влияние влажности древесины

Теоретически древесина также может рассматриваться как природный фиброармированный материал, волокна которого выполнены из целлюлозы, а матрица — из лигнина. Волокна древесины работают на растяжение, а лигнин — на сжатие.

Целлюлозные волокна взаимодействуют с окружающей средой, стремясь к состоянию гигроскопического равновесия с ней, что влечет постоянный взаимообмен между молекулами воды, содержащимися в окружающей среде и древесине. Указанный физико-химический процесс протекает на протяжении всего периода существования деревянного элемента, имея два основных последствия для свойств древесины: изменчивость в размерах (усушка и набухание) и изменчивость в физико-механических характеристиках (плотности, прочности, мгновенных и длительных деформациях).

Изменчивость в размерах обычно является относительно незначительной, зависящей от вида древесины и рассматриваемого направления ее работы: продольного, радиального (поперечного, направленного перпендикулярно слоям древесины) и тангенциального (поперечного, направленного вдоль слоев древесины), см. рис. 7.3. Однако учитывая то, что конструкционная древесина имеет содержание влаги в пределах 10-18%, а также то, что ее сопутствующие объемные деформации могут колебаться в зависимости от вида древесины от 6 до более чем 16% [105], данным фактором при рассмотрении особенностей усиления пренебрегать нельзя.

В зависимости от влажности обычно изменяются и механические характеристики древесины (прочность, модуль упругости), достигая максимальных значений в ангидридном состоянии и имея тенденцию к снижению у точки насыщения влагой (влажность около 30%), см. рис. 7.4.

Следует учитывать также то, что механические свойства древесины, влияющие на работу соединений с фибропластиками, при постоянной влажности также во многом зависят от ее плотности, количества природных дефектов и угла наклона волокон к оси приложения действующих нагрузок.

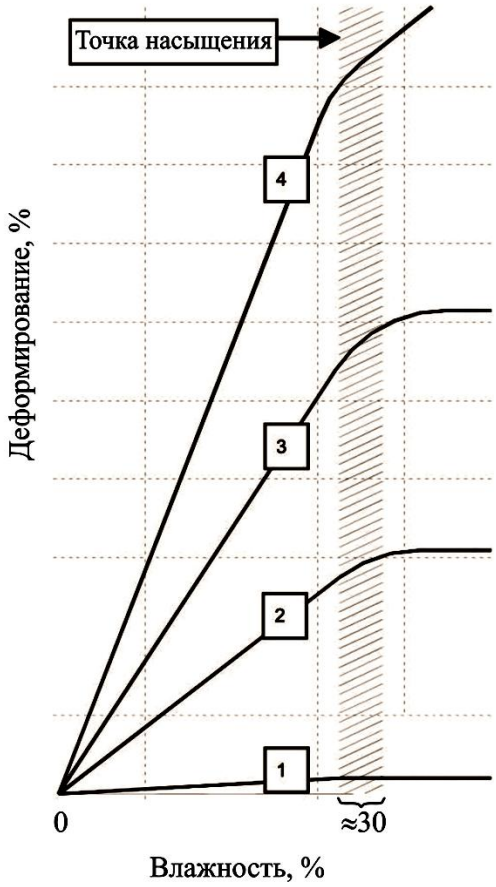


Рис. 7.3. Деформирование древесины при увеличении ее влажности: 1 — продольное, 2 — радиальное, 3 — тангенциальное, 4 — объемное; адаптировано по [105]

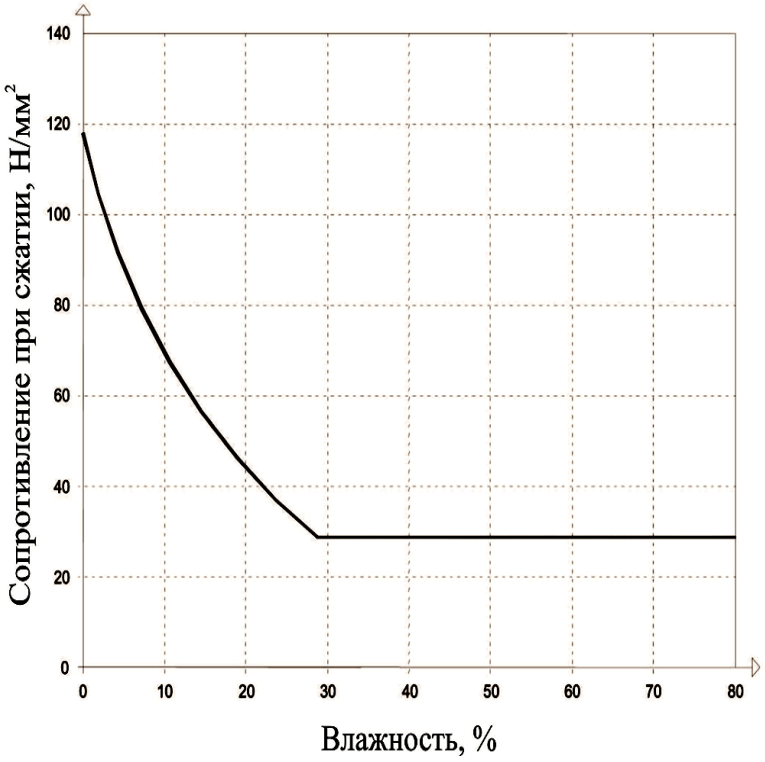
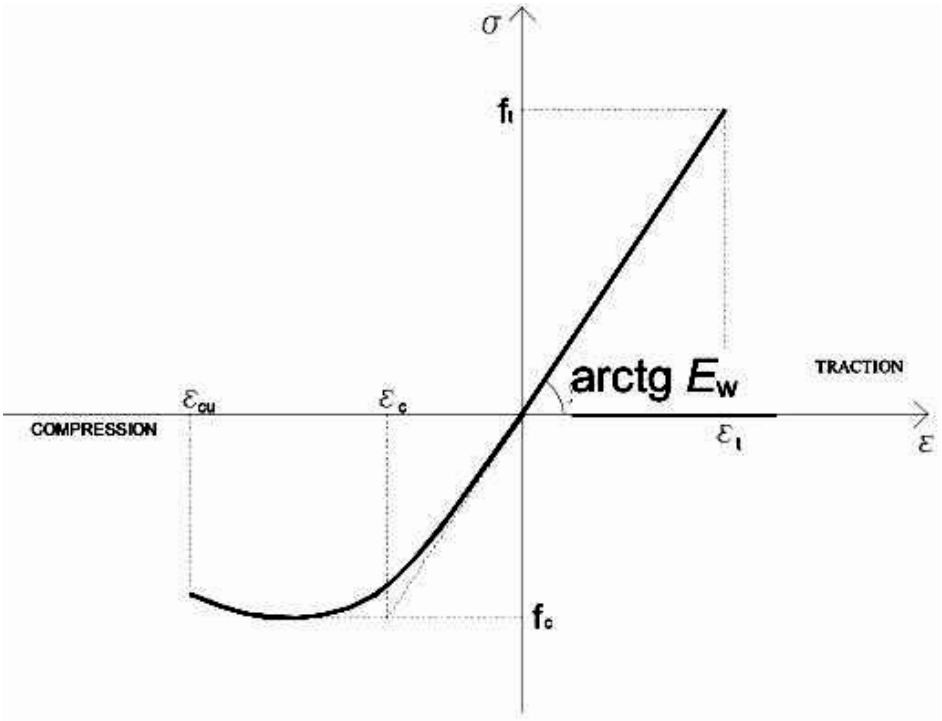


Рис. 7.4. Сопротивление при сжатии вдоль волокон древесины хвойных пород в зависимости от ее влажности; адаптировано по [105]

7.5.2. Изменение характера пластической работы

Работа древесины при осевых нагрузках может быть описана с помощью различных расчетных моделей, имеющих разную степень приближенности. Однако общим для них всех является линейно-упругая, вплоть до разрушения, работа материала при осевом растяжении (характеризуемая постоянным модуль упругости E_w=*const*), а также упругая работа при начальном осевом сжатии (иногда непрерывно изменчивая), характеризуемая той же величиной модуля упругости, что и при растяжении, переходящая в пластическую стадию деформирования [105, 250, 254, 281]. Наиболее точное описание работы древесины, хотя и несколько усложненное с практической точки зрения, дает расчетная модель Охаллорана (рис. 7.5).



$$\sigma = E_w \cdot \varepsilon$$
при $0 < \varepsilon < \varepsilon_t$,

$$\sigma = A \cdot |\varepsilon|^n + E_w \cdot \varepsilon$$
при $\varepsilon_{cu} < \varepsilon < 0$

Рис. 7.5. Расчетная модель Охаллорана, описывающая работу древесины при действии осевых нагрузок: E_w — модуль упругости древесины, ε_t — упругий предел деформирования древесины при растяжении, ε_{cu} — пластический предел деформирования древесины при сжатии, $A > 0$ и $n > 0$ — параметры, зависящие от вида древесины и ее влажности; по [105]

При этом прочность древесины на растяжение f_t, полученная при испытаниях образцов без дефектов, имеет среднюю величину около 80-100 МПа, примерно в два раза большую, чем при сжатии f_c (оценивается как 40-50 МПа). Такое существенное отличие заметно уменьшается для конструкционной древесины, в отношении характеристик которой осуществляется статистическая обработка, учитывающая влияние возможных дефектов, и составляет 10-40 МПа при растяжении и 25-40 МПа при сжатии [270, 282]. Наличие дефектов в значительно большей степени влияет на прочность при растяжении, в конечном итоге достаточно близко приближая данные величины.

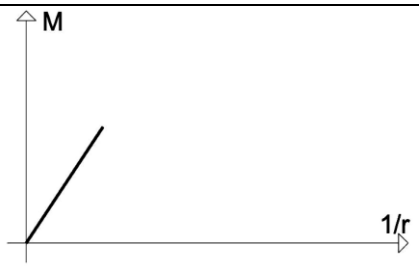
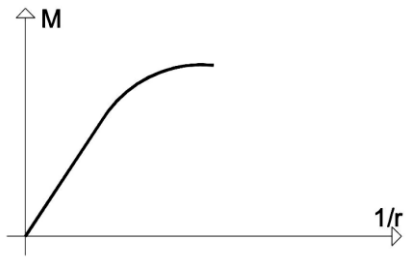
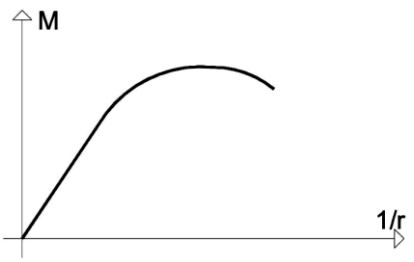
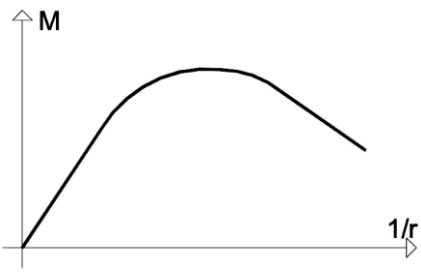
Анализ работы изгибаемых деревянных элементов [105] свидетельствует о том, что характер их разрушения во многом зависит от соотношения показателей прочности на растяжение и сжатие конкретного вида древесины, от способности материала воспринимать усилия в пластической стадии деформирования при сжатии, а также от размеров той части рабочего сечения, что воспринимает растягивающие усилия и является, вследствие возможного наличия локальных дефектов, потенциальной зоной преждевременного начального разрушения.

Модели работы изгибаемых деревянных элементов, имеющие место при различных соотношениях между пределами прочности древесины на растяже-

ние и сжатие $\eta = f_{tu}/f_{cu}$, представлены в таблице 7.1. При этом следует отметить, что для цельной древесины, наиболее часто встречающимся типом разрушений является тот, что протекает при достижении максимально допустимых напряжений в растянутой зоне и сопровождается в большинстве случаев появлением пластических деформаций в сжатой зоне сечения (случай 2 и 3 в таблице 7.1). Случаи хрупкого разрушения древесины (п. 1 в таблице 7.1) достаточно редки (являются наименее возможными) и характерны для образцов с большим количеством несовершенств. Для древесины с влажностью, превышающей так называемую точку насыщения (свежесрубленной древесины), возможно разрушение по типу, представленному в п. 4 таблицы 7.1.

Таблица 7.1

Основные модели разрушения деревянных изгибаемых элементов; по [105]

№№ п.п.	Описание	$\eta = \frac{f_{tu}}{f_{cu}}$	Графическая взаимосвязь величины изгибающего момента и радиуса кривизны
1	Хрупкое разрушение в растянутой зоне, характеризуемое линейной зависимостью величин изгибающего момента и кривизны элемента вплоть до его разрушения	$\eta < 1$	
2	Разрушение в растянутой зоне, сопровождаемое развитием пластических деформаций в растянутой зоне и смещением вниз нейтральной оси сечения	$\eta \geq 1$	
3	Вязкое разрушение в растянутой зоне, сопровождаемое пластическими деформациями по граням сечения элемента	$\eta > 1$	
4	Вязкое разрушение в сжатой зоне, сопровождаемое пластическими деформациями по высоте сечения	$\eta >> 1$	

В случае же рассмотрения клееной древесины, порядок ее разрушения напрямую зависит от качества используемых слоев. Правильность подбора составляющих и специфические особенности осуществления различных производственных операций определяют отличия работы клееной древесины от цельной. Клееная древесина имеет выраженную тенденцию к хрупкому разрушению, характеризуемую рассмотренными случаями 1 и 2, реже 3 (см. табл. 7.1).

Таким образом, главным преимуществом несущих деревянных элементов, изготовленных из древесины с фибропластиковым усилением (особенно при его включении в работу растянутых частей сечения) является сочетание пластичной работы (обеспечиваемой увеличением коэффициента η) с большей предельной прочностью (достигаемой за счет уменьшения влияния дефектов природного материала).

Повышение несущей способности изгибаемых деревянных элементов может быть получено введением композитов в их растянутые зоны, позволяющим увеличить величины соответствующих напряжений сечения. При этом сопутствующее увеличение коэффициента η также способствует развитию пластических деформаций в сжатой зоне сечения. В итоге разрушение элементов становится более пластичным, дающим возможность достичь максимальных преимуществ используемых материалов.

Подобный эффект наблюдается и при применении фибропластиковых усилений в отношении изгибаемых элементов из клееной древесины. В этих случаях также удается достичь увеличения пластичности работы материала конструкций с переходом к 3-му случаю разрушения, ранее рассмотренному в таблице 7.1.

7.5.3. Особенности адгезивов, используемых при фибропластиковом усилении древесины

Адгезивы, применяемые для рассматриваемых усилений, в большинстве своем имеют эпоксидную основу. Их химический состав близок к составу полимерных матриц фиброармированных пластиков, нашедших рассмотрение в разделах 2 и 3.

Адгезивы играют особую роль в передаче напряжений между древесиной и фибропластиками, отличающимися различными вязкоупругими свойствами. Важным для адгезивов, используемых для усиления несущих деревянных конструкций, является учет их составами особенностей различных видов древесины, подтверждаемый соответствующими испытаниями прочности сцепления и долговечности при температурно-влажностном циклировании, определяемом

дальнейшими условиями эксплуатации. Примеры технических характеристик трех различных адгезивов, используемых при усилении деревянных конструкций фибропластиками, приведены в таблице 7.2 (по [105]). При этом рассматривается тиксотропный адгезив, приобретающий большую вязкость в состоянии покоя, жидкий адгезив, являющийся предпочтительным для наклейки на древесину хвойных пород, и грунтовочное покрытие (*праймер*), применяемое совместно с вышеназванными адгезивами при наклейке композитов на древесину твердых пород (например, каштан или дуб).

Таблица 7.2

Примеры технических характеристик различных типов адгезивов и грунтовочного покрытия (*праймера*), используемых при усилении деревянных конструкций фибропластиками; по [105]

Показатель	**Тиксотропный адгезив**	**Жидкий адгезив**	**Грунтовочное покрытие (праймер) для древесины плотных пород**
1	**2**	**3**	**4**
Компоненты	А — В	А — В	А — В
Хранение	24 месяца в оригинальной упаковке при температуре от +5°С до +30°С		
Пропорция при смешивании	А : В = 2 : 1	А : В = 4 : 1	А : В = 1 : 1
Плотность смеси	1,59 г/см^3	1,01 г/см^3	1,08 г/см^3
Время жизнеспособности: — при +10°С — при +23°С — при +30°С	 150 мин. 60 мин. 30 мин.	 60 мин. 40 мин. 20 мин.	30-40 мин.
Время отверждения: — при +10°С — при +23°С — при +30°С	 14-16 ч. 4-5 ч. 2,5-3 ч.	 90 мин. 50 мин. 30 мин.	4-5 ч.
Температура нанесения	+10°С…+35°С	+10°С…+30°С	+10°С…+30°С
Время полного отверждения	7 суток	7 суток	12-24 ч.
Прочность при сдвиге	9 Н/мм^2 (после 7 суток при +23°С)	9 Н/мм^2 (после 7 суток при +23°С)	—
Прочность при растяжении (по стандарту ASTM D 638)	18 Н/мм^2	30 Н/мм^2	—
Удлинение при разрыве (по стандарту ASTM D 638)	1%	1,2%	—

1	2	3	4
Прочность при изгибе (по стандарту ISO 178)	30 Н/мм^2	60 Н/мм^2	—
Модуль упругости при изгибе (по стандарту ISO 178)	4000 Н/мм^2	2000 Н/мм^2	—
Прочность при сжатии (по стандарту ASTM D 695)	45 Н/мм^2	70 Н/мм^2	—
Модуль упругости при сжатии (по стандарту ASTM D 695)	3000 Н/мм^2	5000 Н/мм^2	—

Адгезионным соединениям между фибропластиками и древесиной, также как и подобным соединениям между элементами, выполненными из других материалов, свойственны три основные схемы разрушения (см. п. 2.6): когезионное, адгезионное и смешанное разрушение.

Когезионное разрушение протекает по одному из двух соединяемых материалов. В рассматриваемом случае «идеальное» когезионное разрушение происходит по древесине в непосредственной близости от адгезионного шва или в толще самого адгезива. Наиболее частыми причинами собственного когезионного разрушения материала адгезива являются его дефекты: некачественное смешивание или присутствие инородных частиц.

Адгезионное разрушение, протекающее по границе разделения адгезива и соединяемых элементов, свидетельствует о не правильном нанесении адгезива на древесину или фибропластик (например, вследствие не соответствия времени жизнеспособности раствора), а также о возможной неподготовленности склеиваемых поверхностей (наличии пыли, жиров и т.п.).

Смешанное разрушение, включающее признаки когезионного и адгезионного, может иметь место вследствие ряда причин, определяемых как особенностями фибропластиков, древесины и клеящих составов, так и наличием различных дефектов подготовки поверхностей или смешивания и нанесения адгезивов.

Адгезивы, применяемые для аппликаций фибропластиков по древесине, обычно являются изотропными термореактивными материалами, отличающимися вязкоупругой работой. Модели взаимосвязи параметров их напряженно-деформированного состояния (рис. 7.6) зависят от химического состава и окончательной «композиции» (содержания и распределения входящих компонентов). Температура стеклования T_g , выше которой происходит резкое падение

показателей механических свойств (в частности модуля упругости), для наиболее распространенных в строительстве систем составляет 60…100°С.

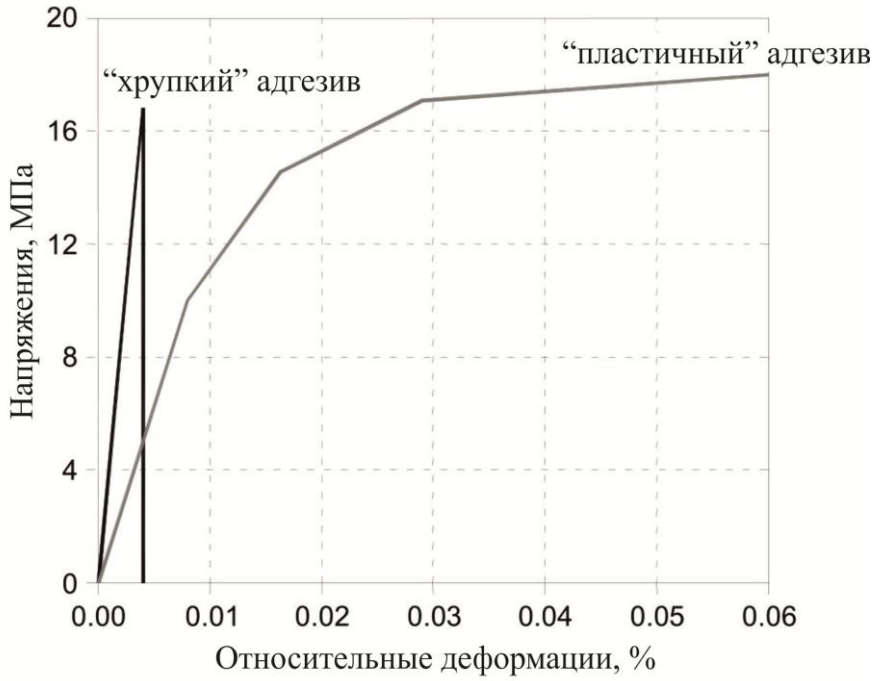


Рис. 7.6. Взаимозависимости между напряжениями и относительными деформациями адгезивов различных видов; адаптировано по [105]

Жесткость эпоксидных адгезивов обычно ниже, чем у древесины, в ее продольном направлении. В тоже время она приближается к жесткости древесины, определяемой в направлении, поперечном волокнам.

7.6. Соединения фибропластиков с древесиной

Эффективность соединения фибропластиков с древесиной зависит от целого ряда факторов, к которым относится тип и марка используемого адгезива или особенности применяемых механических связей, конструктивное решение самого соединения, а также основные физико-механические характеристики сопрягаемых древесины и фиброармированных пластиков.

7.6.1. Адгезионные соединения

7.6.1.1. Основные требования

Результативность правильно запроектированного и изготовленного адгезионного соединения определяется многими параметрами, в число которых в первую очередь входит способность используемого адгезива впитываться в древесину, особенности его объемно-деформационных свойств после полного

набора расчетной прочности и агрессивность условий среды дальнейшей эксплуатации.

Способность адгезива впитываться в древесину во многом обуславливается ее состоянием и качеством (напряженным состоянием усиливаемой поверхности, типом предварительной подготовки материала, возрастом древесины и наличием ее химической модификации, а также присутствием паразитов). Кроме того, одними из наиболее важных показателей являются физико-химических свойств самого адгезива: вязкость, плотность и химическая близости к усиливаемому материалу.

Объемно-деформационные свойствами адгезивов после полного набора расчетной прочности (например, наличие его усадки или прироста объема) существенно влияют на работоспособность соединений с требуемыми толщинами клеевых швов, выполняемых в условиях строительных площадок или без обжатия соединяемых элементов. При этом соблюдение максимальных толщин клеевых швов, рекомендованных производителями, увеличивает степень участия соединяемых поверхностей в передачи усилий между элементами.

Особенности условий окружающей среды, определяющие работоспособность адгезионных соединений, включают температурные колебания (в том числе и в результате воздействий, возникающих при пожарах), а также гигрометрическое циклирование, вызывающее деформирование древесины, не обязательно сопровождаемое соответствующим деформированием адгезива и, как следствие, ведущее к появлению дополнительных напряжений по разделительной поверхности адгезива и древесины.

Как отмечают рекомендации [105], с целью поддержания надежности адгезионных соединений в течение всего периода эксплуатации усиливаемых конструкций, является важным соблюдение необходимых условий подготовки соединяемых поверхностей, учитывающих специфику применения адгезивов в отношении конкретной конструкционной древесины. Способность адгезива взаимодействовать с древесиной во многом зависит от способа ее подготовки, позволяющего получить ровные и чистые поверхности соединений, не загрязненные посторонними частицами или веществами (пылью, жиром, маслом и т.п.). Следы ранее существовавшей химической обработки древесины (например, пропитки поверхности) должны быть удалены или иметь подтвержденную совместимость с применяемым адгезивом. Обычно подготовка усиливаемых поверхностей включает очистку растворителями и механическую обработку (абразивную пескоструйную очистку, выравнивание, ошкуривание и т.п.).

При производстве работ важно избегать локальных разогревов усиливаемого материала (например, при использовании неприспособленного или изно-

шенного оборудования), провоцирующих местное снижение несущей способности соединений. Для удаления пыли эффективным является всасывающее оборудование, исключающее внешнее обдутие конструкций. Важна также полная очистка от следов смазочных материалов, возможно оставляемых на поверхности древесины при использовании режущих механизмов (например, цепных пил), требующая вырубки или острожки загрязненных участков.

В отдельных случаях, при использовании плотных пород древесины, может быть полезным применение грунтовочных смесей (праймеров), с химическим составом близким к адгезиву.

Важным условием производства работ по подготовке контактных поверхностей является их непосредственное предшествование устройству усилений, исключающее вторичное загрязнение плоскостей соединений пылью и грязью, неизбежно присутствующими на строительных площадках.

Возможность применения адгезивов для усиления деревянных строительных конструкций определяется также соответствием их объемно-деформационных свойств (в отношении которых требуется достаточно длительная неизменность во времени) аналогичным свойствам древесины [283-285]. Такое соответствие обычно достигается ограничением показателей прочности на сдвиг по плоскостям разделения адгезивов и древесины, имеющих место в соединениях с нормальной влажностью. Тем не менее, для полной оценки адгезива, применяемого в составе несущих соединений, необходим предварительный контроль его работы при гигрометрических воздействиях, вероятных в течение всего периода эксплуатации конструкций.

7.6.1.2. Регламентирующие стандарты

Адгезивы, используемые для усиления деревянных строительных конструкций, классифицируются в соответствии с результатами лабораторных испытаний.

Оценивает конструкционные адгезивы, работающие совместно с древесиной, и дает описание испытаний на сдвиг, приложением растягивающих усилий, европейский стандарт *UNI EN 302-1* (в отдельных случаях *UNI EN 302-2*). Аналогичным международным стандартом, определяющим сдвиговые характеристики, является также *ASTM D3165*. Определение характеристик адгезионных соединений при сдвиге, осуществляемом сжимающими усилиями, регламентируется стандартами *ASTM D905, ASTM D3931* и *ISO 6238*. При этом следует отметить, что все перечисленные стандарты используют небольшие образцы соединений, изготовленные с применением обжатия. Последнее обстоятельство не позволяет учитывать в полной мере их результаты в отношении соединений

фибропластиков с древесиной, выполняемых в условиях реальных строительных площадок без приложения соответствующих обжимающих усилий и имеющих толщины адгезионных швов более 1 мм.

Классифицирует клеящие составы, применяемые для усиления деревянных конструкций, стандарт *UNI EN 301*, предусматривающий разделение адгезивов на два типа: для внешнего и внутреннего использования.

Адгезивы первого типа подлежат применению при всех видах погодных и климатических условий, при относительной влажности более 85% и эксплуатационных температурах более 50°С. Для соединений фиброармированных пластиков с древесиной такие условия отвечают эксплуатации внешних конструкций, а также внутренних несущих элементов с опорными частями, опирающимися на внешние каменные стены.

Адгезивы, отнесенные ко второму типу, применимы для выполнения внутренних аппликаций, а также для усиления внешних конструкций, защищенных от агрессивных воздействий и эксплуатируемых при температурах ниже 50°С.

Испытания для адгезивов первого типа включают серии термогигрометрических циклирований, проводимых при повышенных температурах, в то время как для адгезивов второго типа циклирование осуществляется при комнатных температурах.

Европейские нормы проектирования (*EN 1995-1-1 — Eurocode 5* [270]) в зависимости от гигрометрических условий определяют три класса эксплуатации деревянных конструкций (табл. 7.3). При этом адгезивы первого типа рекомендуются для всех случаев эксплуатации, а второго — только для 1-го и 2-го классов эксплуатации, предполагающих не длительное действие температур выше 50°С.

Таблица 7.3

Классы эксплуатации деревянных конструкций (по [105]) в соответствии с требованиями *Eurocode 5* [270]

Классы эксплуатации	**1-й**	**2-й**	**3-й**
1	**2**	**3**	**4**
Описание	Климатические условия с температурой 20°С и относительной влажностью более 65%, наблюдаемые ежегодно только в течении нескольких недель	Климатические условия с температурами 20°С и относительной влажностью не более 85% за исключением ежегодного периода, протяженностью в несколько недель	Климатические условия, более худшие, чем для класса 2

1	2	3	4
Средняя влажность древесины	Около 12%	Всегда менее 18%	Более 18%
Характерные примеры эксплуатации деревянных конструкций	— внутренние конструкции, — конструкции, эксплуатируемые в теплой и кондиционируемой среде с ограниченными колебаниями влажности	— внешние конструкции, защищенные от прямых воздействий окружающей среды, — не кондиционируемая среда (навесы, холодные кровли, террасы и т.п.) или среда с повышенной влажностью (например, помещения бассейнов), — опорные части конструкций, опирающиеся на внутренние стены, хорошо вентилируемые и сухие	— внешние конструкции, — мосты, колонны и опоры, — опорные части конструкций, опирающиеся на наружные стены, — условия с повышенными температурами окружающей среды

7.6.1.3. Совместимость адгезивов с древесиной

Конструкционные адгезивы, применяемые совместно с древесиной и наносимые непосредственно в условиях строительных площадок, должны отбираться в соответствии с результатами испытаний специальных образцов на сдвиг, имитирующих соединения со швами большой толщины. При этом для оценки используется величина, так называемого, коэффициента механической совместимости адгезива и древесины $k_{a,w}$.

Для определения коэффициента механической совместимости, образцы, изготовленные соединением радиальных поверхностей двух заготовок, вырезанных из деревянных брусьев (рис. 7.7, а), подвергаются испытаниям до разрушения под действием сдвигающих усилий, приложенных параллельно направлению их волокон [105]. При этом экспериментальные образцы разделяются на две группы. К первой группе (G_{con}) относят образцы, набор прочности адгезива которых реализуется в нормальных условиях (температура 20°С и относительная влажность 65%), а ко второй (G_{inv}) — образцы, претерпевшие несколько чередующихся циклов полного пропитывания (с максимальным приростом массы древесины) и быстрого высушивания при температурах, близких к температуре стеклования адгезива. Эксперименты, выполняемые на набравших влагу образцах, определяют минимальную работоспособность соединений, имитируя ситуации, при которых древесина стала предметом случайных воздействий условиями, необычными для ее эксплуатации.

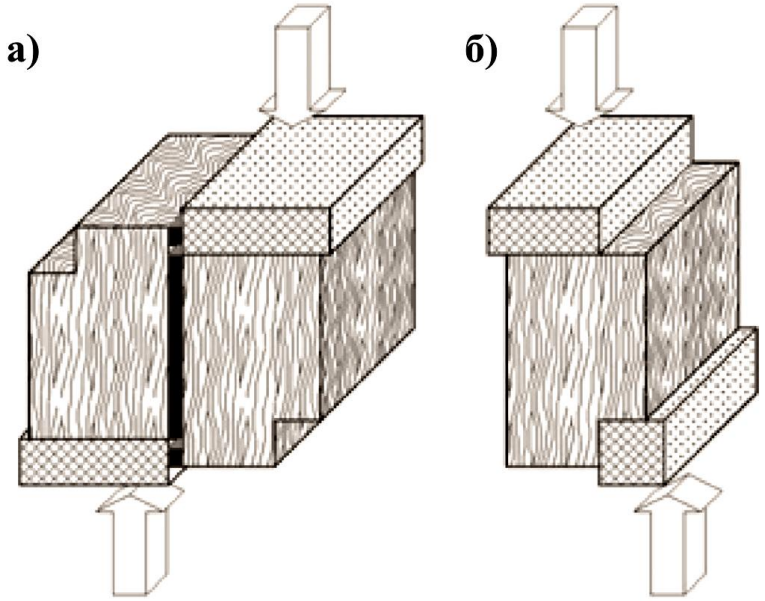


Рис. 7.7. Экспериментальные образцы: а — при непосредственных испытаниях адгезионных соединений, б — при сравнительных испытаниях древесины, входящей в состав соединений; по [105]

После определения поперечной несущей способности соединений обоих групп, разделенные элементы разрушенных образцов подвергаются испытаниям, устанавливающим поперечную прочность их цельной древесины (аналогичным испытаниям соединений), см. рис. 7.7, б. Таким образом, возможно сравнение работоспособности адгезива в сочетании с характеристиками древесины, полученными на образцах, готовившихся в нормальных условиях и при циклических воздействиях влаги.

Благодаря подобным экспериментальным исследованиям становится возможной сравнительная оценка адгезивных материалов, позволяющая выявить различия в их работе.

Исследования, выполнявшиеся на некоторых образцах коммерчески доступных марок адгезивов, предназначенных для производства работ непосредственно на строительных площадках, указывают на существенные различия между ними [105]: часть марок отличается склонностью к отслаиванию, а часть — демонстрирует (даже после гигротермального циклирования) прочностные характеристики, сопоставимые с прочностью древесины (см. п. 7.6.1.4).

Применяемый для оценки соединений коэффициент механической совместимости адгезива и древесины определяется как

$$k_{a,w} = \eta_{dry} \cdot \eta_{wet} \quad , \tag{7.1}$$

где: η_{dry} — сравнительный коэффициент несущей способности соединений, выполненных из сухой древесины, полученный соотношением попереч-

ных прочностей адгезива и древесины образцов, выдерживавшихся при температуре 20°C и относительной влажности 65%,

η_{wet} — сравнительный коэффициент несущей способности соединений, претерпевших термогигрометрическое циклирование, полученный соотношением соответствующих поперечных прочностей адгезива и древесины.

Величины сравнительных коэффициентов несущей способности соединений определяются по формулам

$$\eta_{dry} = \frac{\tau_{G,std}}{\tau_{L,std}} , \quad \eta_{wet} = \frac{\tau_{G,inv}}{\tau_{L,inv}} , \tag{7.2}$$

где: $\tau_{G,std}$, $\tau_{L,std}$ — поперечные прочности адгезионных соединений и цельной древесины образцов, сохранявшихся в нормальных условиях,

$\tau_{G,inv}$, $\tau_{L,inv}$ — поперечные прочности адгезионных соединений и цельной древесины образцов, претерпевших термогигрометрическое циклирование.

Коэффициент механической совместимости $k_{a,w}$ дает численную оценку работоспособности адгезивов в составе соединений, соотнесенную с прочностной характеристикой используемой древесины. Его величина может быть применима для сравнения различных адгезивов, а также для их классификации.

7.6.1.4. Оценка эффективности различных видов адгезивов

Экспериментальные исследования соединений фибропластиков с древесиной, позволяющие дать численную оценку эффективности различных характерных видов коммерчески доступных адгезивов, проводились в венском университете *BOKU* (*Universität für Bodenkultur Wien; University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna,* Австрия). При этом образцы углеродоволоконных ламинатов наклеивались параллельно волокнам древесины экспериментальных образцов (рис. 7.8) с последующим определением напряжений сдвига, предшествующих разрушению соединений [55].

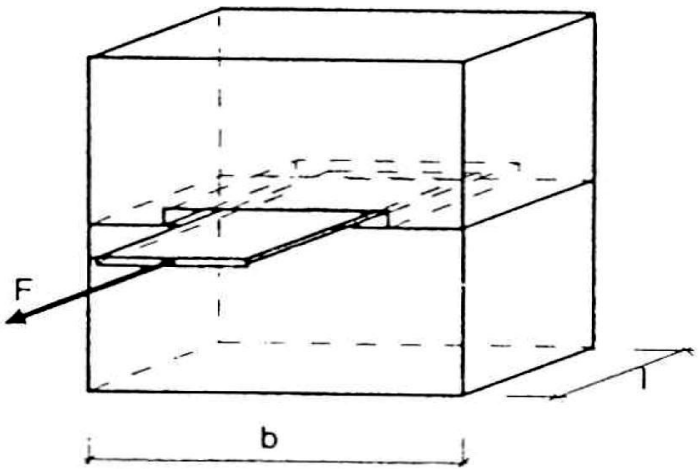


Рис. 7.8. Экспериментальные образцы, использовавшиеся для определения несущей способности адгезионных соединений углеродоволоконных ламинатов с древесиной в венском университете *BOKU* (*Universität für Bodenkultur Wien; University of Natural Resources and Life Sciences, Vienna,* Австрия); по [55]

Исследования предусматривали варьирование типов адгезионных растворов, площадей их нанесения и качества обработки поверхностей наклеиваемых ламинатов. Характерные показатели результатов испытаний сведены в таблицу 7.4. Все испытывавшиеся соединения показали приемлемость величин максимальных напряжений сдвига для выполнения соответствующих практических усилений деревянных конструкций.

Таблица 7.4

Результаты сравнительных испытаний адгезионных соединений углеродоволоконных ламинатов с древесиной при действии сдвигающих усилии, полученные в университете *BOKU* (*Universität für Bodenkultur Wien,* Австрия); по [55]

Адгезионные растворы	Величины прикладывавшихся усилий, кН	Напряжения сдвига, Н/мм^2	Тип разрушения
На основе эпоксидных смол	6,71…6,75	5,59…5,63	Разрушение по древесине, отдельные разрушения адгезионного материала
На основе резорцино-фенольных смол	3,56…5,00	2,97…4,12	Разрушение по адгезионному материалу

7.6.1.5. Общий характер работы адгезивов в соединениях с древесиной

Формы характерных диаграмм взаимозависимости напряжений и деформаций в адгезионных соединениях [286-297], воспринимающих поперечные усилия, качественно близки аналогичным диаграммам, получаемым для цельной древесины. При достижении соединениями пластических фаз деформирования, протяженность которых зависит от величин приложенных нагрузок и типов применяемых адгезивов, возможно внезапное разрушение.

Для поверхностей разрушения правильно выполненных адгезионных соединений свойственно наличие большого числа волокон, соединенных с адгезионным слоем (т.е. когезионное разрушение древесины). Разрушение, проходящее непосредственно по адгезионному слою, свидетельствует о хорошей адгезии между соединяемыми материалами и адгезивом, хотя и может быть признаком неудовлетворительных характеристик последнего.

7.6.2. Механические связи

Элементы из фиброармированных пластиков также могут соединяться с древесиной по средствам традиционных механических связей или соединений комбинированного типа.

Основные проблемы, связанные с использованием механически связей, обуславливаются внутренним строением рассматриваемых композитов. Природа фибропластиков определяет относительно низкую их прочность при действии концентрированных напряжений, а также нагрузок, направленных под углом к направлению волокон материала, что, как правило, имеет место при применении механических связей. По этой причине эффективное применение традиционных механических связей становится возможным только при их сочетании с адгезионными. Такое решение позволяет увеличить несущую способность клеевых соединений, способствует их «прошивке» и восприятию растягивающих напряжений, направленных перпендикулярно плоскостям швов.

Как видно из рисунка 7.9 характер работы соединений различных типов имеет существенные отличия, значительно осложняющие их совместную работу. Наличие значительной разницы в жесткостных параметрах сопряжений, использующих в отдельности адгезивы или механические связи, не позволяет рассматривать их эффективное взаимодействие.

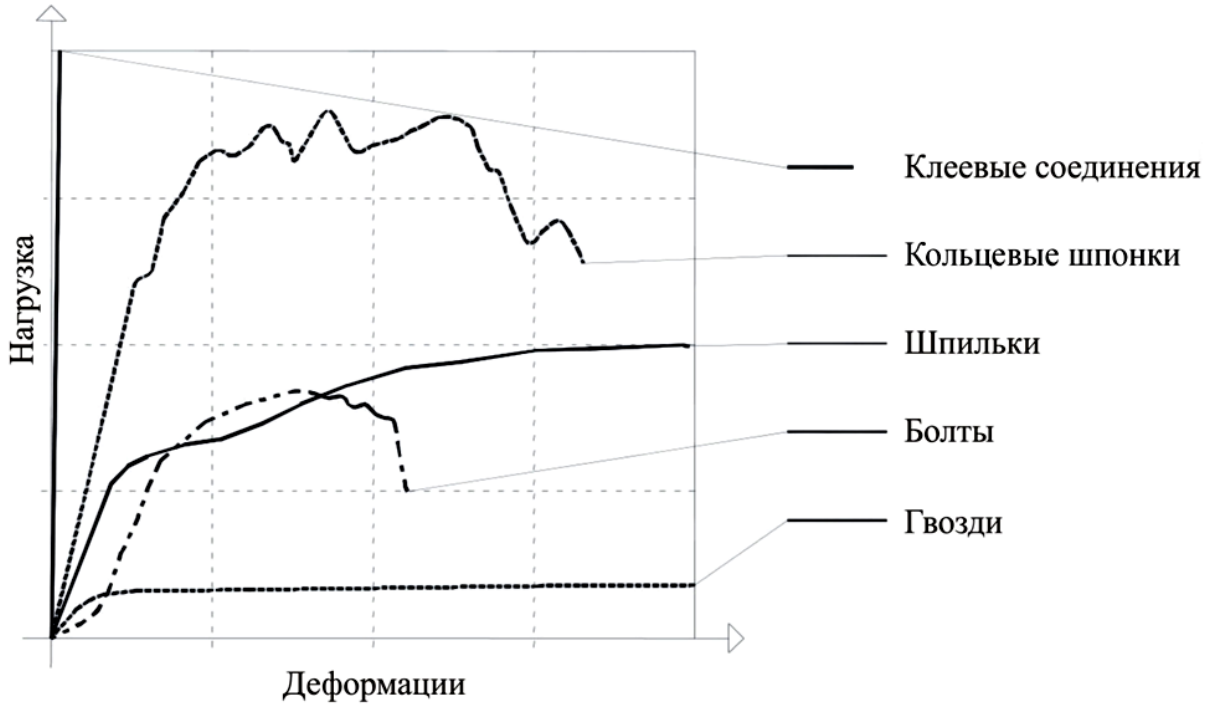


Рис. 7.9. Характерные взаимозависимости нагрузок и деформаций в соединениях различных типов; адаптировано по [105]

Адгезионные соединения, при условии использования эффективных клеящих составов, обеспечивают жесткие связи с ограниченными взаимоперемещениями соединяемых элементов по контактным плоскостям. В составе же комбинированных соединений, при достижении адгезионными связями предельного состояния и начальном процессе разрушения по контактному шву, в

работу вступают механические связи, способствующие передачи усилий от древесины к элементам фибропластикового усиления и придающие пластический характер процессу разрушения всего соединения. При этом расчет механических связей, как правило, должен вестись обособленно от адгезионных, исходя из предположения о восприятии ими полной величины действующих усилий [105].

В отличие от древесины, в отношении которой применение механических связей не вызывает теоретических сложностей, в фибропластиках такие сопряжения способствуют прерыванию армирующих материал волокон и резким концентрациям местных напряжений, влияние которых пока изучено недостаточно. При необходимости их применения, влияние местных напряжений на рабочие показатели композитов должно уточняться посредствам специальных испытаний.

Фибропластиковые элементы малой толщины, выполненные на основе пластин, тканей и лент, обычно требуют равномерной передачи усилий, обеспечиваемой адгезионными связями, в то время как соединения элементов больших толщин (например, на основе многослойных тканей или в виде профильных элементов заводской готовности) могут быть усиленны комбинированием адгезионных и механических связей.

В тех случаях, когда усиление деревянных конструкций предполагает сложное распределение напряжений между отдельными их элементами, механические связи, «прошивающие» соединения между древесиной и фиброкомпозитами, могут выполнять также и вспомогательные функции. Например, в изгибаемых деревянных элементах, усиленных фибропластиками, обладающими собственными изгибными жесткостями (см. рисунок 7.10), внешнее усиление противодействует изгибным деформациям деревянной составляющей и создает по концам адгезионного шва растягивающие напряжения, направленные перпендикулярно его плоскости, способные привести к отслоению по длине соединения. Ограниченная несущая способность адгезивов при восприятии таких усилий требует применения дополнительных связующих элементов [300, 301], в качестве которых могут выступать механические связи, работающие на выдергивание (например, металлические шурупы или фибропластиковые гвозди, введенные с использованием клеящих смол).

Вышесказанное относится к различным типам внешнего армирования изгибаемых элементов и вызывает необходимость уточнения соответствующих расчетных моделей сопряжений. Механические крепления концов соединений не являются обязательным условием при проектировании усилений, однако их наличие значительно упрощает расчетные модели связей и позволяет рассмат-

ривать адгезионные слои как работающими только под действием сдвигающих усилий.

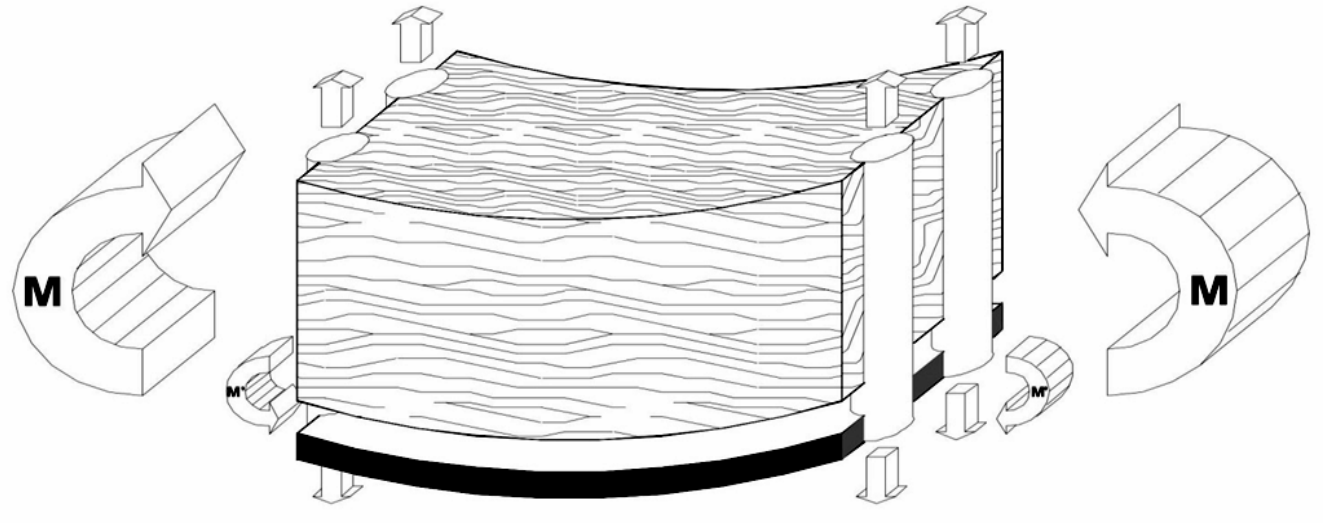


Рис. 7.10. Поперечная «прошивка» механическими связями адгезионных соединений изгибаемых элементов; по [105]

Наиболее часто встречающиеся решения механических связей, размещаемых по концам адгезионных соединений в составе деревянных конструкций, приведены на рисунке 7.11. Однако при их использовании следует учитывать то, что в настоящее время подробный анализ работы таких сопряжений все еще отсутствует, а соответствующее практическое применение требует проведения предварительных испытаний.

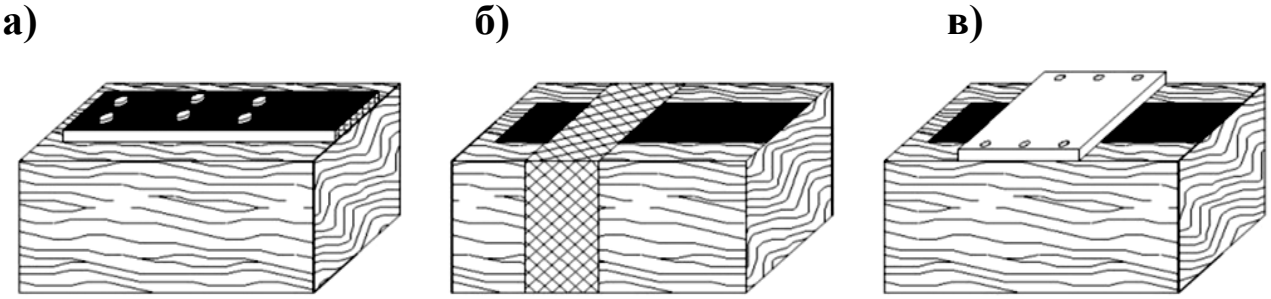


Рис. 7.11. Механическое крепление концов адгезионных соединений: а — нагельное, б — поперечно-направленным внешним фибропластиковым армированием, в — с использованием дополнительных прижимных элементов; по [105]

7.6.3. Повышение работоспособности соединений с использованием фибропластиковых элементов

Рассмотрению возможности использования фибропластиков для изготовления новых соединений деревянных конструкций, а также для усиления уже существующих их образцов, посвящено сравнительно ограниченное количество исследований [105, 261, 262, 286, 287, 298-305]. При этом в большинстве случаев соответствующие методики проектирования и расчета отсутствуют.

7.6.3.1. Плоскостное фибропластиковое усиление

Усиление соединений деревянных конструкций, как правило, не должно существенно изменять аутентичную статическую схему работы последних (за исключением случаев заведомого несоответствия принятых решений и острой необходимости их исправления). В частности, излишнее увеличение жесткости соединений может привести к недопустимым изменениям в напряженном состоянии соединяемых элементов. Принятая схема усиления соединений не должна быть абстрагированной от анализа общей работы конструкции, должна учитывать и, по возможности, смягчать, вероятные негативные последствия вносимых изменений.

Усиление соединений деревянных конструкций в большинстве случаев осуществляется с целью увеличения их общей несущей способности, а также повышения выносливости при действии циклических нагрузок (в том числе и сейсмических).

При увеличении общей несущей способности соединений, эффект рассматриваемых фибропластиковых усилений сводится к ограничению влияния растягивающих напряжений, направленных перпендикулярно направлению волокон древесины, а также к смягчению напряжений смятия, действующих по контактным поверхностям механических связей. Подобное усиления актуальны в сопряжениях с небольшим числом соединительных элементов большого диаметра (рис. 7.12, а), склонных к хрупкому разрушению.

В случае действия циклических нагрузок, особенно в отношении угловых соединений конструкций из клееной древесины (рис. 7.12, б), применение фибропластиковых элементов позволяет добиться в их узлах, так называемого, диссипативного (рассеивающего) эффекта, что может быть достигнуто при помощи размещения армирующих тканей и пластин между слоями клееной древесины.

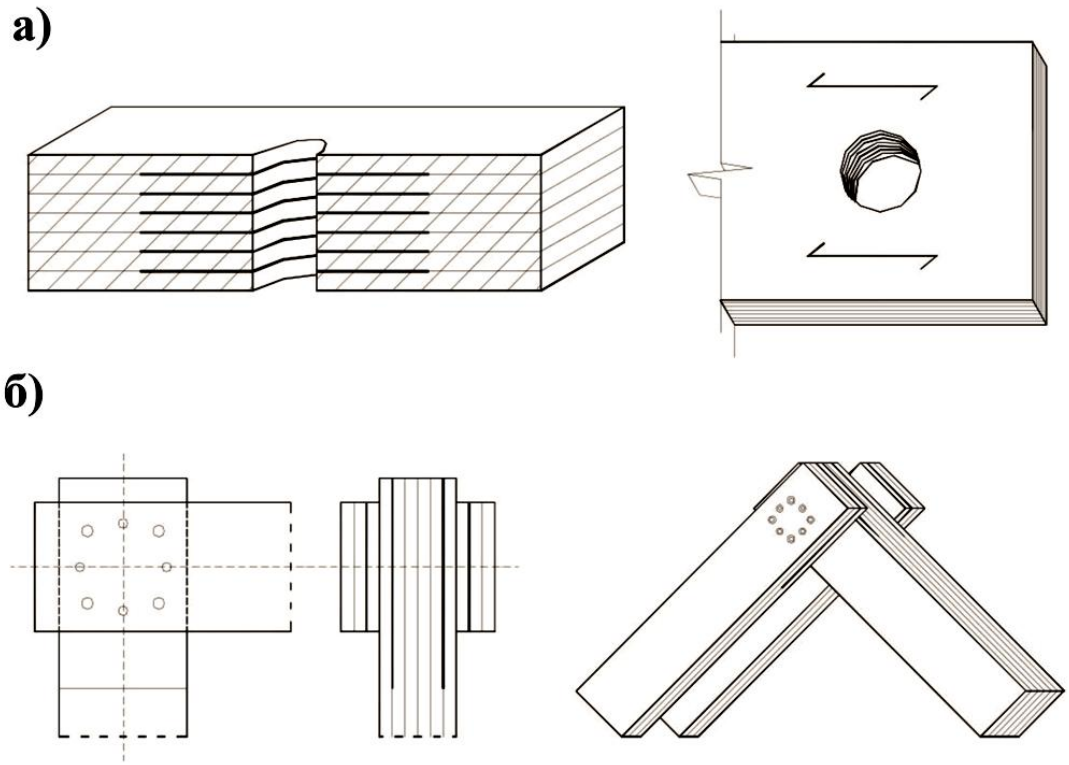


Рис. 7.12. Примеры плоскостного фибропластикового усиления соединений деревянных конструкций: а — по контуру соединительного отверстия элемента, изготовленного из клееной древесины, б — в угловом соединении клееных деревянных элементов; по [105]

Для усиления соединений деревянных конструкций находят применение одно-, двунаправленные и многонаправленные фиброармированные композиты. Выбор типа армирующих волокон зависит от преследуемых при усилении целей: стекловолокно используется при необходимости сохранения деформативности соединений, в то время как углеродные волокна придают сопряжениям высокую прочность и жесткость.

7.6.3.2. Стержневое фибропластиковое усиление

Соединения, выполняемые с применением фибропластиковых стержней, по своей конструкции обычно аналогичны соединениям, изготавливаемым на основе стальных нагелей (рис. 7.13). При этом непрерывно армированные композиты имеют ряд преимуществ. Они обладают высокой устойчивостью к физическим и химическим воздействиям, проявляющимся в условиях агрессивных сред или при отсутствии необходимой защиты сопряжений (особенно фибропластики на основе углеродных волокон). Их применение отличается относительно низкой трудоемкостью и обычно не требует использования специальных механизмов. Конструкционные композиты характеризуются низким весом и

демонстрируют, в зависимости от типа армирующих волокон, достаточно большой диапазон физико-механических свойств.

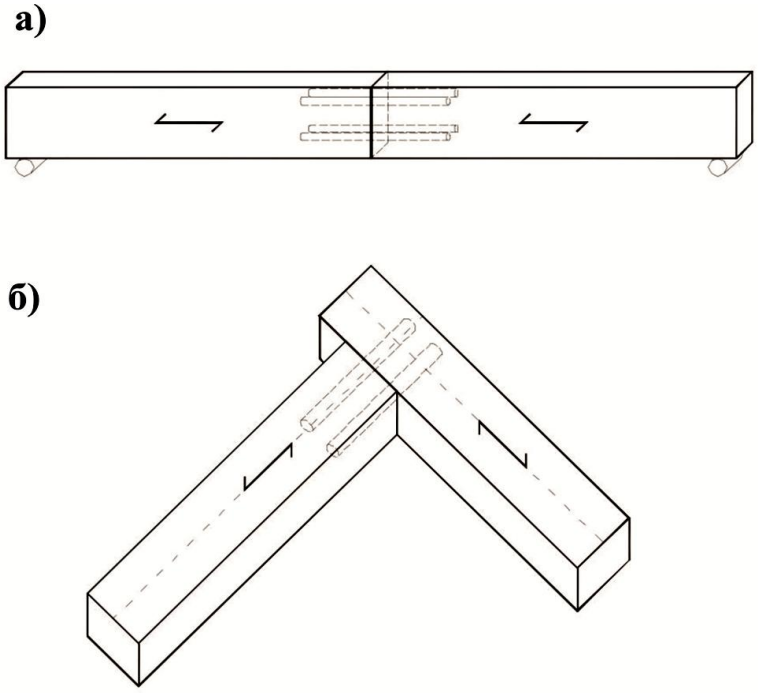


Рис. 7.13. Примеры соединений деревянных элементов с использованием фибропластиковых стержней: а — лобовое соединение, б — угловое соединение; по [105]

К неотъемлемым преимуществам фибропластиковых стержневых соединительных элементов относят низкую деформативность, высокую прочность и выносливость.

7.7. Изгибаемые и внецентренно сжатые элементы

7.7.1. Общие особенности

7.7.1.1. Области рационального применения

Фибропластиковое усиление деревянных изгибаемых и внецентренно сжатых конструкций рационально в случае преследования следующих целей:

— увеличения действующих нагрузок в элементах объектов историко-культурного наследия, режим эксплуатации которых предполагает некоторые изменения,
— компенсации частей сечений элементов, утраченных вследствие износа, вызванного активностью биологических паразитов (грибов, насекомых и т.д.) или по причине аварийных ситуаций (механическое повреждение, пожар и т.п.),
— устранения чрезмерных деформаций.

Немаловажным является также то, что техника усиления, предполагающая использование фибропластиков, наряду с сокращением стоимости и сроков производства работ, позволяет избегать демонтажа конструкций, демонстрируя особую актуальной при сохранении объектов архитектурно-исторического наследия [277-279].

7.7.1.2. Работа изгибаемых деревянных элементов с фибропластиковым усилением

Несмотря на то, что древесина по природе является анизотропным материалом, ее работа в трех направлениях (продольном, тангенциальном и радиальном) может быть описана как ортотропная [263, 272, 273, 274, 275, 270, 271, 276]. Рассмотрение древесины обычно предполагает упругопластическую модель (см. рис. 7.5).

При достижении пластической стадии изгиба деревянного элемента, в его поперечных сечениях начинают проявляться различия в работе материала на растяжение и сжатие, приводящие к постепенному перемещению нейтральной оси к растянутой грани конструкции (рис. 7.14), что в свою очередь способствует пропорциональному уменьшению размеров растянутой зоны и соответствующему росту растягивающих напряжений.

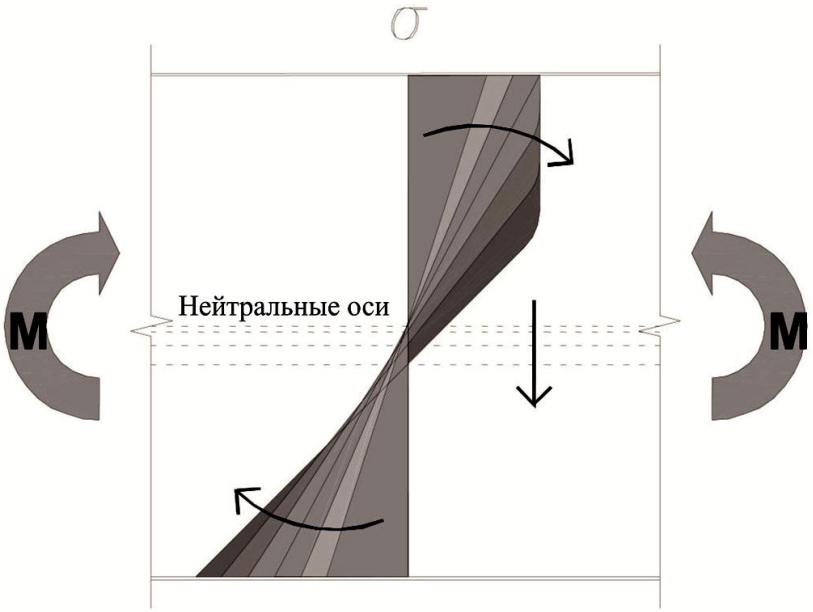


Рис. 7.14. Перемещение нейтральной оси сечения в пластической стадии изгиба деревянного элемента; адаптировано по [105]

Усиление растянутой зоны изгибаемых деревянных элементов с помощью фиброармированных пластиковых материалов, характеризуемых при растяжении высокой прочностью и продольной жесткостью, придает существенный прирост несущей способности и обеспечивает повышенную пластичность работе конструкций (см. табл. 7.1). При этом эффективность усиления определяется главным образом надежностью передачи напряжений от древесины композитным элементам [286-299, 306-312].

Повышение несущей способности деревянных изгибаемых элементов, осуществляемое армированием их растянутых зон композитами, достигается при упругопластической работе древесины на сжатие, а также при фактических величинах сопротивления древесины растяжению, меньших ее показателей прочности на сжатие.

Упругопластическая работа древесины при сжатии отсутствует в тех случаях, когда разрушение наблюдается уже в упругой стадии, что характерно для низкосортных образцов материала, отличающихся наличием множественных дефектов, включающих сучки и косослои. Данные дефекты, особенно присутствующие в растянутой зоне, определяют начальные места вероятного разрушения рассматриваемых элементов.

7.7.1.3. Экспериментальное обоснование особенностей работы изгибаемых элементов

Общеизвестно, что решения клееных деревянных конструкций, благодаря возможности варьирования расчетных характеристик отдельных слоев, потенциально обладают существенными резервами прочности и жесткости. Исследования работы клееных деревянных балок, усиленных углеродоволоконными ламинатами, проводились *Висбаденским техническим университетом* (*Wiesbaden Technical University*, Германия) [55, 313]. При этом в ходе соответствующих экспериментов сравнивались три серии образцов (см. табл. 7.5), имевших различные соотношения длины и высоты сечения. Испытывались балки, усиленные по растянутым граням между опорами углеродоволоконными ламинатами с показателем модуля упругости $E=200$ *ГПа* и величиной придела прочности $\sigma_u = 2500$ *Н/мм*^{2}. С целью оценки эффективности конструкций испытаниям также подверглись и аналогичные балки, не имеющие усиления (см. рис. 7.15).

Таблица 7.5

Характеристики пролетов и поперечных сечений серий клеедеревянных балок, усиленных углеродоволоконными ламинатами и испытанных в *Висбаденским техническим университетом* (*Wiesbaden Technical University*, Германия); по [55]

Серия	Пролет балок, м	Высота прямоугольного сечения, м	Отношение пролетов балок к высоте их сечений	Углеродоволоконное армирование в составе поперечного сечения, %
A	5,20	0,50	10,4	0,28
B	5,20	0,30	17,3	0,47
C	8,80	0,36	24,4	0,39

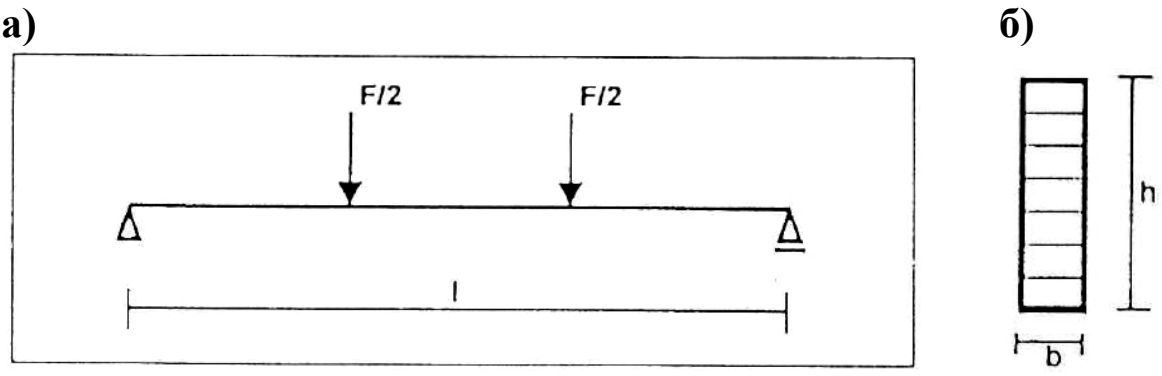


Рис. 7.15. Клеедеревянные балки, усиленные по растянутым граням углеродоволоконными ламинатами, испытывавшиеся в *Висбаденском техническом университете* (*Wiesbaden Technical University*, Германия): а — расчетная схема, б — поперечное сечение; по [55]

Введение углеродопластиковых элементов при эксперименте рассматривалось как решение, позволяющее перекрывать наиболее нагруженные участки древесины, содержащие природные дефекты (сучки, косослои и т.п.), а также как средство повышения общей несущей способности клееных изгибаемых конструкций, вовлекающее древесину сжатой зоны в пластическую стадию работы и способное существенно влиять на уменьшение габаритов поперечных сечений. Величины прогибов балок, измеренные в центре их пролетов, а также показатели соответствующих максимальных относительных деформаций древесины поперечных сечений представлены в таблице 7.6.

Таблица 7.6

Результаты испытаний серий клеедеревянных балок, усиленных углеродоволоконными ламинатами, полученные в *Висбаденским техническим университетом* (*Wiesbaden Technical University*); по [55]

Серия	Показатели, предшествующие разрушению		Максимальные относительные деформации древесины поперечного сечения, %	
	Нагрузка, кН	Прогиб, мм	Сжатия	Растяжения
1	2	3	4	5
А:				
— без усиления,	168,7	56,4	-0,30	0,31
— с усилением.	169,3	49,1	-0,255	0,24
Разница, %	0,4	12,9	0,2	3,8
В:				
— без усиления,	56,2	68,8	не измерялось	0,26
— с усилением.	95,1	112,6	не измерялось	0,48
Разница, %	69,2	63,7		84,6

1	2	3	4	5
С:				
— без усиления,	38,3	119,3	-0,22	0,235
— с усилением.	62,6	183,1	-0,382	0,34
Разница, %	63,4	53,5	73,6	44,7

Проведенные испытания позволили судить о работе конструкций в пластической стадии деформирования (рис. 7.16). Наблюдался существенный рост несущей способности балок. При испытаниях отдельных образцов, имевших углеродопластиковое армирование в размере 0,47%, прирост разрушающей нагрузки, в сравнении с не усиленными конструкциями, составлял до 93%.

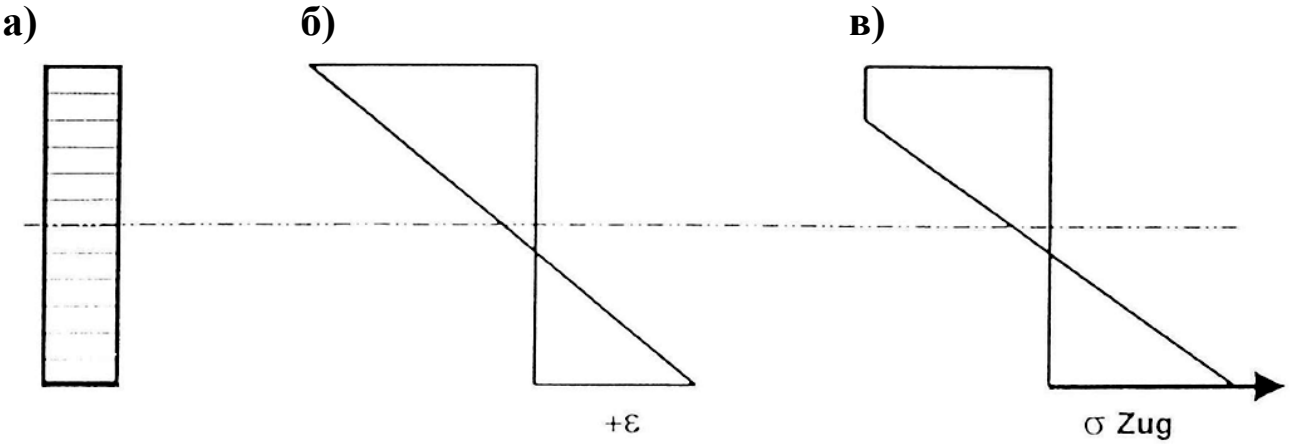


Рис. 7.16. Относительные деформации и напряжения древесины балок, серий *B* и *C*, усиленных углеродоволоконными ламинатами в *Висбаденским техническим университетом* (*Wiesbaden Technical University*, Германия): а — поперечное сечение балок, б — эпюра относительных деформаций древесины поперечного сечения балок, в — эпюра напряжений в древесине поперечного сечения балок; по [55]

Балки серий *B* и *C*, отличавшиеся более высокими соотношениями пролетов и высот поперечных сечений, демонстрировали выраженную пластическую работу материала сжатых зон. В образцах же серии *A*, имевших меньшую величину данного соотношения, разрушение древесины протекало по типу, соответствующему балкам без фибропластикового усиления.

Механизм разрушения усиленных конструкций обладал своими отличиями. В результате приложения более высоких нагрузок разрушение сечений происходило вследствие поперечных деформаций: сначала в опорной зоне, а затем в середине длины балок. Наблюдавшийся характер разрушения позволил авторам исследования сделать предположение, что больший рост воспринимаемых нагрузок мог бы быть достигнут при наличии дополнительного внешнего поперечного армирования (например, стальными хомутами).

7.7.2. Методы усиления

Теоретически фибропластиковое армирование может быть размещено как в растянутых, так и в сжатых зонах изгибаемых деревянных конструкций (рис. 7.17).

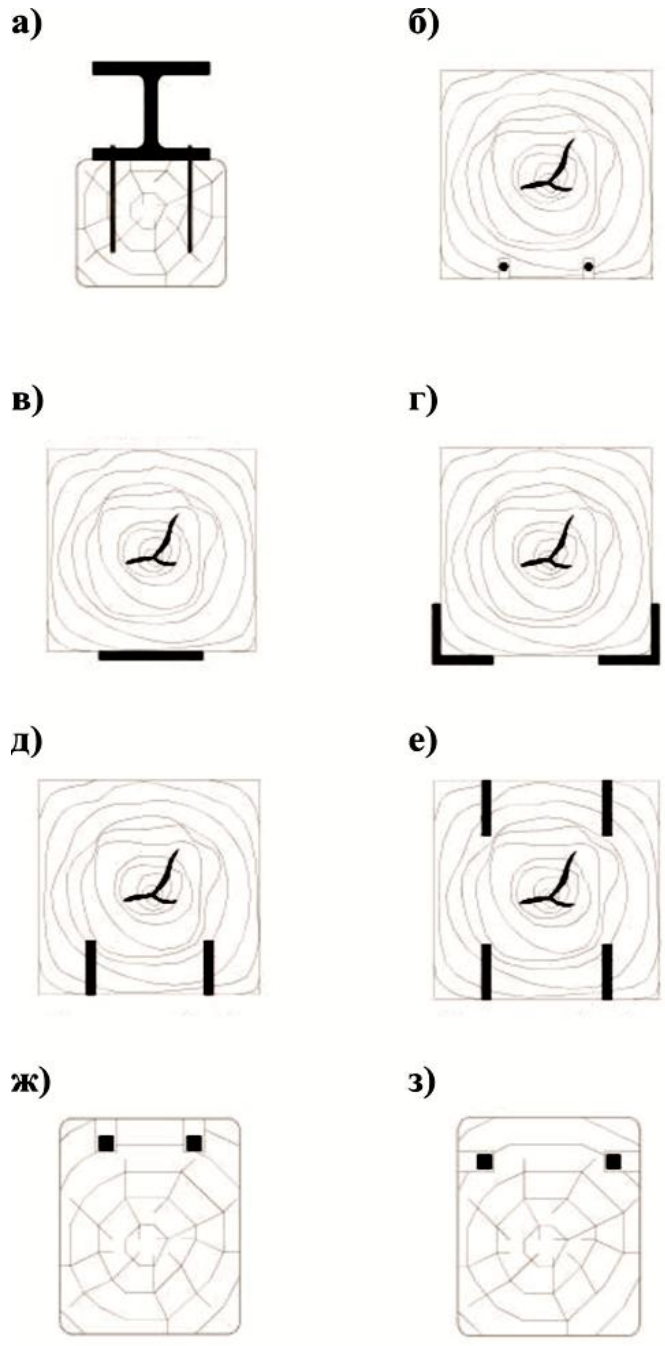


Рис. 7.17. Возможные решения фибропластикового усиления сечений изгибаемых деревянных элементов: а — размещением фибропластикового профиля заводской готовности в сжатой зоне с креплением механическими связями, б — вклейкой стержней в растянутой зоне, в — внешним пластинчатым армированием по грани растянутой зоны, г — внешним профильным армированием по углам растянутой зоны, д — внутренним пластинчатым армированием растянутой зоны, е — внутренним пластинчатым армированием растянутой и сжатой зон, ж — вклейкой армирующих стержней в пазы, выполненные по сжатой грани сечения, з — вклейкой армирующих стержней в пазы, выполненные по боковым граням сжатой зоны сечения; адаптировано по [105]

Усиление в растянутых зонах выполняется с использованием фибропластиковых стержней и пластин, размещаемых как на внешних поверхностях (в том числе и с применением механических связей), так и в специальных внутренних пазах, вырезаемых в деревянных элементах [251-253, 286, 287, 298, 306-316].

Для усиления сжатых зон изгибаемых конструкций также могут использоваться армирующие стержни и пластины, а в отдельных случаях — фибропластиковые профили заводской готовности (рис. 7.17, а). В случае применения усиливающих композитов, не целиком заключаемых в составе поперечных сечений деревянных элементов, соединения фибропластиков с древесиной должны гарантироваться дополнительными механическими связями (гвоздями, шурупами и т.п.). При отсутствии механических креплений внешнее размещение фибропластиковых элементов в сжатых зонах изгибаемых элементов не рекомендуется [105].

Помещение фибропластикового армирования в вырезаемые пазы (рис. 7.17, д, е) позволяет увеличить площади контактных поверхностей адгезионных соединений. В тех случаях, когда элементы усиления полностью погружаются в сечение древесины, практически отсутствуют процессы отслаивания фибропластиков в опорных зонах балочных конструкций.

Использование боковых пазов (рис. 7.17, з), уменьшающих величину плеча внутренних сил, позволяет достигнуть некоторого снижения сдвигающих усилий в адгезионных соединениях фиброкомпозитов с древесиной.

Внешние фибропластиковые аппликации, выполняемые на основе пластин, тканей и лент, консервируют существующие повреждения и трещины, вызванные дефектами материала (сучками, косослоями), потенциально способствующими существенному снижению несущей способности деревянных изгибаемых элементов.

7.7.3. Отслаивание усиливающих фибропластиков в процессе изгиба деревянных элементов

В настоящее время отсутствуют законченные теоретические или экспериментальные исследования, позволяющие установить четкий и надежный порядок расчета и проектирования соединений композитных усилений деревянных изгибаемых элементов, исключающий их отслаивание вследствие влияния параметров напряженно-деформированного состояния конструкций [105].

Разрушениям, сопровождаемым отслаиваниями усиливающих фибропластиков, расположенных в растянутых зонах изгибаемых деревянных элементов, в значительной степени способствуют местные несовершенства древесины и неоднородность ее рабочих поверхностей.

Наличие дефектов древесины в растянутой зоне конструкций (таких как сучки или крупные усушечные трещины) может способствовать отслаиванию усиливающих элементов. При изгибе высока вероятность того, что подобные разрушения возьмут начало в зонах дефектного материала, характеризуемых

превалированием поперечных сил. Разрушения данного типа наблюдались в лабораторных условиях при загружениях образцов одной и двумя сосредоточенными силами [105], приводившими к доминированию поперечных усилий, менее свойственных при действии распределенных нагрузок.

При усилении деревянных изгибаемых конструкций пластинчатыми фибропластиковыми элементами, разрушения соединений часто обуславливаются отслоениями по адгезионному шву, имеющими место по концам усиливающих элементов и вызванными концентрацией касательных напряжений в приопорных зонах, а также отслоениями в средней части конструкции, спровоцированными несовершенствами материала, включающими трещины и значительные косослои, определяющие отклонение направления волокон древесины от оси конструкции.

Неоднородность рабочей поверхности древесины вызывает в адгезионном соединении дополнительные растягивающие напряжения, также способные привести к отслоению элементов внешнего армирования. Избежать данного процесса удается при легкой острожке монтажных поверхностей, удаляющей все неровности, с последующей их очисткой от некогерентных, имеющих нарушенное взаимодействие с основным материалом, частиц.

Кроме того при усилении изгибаемых деревянных конструкций пластинчатыми композитами разрушение может быть вызвано разрывом древесины растянутой зоны, также определяемым наличием дефектов материала (сучков и косослоев растянутых волокон), расположенных в местах действия максимальных изгибающих моментов, а также отделением фрагментов древесины у мест прорезки пазов, выполняемых для размещения элементов внутреннего армирования.

В случае размещения фибропластикового армирования в сжатых зонах конструкций, разрушения могут включать различные варианты, свойственные для изгибаемой не усиленной древесины и обусловливаемые разрывом материала растянутой зоны сечения, а также вызванные потерей продольной устойчивости элементов армирования, сопровождаемой отслоениями по длине прилежащих частей соединений.

При усилении композитным армированием, помещаемым одновременно в растянутой и в сжатой зонах изгибаемых деревянных элементов, возможны все последовательности разрушений, характерные случаям одностороннего армирования.

7.7.4. Особенности расчета

Проектирование фибропластиковых усилений изгибаемых и внецентренно загруженных продольными усилиями деревянных стержней требует размещения армирующих элементов в наиболее нагруженных зонах поперечных сечений.

В случае композитного усиления изгибаемых деревянных элементов, предусматривающего использование армирующих пластин, тканей и лент, учитывая их сравнительно незначительный вклад в увеличение показателей общей жесткости, основным достигаемым результатом является повышение несущей способности конструкций, в то время как с точки зрения снижения деформативности итоговая эффективность данных решений оказывается относительно незначительной [105]. Таким образом, в большинстве случаев применения дополнительного фибропластикового армирования, учет его наличия требуется только при определении величин действующих напряжений.

Гипотезы, положенные в основу расчета. Определение параметров напряженного состояния рассматриваемых конструкций основывается на следующих гипотезах [105]:

— сохранения плоских поперечных сечений,
— «идеальной» работы соединений между древесиной и композитами,
— линейно-упругой продольной работы древесины вплоть до разрушения в растянутых зонах сечений,
— упругопластической продольной работы древесины в сжатых зонах сечений (рис. 7.5),
— линейно-упругой работы фибропластиков, вплоть до их разрушения,
— разрушении изгибаемых элементов, наступающем при достижении древесиной придельных деформаций в сжатых и растянутых зонах сечений.

Пример эпюр нормальных напряжений и относительных деформаций, имеющих место в прямоугольном сечении изгибаемого деревянного элемента, усиленного в растянутой зоне фибропластиковой пластиной, приведен на рисунке 7.18.

При проверке сечений подобных конструкций вопросом потери местной устойчивости обычно пренебрегают, а расчет общей устойчивости выполняют без учета участия в работе элементов композитного усиления.

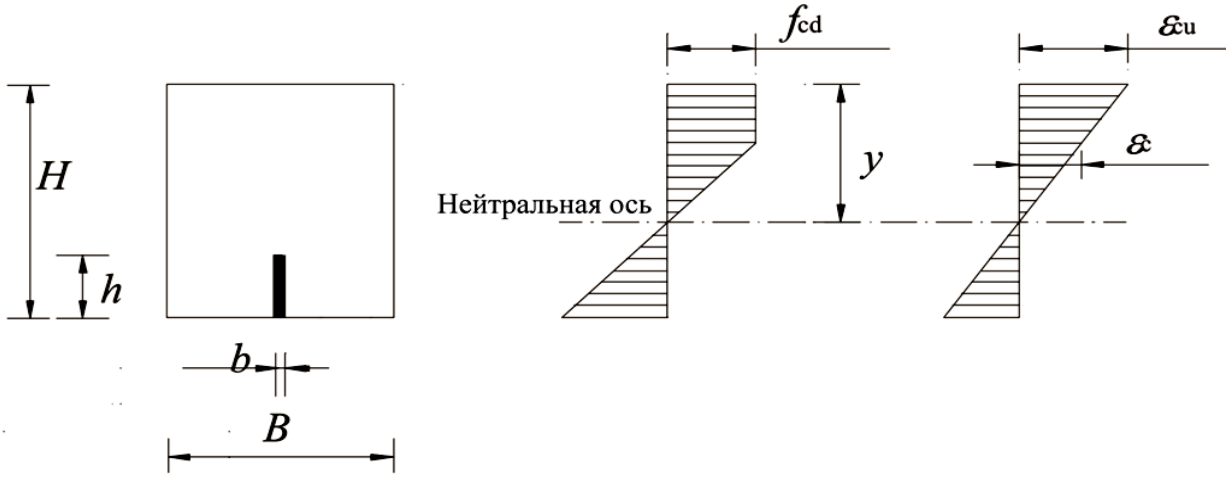


Рис. 7.18. Эпюры нормальных напряжений и относительных деформаций в поперечном сечении деревянного изгибаемого элемента, усиленного фибропластиковой пластиной; адаптировано по [105]

Условия разрушения (по [105])**.** Рассматривается поперечное сечение деревянного элемента, имеющее площадь A, усиленное фибропластиковой пластиной с площадью сечения A_f , установленной на расстоянии d_f от верхней сжатой грани, т.е. $d_f = H - h/2$ (см. рис. 7.18). Возможное разрушение конструкции определяется достижением одного из следующих условий:

1 — развитием предельных деформаций в растянутой древесине сечения, целиком находящегося под действием растягивающих усилий,

2 — развитием предельных деформаций в растянутой древесине сечения, в состав которого входит сжатая зона с упругими деформациями материала,

3 — развитием предельных деформаций в растянутой древесине сечения, включающего сжатую зону, в которой имеют место пластические деформации,

4 — развитием предельных деформаций сжатой древесины сечения при растянутых элементах фибропластикового усиления,

5 — развитием предельных деформаций сжатой древесины при сжатых элементах фибропластикового усиления.

Соответствующие описанным условиям ограничения эпюр деформирования материала представлены на рисунке 7.19.

Каждая из приведенных эпюр ограничения деформаций, определяемых одним из условий разрушения конструкции, соответствует усилиям N и M, имеющим место в армированном поперечном сечении.

Основные уравнения данной задачи могут быть получены из анализа равновесия действующих в конструкции продольных сил и изгибающих моментов, рассматриваемых относительно центра тяжести фибропластикового элемента.

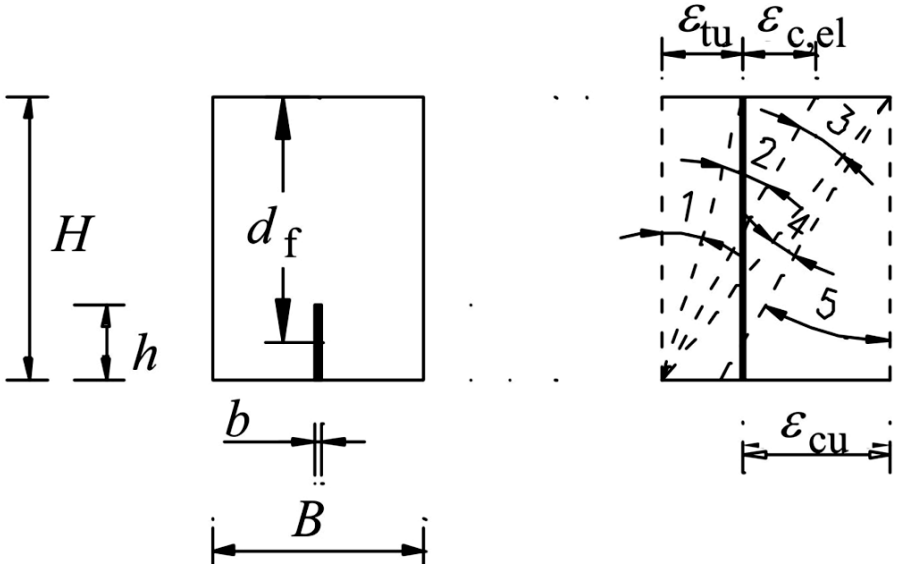


Рис. 7.19. Ограничения эпюр деформирования материала в деревянном изгибаемом элементе, усиленном фибропластиковым армированием; по [105]

Проверка несущей способности сводится к выполнению неравенства:

$$M_{Sd} \leq M_{Rd}(N_{Sd}) \ , \tag{7.3}$$

где: M_{Sd} — действующий момент внешних сил,

M_{Rd} — момент внутренних сил, являющийся функцией действия внешних продольных усилий N_{Sd}.

При этом используются следующие безразмерные вспомогательные величины:

$$N_i = \frac{N_{Sd}}{B \cdot H \cdot f_{cu}} \ , \quad M_i = \frac{M_{Rd}}{B \cdot H^2 \cdot f_{cu}} \ , \quad \xi = \frac{y}{H} \ , \tag{7.4}$$

где: B, H — соответственно, ширина и высота сечения деревянного элемента,

y — расстояние от нейтральной оси до наиболее сжатой грани сечения (см. рис. 7.18),

f_{cu} — предел прочности древесины при сжатии.

Значения величин N_i и M_i при различных условиях ограничения эпюр деформирования материала (по [105])**.** Для пяти различных случаев ограничения эпюр деформирования материала (рис. 7.19) безразмерные величины N_i и M_i имеют следующие значения:

— случай 1: достижение предельных деформаций растяжения древесины сечения, весь материал которого находится под действием растягивающих усилий (внецентренное растяжение с незначительным эксцентриситетом), т.е.

$$0 \le \varepsilon_s \le \varepsilon_{tu} \ \text{(верхние волокна)}, \quad \varepsilon_i = \varepsilon_{tu} \ \text{(нижние волокна)},$$
$$-\infty \le \xi \le 0 \ \text{(нейтральная ось)}, \qquad (7.5)$$

где: ε_s — продольные деформации волокон верхней грани сечения,
ε_{tu} — предельно-допустимые деформации растягиваемой древесины,
ε_i — продольные деформации волокон нижней грани сечения:

$$N_1(\xi) = \frac{\eta}{2}\left(2\xi - 1 + \frac{2\rho_{frp}}{1-\xi} n\left(\xi - p_{frp}\right)\right), \qquad (7.6)$$

$$M_1(\xi) = \frac{\eta}{2(1-\xi)}\xi^2\left(\frac{1}{2} - \frac{1}{3}\xi\right) + \eta\frac{1-\xi}{2}\left(\frac{1}{2} - \frac{1-\xi}{3}\right) + \eta\frac{n}{1-\xi}\left(p_{frp} - \xi\right)\rho_{frp}\left(p_{frp} - \frac{1}{2}\right), \qquad (7.7)$$

где: η — отношение пределов прочности древесины при растяжении и сжатии,
ρ_{frp} — отношение между площадями сечений древесины и фибропластикового армирования,
n — отношение модулей упругости при растяжении фибропластикового армирования и древесины,
p_{frp} — отношение расстояния от фибропластикового армирования до волокон верхней грани сечения к общей высоте сечения балки;

— случай 2: достижение предельных деформаций в растянутой древесине сечения, в состав которого входит сжатая зона с упругими деформациями материала (внецентренное растяжение со значительным эксцентриситетом), т.е.

$$0 \le \varepsilon_s \le \varepsilon_{c,el} \ \text{(верхние волокна)}, \quad \varepsilon_i = \varepsilon_{tu} \ \text{(нижние волокна)},$$
$$0 \le \xi \le \frac{1}{1+\eta} \ \text{(нейтральная ось)}, \qquad (7.8)$$

где: $\varepsilon_{c,el}$ — предел упругих деформаций древесины при сжатии:

$$N_2(\xi) = \frac{\eta}{2}\left(2\xi - 1 + \frac{2\rho_{frp}}{1-\xi} n\left(\xi - p_{frp}\right)\right), \qquad (7.9)$$

$$M_2(\xi) = \frac{\eta}{2(1-\xi)}\xi^2\left(\frac{1}{2} - \frac{1}{3}\xi\right) + \eta\frac{1-\xi}{2}\left(\frac{1}{2} - \frac{1-\xi}{3}\right) + \eta\frac{n}{1-\xi}\left(p_{frp} - \xi\right)\rho_{frp}\left(p_{frp} - \frac{1}{2}\right); \qquad (7.10)$$

— случай 3: достижение предельных деформаций в растянутой древесине сечения, включающего сжатую зону с пластическими деформациями, т.е.

$$\varepsilon_{c,el} \le \varepsilon_s \le \varepsilon_{cu} \ \text{(верхние волокна)}, \quad \varepsilon_i = \varepsilon_{tu} \ \text{(нижние волокна)},$$
$$\frac{1}{1+\eta} \le \xi \le \frac{k}{k+\eta} \ \text{(нейтральная ось)}, \qquad (7.11)$$

где: ε_{cu} — предел деформаций древесины при сжатии,
k — отношение между пределом деформаций и пределом упругих деформаций сжатой древесины:

$$N_3(\xi) = \frac{\eta}{2}\left(\frac{1}{\eta^2}(\xi-1) + \xi\left(\frac{2}{\eta}+1\right) - 1 + \frac{2\rho_{frp}}{1-\xi} n\left(\xi - p_{frp}\right)\right), \qquad (7.12)$$

$$M_3(\xi) = \frac{1-\xi}{2\eta}\left(\frac{1}{2} - \xi + \frac{2(1-\xi)}{3\eta}\right) + \frac{1}{2}\left(\xi - \frac{1-\xi}{\eta}\right)\left(1 - \xi + \frac{1-\xi}{\eta}\right) + \eta\frac{1-\xi}{2}\left(\frac{1}{2} - \frac{1-\xi}{3}\right) +$$
$$+ n\eta\left(\frac{p_{frp}-\xi}{1-\xi}\right)\rho_{frp}\left(p_{frp} - \frac{1}{2}\right); \qquad (7.13)$$

— <u>случай 4</u>: достижение предельных деформаций сжатой древесины сечения при растянутых элементах фибропластикового усиления, т.е.

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{cu} \ \text{(верхние волокна)}, \quad \varepsilon_{cu}\frac{1-p_{frp}}{p_{frp}} \le \varepsilon_i < \varepsilon_{tu} \ \text{(нижние волокна)},$$
$$\frac{k}{k+\eta} \le \xi \le p_{frp} \ \text{(нейтральная ось):} \qquad (7.14)$$

$$N_4(\xi) = \xi k\left(\frac{1}{k} - \frac{1}{2k^2} - \frac{1}{2\xi^2} + \frac{1}{\xi} - \frac{1}{2}\right) + \rho_{frp}\, kn\left(1 - \frac{p_{frp}}{\xi}\right), \qquad (7.15)$$

$$M_4(\xi) = \frac{\xi}{2k}\left(\frac{1}{2} - \xi + \frac{2\xi}{3k}\right) + \frac{1}{2}\left(1 - \frac{1}{k}\right)\left(1 - \xi + \frac{\xi}{k}\right)\xi + \frac{k}{6\xi}(1-\xi)^2\left(\frac{1}{2} + \xi\right) +$$
$$+ n\frac{\rho_{frp}\, k}{\xi}\left(p_{frp} - \xi\right)\left(p_{frp} - \frac{1}{2}\right), \qquad (7.16)$$

— <u>случай 5</u>: достижение предельных деформаций сжатой древесины по верхней грани сечения при сжатых элементах фибропластикового усиления, т.е.

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{cu}\text{(верхние волокна)}, \ 0 \le \varepsilon_i < \varepsilon_{cu}\frac{1-p_{frp}}{p_{frp}}\text{(нижние растянутые волокна)},$$
$$0 \le \varepsilon_i < \varepsilon_{cu}\text{(нижние сжатые волокна)}, \ p_{frp} \le \xi \le \frac{k}{k-1}\text{(нейтральная ось):} \qquad (7.17)$$

$$N_5(\xi) = \xi k\left(\frac{1}{k} - \frac{1}{2k^2} - \frac{1}{2\xi^2} + \frac{1}{\xi} - \frac{1}{2}\right), \qquad (7.18)$$

$$M_5(\xi) = \frac{\xi}{2k}\left(\frac{1}{2} - \xi + \frac{2\xi}{3k}\right) + \frac{1}{2}\left(1 - \frac{1}{k}\right)\left(1 - \xi + \frac{\xi}{k}\right)\xi + \frac{k}{6\xi}(1-\xi)^2\left(\frac{1}{2} + \xi\right). \qquad (7.19)$$

7.8. Повышение пространственной жесткости плоскостных конструкций

7.8.1. Предпосылки усиления

Одним из наиболее распространенных материалов настилов перекрытий исторических зданий и сооружений является древесина. При этом плоскостная жесткость подобных конструкций, в существенной степени определяющая пространственную жесткость всего сооружения, относительно невелика. Достаточно распространенным явлением является деформирование деревянных настилов в плоскости своей конструкции. Данная проблема свойственна перекрытиям как исторических, так и новых зданий.

Деревянные перекрытия состоят из двух основных частей: балочных каркасов и опертых на них настилов. Балочный каркас обычно включает один или несколько поперечных рядов балок, воспринимающих вертикальные нагрузки. Плоские настилы изготавливаются из одного и более слоев досок или, как это имеет место в исторических сооружениях западной Европы, из отдельных керамических плиточных элементов (рис. 7.20), и воспринимают непосредственное приложение вертикальных нагрузок, а также обеспечивают горизонтальную жесткость конструкции перекрытия.

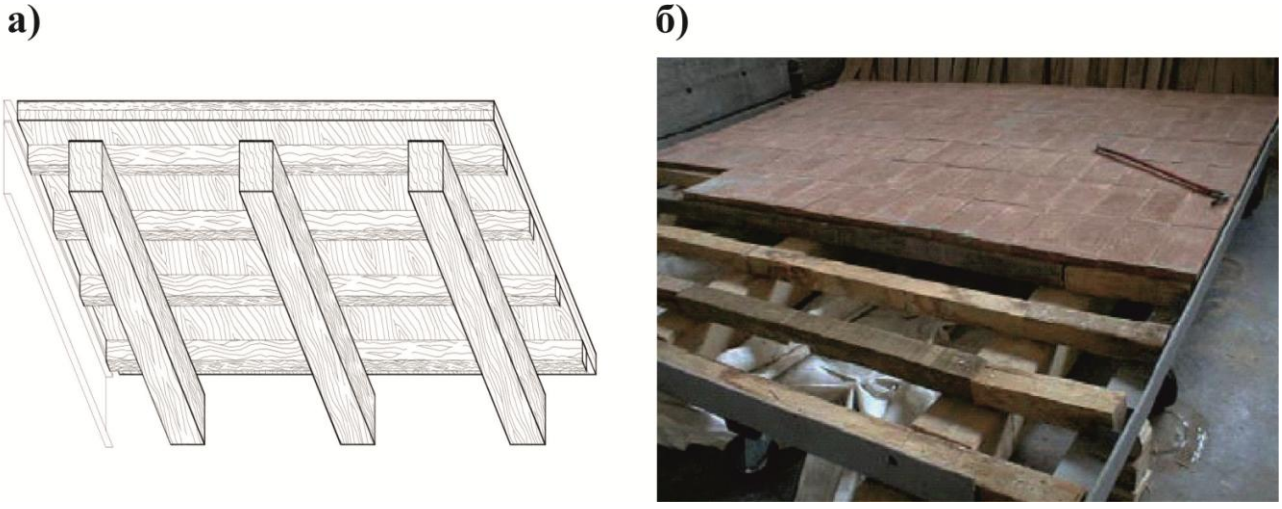


Рис. 7.20. Деревянные перекрытия: а — с дощатыми настилами, б — с настилами из отдельных плиточных элементов; по [105]

Одной из главных целей рассматриваемых методов усиления является увеличение прочностных и жесткостных характеристик работы в плоскости конструкций при действии сейсмических нагрузок [317]. В этом контексте фибропластиковые элементы представляют собой эффективную альтернативу

традиционным методам усиления, часто оказывающимися не адекватными поставленной задаче [318, 319].

При сейсмических воздействиях на здания роль настилов деревянных перекрытий сводится к перераспределению и передаче горизонтальных нагрузок на вертикальные элементы. Определение горизонтальных нагрузок, действующих на отдельные вертикальные элементы, а также общей деформативности их систем, основывается на величинах, характеризующих горизонтальную жесткость перекрытий [320, 321]. Высокая жесткость последних позволяет абстрагироваться от влияния их собственных деформаций на распределение усилий между вертикальными элементами, что значительно упрощает методы определения параметров общей работы систем конструкций и увеличивает точность определения деформаций и усилий.

Большинство деревянных перекрытий не обеспечивает высокую пространственную жесткость и требует соответствующего усиления. Эффективность рассматриваемых вмешательств во многом зависит от особенностей конструкций настилов и их размеров.

Для осуществления фибропластикового усиления, воспринимающего нагрузки, прикладываемые в плоскости настилов конструкций перекрытий, необходимо соответствие последних общим требованиям прочности и жесткости при действии вертикальных нагрузок, так как рассматриваемые изменения не увеличивают их изгибную жесткость и несущую способность. В тоже время при использовании данных методов усиления практически отсутствует и рост собственного веса перекрытий.

7.8.2. Работа не усиленных настилов деревянных перекрытий при действии горизонтальных нагрузок

Определение параметров работы настилов, воспринимающих горизонтальные нагрузки, осложняется недостаточным количеством связей между элементами их конструкций. Для упрощения расчета авторами рассматриваемого метода [105] были проанализированы настилы, состоящие из одного слоя досок, равномерно размещенных по опорным балкам и связанных с ними в каждом узле с помощью двух соединительных элементов (гвоздей, шурупов и т.п.). Также предполагалось, что горизонтальное деформирование настилов ограничивается по одной из их сторон, тогда как противоположная сторона, воспринимающая сдвигающее усилие в плоскости конструкции, перемещается параллельно первой (см. рис. 7.21, а).

Предполагая, что при малых смещениях между отдельными досками отсутствуют продольные связи, авторы метода получили систему, в которой об-

щему деформированию препятствуют только соединительные элементы, крепящие доски к балкам. При этом каждая отдельно взятая доска может рассматриваться как раскрепленная по концам упругой связью, обладающей конечной жесткостью вращения относительно оси, перпендикулярной плоскости настила.

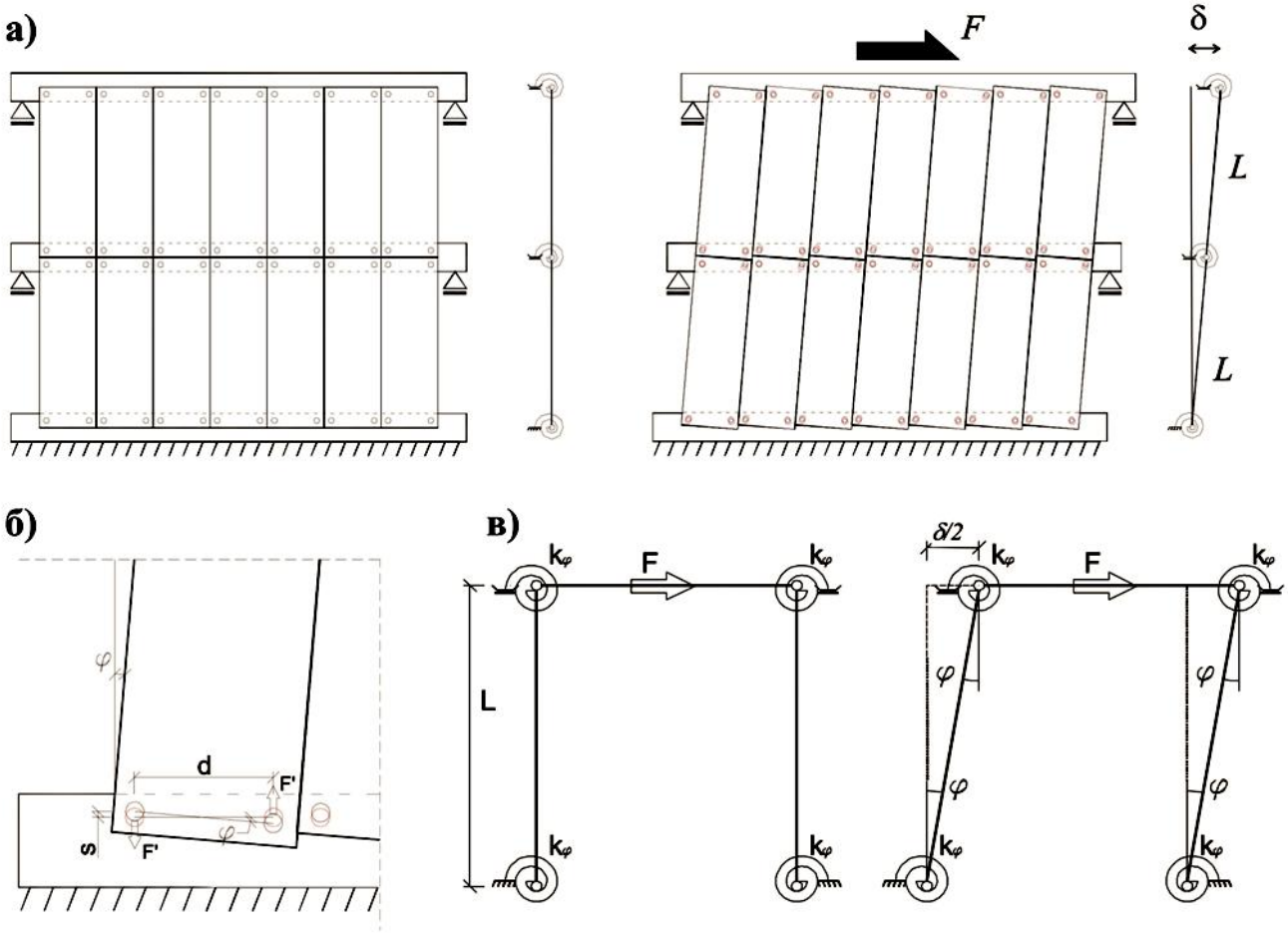


Рис. 7.21. Расчетные схемы настила деревянного перекрытия, воспринимающего нагрузки, приложенные в его плоскости: а — схема настила до и после деформирования, б — расчетная схема парного соединения плоского элемента настила с опорной балкой, в — расчетная схема фрагмента настила [105]

Поскольку известны геометрические размеры и механические характеристики элементов, составляющих рассматриваемую систему, для авторов метода [105] стало возможным, в предположении отсутствия деформирования отдельных досок, определить вращательную жесткость двух упругих связей (рис. 7.21, б). При этом сдвиг по отдельно взятому соединительному элементу s, при повороте доски настила на величину φ, составил

$$s = \frac{d}{2}\varphi = \frac{F'}{k_{ser}} \ , \qquad (7.20)$$

где: k_{ser} — зависит, в соответствии с кодом *EN 1995-1-1*, от типа соединительного элемента и плотности древесины.

Вращательная жесткость k_φ может быть определена с помощью момента *M'* пары сил *F'*, действующих при сдвиге в соединительных элементах

$$M' = F' d = \left(\frac{d^2}{2} k_{ser}\right) \varphi = k_\varphi \cdot \varphi \ . \tag{7.21}$$

Усилие сдвига *F* и соответствующая ему деформация δ, имеют следующие взаимозависимости

$$F \cdot \delta = 2 \sum_{\text{досок}} k_\varphi \varphi^2 \ , \tag{7.22}$$

$$\varphi = \frac{\delta}{L} \ , \tag{7.23}$$

$$F = \left(\frac{2 \sum_{\text{досок}} k_\varphi}{L^2}\right) \delta = k_{tot} \cdot \delta \ , \tag{7.24}$$

где: k_{tot} — общая жесткость настила (рис. 7.21, в), используемая как параметр, оценивающий степень эффективности осуществляемого усиления.

7.8.3. Усиление настилов деревянных перекрытий при действии горизонтальных нагрузок

Предлагаемое авторами метода [105] усиление настилов деревянных перекрытий, предполагающее увеличение их плоскостной жесткости, предусматривает раскрепление конструкций фибропластиковыми полосами, перекрестно размещаемыми в плоскости наката пола (рис. 7.22, а).

Достигаемая эффективность усиления оценивается с помощью расчетной схемы, представленной на рисунке 10.22, б. При этом усиливающие элементы моделируются как диагональные упругие при растяжении связи, закрепленные на поверхности конструкций и обладающие продольной жесткостью k_δ, равной

$$k_\delta = \frac{E_f A_f}{D} \ , \tag{7.25}$$

где: E_f — продольный модуль упругости фибропластикового элемента,
A_f — площадь поперечного сечения фибропластикового элемента,
D — длина диагональной связи.

В связи с практически отсутствующей несущей способностью фибропластиковых полос при действии сжимающих усилий, сжатые диагональные связи в расчете не учитываются.

При приложении горизонтальной нагрузки *F*, возникающие деформации настила будут отличаться от рассмотренных ранее, в предположении отсутст-

вия усиления (рис. 7.21, в), наличием упругой деформации продольной связи (рис. 7.22, б), зависящей от угла поворота φ. Соответствующий коэффициент линейного удлинения ε составит

$$\varepsilon = \frac{\delta \cdot \cos\,\alpha}{D} \ . \qquad (7.26)$$

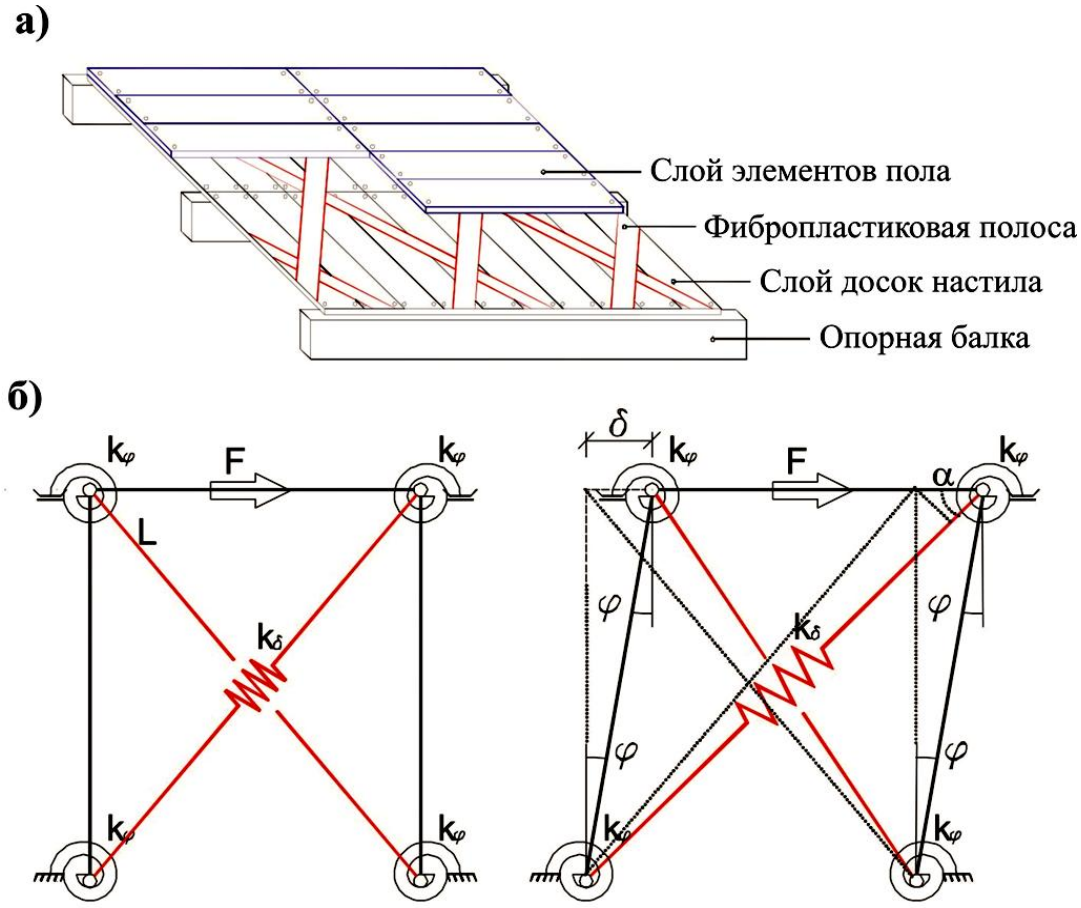


Рис. 7.22. Схемы усиленного настила деревянного перекрытия, воспринимающего нагрузки, приложенные в его плоскости: а — схема взаиморасположения элементов, б — расчетная схема; адаптировано по [105]

Продольная сила в диагональном элементе фибропластикового усиления примет величину

$$N_{frp} = k_\delta \cdot \varepsilon \cdot D = \frac{E_f A_f}{D} \delta \cdot \cos\alpha \ . \qquad (7.27)$$

При этом общая жесткость настила $k_{tot,rinf}$, сравниваемая с аналогичным показателем не усиленной конструкции k_{tot} (рис. 7.21, в), будет равняться

$$F = \left(\frac{E_f A_f}{2D} \cdot \cos^2\alpha\right) \delta = k_{tot,rinf} \cdot \delta \ . \qquad (7.28)$$

Последняя величина определяет гораздо большую плоскостную жесткость конструкции, нежели узловые соединительные элементы (7.24), и таким образом может рассматриваться как общая функция деформирования усиленного настила.

Использование описанного решения становится возможным при диагональном расположении работающих на растяжение элементов, выполненных из однонаправленных фибропластиковых материалов, отличающихся значительной продольной жесткостью, достаточно малой толщиной и высокой деформативностью при действии нагрузок, приложенных перпендикулярно плоскости их размещения.

Для реализации данных усилений наиболее предпочтительными являются фиброармированные композиты, изготовленные на основе стекловолокна, что обуславливается их относительно небольшой величиной модуля упругости, позволяющего вводимым элементам повторять природные деформации древесины, а также эксплуатационные деформации конструкций настилов, не вызывая чрезмерных напряжений по плоскостям их соединений. Элементы усиления могут наклеиваться в виде фибропластиковых ламинатов заводской готовности или выполняться по месту с использованием соответствующих армирующих тканей и лент.

Для исключения потери устойчивости сжатых элементов усиления, выравнивания деформаций настила относительно основных направлений его работы в плоскости, а также для защиты и повышения надежности работы соединений, рекомендуется [105] размещение вышележащего слоя досок пола, ориентируемых перпендикулярно направлению элементов основного слоя и соединяемых с ним нагелями или шурупами (рис. 7.22, а). Устройству верхнего слоя досок предшествует покрытие фибропластиковых элементов адгезивом, предназначенным для увеличения несущей способности соединений системы усиления. Дальнейшая отделка поверхности пола производится в обычном порядке. В случае выполнения наката настила из отдельных плиточных элементов (см. рис. 7.20, б), поверхностный защитный слой, также препятствующий потере устойчивости сжатых элементов усиления, может изготавливаться с применением строительных растворов.

7.9. Примеры фибропластикового усиления деревянных конструкций исторических зданий и сооружений

Рассмотрим некоторые примеры фибропластикового усиления деревянных строительных конструкций объектов исторического наследия, приведенные в [105].

***Дворец Нобили в г. Лукка* (*Palazzo Nobili, Lucca*, Италия).** Балки кессонных перекрытий, имевшие локальные повреждения поверхности, вызванные

деятельностью грибковых заражений и насекомых-вредителей, были подвергнуты фибропластиковому усилению в 2005 году. С этой целью в предварительно прорезанные пазы, размещаемые в нижних частях их боковых граней, вклеивались углеродоволоконные ламинированные пластины (рис. 7.23), повышавшие изгибную прочность и жесткость конструкций.



Рис. 7.23. Усиление балок деревянного кессонного перекрытия дворца *Нобили* в *г. Лукка*, Италия (*Palazzo Nobili, Lucca; проект M.Martinelli – Legno Piu S.r.l.*); адаптировано по [105]

***Здание компании SIAZ в районе Треви, Рим* (*Siaz Buildig, Trevi,* Италия).** Проект усиления, осуществленный в 2003 году, предусматривал использование углеродоволоконных пластин при усилении несущих элементов деревянных перекрытий (рис. 7.24). Конструкции перекрытия, включающего три ряда деревянных балок, выполненных из хвойных пород древесины, были усилены вклеиванием ламинированных элементов в предварительно прорезанные пазы, размещенные в растянутых и сжатых зонах их боковых граней. В качестве адгезионных материалов применялись растворы на основе эпоксидных смол.



Рис. 7.24. Усиление главной балки перекрытия здания компании *SIAZ* в районе *Треви, Рим* (*Siaz Buildig, Trevi; проект A.Giannantoni, F.Menghini, при участии проф. A.Borri*); адаптировано по [105]

***Жилой дом в г. Сполето* (*Spoleto*, Италия).** Усиление деревянного перекрытия, включавшего два ряда деревянных балок и настил, выполненный из керамических плиточных элементов, было осуществлено при реконструкции жилого дома в городе *Сполето* в 2003 году (рис. 7.25). Необходимость производства работ определялась чрезмерными прогибами второстепенных балок перекрытия. Проектное решение предусматривало введение в предварительно прорезанные штрабы, размещенные на нижних гранях второстепенных деревянных балок, углеродоволоконных ламинированных пластин.



Рис. 7.25. Усиление второстепенных балок жилого дома в *городе Сполето* (*Spoleto*, Италия*; проект A.Giannantoni, при участии проф. A.Borri*); адаптировано по [105]

***Дворец Collicola в г. Сполето* (*Spoleto*, Италия).** Старинное деревянное перекрытие галереи современного искусства во дворце *Collicola* города *Сполето* подверглось фибропластиковому усилению с целью повышения сейсмостойкости конструкций в 2004 году. Перекрытие включало главные балки, на которые опирались ряды второстепенных балок, поддерживающих настил. Схема усиления предусматривала монтаж по длине верхних граней главных балок дополнительных фибропластиковых элементов двутаврового сечения, изготовленных из пультрузионного стеклопластика (рис. 7.26, б). Установке стеклопластиковых профилей предшествовала локальная разборка прилежащих зон поперечного наката пола. Для пропуска узлов сопряжения балок нижние полки монтируемых элементов получали местные вырезы (рис. 7.26, а). Крепление фиброармированных конструкций к древесине осуществлялось с помощью шпоночных стеклопластиковых элементов, а также адгезионных растворов на основе эпоксидных смол.

а)



б)

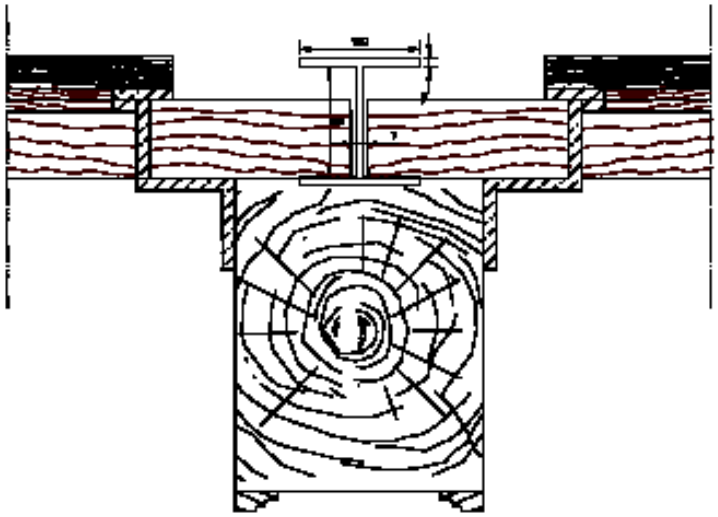


Рис. 7.26. Усиление главных балок перекрытия дворца *Collicola* в городе *Сполето* (*Spoleto*, Италия*; проект A.Giannantoni, F.Menghini, при участи проф. A.Borri*): а — монтаж балок усиления, выполненных из пультрузионного стеклопластика, б — схема поперечного сечения усиленных балок; по [105]

***Историческое здание в г. Лукка* (*Lucca*, Италия).** Балки деревянного перекрытия исторического здания, расположенного в городе *Лукка*, были усилены в 2004 году. Необходимость усиления обуславливалась наличием существенных трещин в их древесине. Инновационной особенностью данного решения, призванного повысить несущую способность и изгибную жесткость конструкций, явилось размещение по верхним граням балок дополнительных дере-

а)



б)

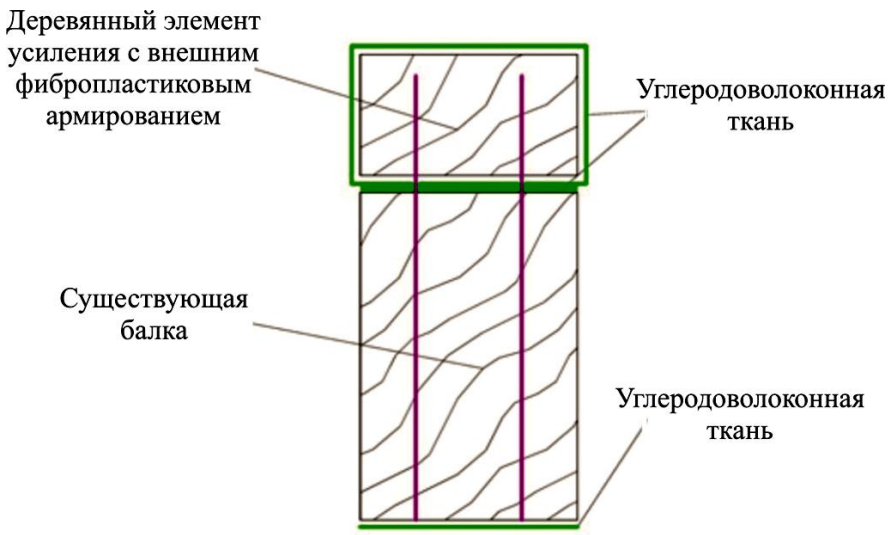


Рис. 7.27. Усиление главных балок перекрытия исторического здания в городе *Лукка* (*Lucca*, Италия*; проект G. Ussia – Ardea Progetti & sistemi S.r.l.*): а — внешний вид конструкций по окончании усиления, б — схема поперечного сечения усиленных балок; адаптировано по [105]

вянных элементов, предварительно армированных внешними слоями фибропластика, изготовленного на основе углеродоволоконных тканей (рис. 7.27, б). Монтажу усиливающих деревянных элементов предшествовала наклейка по верхним и нижним граням существующих конструкций полос углеродоволоконной ткани. Совместность работы частей сечения в данном случае обеспечивалась комбинированием клеевых соединений с механическими связями. На завершающем этапе производства работ внешние поверхности конструкций были оклеены деревянным шпоном, что позволило практически полностью скрыть следы усиления (рис. 7.27, а).

8. Сейсмостойкое усиление

8.1. Методы усиления с использованием фибропластиковых систем

Усиление строительных конструкций фибропластиковыми материалами довольно часто является вынужденной мерой, позволяющей преодолеть их недостаточную сейсмостойкость, а также осуществить необходимую модернизацию, ставящую целью обеспечение более жестких требований новых нормативных документов.

Последствия сейсмических воздействий свидетельствуют о значительной уязвимости существующего фонда зданий и сооружений, возведенных не только в каменной кладке, но и реализованных в соответствии с каркасной конструктивной схемой, чему способствуют имеющиеся недостатки сопряжений балок и колонн, дефицит несущей способности элементов при действии поперечных усилий, малая пластичность изгибаемых элементов, недостаточные длины нахлеста несущих арматурных стержней и, очень часто, неадекватное проектирование, не учитывающее возможность действия эпизодических усилий изгиба, обусловленных сейсмическими воздействиями [322, 323].

К традиционным методам сейсмостойкого усиления строительных конструкций, зданий и сооружений принято относить создание различных армированных рубашек, торкретирование, введение дополнительных железобетонных и металлических рам, обойм и т.п. Преимущества и недостатки подобных методов хорошо известны проектировщикам. Современной, перспективной и быстроразвивающейся их альтернативой являются системы внешнего фибропластикового армирования (см. рис. 8.1). При этом повышение сейсмостойкости конструкций с использованием фибропластиковых систем демонстрирует существенную экономичность в сравнении с традиционными методами решения данной задачи.

Применение в сейсмоопасных районах, характеризуемых сейсмичностью 7…9 балов, комплексных систем внешнего фибропластикового усиления позволяет в зависимости от конкретных условий строительной площадки и конструктивных схем объектов снизить в 1,5-4 раза усилия, действующие в строительных конструкциях от сейсмических воздействий [324]. Достигаемый эффект во многих случаях дает возможность использования проектных решений, не предназначенных для строительства в сейсмических районах, а также обеспечивает практическое повышение сейсмостойкости существующих строительных объектов на 1…2 бала.

а) **б)**





в)



Рис. 8.1. Сейсмостойкое фибропластиковое усиление элементов железобетонных каркасов: а — сжатых «коротких» колонн с использованием углеродоволоконных холстов, б — опорных частей ригелей с использованием углеродоволоконных лент, в — сложных сопряжений элементов с использованием стекловолоконных холстов; по [324]

При сейсмостойком усилении, так же как и в других случаях применения фибропластиковых систем, внешнее армирование осуществляется установкой по адгезионному слою высокопрочных волоконных холстов, лент, ламинатов и сеток, размещаемых в растянутых зонах изгибаемых и внецентренно сжатых элементов и их сопряжений, охватывающих поперечные сечения частей конструкций, воспринимающих поперечные силы или сжимающие усилия, а также диагонально раскрепляющих плоские элементы, требующие повышения пространственной прочности. Данному усилению могут подвергаться железобетонные колонны, ригели и диафрагмы, участки несущих каменных стен, а также горизонтальные элементы перекрытий и покрытий, участвующие в распределении сейсмических усилий между вертикальными несущими элементами.

Преимущества систем сейсмостойкого фибропластикового усиления основываются на высоких механических характеристиках растянутых волоконных материалов и их низком весе (которым в большинстве случаев допустимо пренебречь), возможности сокращения затрат времени и труда при монтаже, отсутствии необходимости привлечения тяжелой техники, возможности производства работ без полного вывода объектов из эксплуатации, допустимости гибкого исправления ошибок, допущенных при проектировании и строительстве. Повышение надежности и безопасности эксплуатации в этих случаях сочетается со снижением затрат на устройство систем усиления: в сравнении с традиционными антисейсмическими мероприятиями, в зависимости от сейсмического района, конструктивного решения, высоты и степени ответственности строительного объекта, расходы снижаются на 5-20% [324]. Немаловажными факторами, способствующими выбору антисейсмических фибропластиковых систем, является возможность сохранения существующего архитектурного облика, а также достигаемая свобода принятия планировочных и конструктивных решений.

Используемые в настоящее время традиционные схемы увеличения сейсмостойкости зданий до 9-10 балов, предусматривают возведение мощных контрфорсов, располагаемых по их контурам, изменяющих конструктивные схемы и существенно влияющих на архитектурный облик (рис. 8.2). В тоже время в отношении многих объектов достижение подобного результата становится возможным при устройстве внутренних диафрагм жесткости, выполняемых из торкрет-бетона, армированного углеродоволоконными сетками, с усилением основных несущих конструкций системами внешнего фибропластикового армирования (рис. 8.3).

а) **б)**



Рис. 8.2. Увеличение сейсмостойкости зданий устройством контрфорсов: а — здание в процессе усиления, б — здание по окончании производства работ; по [108]

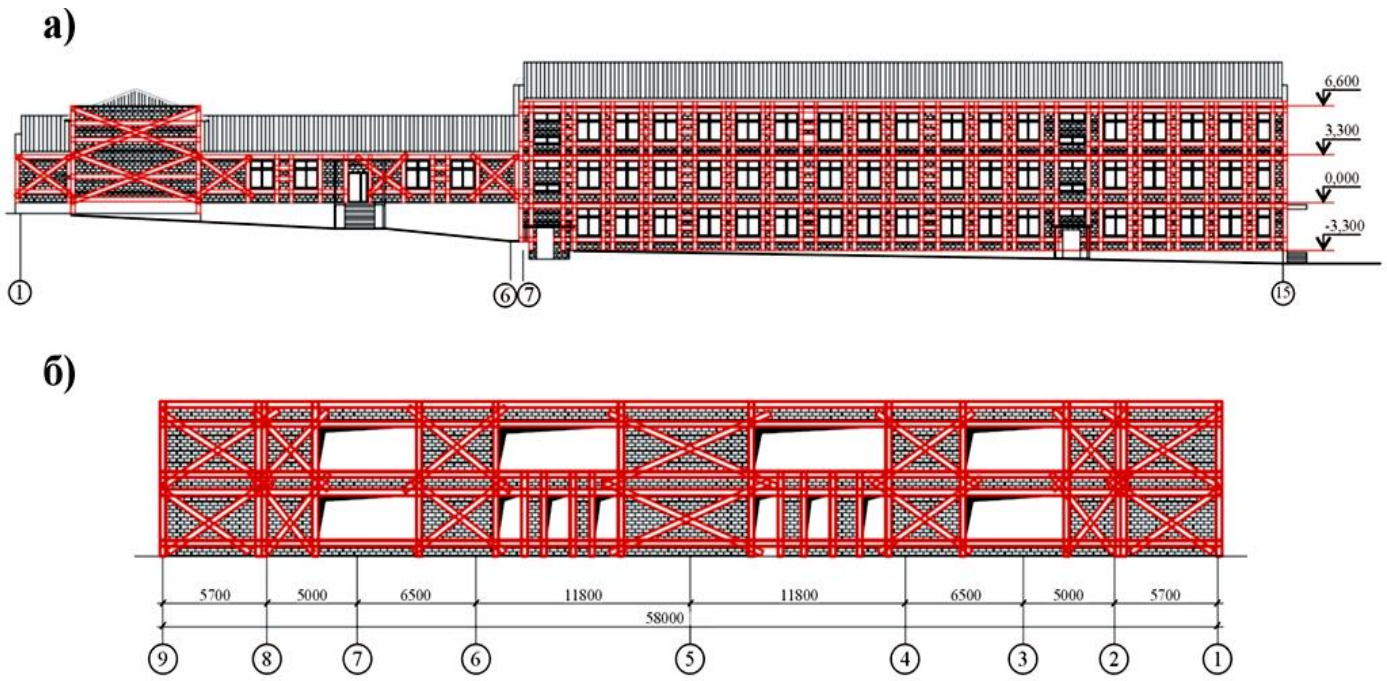


Рис. 8.3. Примеры сейсмостойкого усиления каменных зданий фибропластиковыми системами внешнего армирования: а — с эффективностью усиления, в сравнении с железобетонными аппликациями, составляющей 18%, б — с эффективностью усиления, составляющей 24%; по [108]

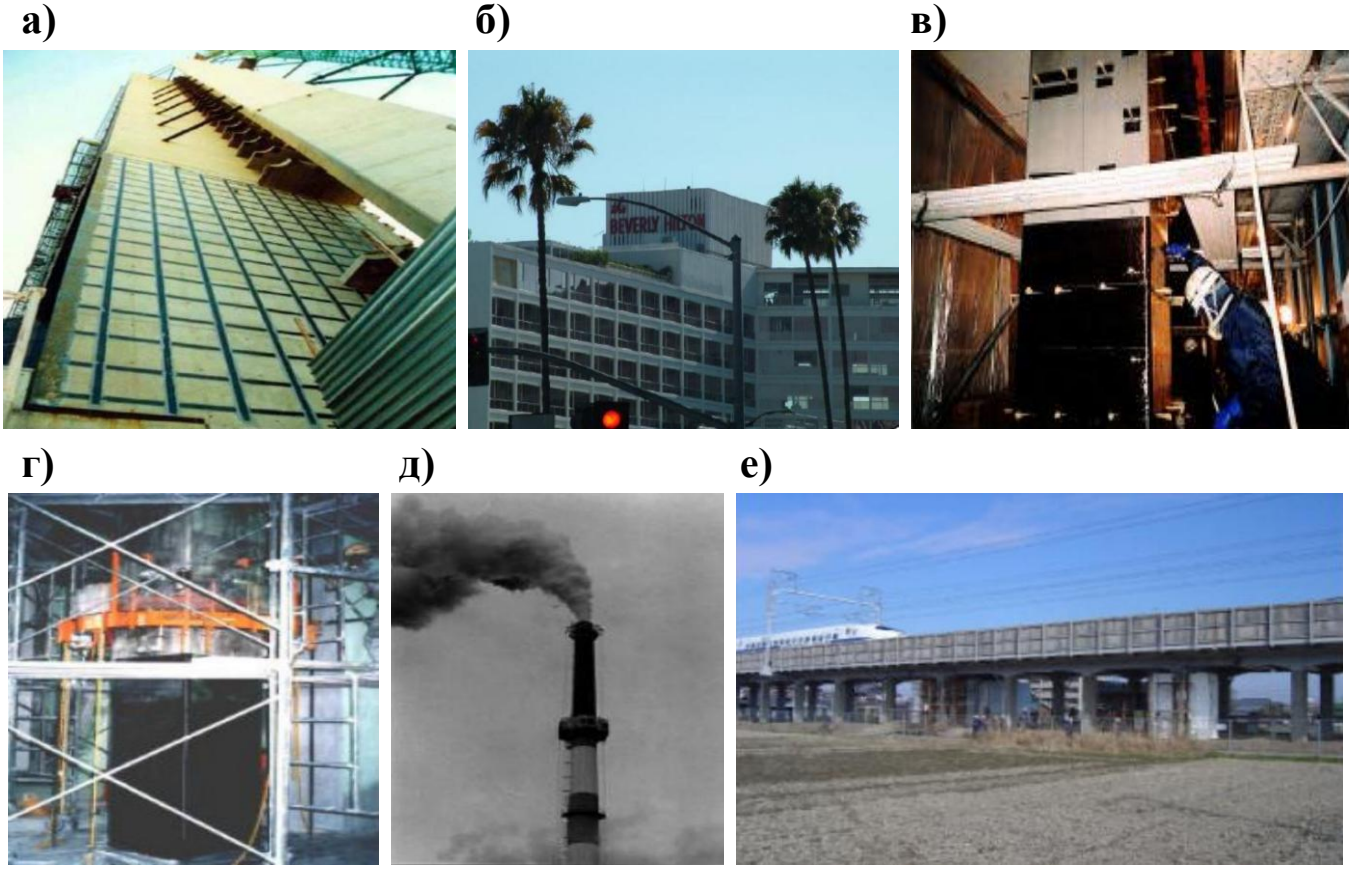


Рис. 8.4. Примеры фибропластикового сейсмостойкого усиления: а — здание суда в г. Неаполь, б — здание отеля *Beverly Hills Hilto*n (США), в-е — соответственно, колонны офисного здания и музея, дымовые трубы, эстакада скоростных поездов (Япония); по [324]

К списку наиболее известных примеров фибропластикового сейсмостойкого усиления можно отнести многоэтажное, высотой 110 метров, здание суда в городе *Неаполь* (Италия), здание отеля *Beverly Hills Hilton* (США), здание гостиницы «*Сочи-Плаза*» в городе *Сочи* (Российская Федерация). Только в одной Японии в последние годы подобное усиление было выполнено в отношении более чем 200 объектов, включавших защитные конструкции вдоль автодорог у береговой линии, резервуары для воды, офисные здания, школы, больницы и музеи (см. рис. 8.4) [324].

8.2. Эффективность фибропластиковых систем сейсмостойкого усиления

8.2.1. Здания и сооружения

С целью оценки эффективности применения фибропластиковых систем сейсмостойкого усиления федеральным государственным бюджетным учреждением «*Всероссийский научно-исследовательский институт по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России»* (*ФГБУ ВНИИ ГОЧС,* Российская Федерация) в 2012 году были проведены сравнительные испытания фрагментов зданий на действия сейсмических нагрузок. Экспериментальные исследования предусматривали размещение на сейсмоплатформе больших размеров (рис. 8.5) каменных и железобетонных фрагментов зданий, не имевших специального сейсмического усиления, а также подвергнутых усилению с помощью композитных материалов *FibARM* на основе углеродного волокна холдинговой компанией *«Композит»* (Российская Федерация) [324]. При испытаниях регистрировались ускорения, перемещения и относительные смещения оснований опор в вертикальном и горизонтальном направлениях, а также напряжения в узлах испытываемых конструкций, их деформации и время образования (раскрытия) трещин.

Испытывавшиеся фрагменты зданий, выполненные в каменной кладке, имели размеры 5820×4800×2200 мм (рис. 8.6, а) и расчетную несущую способность, эквивалентную сейсмическому воздействию в 5-6 балов по шкале *MSK-64*. При этом у одного из фрагментов, стены и узлы соединения сборных железобетонных плит перекрытия с нижележащими конструкциями были усиленны фибропластиковыми элементами на основе лент из углеродного волокна, предварительно предполагавшими повышение сейсмостойкости до 8-9 балов.

а) **б)**

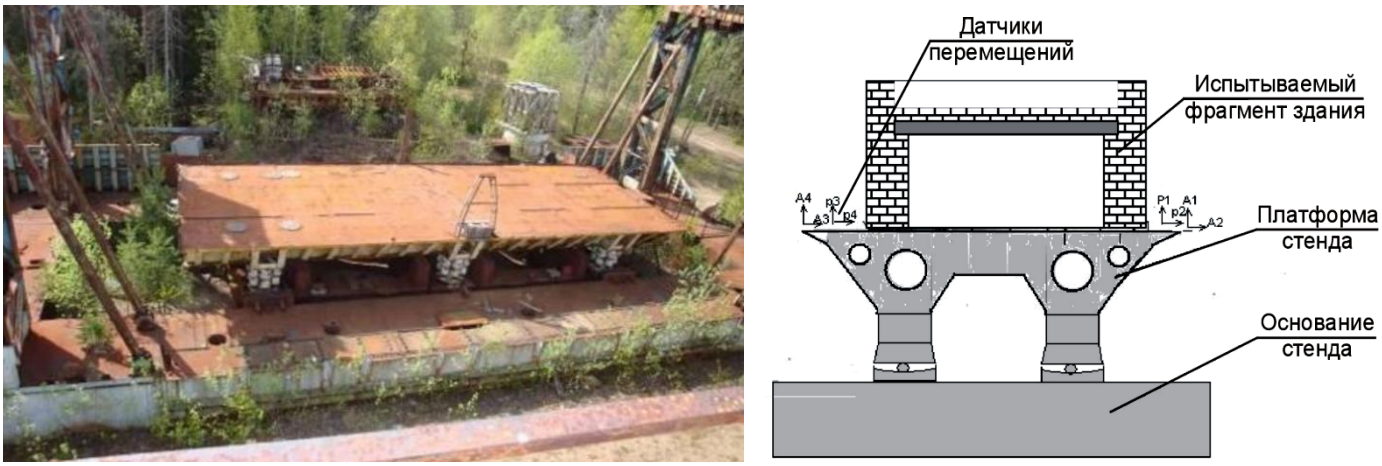


Рис. 8.5. Испытательная сейсмоплатформа: а — общий вид, б — расчетная схема; по [324]

а) **б)**



Рис. 8.6. Испытываемые фрагменты зданий, выполненные в каменной кладке: а — до испытаний, б — после испытаний; по [324]

Железобетонные фрагменты зданий, представляли собой сборные одно-пролетные каркасы с размерами 6000×5100×2720 мм (рис. 8.7, а) и имели расчетную несущую способность, также эквивалентную сейсмическому воздействию в 5-6 балов по шкале *MSK-64*. В этом случае колонны, ригели, узлы соединения плит перекрытия с ригелями и ригелей с колоннами одного из фрагментов были усилены внешними армирующими системами на основе лент и жгутов из углеродного волокна, предполагавшими повышение сейсмостойкости до 8-9 балов.

а) **б)**



Рис. 8.7. Испытываемые фрагменты железобетонных каркасов: а — до испытаний, б — после испытаний; по [324]

В ходе исследований сейсмостендом, при помощи пневмоустановки и вибромашины, моделировались динамические нагрузки, эквивалентные сейсмическим воздействиям интенсивностью от 3-х до 9,5 балов по шкале *MSK-64*: было проведено порядка 20 испытаний, предусматривавших различную интенсивность и виды воздействий (только вибрация, вибрация и пневмоудар, только пневмоудар) при размещенной на перекрытиях полезной нагрузке переменной величины (от 10 до 30 тонн). При максимальных динамических нагрузках горизонтальные составляющие ускорения сейсмостенда приближались к 6 м/с^2, а вертикальные — к 3,5 м/с^2 (эквивалентно сейсмическому воздействию в 9,5 баллов). Перемещения опытных фрагментов варьировались от 120 до 150 мм, а измерявшиеся напряжения в бетоне колонн не усиленного фрагмента железобетонного каркаса, действовавшие в местах максимальных изгибающих моментов (в зонах сопряжения с основанием), превышали предельные значения $\sigma > 250$ кгс/см^2.

В процессе рассматриваемых испытаний не усиленные фрагменты зданий были доведены до разрушений (см. рис. 8.6, б и 8.7, б). Разрушению каменного фрагмента предшествовало образование наклонных трещин по длине кладки стен и у стеновых проемов, смещение плит перекрытия относительно друг друга и несущих стен. Разрушение фрагмента железобетонного каркаса сопровождалось образованием в колоннах продольных трещин вдоль сжатой арматуры, наклонными трещинами у опоры одной из колонн, по которой произошло разрушение, а также смещением плит перекрытия относительно друг друга и несущих стен.

В результате испытаний усиленный фрагмент каменного здания существенных повреждений не получил. В процессе обследования усиленного железобетонного фрагмента каркаса, проводившегося после 20 динамических воздей-

ствий, дефектов и повреждений колонн, ригелей и плит перекрытий не было зафиксировано. Отслоений и повреждений армирующих холстов, а также клеевого состава на поверхности элементов железобетонного фрагмента также не было обнаружено.

Результаты сравнительных испытаний продемонстрировали практическую возможность увеличения сейсмостойкости каменных и железобетонных зданий с помощью фибропластиковых систем внешнего армирования на 2…3 бала при сокращении сопутствующих затрат на 30…50%.

8.2.2. Соединения элементов внутреннего армирования

Экспериментальное подтверждение повышения сейсмостойкости железобетонных конструкций в зонах соединений элементов внутреннего армирования с исключением появления пластических шарниров было получено при исследовании стеновых конструкций общественного здания в г. Беркли (Калифорния, США) [324].

Здание было запроектировано и возведено в 1960 году и не соответствовало современным сейсмическим нормам. Его несущие конструкции имели ряд конструктивных недостатков, в числе которых назывались: наличие соединений продольной арматуры стеновых железобетонных элементов в зонах вероятного возникновения пластических шарниров (рис. 8.8) и недостаточная несущая способность данных зон при действии сдвигающих усилий.

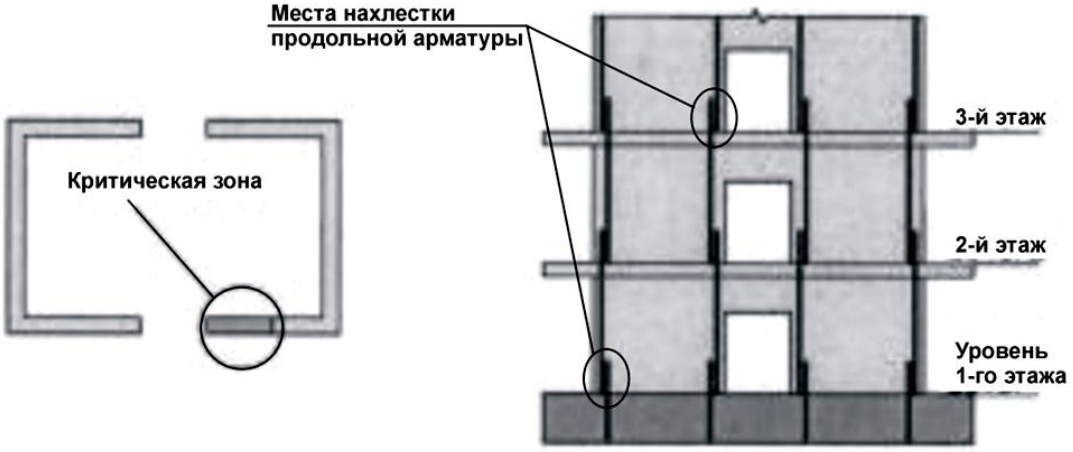


Рис. 8.8. Схема вертикальных железобетонных конструкций общественного здания в г. Беркли (Калифорния, США); по [324]

Программа исследования предусматривала проведение испытаний железобетонных образцов вертикальных несущих конструкций. При этом испытаниям на сдвиг (рис. 8.9) были подвергнуты два типа образцов, выполненных без

усиления (рис. 8.10) и с его применением (рис. 8.11), имевших длины 3250 и 3750 мм.

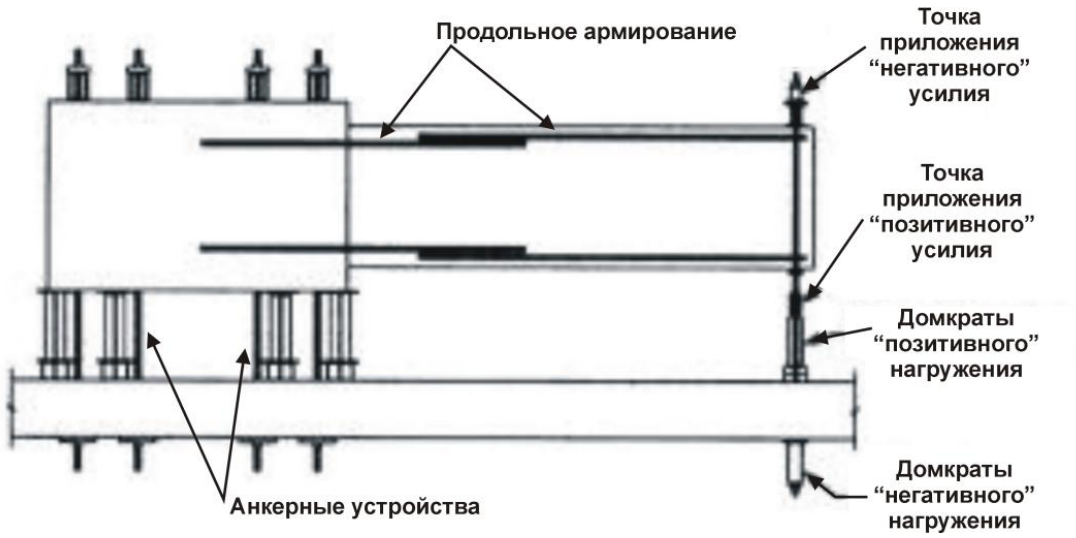


Рис. 8.9. Схема испытательного стенда, использовавшегося для образцов вертикальных конструкций здания г. Беркли; по [324]

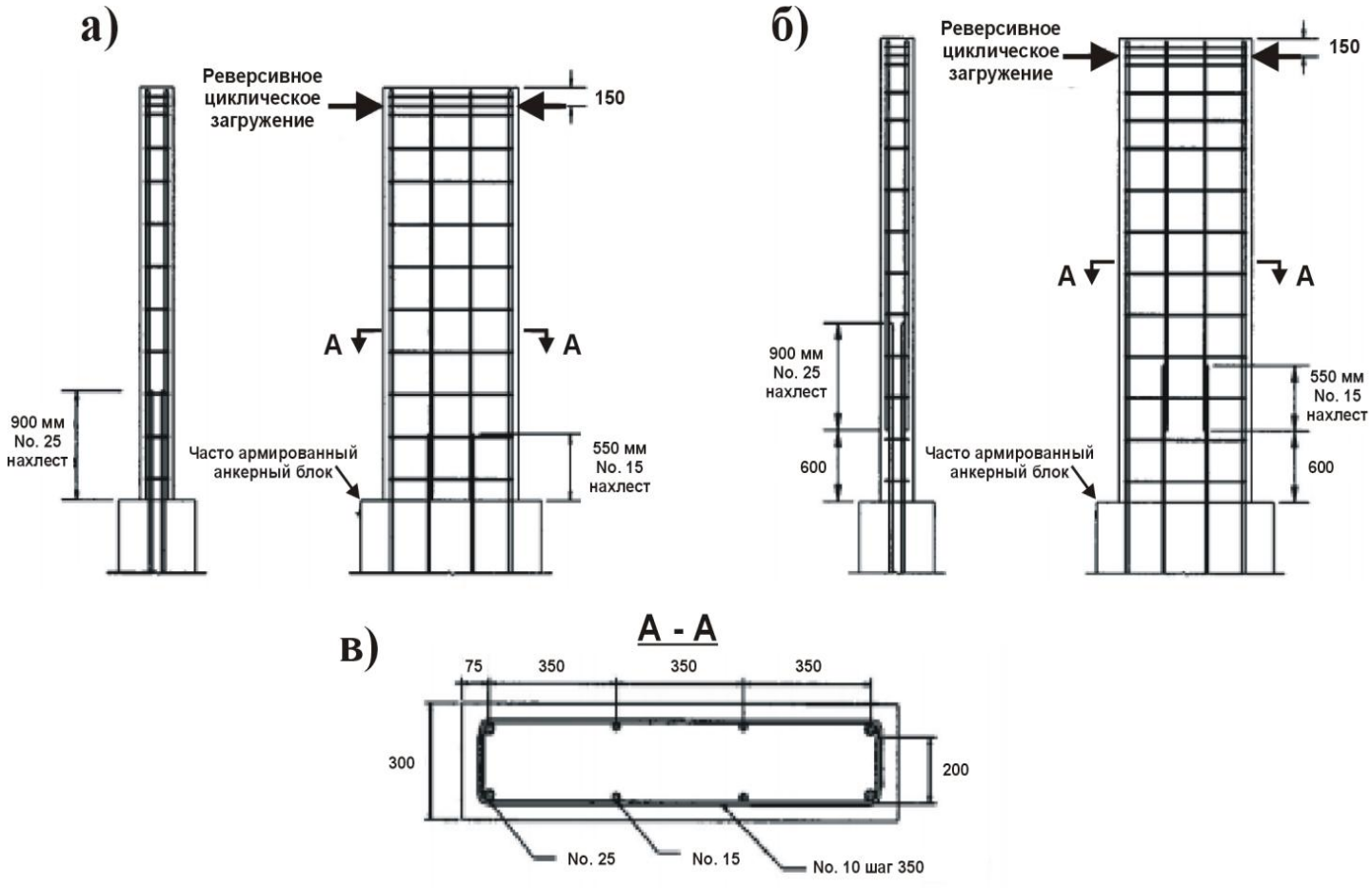


Рис. 8.10. Не усиленные образцы вертикальных конструкций здания г. Беркли, подвергавшиеся циклическим нагружениям поперечной силой: а — длиной 3250 мм, б — длиной 3750 мм, в — поперечное сечение; по [324]

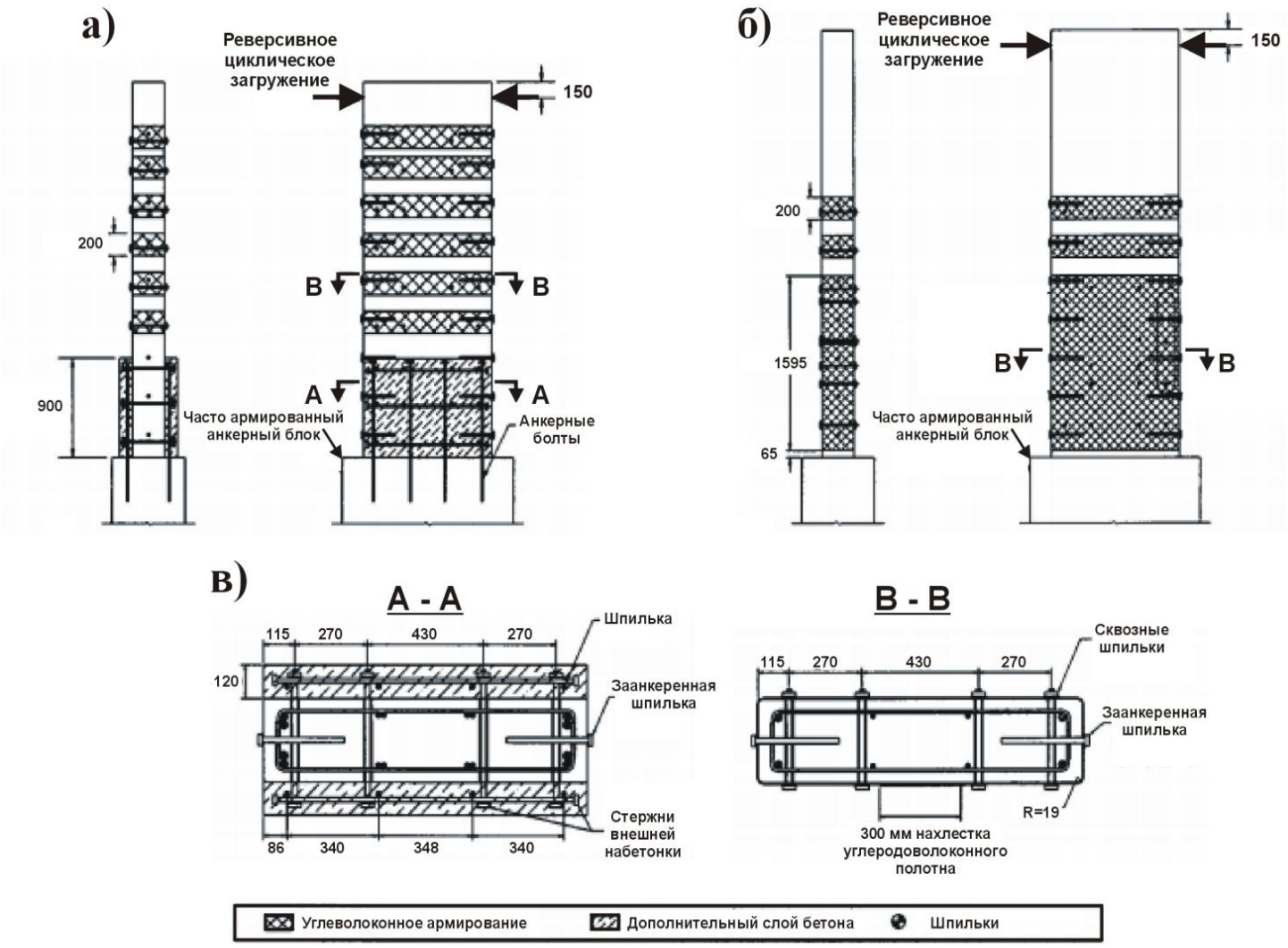


Рис. 8.11. Усиленные углеродоволоконными фибропластиками образцы вертикальных конструкций здания г. Беркли, подвергавшиеся циклическим нагружениям поперечной силой: а — длиной 3250 мм, б — длиной 3750 мм, в — поперечные сечения; по [324]

Результаты испытаний показали, что усиление углеродоволоконными пластиками железобетонных элементов, в отличие от их оригинальных образцов, отличавшихся низкой пластичностью и хрупким разрушением, позволило повысить несущую способность зон железобетона, включавших напускные соединения продольной арматуры, и переместить места появления пластических шарниров за пределы усиленных участков. В результате усиления образцов, имевших длину 3250 мм, величина относительного уровня пластических деформаций (отношение общих деформаций к их упругим составляющим) возросла с 1,5 до 3,8 , а соответствующее поглощение кумулятивной энергии увеличилось в 7 раз (см. рис. 8.12).

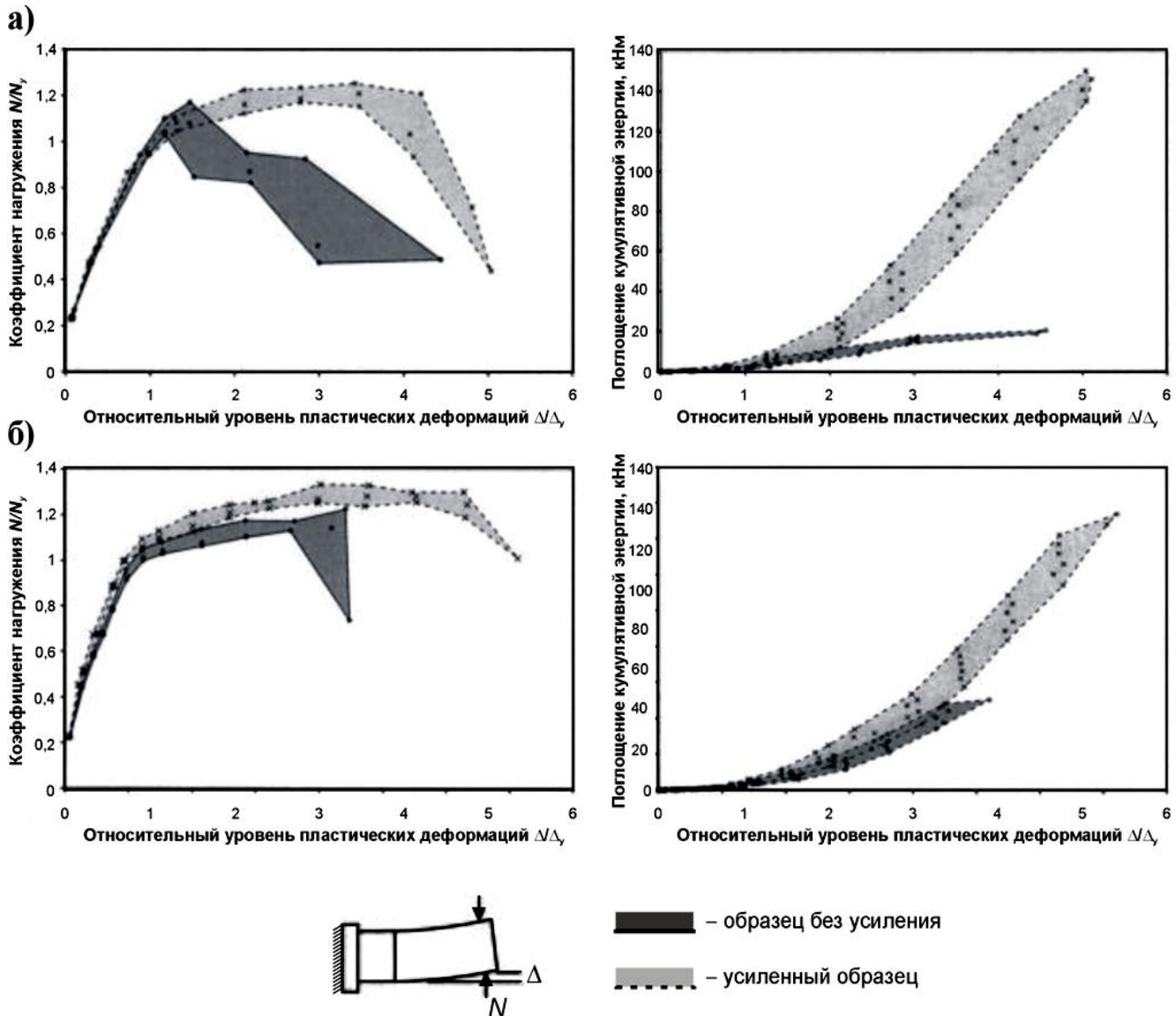


Рис. 8.12. Зависимости относительного уровня пластических деформаций Δ/Δ_y от коэффициента нагружения N/N_y и поглощения кумулятивной энергии: а — в образцах длиной 3250 мм, б — в образцах длиной 3750 мм; по [324]

Внешнее охватывающее фибропластиковое армирование продемонстрировало эффективность в совершенствовании прочностных и пластических характеристик испытывавшихся железобетонных элементов, а также способствовало значительному снижению их повреждаемости в результате проявления сдвиговых деформаций.

8.3. Усиление железобетонных конструкций

8.3.1. Колонны

Сейсмостойкость многих железобетонных конструкций, применявшихся в первой половине XX века, является сравнительно низкой, отличающейся от-

носительно малыми показателями изгибной прочности и пластичности работы. В частности, подобные недостатки железобетонных колонн во многом связаны с наличием не всегда достаточных длин нахлестки элементов внутреннего армирования и отсутствием необходимой анкеровки сопряжений конструкций. При проявлениях эпизодических нагрузок, вызывающих напряжения арматурующей стали, превышающие показатели предела ее текучести, напуски арматурных стержней сжатых зон сечений оказываются не всегда способными передавать необходимые величины действующих усилий. Сейсмические воздействия, сопровождаемые циклическими изгибающими моментами и дополнительными продольными силами, потенциально способны вызывать отказ их работы, что является особенно опасным для узловых сопряжений основных несущих элементов.

Наличие малых проектных длин арматурных нахлесток при подобных воздействиях приводит к появлению в конструкциях подобий пластических шарниров [54]. Данный недостаток не редко встречается в элементах старых зданий и мостов. Кроме того, при усилении следует учитывать и то, что достаточно часто при действии сейсмических нагрузок, в железобетонных элементах неудовлетворительной оказывается поперечная прочность.

8.3.1.1. Повышение общей сейсмостойкости

Решения, снижающие влияние перечисленных выше недостатков на работу железобетонных колон, предусматривают введение дополнительного армирования, повышающего сейсмостойкость, в том числе и за счет создания радиальных напряжений. Внешнее усиление колонн может осуществляться различными методами, традиционно сводящимися к использованию стальных или железобетонных обойм. В последнее десятилетие все большую популярность также приобретает использование методов фибропластикового усиления [325, 326].

При усилении колонн, воспринимающих сейсмические воздействия, могут использоваться различные фибропластиковые системы. Например, в восточной части США обычно используются усиления на основе E-стеклянных волокон, а в сейсмических районах американского запада и центральной Европы — системы, армированные стойкими к щелочным воздействиям AR-стекловолокнами, заключенными в паропроницаемые матрицы. В связи с высокой стоимостью армирование арамидными волокнами используется относительно редко.

Кроме того, относительно перспективным видом сейсмостойкого фибропластикового усиления строительных конструкций в настоящее время считают-

ся системы на основе углеродных волокон. Подтверждением чему могут служить исследования сейсмической стойкости фибропластиковых систем, армированных углеродным волокном, проводившиеся в *Техническом университете Порто* (*TU Porto,* Португалия) [54, 327]. При которых испытывались железобетонные колонны квадратного поперечного сечения с размерами сторон 200 мм, усиленные продольным армированием углеродоволоконными ламинатами, размещаемыми в предварительно прорезанных внутренних штрабах (рис. 8.13, а). Поперечное армирование усиливалось внешними однонаправленными углеродоволоконными лентами, установленными с равными интервалами по длине стержня колонны. Результаты испытаний продемонстрировали высокую эффективность сочетания внутреннего и внешнего армирования высокомодульными (*E = 240 ГПа*) углеродоволоконными фибропластиками для повышения сейсмической стойкости конструкций (рис. 8.13, б).

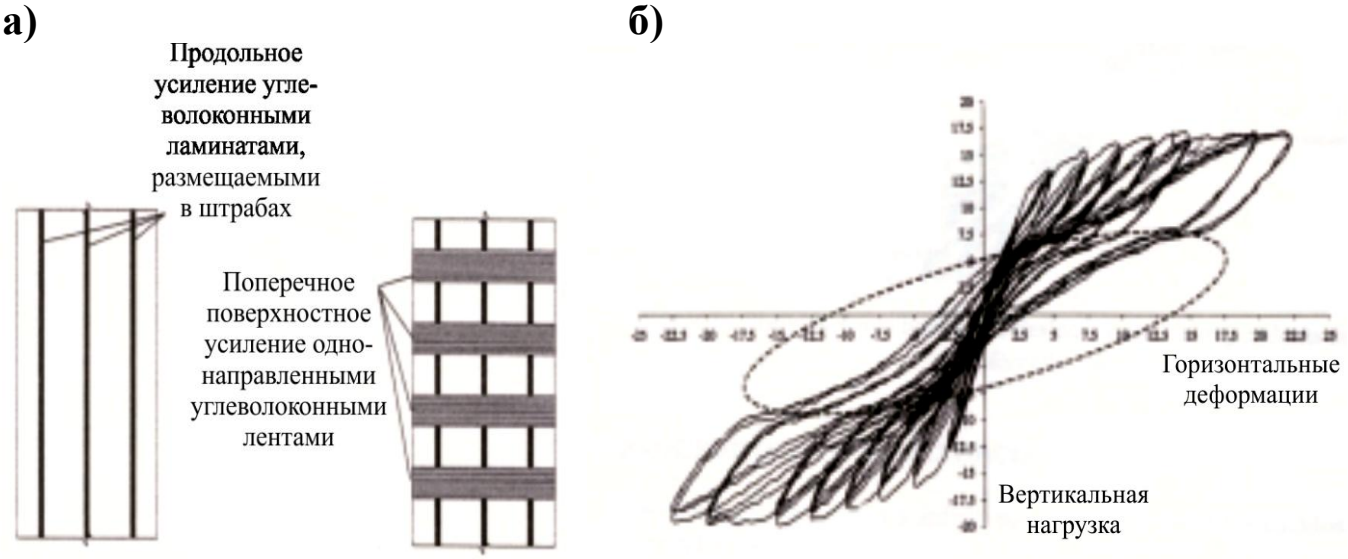


Рис. 8.13. Испытания железобетонных колонн, усиленных продольным армированием углеродоволоконными ламинатами, размещенными в штрабах, а также поперечным внешним армированием однонаправленными углеродоволоконными лентами, проводившиеся в *Техническом университете Порто* (*TU Porto,* Португалия): а — схема усиления, б — общий характер взаимозависимостей горизонтальных перемещений от вертикальных нагрузок, прикладывавшихся к образцам; адаптировано по [54]

Характер работы железобетонных колонн, усиленных внешним фибропластиковым армированием, рассмотрен в ряде современных исследований [144-148]. Определен и порядок расчета таких конструкций (например, в работе М.Престли, Ф.Сейбола, Г.Калви «Сейсмический дизайн и усиление мостов» [145]).

Внешнее усиление сжатых элементов, имеющих прямоугольные поперечные сечения, является значительно более сложной задачей, чем элементов с круглой формой сечения. В таких колоннах радиальные напряжения концентрируются у углов. Для достижения необходимых усилий обжатия в настоящее время с успехом используются системы, предусматривающие создание предварительного напряжения элементов внешнего фибропластикового армирования, обеспечивающего необходимые величины трехосевого напряженного состояния бетона. В случае использования усилений, выполняемых без предварительного напряжения, трехосевое напряженное состояние проявляет реальное воздействие на работу бетона колонны только при достаточно существенных величинах его поперечных деформаций. Предварительное напряжение значительно увеличивает эффективность решений, использующих фибропластиковые элементы, и обеспечивает создание необходимых радиальных напряжений в колоннах с прямоугольными формами поперечных сечений.

Применение внешнего фибропластикового усиления позволяет исключить возможное при сейсмических воздействиях поперечное разрушение железобетонных стержневых элементов. При этом композитное поперечное однонаправленное армирование практически не влияет на продольную жесткость колонн. Определение размеров подобных фибропластиковых элементов усиления аналогично расчету внешнего поперечного стального армирования. Однако в этих случаях ограничение деформаций фибропластиков рекомендуется принимать приблизительно равным 50% удлинения их волокон, соответствующего временной прочности материала [54].

Фибропластиковое усиление позволяет оказывать комплексное влияние на работу железобетонных колонн, находящихся под действием сейсмических нагрузок. В случае появления пластических шарниров, продольные фибропластиковые элементы, расположенные на растянутых участках таких конструкций, перекрывают существующее армирование, а также обеспечивают необходимую анкеровку узловых соединений, позволяя использовать работу стальной арматуры, находящейся в пластической стадии деформирования. На сжатых участках конструкций, характеризуемых наличием пластических шарниров, поперечное фибропластиковое армирование препятствует потере устойчивости продольной стальной арматуры и предотвращает отколы поверхностных слоев бетона.

8.3.1.2. Повышение пластичности при изгибе

Одной из основных целей применяемых усилений является повышение пластичности работы конструкций при изгибе. Колонны с недостаточным

внутренним поперечным армированием не способны воспринимать значительные не упругие угловые деформации в зоне появления пластических шарниров. В свою очередь фибропластиковые элементы внешнего усиления позволяют существенно повысить пластичность изгибной работы несущих элементов.

Испытания колонн с круглыми поперечными сечениями свидетельствуют о том, что композитные армирующие материалы, обладая линейно-упругим характером деформирования, способны повысить пластичность работы конструкций более эффективно, чем традиционные стальные обоймы [54, 55]. Так сейсмические воздействия потенциально способны вызывать тангенциальные деформации стальных обойм. При прекращении действия нагрузки остаточные пластические деформации сохраняются в таких обоймах. С каждым последующим сейсмическим воздействием эффективность стальных обойм снижается, и для восприятия усилий требуются большие величины поперечных деформаций бетона [328, 329]. Линейно-упругий характер работы фибропластиковых элементов исключает накопительные воздействия на их напряженно-деформируемое состояние и таким образом последовательные циклы нагружений вызывают равные поперечные деформации. Данный вид работы фибропластиков положен в основу определения их требуемых характеристик при расчете усилений колонн.

В колоннах с круглым поперечным сечением, максимальные деформации сжатия могут быть определены в соответствии с выводами М.Престли, Ф.Сейбола и Г.Калви [54, 145]:

$$\varepsilon_{cu} = 0{,}004 + \frac{2{,}5\rho_s f_{FRP}\,\varepsilon_{FRP}}{f_{cc}^{'}}\ , \tag{8.1}$$

где: ρ_s — коэффициент усиления колонны круглого сечения, равный

$$\rho_s = \frac{4t_{FRP}}{D}\ , \tag{8.2}$$

(t_{FRP} — теоретическая толщина фибропластикового усиления, D — диаметр колонны),

f_{FRP} — максимальные напряжения в элементах фибропластикового усиления,

ε_{FRP} — максимальные относительные деформации в элементах фибропластикового усиления,

$f_{cc}^{'}$ — сопротивление бетона сжатию в составе усиленного сечения колонны, равное

$$f_{cc}^{'} = f_c^{'}\left[2{,}254\sqrt{1+\frac{7{,}94f_1^{'}}{f_c^{'}}} - \frac{2f_1^{'}}{f_c^{'}} - 1{,}254\right] \tag{8.3}$$

($f_c^{'}$ — сопротивление бетона сжатию, $f_1^{'}$ — эффективные напряжения в элементах внешнего усиления, т.е. напряжения в теоретическом сечении армирующего материала).

В соответствии с выражениями (8.1) и (8.2) требуемая теоретическая толщина армирующего слоя фибропластикового усиления составит

$$t_{FRP} = \frac{0{,}1(\varepsilon_{cu} - 0{,}004) D f_{cc}^{'}}{f_{FRP}\, \varepsilon_{FRP}} \ . \qquad (8.4)$$

Проведенные испытания предварительно поврежденных колонн круглого поперечного сечения, усиленных эпоксидным инжектированием существующих дефектов с последующим устройством внешних фибропластиковых обойм, показали полную эффективность подобной техники усиления для восстановления оригинальных характеристик жесткостной работы, что достигалось переходом от хрупкого разрушения элементов к более пластичному. При этом полученные результаты показателей пластичности соответствовали результатам сравнительных испытаний аналогичных колонн, усиленных полноразмерными металлическими обоймами [55].

В колоннах с прямоугольным поперечным сечением, усиленных фибропластиками, также может быть достигнуто увеличение общей пластичности. Рисунок 8.14 приводит результаты испытаний подобной колонны, имеющей внешнее армирование стекловолоконным композитом с эпоксидной матрицей [54, 55, 145]. При данных испытаниях был получен восьмикратный показатель пластичности (μ_{Δ} = *8,* т.е. отношение деформаций, соответствующих пределу несущей способности, к начальным пластическим деформациям), отвечавший угловым деформациям, составлявшим около 4%.

а) **б)**

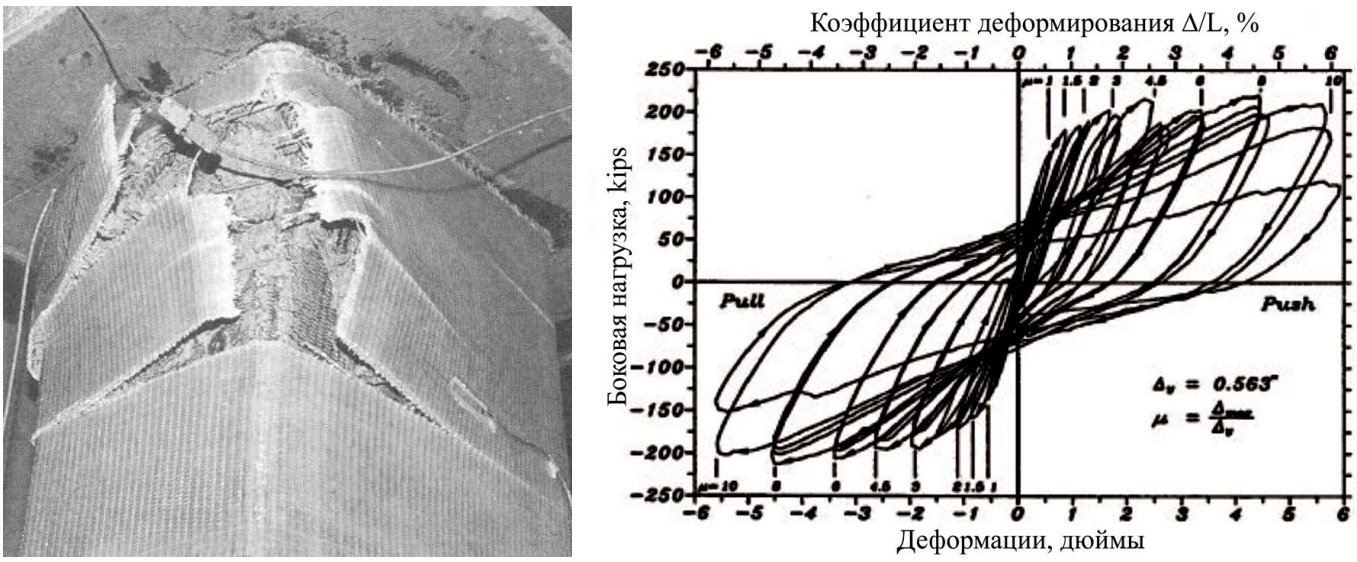


Рис. 8.14. Результаты испытаний железобетонной колонны, имеющей прямоугольное поперечное сечение, усиленной внешним стекловолоконным армированием: а — разрушение колонны, б — характерные взаимозависимости деформаций от действующих нагрузок (*1 kips = 4,45 кН, 1 дюйм = 2,54 см*); адаптировано по [54, 55, 145]

Результаты серии испытаний показали, что увеличение пластичности колонн с прямоугольными поперечными сечениями по сравнению с колонами, обладающими сечениями круглой формы и соответствующей площади, составляет приблизительно 50% [54].

Максимальная относительная деформация сжатия бетона сечения колонны, имеющей прямоугольное сечение [54, 145], может быть получена как

$$\varepsilon_{cu} = 0{,}004 + \frac{1{,}25\rho_s f_{FRP}\,\varepsilon_{FRP}}{f_{cc}^{'}} \ . \qquad (8.5)$$

Коэффициент усиления колонны прямоугольного сечения, составит

$$\rho_s = 2t_{FRP}\left[\frac{b+h}{bh}\right] , \qquad (8.6)$$

где: b, h — геометрические размеры поперечного сечение колонны.

В соответствии с выражениями (8.5) и (8.6) требуемая теоретическая толщина армирующего слоя фибропластикового усиления составит

$$t_{FRP} = \frac{0{,}4(\varepsilon_{cu}-0{,}004)f_{cc}^{'}}{f_{FRP}\,\varepsilon_{FRP}}\left[\frac{bh}{b+h}\right] . \qquad (8.7)$$

Необходимые длины усиления стержней колонн l внешним фибропластиковым армированием приведена в таблице 8.1 [54].

Таблица 8.1

Необходимые длины усиления стержней колонн внешним фибропластиковым армированием; по [54]

Раскрепление стержней колонн	**Характеристика поперечного сечения**	**Длины колонн**	**Длина усиливаемого участка**
В одном направлении	D	L	$D \le l \le 0{,}25L$
В двух направлениях: M_a M_b	D	 L_a L_b	 $D \le l \le 0{,}25L_a$ $D \le l \le 0{,}25L_b$
где: L_a , L_b — расстояние от опоры до центра соответствующих изгибающих моментов			

8.3.1.3. Усиление соединений элементов внутреннего стального армирования

Процесс передачи нагрузки от элементов внутреннего стального армирования к бетону способствует образованию в прилежащих к стержням зонах микротрещин, уменьшающих величину сцепления между сталью и бетоном. Усиление колонн с помощью внешнего фибропластикового армирования, осо-

бенно установленного с использованием предварительного напряжения, увеличивает несущую способность таких связей.

В подобных случаях расчет ведется с учетом величины коэффициента усиления, составляющей

$$\rho_s = 2\left[\frac{A_b f_s/\mu p\, l_s - f_a}{0{,}0015\, E_{FRP}}\right] , \tag{8.8}$$

где: f_a — активное поперечное напряжение,
A_b — поверхность продольного усиления,
f_s — напряжения в продольном армировании,
μ — коэффициент трения, равный *1,4*,
p — область влияния нарушенной поверхности в зоне нахлестки,
l_s — длина нахлестки арматуры.

Армирующие полотна, отличающиеся низким модулем упругости (например, стекловолоконные) являются не целесообразными при рассматриваемом виде усиления. Предполагается, что предварительно напряженные арамидоволоконные ленты демонстрируют большую эффективность.

Данное усиление необходимо только за пределами зон, уже усиленных в связи с возможным образованием пластических шарниров.

8.3.1.4. Усиление, воспринимающее действие поперечных сил

Фибропластиковое поперечное усиление, подобно стальным обоймам, способно эффективно увеличивать несущую способность железобетонных элементов при действии поперечных сил. Поскольку фибропластики проявляют линейно-упругою работу вплоть до момента разрушения, порядок расчета, применяющийся для внешнего стального армирования, при их использовании претерпел некоторую адаптацию. Рассматриваемое решение требует ограничения относительных деформаций фибропластиков величиной 0,2…0,3%. По этой причине для подобных усилений более предпочтительными являются высокомодульные материалы, например углеродоволоконные полотна с модулем упругости 640 ГПа и предельными деформациями, предшествующими разрушению, составляющими около 0,4%.

Получаемое усиление (приращение воспринимаемых поперечных сил) может быть определено по формулам М.Престли, Ф.Сейбола и Г.Калви [54, 145].

В колонне с круглой формой сечения поперечное усилие, воспринимаемое фибропластиковым армированием, составит

$$V_{FRP} = \frac{\pi}{2} t_{FRP} f_{FRP} D \cot\theta \ , \tag{8.9}$$

где: t_{FRP} — теоретическая толщина усиливающего фибропластика,
f_{FRP} — напряжения в элементах фибропластикового усилении,
D — диаметр поперечного сечения колонны,
θ — угол, составляющий 35°.

В колонне, имеющей прямоугольное сечение, поперечное усилие, приходящееся на долю фибропластиков, составит

$$V_{FRP} = 2t_{FRP} f_{FRP} h \cot\theta \ , \qquad (8.10)$$

где: h — размер сечения колонны в направлении действия касательных напряжений,
θ — угол, составляющий 35°.

При сниженной поперечной несущей способности железобетонных колонн фибропластиковое усиление устанавливается в зоне появления возможного пластического шарнира на длине, равной двум диаметрам колонны круглого сечения или двум высотам прямоугольного сечения колонны (т.е., соответственно, *2D* или *2h*).

8.3.1.5. Усиление, воспринимающее изгиб

При фибропластиковом усилении достигается некоторое увеличение изгибной жесткости и прочности железобетонных колонн. Степень повышения изгибной прочности определяется формой сечения колонны, выбранным методом усиления и характеристиками используемого материала. Таблица 8.2 приводит сравнительные результаты применения различных методов усиления при повышении прочности изгибаемых железобетонных колонн.

Таблица 8.2

Возможное повышение изгибной прочности железобетонных колонн при использовании различных методов усиления, %; по [54]

Тип сечения колонны	Метод усиления	Получаемое повышение изгибной прочности при использовании различных методов усиления		
		Стальные обоймы	Железобетонные обоймы	Фибропластиковые системы
1	2	3	4	5
Круглое	Усиление, исключающее появление пластического шарнира	10…20	20…50	0…5
	Поперечное армирование	20…40	25…75	0…5

1	2	3	4	5
Прямоугольное	Усиление, исключающее появление пластического шарнира	20…40	20…50	0…10
	Поперечное армирование	40…70	25…75	0…5

Как видно из вышеприведенной таблицы фибропластиковое усиление способствует гораздо меньшему увеличению несущей способности изгибаемых железобетонных колонн, чем методы, предусматривающие использование стальных или железобетонных обойм.

8.3.1.6. Сравнительная оценка различных методов усиления

Сравнение преимуществ и недостатков различных методов усиления, приведенное в таблице 8.3, свидетельствует об эффективности фибропластикового внешнего армирования колонн, подвергаемых сейсмическим воздействиям. Одним из главных преимуществ подобных решений является минимальное повышение изгибной жесткости при значительном улучшении пластичности работы, что позволяет добиваться усилений, не сопровождаемых существенным приращением величин действующих усилий.

Таблица 8.3

Результаты, достигаемые при использовании различных методов усиления железобетонных колонн; по [54]

Метод усиления	Результаты использования методов усиления					
	Рост веса конструкций	Изменение габаритных размеров сечений	Создание радиальных напряжений в сечениях	Увеличение изгибной жесткости	Простота технологии производства работ	Защита от коррозионных воздействий
Стальными обоймами	+	+	–	+	–	– –
Железобетонными обоймами	+	+	–	+ +	–	+
Внешним фибропластиковым армированием	–	–	+ +	–	+	+ +
Обозначено: + — результат наблюдается, – — результат отсутствует, + + / – – — соответствующий, ярко выраженный результат						

Трехосевое напряженное состояние материала железобетонных конструкций может быть достигнуто при использовании методов предварительного напряжения поперечных фибропластиковых элементов, позволяющих повысить прочность бетона без развития значительных продольных деформаций сжимаемых элементов, что в свою очередь обеспечивает увеличение уровня воспринимаемых нагрузок.

Немаловажным также является то, что технологические операции, применяемые при устройстве фибропластиковых систем внешнего усиления, относительно просты и дают возможность производить работы в более короткие сроки. Кроме того, внешнее фибропластиковое армирование имеет незначительную толщину и требует меньшей адаптации смежных конструкций.

8.3.2. Элементы каркасов

Особенности применяемых конструктивных решений усилений железобетонных конструкций, подверженных сейсмическим воздействиям, напрямую зависят от возможного характера их разрушения. Наиболее часто встречающиеся недостатки работы железобетонных каркасов предполагают разрушения «коротких» стоек под действием поперечных сил, разрушения слабых узловых сопряжений и появление пластических шарниров.

8.3.2.1. Разрушение «коротких» стоек

Разрушения элементов железобетонных каркасов нередко обусловливаются их низкой общей поперечной несущей способностью, недостаточной способностью к восприятию поперечных усилий в соединениях колонн и ригелей, а также ригелей и монолитных перекрытий. Подобные разрушения обычно рассматриваются как наиболее критические следствия сейсмических воздействий, они сопровождаются наклонным трещинообразованием в бетоне и обнажением поперечной арматуры (рис. 8.15).

Предотвратить хрупкое разрушение колонн у их концов, а также в центральной части, призвано дополнительное армирование, повышающее несущую способность и пластичность работы элементов. Внешнее фибропластиковое армирование обеспечивает адекватное увеличение поперечной несущей способности элементов в зонах потенциального появления рассматриваемых разрушений.

В соответствии с требованием обеспечения общей пластичности работы конструкций, производители систем фибропластикового усиления в данном случае рекомендуют применение стекловолоконных полотен и арамидоволоконных лент, указывая на то, что высокомодульные углеродоволоконные мате-

риалы в меньшей степени способствуют приданию необходимых пластических свойств подобных элементов [54].



Рис. 8.15. Пример разрушения «короткой» стойки каркаса под действием поперечных сил [54, 55]



Рис. 8.16. Пример разрушения узловых сопряжений элементов железобетонного каркаса [54, 55]

8.3.2.2. Разрушение узловых сопряжений

Узловые сопряжения с недостаточной несущей способностью также являются одной из основных причин разрушения железобетонных каркасов, воспринимающих сейсмические воздействия (рис. 8.16). В данных зонах аварии сопровождаются появлением шарниров с сопутствующим растрескиванием поверхности или полным разрушением бетона, обнажением и потерей устойчивости элементов продольного армирования. Проявляются подобные разрушения обычно в ограниченных пределах длин соответствующих стержневых элементов (обычно колонн). Существенное влияние на работоспособность узловых соединений каркасов, находящихся под действием сейсмических нагрузок, оказывают величины нахлесточных длин соединений стержней внутреннего стального армирования, недостаточная протяженность которых в узлах крепления колонн достаточно часто определяет возможную причину разрушения.

В этих случаях усиления узловых сопряжений могут выполняться с помощью углеродоволоконных ламинатов, вклеиваемых в продольные внутренние штрабы, прорезаемые в теле конструкций, с дополнительным внешним поперечным обвертыванием стекловолоконными полотнами или арамидоволоконными предварительно напряженными лентами, размещаемыми в зонах сопряжений элементов железобетонных каркасов [54].

8.3.2.3. Появление пластических шарниров

При недостаточном поперечном или продольном (по верхним или нижним граням) армировании горизонтальные изгибаемые железобетонные элементы в условиях действия сейсмических нагрузок могут демонстрировать разрушения с зонами проявления выраженных пластических шарниров (рис. 8.17).

Для усилений, устраняющих возможность появления рассматриваемого дефекта, рекомендуется поперечное внешнее армирование высокомодульными однонаправленными углеродоволоконными полотнами. Недостаточная изгибная прочность элементов в серединах пролетов или у опор может быть устранена при помощи углеродоволоконных ламинатов, устанавливаемых во внутренние штрабы или непосредственно на внешней поверхности конструкций [54].



Рис. 8.17. Поперечное разрушение изгибаемых элементов железобетонного каркаса в зоне образования пластического шарнира [54, 55]

8.3.2.4. Эффективные системы сейсмостойкого усиления

Результаты ряда исследований подтверждают, что усиление элементов железобетонных каркасов в зонах образования возможных пластических шарниров повышает несущую способность и способствует улучшению пластичности работы конструкций [54, 55]. Эффективность стекловолоконных и арамидоволоконных полотен, применяемых при повышении пластичности работы, определена сериями соответствующих экспериментов и опытом эксплуатации существующих усилений. Исследования свидетельствуют о том, что стекловолоконные и арамидные композиты, обладающие высокой прочностью, но не демонстрирующие высоких модулей упругости, в значительно большей степе-

ни повышают пластичность железобетонных конструкций, нежели углеродоволоконные материалы.

Эффективные системы фибропластикового сейсмостойкого усиления представляют собой системы с повышенной пластичностью работы, сочетающие высокомодульные и высокопрочные низкомодульные элементы, ограничивающие поперечные деформации сечений элементов в зонах возможного появления пластических шарниров и обеспечивающие продольное усиление изгибаемых элементов (см. рис. 8.18).

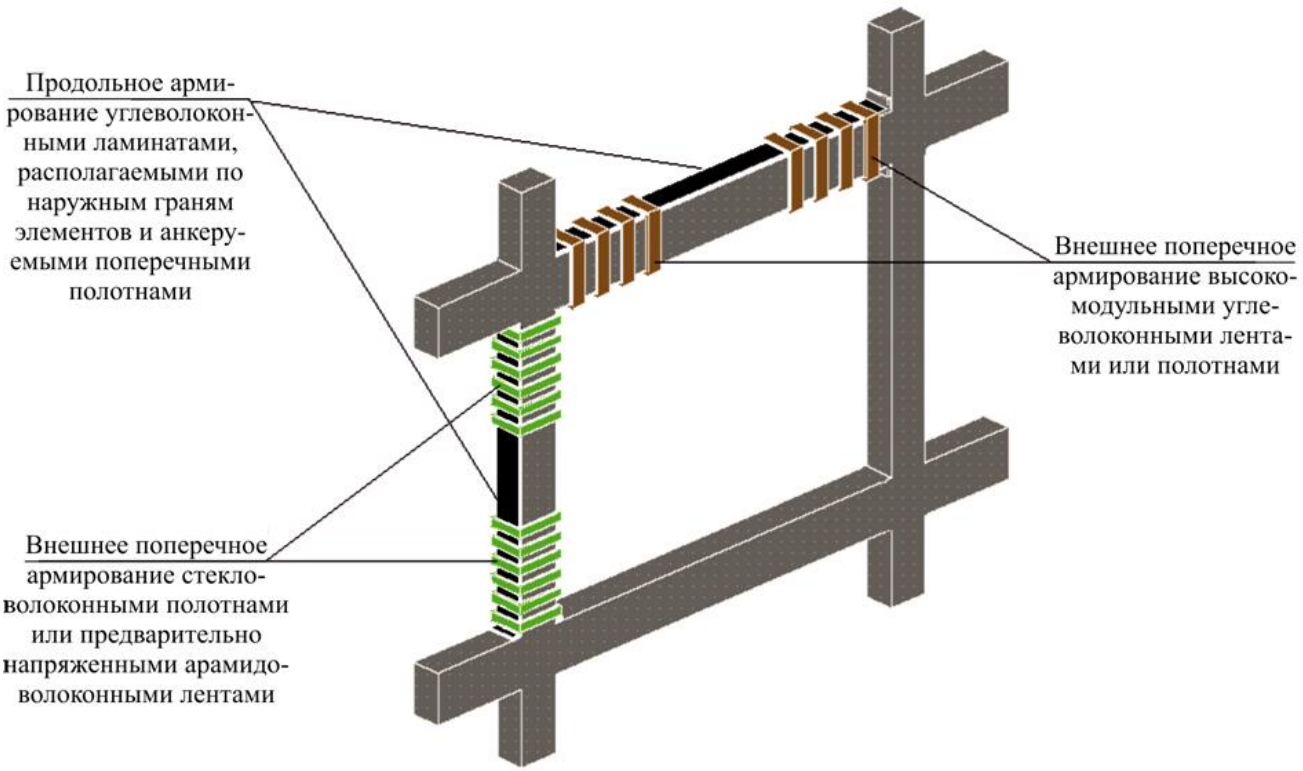


Рис. 8.18. Схема фибропластикового сейсмостойкого усиления элементов железобетонной рамы; адаптировано по [54, 55]

Результаты испытаний полноразмерных образцов указывают на технические преимущества и экономичность стекловолоконных и арамидных фибропластиковых усилений в сравнении с традиционными металлическими обоймами. При использовании внешнего армирования композитными материалами, располагаемыми по всей длине конструкций или только у их узловых сопряжений (рис. 8.18), разрушение бетона происходит при больших уровнях действующих нагрузок. Ограничение деформаций материала сечений при помощи поперечного фибропластикового армирования также препятствует потере устойчивости продольных элементов стальной арматуры.

Обязательным условием применения фибропластиковых решений в отношении эксплуатируемых железобетонных конструкций является предварительный инъекционный ремонт их усиливаемых поверхностей.

8.4. Усиление каменных конструкций

Каменным конструкциям при действии повышенных сейсмических воздействий свойственно разрушение с наклонным трещинообразованием, протекающим по швам кладки или пересекающим ее жесткие составляющие (рис. 8.19). Различия в свойствах каменных материалов и связующих растворов способствуют значительным сейсмическим колебаниям выполненных из них элементов. Современные повышенные нормативные требования также придают дополнительную важность вопросу сейсмостойкого усиления каменных конструкций.

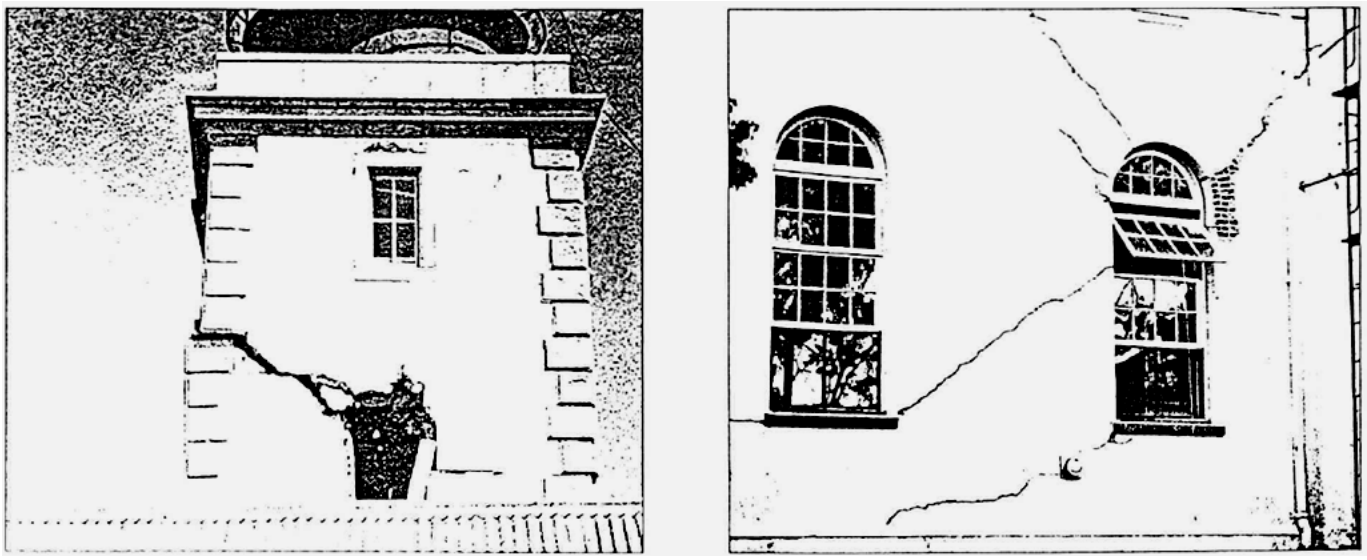


Рис. 8.19. Характерные случаи разрушения каменных конструкций при действии сейсмических нагрузок [55]

Традиционные методы увеличения стойкости кладок предусматривают нанесение слоев бетона или раствора, внешнее предварительное напряжение или монтаж элементов дополнительного стального армирования. Основным недостатком этих методов является сопутствующее увеличение веса конструкций, вызывающее пропорциональный рост сейсмических нагрузок. Устройство внешних усиливающих слоев сопряжено со сложностями обеспечения требуемого сцепления с кладкой и приводит к уменьшению прилежащего полезного пространства. Системы внешнего предварительного напряжения создают дополнительные сжимающие усилия, способные перегружать уже задействованный в работе материал конструкций. Стальные элементы усиления часто вызы-

вают затруднения эстетического плана, а их эксплуатация, проходящая в агрессивных средах, провоцирует коррозию. Перечисленные недостатки практически полностью устраняются при применении фибропластиковых систем сейсмостойкого усиления.

8.4.1. Усиление кладок стекловолоконными полотнами

Усиление кладок стекловолоконными полотнами оправдывается в тех случаях, когда преследуется цель увеличения пластичности работы конструкций, а требование повышения прочности не является решающим [55]. Подобное сейсмическое усиление несущих стен направлено на равномерное распределение трещин по их поверхности. Повышение пластичности достигается пропорциональным раскрытием трещин при минимальных величинах сейсмических воздействий, что может быть достигнуто оклейкой двунаправленными низкомодульными стекловолоконными фибропластиками. Однако усиленные таким образом каменные конструкции не способны нести дополнительные нагрузки.

Усиление двунаправленными стекловолоконными полотнами выполняется только на одной из сторон каменных стен (внутренней или внешней). В случае полной оклейки поверхности стены используются паропроницаемые матричные составы.

8.4.2. Усиление кладок углеродоволоконными ламинатами

Эффективное усиление каменных стен может производиться углеродоволоконными ламинатами, диагонально или перекрестно расположенными на их поверхностях и заанкеренными к прилежащим бетонным конструкциям (рис. 8.20).

Данный метод был разработан швейцарским институтом *EMPA* (*EMPA Switzerland, Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology*) для усиления каменных зданий, расположенных в сейсмических районах [330]. Углеродоволоконные ламинаты при подобном решении размещаются преимущественно по диагонали стен и обязательно анкеруются к бетонным элементам плит или балок. На практике рекомендуется выполнять небольшие отверстия в бетонных элементах с последующим их заполнением специальной эпоксидной пастой после установки в проектное положение предусмотренных проектом ламинированных элементов. Особое внимание при монтаже уделяется местам пересечения полос ламинатов.

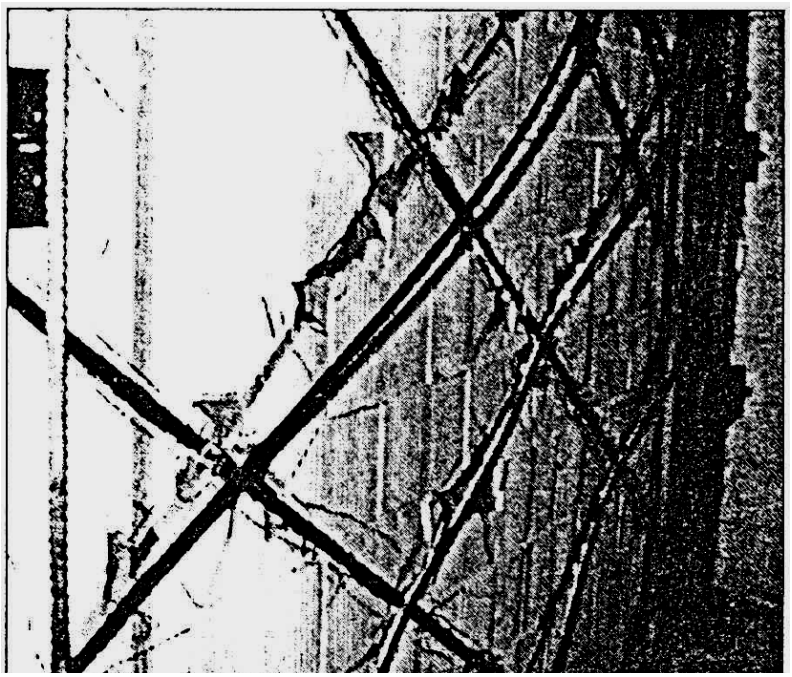


Рис. 8.20. Сейсмостойкое усиление каменных стен перекрестно расположенными углеродоволоконными ламинатами [55, 330]

Институт *EMPA* провел серию испытаний фрагментов каменных стен, имевших размеры 3,6×2,0 м, и подвергавшихся циклическим нагрузкам, прикладывавшимся в горизонтальном направлении к их верхним углам. Результаты экспериментов свидетельствуют, что продольная прочность размещенных во внутренних штрабах углеродоволоконных ламинатов *S&P Laminates CFK*, имевших ширину 50 мм и толщину 1,2 мм, могла быть полностью использована при анкеровке в прилежащие бетонные элементы, предусматривавшей длину 25…30 см [54]. Кладка, усиленная ламинатами, установленными только по одной из ее сторон, демонстрировала упругую работу вплоть до 2/3 величины максимальной поперечной силы $V_{A,max}$ (рис. 8.21).

В результате отклеивания ламинатов, проходящего при повышении передаваемой кладкой нагрузки, деформации верхних ступеней загружения демонстрирую значительный рост. Испытания показывают, что кирпичные стены обладают большими резервами деформативности, увеличивающими их пластичность. Сейсмостойкость усиленных ламинатами стен (образец BW6) была повышена в 4,3 раза в сравнении с не усиленными стенами (образец BW5). Как показывает рисунок 8.21, пластичность стены в этом случае увеличивалась более чем в 3 раза при соответствующем росте несущей способности в 1,4 раза.

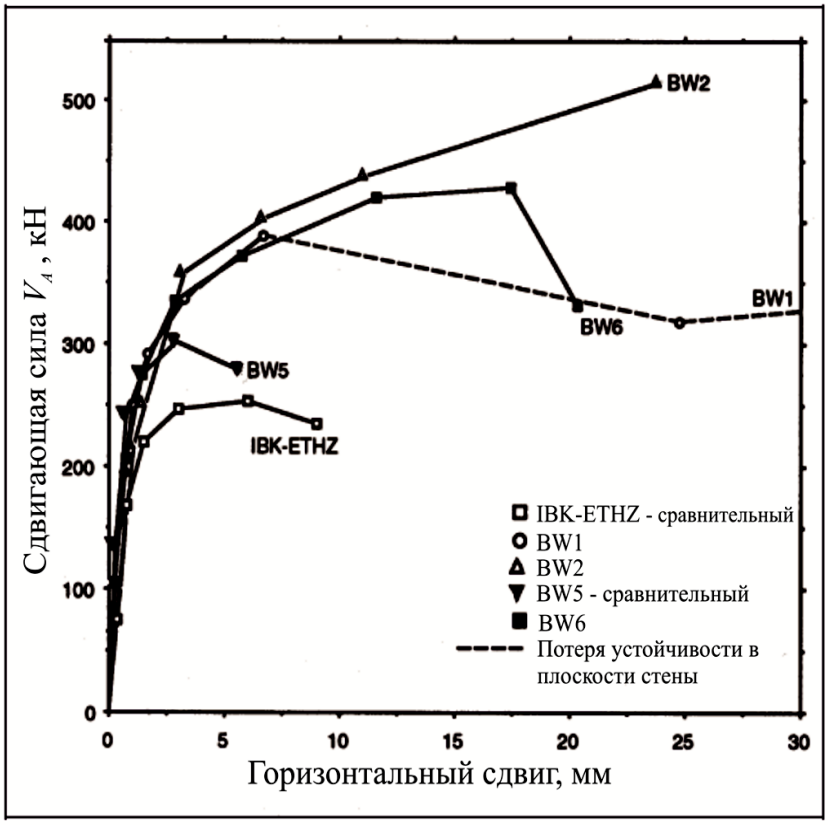


Рис. 8.21. Сравнение усиленных фибропластиками кладок с образцами без усиления; адаптировано по [54, 330]

Перспективным способом сейсмостойкого усиления кладок является сочетание заштрабленных углеродоволоконных ламинатов с покрытием внешней поверхности стены стекловолоконными полотнами [54].

8.4.3. Системы, увеличивающие сейсмостойкость каменных стен

Горизонтальная сейсмическая равнодействующая Q_{acc} , зависящая от собственного веса конструкций и нагрузки, действующей на перекрытия, воспринимается несущими стенами каменных зданий (рис. 8.22). В уровне нижних этажей равнодействующая Q_{acc} вызывает существенные сдвигающие усилия, действующие в комбинации с вертикальной нагрузкой. Сочетание вертикальных и горизонтальных сил способно превысить несущую способность вертикальных каменных конструкций. При этом общая изгибная прочность систем каменных элементов зданий обычно является достаточной. Таким образом, конструкции нижних этажей требуют усилений, перераспределяющих, при помощи диагональных элементов, сдвигающие силы в растягивающие и сжимающие [54].

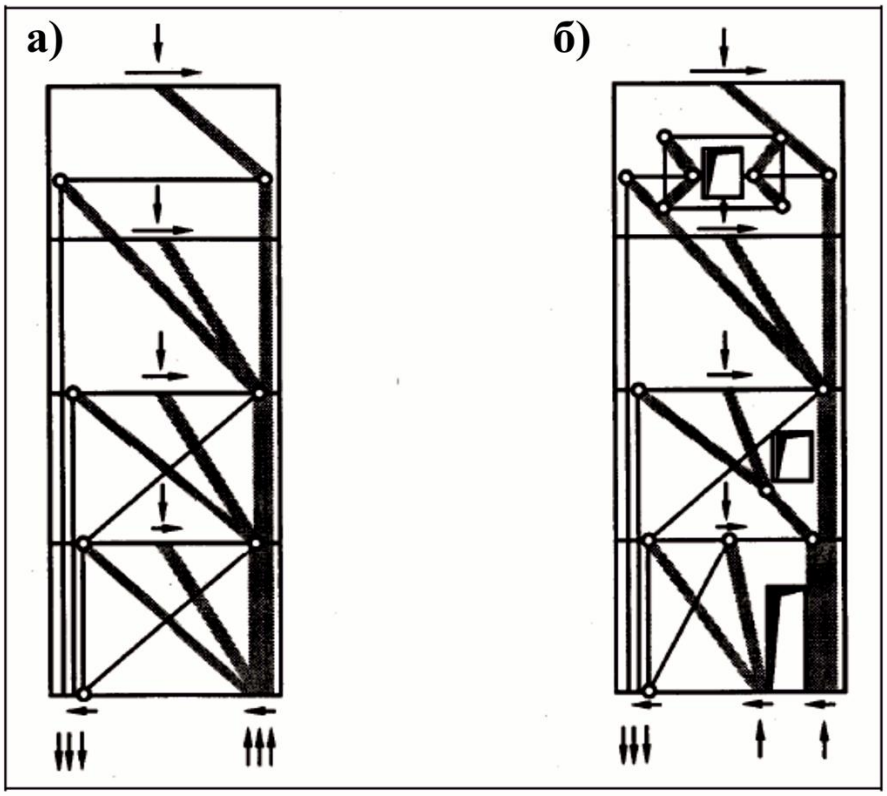


Рис. 8.22. Сейсмостойкое фибропластиковое усиление каменных стен: а — без проемов, б — при наличии проемов; адаптировано по [54]

Конструктивные особенности подобных усилений стен во многом зависят от сочетаний действующих усилий (изгибающего момента M_x , продольной и поперечной силы — N_x , V_y). Требования, относящиеся к конструкциям нижних этажей, во многом отличаются от тех, что предъявляются к вышележащим элементам. Данные усиления могут быть осуществлены с помощью фибропластиковых ламинатов или различных армирующих полотен (рис. 8.23). Особое внимание при этом уделяется анкеровке концов ламинированных фибропластиков.



Рис. 8.23. Использование армирующих полотен при экспериментальных исследованиях сейсмостойкого фибропластикового усиления стеновых конструкций в *Стамбульском техническом университете* (*Istanbul Technical University*, Турция); по [324]

9. Использование фибропластиковых систем для защиты от взрывов и ударных воздействий

9.1. Защита от взрывов

Наличие соответствующей взрывозащиты является одним из требований, предъявляемым к сооружениям химической промышленности. Ущерб, потенциально наносимый строительным конструкциям военными действиями и сопровождающими их взрывами, также достаточно существенен. В то время как методы оценки взрывных воздействий, теоретически возможных в отношении конструкций промышленных объектов, известны давно, эффект военных действий оценке не поддается. Проектные решения промышленных зданий старой постройки достаточно часто не соответствуют современным требованиям, действующим в отношении взрывозащиты. Традиционные методы усиления, предусматривающие использование стальных или монолитных конструкций, являются достаточно дорогими, а их исполнение обычно требует существенных затрат время. Применение же фибропластиковых систем усилений при решении подобных задач демонстрирует экономичность и позволяет значительно сократить периоды производства работ.

В настоящее время широкое внедрение для защиты строительных конструкций от взрывов нашли фибропластики, изготавливаемые непосредственно по месту использования на основе двунаправленных стекловолоконных полотен, размещаемых в один или несколько слоев. С этой целью также находят применение однонаправленные углеродоволоконные ламинаты заводской готовности, наклеиваемые на поверхности строительных конструкций. В настоящее время системы на основе углеродоволоконных ламинатов прошли необходимые испытания и получили одобрение регулятивных структур НАТО как защитные конструкционные элементы [54].

Высокую эффективность также показывают и фибропластики на основе двунаправленных арамидоволоконных полотен, специально рекомендуемые как средства защиты от взрывных воздействий [331]. Благоприятные механические свойства арамидных волокон, и особенно их прочность в поперечном направлении, определили высокую эффективность использования подобных систем. Экспериментальные исследования, проводившиеся производителями волокон, указываю на то, что арамидные фибропластики способны повысить сопротивление каменных конструкций взрывным воздействиям в 5…10 раз [54]. Однако

относительно высокая цена данного материала несколько сужает степень его использования в качестве элемента взрывозащиты строительных конструкций.

9.2. Защита от ударных воздействий

Элементы эксплуатируемых строительных конструкций не всегда способны на практике воспринимать возможные ударные воздействия (например, опоры мостов или линий электропередач часто не приспособлены к ударам груженых автомобилей). Традиционные методы усиления, такие как железобетонные обоймы, часто оказываются неприменимыми по причине нехватки необходимого пространства или ввиду эстетических соображений. Кроме того, устройство железобетонных систем обычно требует продолжительного времени, что в ряде случаев просто недопустимо, так как препятствует нормальной эксплуатации сооружений (например, при усилении опор пролетных строений автомобильных развязок). Альтернативным методом повышения стойкости к ударным воздействиям, нашедшим в последнее десятилетие относительно широкое применение, является усиление арамидоволоконными двунаправленными композитами.

Работа колонн с круглыми поперечными сечениями, усиленных арамидоволоконными пластиками и подвергающихся ударам автомобилями, изучалась в Великобритании [54, 331, 332]. Испытывались усиления, выполненные поперечно ориентированными арамидными полотнами, имевшими вес слоя 290 гр./м^2. При этом удар 30-тонного грузовика, движущегося со скоростью 75 км/ч, имитировался нагрузкой в 1500 кН, бьющей колонны на высоте 0,75…1,5 м над поверхностью дороги, и дополнительным усилием 750 кН, синхронно действующим на высоте 1…3 м (рис. 9.1). Полученные результаты экспериментов продемонстрировали то, что абсорбция энергии колоннами, усиленными в двух направлениях (продольном и поперечном) значительно выше, чем у не усиливавшихся образцов.

Углеволоконные и стекловолоконные материалы, использовавшиеся в составе сравнительных образцов, обеспечили незначительный рост поглощения энергии. Отличающиеся хрупкостью углеродные и стеклянные волокна показали более раннее разрушение в связи с незначительной поперечной прочностью. Арамидные холсты допускали существенно больший прирост деформаций стержней колонн благодаря присущей их волокнам повышенной сопротивляемости поперечным воздействиям.

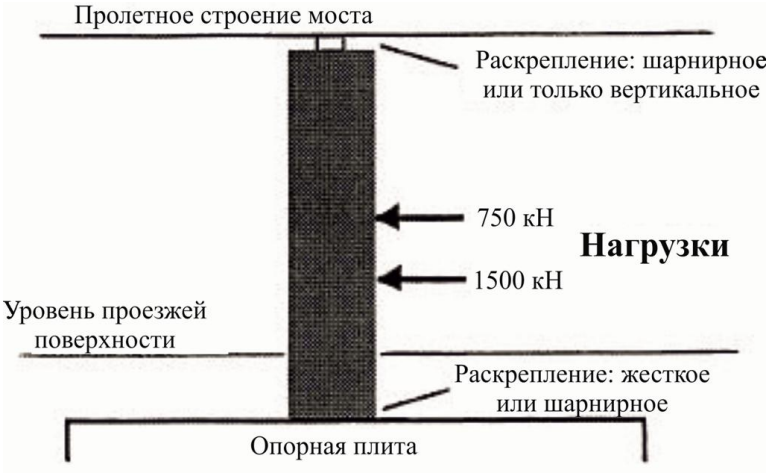


Рис. 9.1. Схема испытаний колонн автомобильных путепроводов на ударные воздействия; адаптировано по [54]

Результаты соответствующих испытаний, проведенных одним из ведущих производителей арамидных волокон — британским подразделением компании *Дюпон* (*DUPONT UK*), сведены в таблицу 9.1. При этом серию колонн, не имевших усиления, условно обозначили как *C1*, серию колонн, усиленных 2-мя продольными и 2-мя поперечными слоями арамидных холстов, маркировали как *C3*, серию с 3-мя продольными и 2-мя поперечными слоями арамидных холстов назвали *C4*. Соответствующее графическое описание зависимостей нагрузок и деформаций приведено на рисунке 9.2.

Таблица 9.1

Результаты испытаний, проведенных компанией *Дюпон* (*DUPONT UK*) на колоннах с круглыми поперечными сечениями, усиленных арамидоволоконными пластиками; по [54]

Серия колонн	Количество слоев арамидных полотен		Полученные максимальные величины		Характер разрушения
	Продольных	Поперечных	Нагрузок, кН	Деформаций, мм	
C1	—	—	233	34	Пластические деформации внутреннего армирования с последующим разрушением бетона
C3	2	2	580	50	Разрушение продольных волокон арамидоволоконного усиления
C4	3	2	785	69	Разрушение продольных волокон арамидоволоконного усиления

При разрушениях экспериментальных образцов наблюдался разрыв продольных арамидных волокон, в то время как наличие внешних поперечных слоев усиливающего материала, исключило преждевременную потерю их устойчивости.

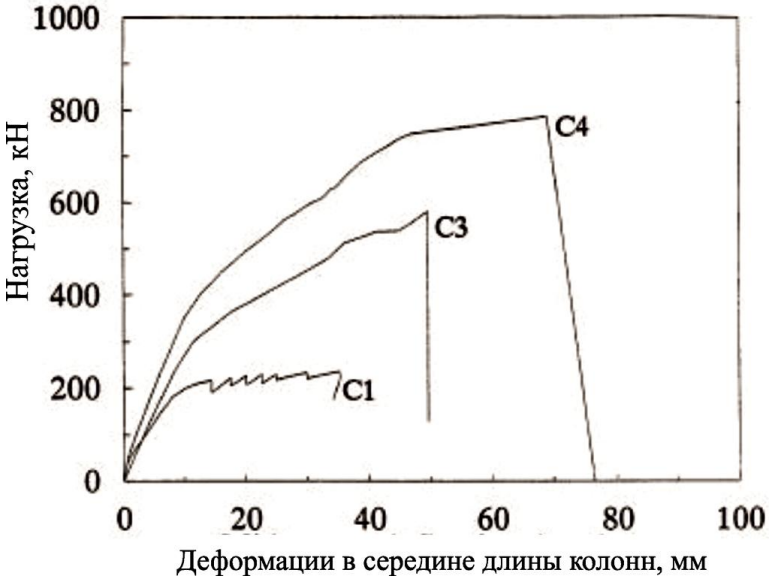


Рис. 9.2. Зависимость деформаций в середине длины колонн от величин действующих нагрузок в соответствии с характером арамидоволоконного внешнего армирования; адаптировано по [54]

Проведенные испытания подтвердили возможность существенного повышения несущей способности изгибаемых колонн при помощи внешнего арамидоволоконного армирования. Абсорбция энергии стала возможной благодаря повышению изгибной жесткости, что позволило рекомендовать арамидные волокна для осуществления усилений, призванных воспринимать случайные ударные воздействия транспортных средств [54].

ЛИТЕРАТУРА

1. Mortensen, A. Concise Encyclopedia of Composite Materials. – Pergamon, 2007. – 958p.
2. Композиционные материалы: справочник. Под. ред. В.В. Васильева, Ю.М. Тарнопольского. – М.: Машиностроение, 1990. – 512с.
3. Композиционные материалы. Справочник под ред. Дж. Любина. Перевод с англ., кн. 1-2. – М., 1988.
4. Kelly, A. and Mileiko, S.T. (eds.) Fabrication of Composites (Handbook of Composites), Vol.4, North-Holland, Amsterdam, 1983.
5. Васильев В.В. и др. Анизогридные композитные сетчатые конструкции — разработка и приложения к космической технике // Композиты и наноструктуры, №3, 2009. – С. 38-50.
6. Cadei, J.M.C., Stratford, T.J., Hollaway, L.C. and Duckett, W.G. Strengthening Metallic Structures Using Externally Bonded Fiber-Reinforced Composites, C595. – London: CIRIA, 2004.
7. Levnt Gür. Global Trends in Carbon Fiber Technologies in Building and Construction // Composites without borders. I International Conference, Moscow, 31 October – 2 November, 2013 / Презентация. DowAksa. – 10с.
8. Mosallam, A.S., Bayraktar, A., Elmikawi, M., Pul, S. and Adanur, S. Polymer Composites in Construction: An Overview // Symbiosis, February 11, 2014.
9. Plunkett, J.D. Rapid replacement composite bridge No. 1. NCHRP-IDEA Project 30 // Innovations Deserving Exploratory Analysis Programs (IDEA). New IDEAS for Highway Systems. NCHRP Highway. Annual Progress Report. January 2013. / Transportation research board of national academies. – 241p.
10. Liu, W., Zhou, E. and Wang, Y. Response of No-Name Creek FRP Bridge to Local Weather. Final Report // Report No. FHWA-KS-12-6, September 2012 / Kansas State University Transportation Center, Kansas Department of Transportation, 2012. – 86p.
11. Stone, D., Nanni, A., Watkins, S. and Nystrom, H. CIES 02-26. Laboratory and Field Testing of FRP Composite Bridge Decks and FRP-Reinforced Concrete Bridge for the City of St. James, Phelps County, MO / Center for Infrastructure Engineering Studies. University of Missouri-Rolla. – 278p.

12. Flannigan, J.C. Acoustic emission monitoring on fiber reinforced bridge panels // A report submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree Master of sciences / Department of Mechanical Engineering, College of Engineering, Kansas state university. – Manhattan, Kansas: 2008. – 75p.

13. Исследование возможности и области рационального применения гибких лент и тканей из композиционных материалов при ремонте железобетонных конструкций мостовых сооружений с разработкой ОДМ. Отчет о научно-исследовательской работе. – М.: ФГУП РОСДОРНИИ, 2011. – 145с.

14. Anurag Bansal. Application of Composites in Construction // Composites without borders. I International Conference, Moscow, 31 October – 2 November, 2013 / Презентация. Technology & Innovation Division. ACCIONA Infrastructures. – 32с.

15. Flexible Construction Techniques for New Bridges. Integrated design and engineering / Colophon: Pantura work group, Deliverable 4.7, Version, 13 February 2013. – 119p.

16. Svoboda, B.E., Dagher, H.J. Bridge-in-a-Backpack™. A hybrid composite-concrete bridge combining the advantages of advanced composite materials and concrete // Презентация / Advanced Structures & Composites Center, The University of Maine: 05.04.2011. – 2p.

17. Bridge Formwork in a Backpack / Concrete international. The Magazine of the American Concrete Institute — an international technical society. February 2010. Vol. 32 No. 2. – P. 26-29.

18. Завод по производству стеклопластиковых труб «Амитек» // Composites without borders. I International Conference, Moscow, 31 October – 2 November, 2013 / Презентация. Холдинговая компания «Композит». – 29с.

19. Стан та залишковий ресурс фонду будівельних металевих конструкцій в Україні / А.В. Перельмутер, В.М. Гордеєв, Є.В. Горохов та ін.; За ред. д.т.н. Перельмутера А.В. – К.: Сталь, 2002. – 166с.

20. Обследование и усиление конструкций промышленных зданий / Прядко Н.В., Руднева И.Н., Прядко Ю.Н.; Под ред. Прядко Н.В. – Донецк: ДонНАСА, Норд-Пресс, 2010. – 268с.

21. Добромыслов А.Н. Анализ аварий промышленных зданий и инженерных сооружений // Пром. стр-во, 1990, №9. – С. 9-10.

22. Лантух-Лященко А.І. Оцінка технічного стану транспортних споруд, що знаходяться в експлуатації // Вісник Транспортної Академії України, №3, – К., 1999. – С. 59-63.

23. Перельмутер А.В. Избранные проблемы надежности и безопасности строительных конструкций. – К.: УкрНИИПСК, 2000. – 216с.

24. Прядко Н.В. Обследование и реконструкция жилых зданий. – Макеевка: ДонНАСА, 2006. – 156с.

25. Физдель И.А. Дефекты в конструкциях и сооружениях и методы их устранения. – М.: Стройиздат, 1986. – 336с.

26. Рекомендации по усилению и ремонту строительных конструкций инженерных сооружений. – М.: ЦНИИПромзданий, 1990.

27. Рекомендации по проектированию усиления железобетонных конструкций зданий и сооружений реконструируемых предприятий. Надземные конструкции и сооружения / Харьковский ПНИИ Промстройниипроект Госстроя СССР, НИИЖБ Госстроя СССР. – М.: Стройиздат, 1992.

28. Методические рекомендации по технологии усиления металлических конструкций на реконструируемых объектах. – К.: НИИСП Госстроя УССР, 1984.

29. ДБН В.3.1-1-2002. Експлуатація конструкцій та інженерного обладнання будівель і споруд та систем життєзабезпечення. Ремонт і підсилення несучих і огороджувальних будівельних конструкцій і основ промислових будинків та споруд / НДІ будівельного виробництва. – К.: Державний комітет України з будівництва та архітектури, 2003. – 82с.

30. Голышев А.Б., Кривошеев П.И., Козелецкий П.М. и др. Усиление несущих железобетонных конструкций производственных зданий и просадочных оснований. – К.: Логос, 2004. – 219с.

31. Валь В.Н., Горохов Е.В., Уваров Б.Ю. Усиление стальных каркасов одноэтажных производственных зданий при их реконструкции. – М.: Стройиздат, 1987. – 220с.

32. Мальгамов А.И., Плевков В.С., Полищук А.И. Усиление железобетонных и каменных конструкций зданий и сооружений (Атлас схем и чертежей). Изд. Томского университета. Томск, 1989. – 454с.

33. Топчий В.Д., Гребенник Р.А., Клименко В.Г. и др. Реконструкция промышленных предприятий. В 2 т., Т. 1. – М.: Стройиздат, 1990. – 591с.

34. Методические рекомендации по технологии усиления металлических конструкций на реконструируемых объектах. – К.: НИИСП Госстроя УССР, 1984с. – 58с.

35. Методические рекомендации по усилению железобетонных конструкций зданий и сооружений (на основе анализа и обобщения существующего опыта). Госстрой СССР, Главпромстройпроект, Союзметаллургстрой-НИИпрект, Харьковский ПромстройНИИпроект, НИИСП Госстроя УССР, НИИЖБ. – Харьков, 1984. – 203с.

36. Методические рекомендации по усилению железобетонных конструкций на реконструируемых предприятиях. – К.: НИИСП Госстроя УССР, 1984. – 146с.

37. Методические рекомендации по усилению каменных конструкций. – К.: НИИСП Госстроя УССР, 1985. – 48с.

38. Рекомендации по оценке состояния и усилению строительных конструкций промышленных зданий и сооружений. – М.: НИИСК Госстроя СССР, Стройиздат, 1989. – 104с.

39. Рекомендации по усилению железобетонных конструкций зданий и сооружений под нагрузкой в условиях реконструкции. – К.: НИИСП Госстроя УССР, 1990. – 60с.

40. Рекомендации по усилению металлических конструкций производственных зданий и сооружений. – Л.: Минсудпром СССР, 1978.

41. Система внешнего армирования FibARM. Технология / Презентация. – Композитспецстрой, 2013 (www.hccomposite.com). – 20с.

42. Применение композитных материалов в строительстве / Презентация. – Холдинговая компания «Композит», 2014 (www.compozit.su). – 17с.

43. Холдинговая компания «Композит». Композитные материалы для автодорожной отрасли / Презентация. – М.: Холдинговая компания «Композит», АО «Препрег-СКМ», 2016 (www.hccomposite.com). – 30с.

44. Системы внешнего армирования из углеродных композитных материалов для ремонта и усиления строительных конструкций / Презентация. – М.: Холдинговая компания «Композит», 2014 (www.hccomposite.com). – 24с.

45. Шилин А.А. и др. Усиление железобетонных конструкций композиционными материалами. – М.: Стройиздат, 2004, – 144с.

46. Шилин А.А. Стратегия ремонта железобетонных конструкций подземных сооружений с учётом их состояния и требуемого уровня надёжности // Научное обоснование подземного строительства: Избранные труды учёных МГГУ. – М.: Изд-во Академии горных наук, 2001. – С. 301-344.

47. ЗАО «Холдинговая компания «Композит» ». Системы внешнего армирования FibARM // Composites without borders. I International Conference, Moscow, 31 October – 2 November, 2013 / Презентация. – М.: Холдинговая компания «Композит». – 26с.

48. Композитные материалы в строительстве // Composites without borders. I International Conference, Moscow, 31 October – 2 November, 2013 / Презентация. Холдинговая компания «Композит». – 13с.

49. Carbon Fibre – An Australian Perspective // Composites without borders. I International Conference, Moscow, 31 October – 2 November, 2013 / Презентация. Carbon nexus. Carbon fibre & composite research. – 35с.

50. CNR-DT 200/2004 Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures. Materials, RC and PC structures, masonry structures. ROME – CNR, July 13th, 2004. – 144p.

51. Friberg, E., Olsson, J. Application of fiber reinforced polymer materials in road bridges – General requirements and design considerations // Master of Science Thesis in the Master's Programme of Structural Engineering and Building Technology / Department of Civil and Environmental Engineering, Division of Structural Engineering, Chalmers University of Technology: Göteborg, Sweden 2014. – 359p.

52. Болтон У. Конструкционные материалы, металлы, сплавы, полимеры, керамика, композиты. Карманный справочник. Перевод с англ. – М.: Додека-XXI, 2004. – 320с.

53. Арзомасов Б.Н.. Конструкционные материалы. – М.: Машиностроение, 1990. – 688с.

54. Design Guide Line for S&P FRP Systems. S&P Clever Reinforcement Company, Switzerland. – 69p.

55. FRP Design Guide, S&P Clever Reinforcement Company, Brunnen, Switzerland, June 2000. – 70p.

56. Ingildeev, D., Hermanutz, F., Buchmeiser, M.R. New Challenges in the Development of Carbon Fibers // Composites without borders. I International Conference, Moscow, 31 October – 2 November, 2013 / Презентация. Institut für Textilchemie und Chemiefasern. – 28с.

57. Костиков В.И., Дергунова В.С. Композиционные материалы на основе углерода. – М., 1978.

58. Углеродные волокна и углекомпозиты. Под ред. Э. Фитцера. Пер. с англ. – М., 1988.

59. Конкин А.А. Углеродные и другие жаростойкие волокнистые материалы. – М., 1974.

60. Springer Handbook of Nanomaterials. (Ed.) R.Vajtai / Springer, 2013. – 1500p.

61. Термо-жаростойкие и негорючие волокна. Под ред. А.А.Конкина, – М.: 1978. – 216с.

62. Manas Chandal, Salil K.Roy. Industrial Polymers, Specialty Polymers and Their Applications. – CRC Press, 2009.

63. Lawrence, C. High Performance Textiles and Their Applications. – Woodhead Publishing, 2014.

64. A.R.Horrocks, S.C.Anand. Handbook of technical textiles. – Woodhead Publishing, 2000.

65. Аблесимов Н. Е., Земцов А. Н. Релаксационные эффекты в неравновесных конденсированных системах. Базальты: от извержения до волокна. – М.: ИТиГ ДВО РАН, 2010. – 400с.

66. Словарь нанотехнологических и связанных с нанотехнологиями терминов. Под ред. С.В.Калюжного. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2010. – 528с.

67. ASM Handbook Volume 21, Composites, by ASM International, December 2001.

68. Applications & Mechanical Properties of FRP / Ahmed Hassan Mahmoud, Abdelrahman Khamis, Hesham Atef Mohamed. Alexandria University – Faculty of Engineering, 2009. – 29p.

69. Testing and Analysis of a Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Bridge Deck, by Zihong Liu, dissertation submitted to the Faculty of Virginia Polytechnic Institute and State University in partial fulfillment for the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in Civil Engineering.

70. Bonaldo, E., Barros, J.A.O.; Lourenço, P.J.B., Concrete Slabs Strips Reinforced with Epoxy- bonded Carbon Laminates into Slits, Third International Conference Construction Materials: Performance, Innovations and Structural Implications, Vancouver, August CD, 22-24, 2005.

71. SST Carbon Reinforcing Systems. FRP Sheets Laminate. Pre-stressed Laminate Epoxies. C-FRP-2013/14 APACME. – Simpson Strong-Tie Asia Ltd. – 24p.

72. Sand, P. Faser Reinforcement Polimer. Clever Reinforcement Company, 2008.

73. Система внутреннего армирования неметаллической арматурой / Презентация. – Композитспецстрой, 2013 (www.hccomposite.com). – 24с.

74. ГОСТ 31938-2012 (ISO 10406-1:2008, NEQ). Межгосударственный стандарт. Арматура композитная полимерная для армирования бетонных конструкций

75. CNR-DT 203/2006 Guidelines for the Design and Construction of Concrete Structures Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars. ROME – CNR, June, 2007. – 39p.

76. CNR-DT 204/2006 Guidelines for the Design and Construction of Fiber-Reinforced Concrete Structures. ROME – CNR, November, 2007. – 57p.

77. Report on Fiber-Reinforced Polymer (FRP) Reinforcement for Concrete Structures, by ACI Committee 440, 2000.

78. ACI 440.2R-08. Guide for Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures. – American Concrete Institute, ACI Committee 440, technical committee document, 2008.

79. Strengthening and rehabilitation of civil infrastructures using fibre-reinforced polymer (FRP) composites. Edited by L.C. Hollaway and J.G. Teng. – Woodhead Publishing Limited and Maney Publishing Limited on behalf of The Institute of Materials, Minerals & Mining, 2008. – 398p.

80. Cripps, A., Harris, B. and Ibell, T. Fibre-reinforced polymer composites in construction, C564. – London: CIRIA, 2002.

81. Shcnoi, R.A., Moy, S.S.J., Hollaway, L.C. Advanced polymer composites for structural application. – Thomas Telford, 2002.

82. Concrete Society. Design guidance for strengthening concrete structures using fibre composite materials. – Technical report no. 55, Crowthorne, UK, 2000.

83. The Concrete Society (UK): Technical Report No. 55 – Design guidance for strengthening concrete structures using fibre composite materials – ISBN 0 946691 843, 2000.

84. Eurocode 8. Design of structures for earthquake resistance. Part 3: Assessment and retrofitting of buildings. EN 1998-3:2004. European Committee for Standardization, November 2004.

85. Federation Internationale du Beton. Externally bonded FRP reinforcement for RC structures. – Fib bulletin 14, Lausanne, Switzerland, 2001.

86. Concrete Engineering Series 23. Recommendation For Design And Construction of Concrete Structures Using Continuous Fiber Reinforcing Materials. Research Committee on Continuous Fiber Reinforcing Materials, Tokyo, 1997. Japan Society of Civil Engineers (JSCE). – 325p.

87. Design Manual. Seismic Retrofiting Design and Constraction Guidelines for Existing Reinforced Concrete (RC) Buildings with FRP Materials. Japan Building Disaster Prevention Association (JBDPA). Tokyo, Japan, 1999. – 115p.

88. Design Manual No. 3. Reinforcing Concrete Structures with Fiber Reinforced Polymers. Intelligent Sensing for Innovative Structures Canada Corporation, Winnipeg, Manitoba, Canada, 2001. – 158p.

89. CAN/CSA-S806-02. Design and Construction of Building Components with Fibre-Reinforced Polymers. Canadian Standards Association (CSA). Toronto, Ontario, Canada, 2007. – 218p.

90. ACI 440.4R-04. Prestressing Concrete Stuctures with FRP Tendons Reapproved 2011. ACI Committee 440, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., 2004. – 35p.

91. Fib Bulletin No. 40. FRP Reinforcement in RC Structures, International Federation for Structural Concrete, Lausanne, Switzerland, 2007. – 160 p.

92. Руководство по усилению железобетонных конструкций композитными материалами. -М.: ГУП «НИИЖБ» и ООО «Интераква», 2006.

93. Рекомендации по расчету конструкций со стеклопластиковой арматурой. – М.: НИИЖБ, 1978г.

94. ПРОЕКТ. СТО Применение в строительных бетонных и гидротехнических конструкциях неметаллической композитной арматуры. – М.: НОСТРОЙ, 2012.

95. ПРОЕКТ. СП Конструкции из бетона с композитной неметаллической арматурой. – М.: НИИЖБ, 2013.

96. СП 164.1325800.2014 Свод правил. Усиление железобетонных конструкций композитными материалами. Правила проектирования. – М.: Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации, 2015.

97. Dolan. C.W., Leu, B.L., Hundley, A.: Creep rupture of fiber reinforced plastics in a concrete environment. Proceedings of the Third International Symposium on Non-Metallic (FRP) reinforcement for Concrete Structures. Sapporo. October 1997. – P. 187-194.

98. Ando, N., Matsukawa, H., Hattori, A., Mashima, M. Experimental studies on the long-term tensile properties of FRP-tendons. Proceedings of the Third International Symposium on Non-Metallic (FRP) reinforcement for Concrete Structures. Sapporo. October 1997. – P. 203-210.

99. Uomoto, T., Nishimura, T., Ohga, H. Static and fatigue strength of FRP rods for concrete reinforcement. Non-Metallic (FRP) reinforcement for Concrete Structures, Proceedings of the Second Inter-national RILEM Symposium (FRPCS-2). Gent, August 1995. – P. 100-1070.

100. Adini, R., Rahman, H., Benmokrane, B., Kobayashi, K. Effect of temperature and loading frequency on the fatigue life of a CFRP-bar in concrete. Fiber Composites in Infrastructure, Proceedings of the Second International Conference on Composites in Infrastructure, ICCCI 98. Tucson, Jan. 1998. – P. 203-210.

101. Porter, M.L., Mehus, J., Young, K.A., O'Neil, E.F., Barnes, B.A. Aging for fiber reinforcement in concrete. Proceedings of the Third International Symposium on Non-Metallic (FRP) reinforcement for Concrete Structures. Sapporo. October 1997. – P. 59-66.

102. Terrasi, G.P., Kaiser, H.: CFK-Lamellen verstärkte Querschnitte bei Temperatursprüngen, nach-trägliches Verstärken von Bauwerken mit CFK-Lamellen, Referate und Beiträge zur EMPA/SIA-Studientagung vom 21. September 1995 in Zürich. Dokumentation SIA D 0128.

103. Terrasi, G.P.: Aluminium/CFK Hybride unter thermischer Beanspruchung. Diplomarbeit an der ETH Zürich, Abt. für Werkstoffe.

104. Taerwe, L., Matthys, S. Universität Gent: Inrijgen van Betonkolomnen met vezelcomposietlaminaten.

105. CNR-DT 201/2005 Guidelines for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures. Timber structures. Preliminary study. ROME – CNR, June, 2007. – 58p.

106. CNR-DT 202/2005 Guidelines for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Existing Structures. Metallic structures. Preliminary study. ROME – CNR, June, 2007. – 57p.

107. CNR-DT 205/2007 Guidelines for the Design and Construction of Structures made of FRP Pultruded Elements. ROME – CNR, October 9th, 2008. – 50p.

108. Оценка надежности и долговечности углепластикового армирования / Презентация. – Холдинговая компания «Композит», 2014 (www.hccomposite.com). – 43с.

109. ГОСТ 25.601-80*. Расчёты и испытания на прочность. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытания плоских образцов на растяжение при нормативной повышенной и пониженной температурах, 1987.

110. Xiao-Ling Zhao. FRP-Strengthened Metallic Structures. – CRC Press, Taylor & Francis Group, 2014. – 247p.

111. El Damatty, A.A., Abushagur, M. Testing and modeling of shear and peel behavior for bonded steel/FRP connections. Thin-Walled Structures, 41(11), 2003. – P. 987-1003.

112. Zhao, X.L., Zhang, L. State-of-the-art review on FRP strengthened steel structures. Engineering Structures, 29(8), 2007. – P. 1808-1823.

113. Xia, S.H., Teng, J.G. Behavior of FRP-to-steel bond joints. In Proceedings of International Symposium on Bond Behavior of FRP in Structures (BBFS 2005), Hong Kong, December, 2005. – P. 419-426.

114. Hart-Smith, L.J. Adhesive- bonded double-lap joints. Technical Report NASA CR-112235. Long Beach, CA: Douglas Aircraft Company, 1973.

115. Schnerch, D., Stanford, K., Summer, E., Rizkalla, S. Strengthening steel structures and bridges with high modulus carbon fiber reinforced polymers: Resin selection and scaled monopole behavior. Transportation Research Record 1892. 2004. – P. 237-245.

116. Fawzia, S., Al-Mahaidi, R., Zhao, X.L. Experimental and finite element analysis of a double strap joint between steel plates and normal modulus CFRP. Composite Structures, 75(1-4), 2006. – P. 156-162.

117. Colombi, P., Poggi, C. Strengthening of tensile steel members and bolted joints using adhesively bonded CFRP plates. Construction and Building Materials, 20(1-2), 2006. – P. 22-33.

118. Fawzia, S., Al-Mahaidi, R., Zhao, X.L., Rizkalla, S. Strengthening of circular hollow steel tubular sections using high modulus CFRP sheets. Construction and Building Materials, 21(4), 2007. – P. 839-847.

119. Jiao, H., Zhao, X.L. CFRP strengthened butt-welded very high strength (VHS) circular steel tubes. Thin-Walled Structures, 42(7), 2004. – P. 963-978.

120. Concrete Society. Strengthening Concrete Structures with Fibre Composite Materials: acceptance, inspection and monitoring. – Technical report no. 57. Crowthorne, UK, 2003.

121. American Concrete Institute. Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRF Systems for Strengthening Concrete Structures. – ACJ 440.2R-02, Detroit, USA, 2002.

122. Рекомендации по применению композиционных материалов при ремонте железобетонных конструкций мостовых сооружений. – М.: Мосавтодор, 2007.

123. Регламент по ремонту железобетонных конструкций подземных коллекторов для инженерных коммуникаций. Утвержден ГУП «Москоллектор», правительством г. Москва. – М.: 2009. – 74с.

124. Рекомендации по расчету усилений железобетонных конструкций системой внешнего армирования из полимерных композитов FibARM. – М.: НИИЖБ, 2012. – 29 с.

125. СТО 70386662-101-2012. Применение системы внешнего армирования MBrace для усиления главных балок железобетонных пролетных строений железнодорожных мостов. – М.: Общество с ограниченной ответственностью «БАСФ Строительные системы», 2012. – 16с.

126. СТО 2256-002-2011. Системы внешнего армирования из полимерных композитов FibARM для ремонта и усиления строительных конструкций. – М.: ЗАО «Препрег-СКМ», НИЦ «Мосты», 2012. – 54с.

127. ОДМ 218.3.027-2013. Рекомендации по применению тканевых композиционных материалов при ремонте железобетонных конструкций мостовых сооружений. – М.: РосАвтодор, 2013. – 55с.

128. Восстановление несущей способности конструкций зданий и сооружений с применением технологии внешнего армирования FibARM / Презентация. – Композитспецстрой, 2013 (www.hccomposite.com). – 22 с.

129. Сравнительные испытания образцов-балок на изгибающую нагрузку с целью определения возможности применения углепластика для усиления мостовых железобетонных конструкций. – М.: НИЦ «Мосты», ОАО ЦНИИС, 2001.

130. Holzenkämpfer, P.: Ingenieurmodell des Verbunds geklebter Bewehrung für Betonbauteile. Dissertation TU Braunschweig, 1994.

131. Rostasy, F.S., Ranisch, E.H.: Sanierung von Betontragwerken durch Ankleben von Faserverbundwerkstoffen. Forschungsbericht, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig, Dezember 1994.

132. Biege-und Schubtragverhalten eines mit geklebten CFK-Lamellen und Stahllaschenbügeln verstärkten Stahlbetonträgers, Untersuchungsbericht Nr.8516/8516 Neu-des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig vom 13.05.1996.

133. Verbundversuche an Doppellaschenkörpern mit CFK-Lamellen und Biegeversuche an mit CFK-Lamellen verstärkten Platten, Untersuchungsbericht Nr. 8511/8511 – Neu- des Institutes für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz Braunschweig vom 05.11.1996.

134. Versuche zur Bestimmung der Werkstoffeigenschaften, der Verbundtragfähigkeit, des Entkoppelungsverhaltens von CFK-Lamellen sowie Biegeschubversuche an mit CFK-Lamellen verstärkten Platten, Untersuchungsbericht Nr. 8524/5247 des Institutes für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der TU Braunschweig vom 20.05.1998.

135. Structural strengthening manual. Cutting-edge systems and solutions for the repair and static/seismic upgrading of buildings using fibre reinforced composites. – Milan: MAPEI SpA, 2014. – 92p.

136. Barros, J.A.O., Dias, S.J.E. Shear Strengthening of RC beams with near-surface-mounted CFRP laminates // 7th International Symposium on Fiber Reinforced Polymer (FRP) Reinforce-ment for Concrete Structures (FRP7RCS), Kansas, USA, 7-10 November 2005.

137. Bonaldo, E., Barros, J.A.O., Lourenço, P.J.B. Concrete Slabs Strips Reinforced with Epoxy-bonded Carbon Laminates into Slits // Third International Conference Construction Materials: Performance, Innovations and Structural Implications, Vancouver, August, 22-24, 2005.

138. Barros, J.A.O., Dias, S.J.E., Fortes, A.S. Near Surface Mounted technique for the flexural and shear strengthening of concrete beams // INCOS'05 International Confence, Coimbra, Portugal, June 2005. – P. 229-236.

139. Barros, J.A.O., Fortes, A.S. Flexural strengthening of concrete beams with CFRP laminates bonded into slits // Journal Cement and Concrete Composites, 27(4), 2005. – P. 471-480.

140. Kaluza M., STU Gliwice: Verstärkung der Balken mit vorgespannten S&P CFK-Lamellen

141. Vielhaber, Joh. Versuchsreihe Verstärkung der Querkrafttragfähigkeit von Stahlbetonkonstruktionen, Fachhochschule Potsdam.

142. EN 1992-1-1 (2004): Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings

143. Wang Yung-Chih. Retrofit of Reinforced Concrete Members Using Advanced Composite Materials. Research Report 2000-3, Department of Civil Engineering, University of Canterbury, February 2000, ISSN 0110-3326.

144. Pauly, T., Priestley, M.J.N. Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings.

145. Priestley, M.J.N., Seible, F. and Calvi, G.M. Seismic Design and Retrofit of Bridges, 1996.

146. Pauly, T. and Priestly, M.J.N. Seismic Design of Reinforced Concrete and Masonry Buildings, 1991.

147. Priestley, M.J.N., Seible, F. and Fyfe, E. Column Seismic Retrofit Using Fiberglass/Epoxy Jackets // Proceedings 1st International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, 1992. – P. 287-298.

148. Mander, J.B., Priestley, M.J.N. and Park, R. Theoretical stress-strain model for confined concrete // Journal of Structural Division, ASCE, vol. 107, No. ST11, 1998. – P. 2227-2244.

149. Mander, J.B., Priestley, M.J.N. and Park, R. Seismic Design of Bridge Piers. Research Report 84-2, Department of Civil Engineering, University of Canterbury, New Zealand, 1984. – 442p.

150. Dawood, M., Rizkalla, S., Schncrch, D. Design guidelines for the use of HM strips – strengthening of steel-concrete composite bridges with high modulus carbon fiber reinforced polymer (CFRP) strips, 2005.

151. Moy, S.S.J. FRP Composite: Life Extension and Strengthening of Metallic Structures: ICE Design and practice guide. – London: Thomas Telford, 2001.

152. Schncrch, D., Dawood, M., Rizkalla, S. Design guidelines for the use of HM strips: strengthening of steel-concrete composite bridges with high modulus carbon fiber reinforced polymer (CFRP) strips. Technical Report IS-06-02, Department of Civil, Construction and Environmental Engineering, North Carolina State University, 2006.

153. Moy, S.S.J., Clark, J. and Clarke H. The Strengthening of Wrought Iron Using Carbon Fiber Reinforced Polymer Composites. ACIC-2004. – Guildford, 2004.

154. JSCE. 2012. Advanced technology of repair and strengthening of steel structures using externally-bonded FRP composites (in Japanese). Hybrid Structure Reports 05. Tokyo: Japan Society of Civil Engineers, 2012.

155. Oehlers, D.J., and Seracino, R. Design of FRP and steel plated RC structures: Retrofitting beams and slabs for strength, stiffness and ductility. – Oxford: Elsevier, 2004.

156. Sen, R., and Liby, L. Repair of steel composite bridge sections using CFRP laminates. Final report. Florida and U.S. Department of Transportation. Springfield, VA: National Technical Information Service, 1994, August.

157. Особенности усиления металлических конструкций композитными материалами на основе углеродного волокна / Е.П. Капустина, М.В. Анненкова. Вісник ДНАБА №6.2016. – С. 34-36.

158. Усиление металлических конструкций фиброармированными пластиками, часть 1. Состояние проблемы / И.И.Овчинников, И.Г. Овчинников, Г.В.Чесноков, Д.А.Татиев, К.В.Покулаев // Инженерный журнал «Науковедение». Выпуск 3, 2014. – С. 1-27.

159. Усиление металлических конструкций фиброармированными пластиками, часть 2. Применение метода предельных состояний к расчету растягиваемых и изгибаемых конструкций / И.И.Овчинников, И.Г.Овчинников, Г.В.Чесноков, Д.А.Татиев, К.В.Покулаев // Инженерный журнал «Науковедение». Выпуск 3, 2014. – С. 1-23.

160. Применение композитных материалов для резервуаров в условиях севера / А.У. Якупов, Н.В. Шайталова, В.И. Кучерюк // Тюменский государственный нефтяной университет. Материалы международной научно-технической конференции. Том 3. Проектирование, сооружение и эксплуатация систем транспорта и хранения нефти и газа. – Тюмень: ТЮМГНСХ, 2015. – С. 140-143.

161. Стоянов В.В. Новые подходы в управлении несущей способностью конструкций // Современные строительные конструкции из металла и древесины / Сб. науч. тр. ОГАСА. – Одесса: ОГАСА, 2001. – С. 164-167.

162. Стоянов В.В. Проблемы совершенствования комбинированных строительных конструкций с целью повышения их несущей способности // Современные строительные конструкции из металла и древесины / Сб. науч. тр. ОГАСА. – Одесса: ОГАСА, 2003. – С. 4-11.

163. Стоянов В.В. Новые подходы обеспечения несущей способности строительных металлических конструкций в полном объеме срока эксплуатации // Сб. XII Украинского НТК «Металлические конструкции». –К.: Сталь, 2004. – С. 280-292.

164. Стоянов В.В. Металлические резервуары — некоторые проблемы проектирования и реконструкции // Сб. науч. тр. УАМК. – Донецк: УАМК, 2007. – С. 45-49.

165. Стоянов В.В. «Консервация» трещин как способ продления срока работоспособности // Промислове будівництво, інженерні споруди, 2009, №4.

166. Стоянов В.В., Мазин Ж. Алаид. Испытания на выносливость растянутых металлических образцов с нормальной искусственной трещиной // Современные строительные конструкции из металла и древесины / Сб. науч. тр. ОГАСА. – Одесса: ОГАСА, 2009. – С. 51-58.

167. Стоянов В.В. Прогнозирование динамической усталости элементов металлических конструкций при циклическом нагружении // Современные строительные конструкции из металла и древесины / Сб. науч. тр. ОГАСА. – Одесса: ОГАСА, 2010. – С. 1-11.

168. Стоянов В.В., Мазин Ж. Алаид. Долговечность металлических составных подкрановых балок при местном усилении углепластиком // Современные строительные конструкции из металла и древесины / Сб. науч. тр. ОГАСА. – Одесса: ОГАСА, 2010. – С. 258-263.

169. Стоянов В.В., Алаид М.Ж. Элементы металлических конструкций, усиленных углепластиком, при статическом и циклическом загружении // Эффективные строительные конструкции / Сб. науч. тр. ЛГТУ. – Липецк: ЛГТУ, 2009. – С. 105-111.

170. Стоянов В.В. Восстановление прочности и деформативности составных двутавровых балок ослабленных трещинами на поясах // Вісник ОДАБА, вип. 34 / Зб. наук. праць. – Одеса: ОДАБА, 2009. – С. 50-53.

171. Мазин Алаид Жержос. Несущая способность составных металлических балок усиленных углепластиком при циклическом загружении / Диссертация на соискание степени канд. тех. наук. – Одесса: ОГАСА, 2010. – 132с.

172. Stojanov V.V., Alaid M.J. Tests of endurance of stretched metal samples with normal artificial cracks / International conference UACEG Science & Practice "We build the infrastructure of Bulgaria", Sofia, October, 2009. – P. 52.

173. Хоменская А.В. Прочность и деформативность элементов металлических конструкций, усиленных углепластиком, при статических и циклических загружениях / Диссертация на соискание степени канд. тех. наук. – Одесса: ОГАСА, 2012. – 196с.

174. Wu, Z.S., Yuan, H., Niu, H.D. Stress transfer and fracture propagation in different kinds of adhesive joints. Journal of Engineering Mechanics, 128(5), 2002. – P. 562-573.

175. Yuan, H., Teng, J.G., Seracino, R., Wu, Z.S., Yao, J. Full-range behaviour of FRP-to- concrete bonded joints. Engineering Structures, 26(5), 2001. – P. 553-565.

176. Yao, J., Teng, J.G., and Chen, J.F. Experimental study on FRP-to-concrete bonded joints. Composites Part B: Engineering, 36(12), 2005. – P. 99-113.

177. Fawzia, S., Al-Mahaidi, R., Zhao, X.L. Experimental and finite element analysis of a double strap joint between steel plates and normal modulus CFRP. Composite Structures, 75(1–4), 2006. – P. 156-162.

178. Fawzia, S. Bond characteristics between steel and carbon fibre reinforced polymer (CFRP) composites. PhD thesis, Department of Civil Engineering, Monash University, Melbourne, Australia, 2007.

179. Fawzia, S., Zhao, X.L., Al-Mahaidi, R. Bond-slip models for double strap joints strengthened by CFRP. Composite Structures, 92(9), 2010. – P. 2137-2145.

180. Wu, C., Zhao, X.L., Duan, W.H., Al-Mahaidi, R. Bond characteristics between ultra high modulus CFRP laminates and steel. Thin-Walled Structures, 51(2), 2012. – P. 147-157.

181. Yu, T., Fernando, D., Teng, J.G., Zhao, X.L. Experimental study on CFRP-to-steel bonded interfaces. Composites Part B: Engineering, 43(5), 2012. – P. 2279-2289.

182. Teng, J.G., Fernando, D., Yu, T., Zhao, X.L. Debonding failures in CFRP-strengthened steel structures. Presented at Third Asia-Pacific Conference on FRP in Structures (APFIS2012), Sapporo, Japan, February 2-4, 2012.

183. Liu, H.B., Zhao, X.L., Al-Mahaidi, R. Effect of fatigue loading on bond strength between CFRP sheets and steel plates. International Journal of Structural Stability and Dynamics, 10(1), 2010. – P. 1-20.

184. Nguyen, T.C., Bai, Y., Zhao, X.L., Al-Mahaidi, R. Mechanical characterization of steel/CFRP double strap joints at elevated temperatures. Composite Structures, 93(6), 2011. – P. 1604-1612.

185. Cadci, J.M.C. and Stratford, T.J. Elastic Analysis of Adhesion Stresses Between a Beam and a Bonded Strengthening Plate. ACIC-2004, Guildford, 2004.

186. Deng, J., Lee, M.M.K., Moy, S.S.J. Stress analysis of steel beams reinforced with a bonded CFRP plate. Composite Structures, 65, 2004. – P. 205-215.

187. Denton, S.R. Analysis of stresses developed in FRP plated beams due to thermal effects. Composites in Civil Engineering, Hong Kong, 2001. – P. 527-536.

188. Frost, S., Lee, R.J., Thompson, V.K. Structural integrity of beams strengthened with FRP plates – Analysis of the adhesive layer. Structural Faults & Repair, London, 2003.

189. Buyukozturk, O., Guncs, O., Karaca, E. Progress on Understanding Debonding Problems in Reinforced Concrete and Steel Members Strengthened Using FRP Composites, Construction and Building Materials, Vol. 18(1), 2004. – P. 9-19.

190. Buyukozturk, O., Gunes, O., Karaca, E. Progress on Understanding Debonding Problems in reinforced Concrete and Steel Members Strengthened using FRP Composite. In Proc., 10th International Conference and Exhibition London, UK, 1-3 July, 2003.

191. De Bruync, N.A. The Strength of Glued Joints. Aircraft Engineering, 16 (182), 1944. – P. 115-118, 140.

192. Hart-Smith, L.J. Bolted and Bonded Joints, Composites, Vol. 21, ASM Handbook, American Society for Materials (ASM) International, 2001. – P. 271-289.

193. Liu, X., Silva, P., Nanni, A. Rehabilitation of Steel Bridge Members with FRP Composite Material. In Proc., CCC 2001, Composite in Construction, Porto, Portugal, 10-12 October edited by J. Figueras, L. Juvandcs and R. Furia. Eds., 2001.

194. Каримова С.А., Павловская Т.Г., Чесноков Д.В., Семенова Л.В. Коррозионная активность углепластиков и защита металлических силовых конструкций в контакте с углепластиком // ВИАМ/2009-205391, Август 2009. – 16с.

195. Aylor, D.M. The Effect of a Seawater Environment on the Galvanic Corrosion Behavior of Graphite/Epoxy Composites Coupled to Metals, High Temperature and Environmental Effects on Polymeric Composites, ASTM STP 1174, C.E. Harris and T.S. Gates, eds., American Society for Testing and Materials (ASTM), 1993. – P. 81-94.

196. Bellucci, F. Galvanic Corrosion between Nonmetallic Composites and Metals: I. Effect of Metal and of Temperature, Corrosion, National Association of Corrosion Engineers (NACE), 47(10), 1991. – P. 808-819.

197. Bellucci, F. Galvanic Corrosion between Nonmetallic Composites and Metals: II. Effect of Area Ratio and Environmental Degradation. Corrosion. National Association of Corrosion Engineers (NACE), 48(4), 1992. – P. 281-291.

198. West, T.D. Enhancements to the Bond between Advanced Composite Materials and Steel for Bridge Rehabilitation, M.S. Thesis, University of Delaware (U.S.A.), 2001. – P. 16-85.

199. Tavakkolizadeh, M., Saadatmanesh, H. Galvanic Corrosion of Carbon and Steel in Aggressive Environment, Journal of Composites for construction, ASCE, 3(5), 2001. – P. 200-210.

200. McKnight, S.H., Bourban, P.E., Karbhari, V.M., Gillespie, J.W. Surface Preparation of Steel for Adhesive Bonding in Rehabilitation Applications. In Proc. Of the Third Materials Engineering Conference, Infrastructure: New Materials and Methods of Repair, edited by Basham K.D., San Diego, CA: ASCE, 1994.

201. Karbhari, V.M., Shulley, S.B. Use of Composites for Rehabilitation of Steel Structured — Determination of Bond Durability, Journal of Materials in Civil Engineering, ASCE, 4(7), 1995. – P. 239-245.

202. Tucker, W.C., Brown, R. Blister Formation on Graphite/Polymer Composites Galvanically Coupled with Steel in Seawater, Journal of composite Composite Materials, ASCE Technomic, 4(23), 1989. – P. 227-238, 389-395.

203. Boyd, J., Chang, G., Webb, W., Speak, S., Gerth, D., Reck, B. Galvanic Corrosion Effects on Carbon Fiber Composites, Proceedings of the 36th International SAMPE Symposium and Exhibition, San Diego, CA, April 15-18, 1991, Society for the Advancement of Material and Process Engineering (SAMPE), 1991. – P. 1217-1231.

204. Tavakkolizadeh, M., Saadatmanesh, H. Galvanic Corrosion of Carbon and Steel in Aggressive Environment, Journal of Composites for construction, ASCE, 3(5), 2001. – P. 200-210.

205. Sen, R., Liby, L., Mullins. G. Strengthening Steel Bridge Sections Using CFRP Laminates, Composites: Part B, 32, 2001. – P. 309-322.

206. Liu, X., Silva, P., Nanni, A. Rehabilitation of Steel Bridge Members with FRP Composite Material. In Proc., CCC 2001, Composite in Construction, Porto, Portugal, 10-12 October, edited by J. Figueras, L. Juvandcs and R. Furia. Eds., 2001.

207. Mertz, D.R., Gillespie, J.W. Rehabilitation of Steel Bridge Girders through the Application of Advanced Composite Materials, IDEA Project Final Report, Contract NCHRP-93-ID011, Transportation Research Board, 1996. – P. 30.

208. Photiou, N., Hoilaway, L.C., Chryssanthopoulos, M.K. Strengthening of an artificially degraded steel beam utilising a carbon/glass composite system. In L.C. Hoilaway, M.K. Chryssanthopoulos and S.S.J. Moy (eds.), Proc. Int. Conf., Advanced Polymer Composites for structural applications in construction ACIC 2004, 20-22 April 2004, Guilford UK. Cambridge, England: Woohead Publishing Limited, 2004.

209. Moy, S.S.J. Early Age Curing under Cyclic Loading — an Investigation into Stiffness Development in Carbon Fibre Reinforced Steel Beams. In Proc., ACIC 2002, Southampton University, UK, 15-17 April, edited by R.A. Shenoi, S.S.J. Moy, L.C. Hollaway. Thomas Telford, 2002.

210. Moy, S.S.J., Nikoukar, F. Flexural Behavior of Steel Beams Reinforced with Carbon Fibre Reinforced Polymer Composite. In Proc., ACIC 2002, Southampton University, UK, 15-17 April, edited by R.A. Shenoi, S.S.J. Moy, L.C. Hollaway. Thomas Telford, 2002.

211. Дзюба С.В., Стоянов В.В. Проблемы усиления стенок металлических цилиндрических вертикальных резервуаров // Современные строительные конструкции из металла и древесины, №19 / Сб. научных трудов. – Одесса: ОГАСА, 2015. – С. 40-65.

212. Дзюба С.В., Стоянов В.В. Усиление стенок металлических цилиндрических резервуаров направленно-ориентированными фибропластиковыми материалами // Современные строительные конструкции из металла и древесины, №19 / Сб. научных трудов. – Одесса: ОГАСА, 2015. – С. 66-78.

213. Дзюба С.В., Михайлов О.О. Влияние термических деформаций на напряженное состояние стенок металлических цилиндрических резервуаров, усиленных фибропластиками // Современные строительные конструкции из металла и древесины, №20 / Сб. научных трудов. – Одесса: ОГАСА, 2016. – С. 39-50.

214. Дзюба С.В., Михайлов О.О. Проблемы усиления корпусов металлических цилиндрических резервуаров фибропластиковыми материалами // Современные строительные конструкции из металла и древесины, №21 / Сб. научных трудов. – Одесса: ОГАСА, 2017.

215. Дзюба С.В. Консервация усталостных дефектов стенок металлических цилиндрических резервуаров предварительно напряженными фибропластиковыми материалами // Современные строительные конструкции из металла и древесины, №19 / Сб. научных трудов. – Одесса: ОГАСА, 2015. – С. 32-39.

216. Gillespie, J.W., Mcrtz, D.R., Edbcrg, W.M., Ammar, N., Kasai, K., Hodgson, I.C. Rehabilitation of Steel Bridge Girders through Applications of Composite Materials. In Proc., 28th International SAMPE Technical Conference, November 4-7, 1996.

217. Miller, T.C., Chajes, M.J., Mertz, D. R. and Hastyings, J. Strengthening of a Steel Bridge Girder Using CFRP Plates, Journal of bridge engineering, ASCE, 6(6), 2001. – P. 514-522.

218. Bassetti, A., Nussbaumer, A., Hirt, M. Crack Repair and Fatigue Life Extension of Riveted Bridge Members using Composite Materials. In Proc., Bridge Engineering Conference, ESE-IABSE-FIB, 26-30 March 2000, Sharrn El Sheik (Egypt), 2000.

219. Nozaka, K. Repair of Fatigued Steel Bridge Girders with Carbon Fiber Strips, Ph.D. Thesis, University of Minnesota, MN, 2002.

220. Jones, S.C., Civjan, S.A. Application of Fiber Reinforced Polymer Overlays to Extend to Steel Fatigue Life, ASCE Journal of Composites for Construction, 7(4), 2003. – P. 331-338.

221. Matta, F., Karbhari, V.M., Tinazzi, D., Vitaliani, R. Static and fatigue behaviour of steel/CFRP adhesive bonds for the rehabilitation of metallic bridges. In Di Tommaso A., editor. Mechanics of masonry structures strengthened with FRP - materials modelling, testing, design, control. Padova (I): Libreria Cortina, 2004. – P. 411-420.

222. Carolin, A. Carbon Fiber Reinforced Polymers for Strengthening of Structural Elements. Doctoral Thesis no. 2003:18, Lulea University of Technology, Lulea, Sweden, 2003.

223. Liu, X., Nanni, A., Silva, P. Rehabilitation of Steel Bridge Columns with Composite. Materials. In Proc., 10th International Conference and Exhibition London, UK, 1-3 July 2003.

224. Cecchi A., Zerbo V. Analisi di stabilita di travi metalliche rinforzate con FRP-materials. In 2nd Nat. Symp. Mechanics of Masonry Structures strengthened with FRP-materials: modeling, testing, design, control, Venezia, 6-8 Dicembrc, edited by Ceriolo L., Zcrbo V. Libreria internazionale Cortina: Padova, 2004.

225. Moy, S.S.J. (ed.). FRP composites – Life extension and strengthening of metallic structures. – ICE design and practice guide. London, Thomas Telford, 2001.

226. IStructE. Guide to the structural use of adhesives, London, SETO, 1999.

227. Highways Agency. Strengthening of concrete highway structures using externally bonded plates. – BA 30/94, London, 1994.

228. Cripps, A., Harris, B., Ibell, T. Fibre-reinforced polymer composites in construction, C564. – London: CIRIA, 2001.

229. Clarke, J.L. (ed.) Structural Design of Polymer Composites: Eurocomp Design Code and Handbook, London, E & F N Spon, Chapman and Hall, 1996.

230. Lane, I.R., Waed, J.A. Restoring Britain's Bridge Heritage // Institution of Civil Engineering (South Wales Association) Transport Engineering Group Award, 2000.

231. Luke, S. The Use of Carbon Fibre Plates for the Strengthening of Two Metallic Bridges of a Historic Nature // Proceedings of the UK, FRP Composites in Civil Engineering. Vol. II. Edited by J.G.Teng, 2001. – P. 975-983.

232. Farmer, N., Smith, I. King Street Railway Bridge – Strengthening of Cast Iron Girders with FRP Composites // Proceedings of the 9-th International Conference on Structural Faults and Repairs, 2001.

233. Moy, S.S.J., Nikoukar, F. Flexural Behaviour of Steel Beams Reinforced with Carbon Fibre Reinforced Polymer Composite // In Proc., ACIC 2002, Southampton University, UK, 15-17 April, edited by R.A.Shenoi, S.S.J.Moy, L.C.Hollway. – Thomas Telford: 2002.

234. Moy, S.S.J., Barnes, F., Moriarty, J., Dier, A.F., Kenchington, A. and Iverson, B. Structural Upgrade and Life Extension of Cast Iron Struts Using Carbon Fibre Reinforced Composites // Proceedings of the 8-th International Conference on Fibre Rcinforccd Composites, Newcastle upon Tyne, UK, September 13-15, 2000. – P. 3-10.

235. Zerbo, V. Materiali compositi (AFRP) per la riabilitazione di strutture storiche in ghisa: il caso del ponte de la Corona a Vcnezia. Thesis, Istituto Univcrsitario di Architettura Vcnczia, a.a 1999/2000.

236. Ceriolo, L., Di Tommaso, A. Problems of Restoration of Old Cast Iron Bridges Using Aramid Fiber Reinforced Polymers. In 5th International Congress on Restoration of Architectural Heritage, CICOP, International Center for the Architectural Heritage Conservation, Firenze, September 18-23, 2000.

237. Bastianini, F., Ceriolo, L., Di Tommaso, A, Zaffaroni, G. Mechanical and non-Destructive Testing to Verify the Effectiveness of Composite Strengthening on an historical Cast Iron Bridge in Venice (Italy). In MCM 2002, XII International Conference on Mechanics of Composite Materials, June 9-13, Riga, Latvia, 2002.

238. Zaffaroni, G., Ceriolo, L., Bastianini, F., Di Tommaso, A. Issues Related with the Use of Reinforced Polymers in the Reparation/Restoration of an Historical Cast Iron Bridge. In Proc., 23rd International Conference, Sampe Europe, Society for the Advancement of Material & Process Engineering. Paris, 9-11 April, 2002.

239. Zerbo, V., Ceriolo L., Di Tommaso, A. Cast iron arch bridges: from construction to restoration. In Innovative Materials and Technologies for Construction and Restoration. Napoli: Liguori editore, 2004.

240. Bastianini, F., Ceriolo. L., Di Tommaso, A, Zaffaroni, G. Mechanical and non-Destructive Testing to Verify the Effectiveness of Composite Strengthening on historical Cast Iron Bridge in Venice, Italy, Journal of Materials in Civil Engineering, 16(5), 2004. – P. 407-413.

241. Chacon, A., Chajes, M., Richardson, D., Wenczel, G. Applications of Advanced Composites to Steel Bridges: a Case Study on the Ashland Bridge (Delaware-USA), Proceedings of the 4th International Conference on Advanced Composite Materials in Bridges and Structures, Calgary, Canada, 2004. – P. 8.

242. Moy, S.S.J., Barnes, F., Moriarty, J., Dier, A.F., Kenchington, A. and Iverson, B. Structural Upgrade and Life Extension of Cast Iron Struts Using Carbon Fibre Reinforced Composites. Proceedings of the 8th International Conference on Fibre Reinforced Composites, Newcastle upon Tyne, UK, September 13-15, 2000. – P. 3-10.

243. Leonard, A.R. The Design of Carbon Fibre Composite (CFC) Strengthening for Cast Iron Struts at Shadwell Station vent shaft. In Proc., ACIC 2002, Southampton University, UK, 15-17 April, edited by R.A. Shenoi, S.S.J. Moy, L.C. Hollaway. Thomas Telford, 2002.

244. Ajdukiewicz, A., Brol, J. Modern strengthening metods of old timber structures. Proceedings of IABSE Conference of Lahti (Finland), 2001. – P. 479-484.

245. Balsamo, A., Cerone, M., Viskovic, A. New wooden structures with composite material reinforcements for historical buildings. Proceedings of IABSE Conference of LAHTI (Finland), 2001. – P. 459-464.

246. Bergmeister, K., Luggin, W. Innovative strengthening of timber structures using carbon fibres. Proceedings of IABSE Conference of Lahti (Finland), 2001. – P. 361-366.

247. Haller, P., Birk, T. Tailor made textile reinforcements in wood constructions. Proceedings of Timber Conference WCTE 8, Lahti (Finland), vol. I, 2004. – P. 365-370.

248. La Tegola, A., Scialpi, V., Micelli, F. Controventatura in CFRP per coperture in legno lamellare. L'edilizia n. 134, 2004. – P. 58-61.

249. Piazza, M., Turrini, G. Una tecnica di recupero di solai in legno, Recuperare, n. 5-7, 1983.

250. Thelandersson, S., Larsen, H.J. Timber Engineering. Wiley-Interscience, 2003.

251. Triantafillou, T.C., Plevris, N. FRP-reinforced wood as structural material. Journal of Materials in Civil Engineering, n. 3, vol. 4, 1992. – P. 300-317.

252. Triantafillou, T.C., Deskovic, N. Innovative prestressing with FRP sheets: mechanics of short-term behavior. Journal of eng. mech., n. 7, vol. 117, 1991. – P. 1652-1673.

253. Triantafillou, T.C., Deskovic, N. Prestressed FRP sheets as external reinforcement of wood members. Journal of Structural Engineering, n. 5, vol. 118, 1992. – P. 1270-1284.

254. Uzielli, L. (a cura di). Manuale del legno strutturale, vol. IV, Ed. Mancosu, Roma, 2004.

255. Alam, P., Ansell, M.P., Smedley, D. Flexural properties of steel and FRP reinforced LVL composites. Proceedings of Timber Conference WCTE 8, Lahti (Finland), vol. III, 2004. – P. 343-346.

256. Kasal, B., Heiduschke, A., Haller, P. Fibre-reinforced beam-to-column connections for seismic applications. Proceedings of CIB-W18 Meeting 35 of Kyoto (Japan), 2000. – P. 35-7-12.

257. Kasal, B., Haller, P., Prospisil, S., Jirovsky, I., Heiduschke, A., Drdacky, M. Experimental investigation of laminated timber frames with fibre-reinforced connections under earthquake loads. Proceedings of CTB-W18 Meeting 36 of Colorado (USA), 2003. – P. 36-15-5.

258. Kasal, B., Heiduschke, A., Kadla, J., Haller, P. Laminated timber frames with composite fibre-reinforced connections. Progress in Structural Engineering, and Materials, n. 6, 2004. – P. 84-93.

259. Kasal, B., Prospisil, S., Jirovsky, I., Heiduschke, A., Drdacky, M., Haller, P. Seismic performance of laminated timber frames with fibre-reiforced joints. Earthquake Engineering and Structural Dynamics, n. 33, 2004. – P. 633-646.

260. Berti, S., Pizzo, B., Lauriola, M., Lavisci, P., Rizzo, G. Consolidamento con adesivi epossidici delle strutture lignee. Parte 1: Indagine sulla durabilita degli interventi, Arkos, n. 1/2002, 2002. – P. 32-37.

261. Berti, S., Pizzo, B., Lavisci, P., Misani, C, Rizzo, G. Consolidamento con adesivi epossidici delle strutture lignee. Parte 2: Compatibilita strutturale tra adesivi e legno, Arkos, n. 2/2002, 2002. – P. 46-52.

262. Feligioni, L., Lavisci, P., De Ciechi, M., Spinelli, P. Consolidamento con adesivi epossidici delle strutture lignee. Parte 3: L'impiego di barre e resine. Arkos, n. 3/2002. – P. 36-43.

263. ДБН В.2.6-161:2010. Дерев'яні конструкції. Основні положення. – К.: Мінрегіонбуд України, 2011. – 102с.

264. ГОСТ 16483.0-89. Древесина. Общие требования к физико-техническим испытаниям.

265. ГОСТ 16483.3-84. Древесина. Метод определения предела прочности при статическом изгибе.

266. ГОСТ 16483.5-73*. Древесина. Методы определения предела прочности при скалывании вдоль волокон.

267. ГОСТ 16483.7-81*. Древесина. Методы определения влажности.

268. ГОСТ 17005-82. Конструкции деревянные клееные. Методы определения влагостойкости клееных соединений.

269. ГОСТ 17580-82. Конструкции деревянные клееные. Методы определения стойкости клееных соединений к циклическим температурным влажностным воздействиям.

270. EN 1995-1-1:2004 Eurocode 5: Design of timber structures. Part 1-1: General – Common rules and rules for buildings.

271. UNI ENV 1995-2:1999. Progettazione delle strutture in legno, parte 2: ponti, edizione 1999 (sostituita da EN 1995-2/2004).

272. UNI 11035-1:2003. Legno strutturale. Classificazione a vista di legnami italiani secondo la resistenza meccanica: terminologia e misurazione delle caratteristiche.

273. UNI 11035-2:2003. Legno strutturale. Regole per la classificazione a vista secondo la resistenza e i valori caratteristici per tipi di legname strutturale italiani.

274. UNI EN 338:2004. Legno strutturale. Classi di resistenza.

275. UNI EN 518:1997. Legno strutturale. Classificazione. Rcquisiti per le normc di classificazione a vista secondo la resistenza.

276. UNI EN 519:1997. Legno strutturale. Classificazione. Rcquisiti per il legno classificato a macchina secondo la resistenza e per le macchine classificatrici.

277. UNI 11118:2004. Beni culturali. Manufatti lignei. Strutture portanti degli edifici. Criteri per ridentificazione delle specie legnose.

278. UNI 11119: 2004. Beni culturali. Manufatti lignei. Strutture portanti degli edifici. Ispezioni in situ per la diagnosi degli elementi in opera.

279. UNI 11138:2004. Beni culturali Manufatti lignei Strutture portanti degli edifici. Criteri per la valutazione preventive, la progettazione e l'esecuzione di interventi.

280. Tampone, G. Metodi tradizionali ed innovativi per il restauro strutturale. Istanze ideologiche e innovazione tecnologica nella conservazione delle strutture di legno, Restauro, n. 159, 2002. – P. 195-242.

281. Giordano G. Tecnologia del Legno. Ed. UTET, 1981.

282. EN 14081-1. Timber structures – Strength graded structural timber with rectangular cross-section - Part 1: General requirements

283. UNI EN 384:1997. Legno strutturale. Determinazione dei valori caratteristici delle proprieta meccanichc c della massa volumica.

284. UNI EN 408:2004. Strutture di legno – Legno massiccio e legno lamellare incollato - Determinazione di alcune proprieta fisiche e meccaniche.

285. DIN 1052/2004: Bemessungsregeln fur Holzkonstruktionen.

286. Del Senno, M., Piazza, M., Tomasi, R. Axial glued-in steel timber joints – experimental and numerical analysis. Holz als Roh- und Werkstoff, n. 62, 2004. – P. 137-146.

287. Feligioni, L., Lavisci, P., Duchanois, G., De Ciechi, M., Spinelli, P. Influence of glue rheology and joint thickness on the strength of bonded-in rods. Holz als Roh- und Werkstoff, n. 61, Vol. 4, 2003. – P. 281-287.

288. Kalamkarov, A.L. Stress analysis in elastic joint structures. International Journal of Mechanical Science, Vol. 39, n. 7, 1997. – P. 873-883.

289. Lavisci, P., Berti, S., Pizzo, B., Triboulot, P., Zanuttini, R. A shear test for structural adhesives used in the consolidation of old timber. Holz als Roh- und Werkstoff, n. 59, 2001. – P. 145-152.

290. Lavisci, P., Pizzo, B., Gagliano, J.M., Triboulot, P., De Ciechi, M. Fracture energy testing of thick joints with structural wood adhesives. Holz als Roh- und Werkstoff, n. 61, 2003. – P. 355-357.

291. Pizzo, B., Lavisci, P., Macchioni, N., Misani, C. A new approach to the design of epoxy adhesives for the restoration of timber structures. European Timber Buildings as an Expression of Technological and Technical Cultures, Ed. Elsevier SAS, 2002. – P. 245-254.

292. Pizzo, B., Lavisci, P., Misani, C., Triboulot, P., Macchioni, N. Measuring the shear strength ratio of glued joints within the same specimen. Holz als Roh- und Werkstoff, n. 61, vol. 4, 2003. – P. 273-280.

293. Pizzo, B, Lavisci, P, Lauriola, M, Misani, C, Moschi, M. Tecniche di restauro delle strutture lignee con l'applicazione di adesivi epossidici. Arkos, n. 1/2003, 2003, – P. 70-75.

294. Pizzo, B., Lavisci, P., Misani, C., Triboulot, P. The compatibility of structural adhesives with wood. Holz als Roh- und Werkstoff, n. 61, vol. 4, 2003. – P. 288-290.

295. Scialpi, V., De Lorenzis, L., Micelli, F., La Tegola, A. Connessioni tra elementi strutturali in legno lamellare con barre in FRP. Proceedings of the International Conference on Mechanics of Masonry Structures Strengthened with FRP-materials, Venezia (Italia), 2004. – P. 365-374.

296. Tsai, M.Y., Oplinger, D.W., Morton, J. Improved theoretical solutions for adhesive lap joints. International Journal of Solid Structures, vol. 35, n. 12, 1998. – P. 1163-1185.

297. Wernersson, H., Gustafsson, P.J. A mixed-mode model for analysis of brittle and ductile glued joints. Proceedings of International Wood Engineering Conference, New Orleans (USA), vol. 4, 1996. – P. 481-487.

298. Brunner, M., Schurigher, M. Timber beams strengthened with prestressed fibres: delamination. Proceedings of Timber Conference WCTE 8, Lahti (Finland), vol. I, 2004. – P. 345-350.

299. Gustafsson, P.J., Serrano, E. Predicting the pull-out strength of glued-in rods. Proceedings of the 6th World Conference on Timber Engineering, Whistler (B.C., Canada), 2000. Cd-Rom: 7.4.4-1-7.4.4-8.

300. Haiman, M. Possible ways to taking over perpendicular stresses. Proceedings of Timber Conference WCTE 8, Lahti (Finland), vol. III, 2004. – P. 373-376.

301. Haller, P., Wehsener, J., Birk, T. Embedding characteristics of fibre reinforcement and densified timber joints. Proceedings of CIB-W18 Meeting 34 of Venice Italia), 2001. – P. 34-7-7.

302. Madhoushi, M., Ansell, M.P. Flexural fatigue of beam to beam connections using glued - in GFRP rods. Proceedings of Timber Conference WCTE 8, Lahti (Finland), vol. I, 2004. – P. 319-326.

303. Madhoushi, M., Ansell, M.P. Fatigue and cyclic loading of moment - resisting structures connected using glued - in GFRP rods. Proceedings of Timber Conference WCTE 8, Lahti (Finland), vol. 111, 2004. – P. 347-351.

304. Piazza, M. Interventi di consolidamento con l'uso di elementi meccanici di collegamento: solai misti legno - legno. In II manuale del legno strutturale, vol. IV: Interventi sulle strutture, Ed. Mancosu, 2004. – P. 108-127.

305. Serrano, E. Glued-in rods for timber structures – a 3D model and finite element parameter studies. International Journal of Adhesion & Adhesives, n. 21, vol. 2, 2001. – P. 115-127.

306. Borri, A., Terenzi, G., Bartoloni, M., Calitema, P. Travi lignee: tecniche di rinforzo basate su disposizioni diversificate di nastri in CFRP. L'edilizia, n. 7-8, 1999. – P. 32-39.

307. Borri, A., Corradi, M., Speranzini, E. Travi in legno rinforzate con barre o con tessuti in fibra di carbonio. L'edilizia, n. 4, 2001. – P. 48-56.

308. Borri, A., Corradi, M. Consolidamento di strutture lignee: risultati di una sperimentazione. L'edilizia, n. 5-6, 2000. – P. 62-67.

309. Borri, A., Corradi, M., Grazini A. A method for flexural reinforcement of old wood beams with CFRP materials. J. Composites part B engineering, 36/2, 2005. – P. 143-153.

310. Borri, A., Giannantoni. Elementi pultrusi in FRP: il rinforzo di solai lignei. L'edilizia, n. 134, 2004. – P. 52-57.

311. Duarte, A, Negrao, J., Cruz, H. Rehabilitation of timber beams with reinforced epoxy plates. Proceedings of Timber Conference WCTE 8, Lahti (Finland), vol. I, 2004. – P. 351-356.

312. Galloway, T.L., Fogstad, C., Dolan, C.W., Puckett J.A. Initial tests of kevlar prestressed timber beams. Proceedings of the National Conference on Wood Transportation Structures, Madison, WI (USA), 1996.

313. Forschungsergebnisse faserverstärktes Leimholz FH Wiesbaden. BOKU Wien.

314. Kent, S., Tingley, D. Structural evaluation of fibre reinforced hollow wood beams. Proceedings of IABSE Conference of Lahti (Finland), 2001. – P. 367-372.

315. Romani, M., Blass, H.J. Design model for FRP reinforced glulam beams. Proceedings of the CIB-W18 Meeting 34 of Venice, (Italy): 34-12-3, 2001.

316. Stamato, G.C., Juliano, F. FRP reinforced nailed plywood box beam. Proceedings of Timber Conference WCTE 8, Lahti (Finland), 2004, vol. III. – P. 361-364.

317. Borri, A., Corradi, M., Speranzini, E., Vignoli, A. Irrigidimento nel piano di solai esistenti con FRP. Proceedings of the International Conference on Mechanics of Masonry Structures Strengthened with FRP-materials, Venezia (Italia), 2004. – P. 345-355.

318. Giuriani, E., Frangipane, A. Wood to concrete composite section for stiffening of ancient wooden beam floor. Workshop Italiano sulle Costruzioni Composte, Trento, 1993. – P. 307-317.

319. Meierhofer, U.A. Long term performance of timber-concrete composite structural elements. Proceedings of the IABSE International Conference of Innsbruck (Austria), ABSE, n. 9, 1997. – P. 938-939.

320. ДБН В.1.1-12-2014. Будівництво у сейсмічних районах України. – К.: Мінрегіонбуд, 2014.

321. PREN 1998-1/2003: Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance – Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings.

322. Design for Earthquakes. James Ambrose and Dimitry Vergun, 1999.

323. Park, R. and Pauley, T. – Reinforced Concrete Structures – John Wiley and Sons, New York. – 769p.

324. Применение композитных материалов для сейсмоусиления / Презентация. – Холдинговая компания «Композит», 2014 (www.compozit.su). – 35с.

325. Fastenings for Seismic Retrofitting, State of the Art Report, Comite Euro-International du Beto (CEB), 1997.

326. Evaluation of Seismic Retrofit Methods for Reinforced Concrete Bridge Columns, Terry J, Wipf, F. Wayne Klaiber and Frank M. Russo, Iowa State University, Department of Civil and Construction Engineering, 28.12.1997.

327. TU Porto (P). Pilares De Betao. Armado Reforcados Com Laminados De Fibras De Carbono.

328. Dodd, L.L. and Restrepo-Posada, J.I. – Model for predicting cyclic behaviour of reinforcing steel / Journal of Structural Engineering, ASCE, vol. 121, No. 3, 1995. – P. 443-445.

329. Sheikh, S.A. and Uzumeri, S.M. – Strength and ductility of tied concrete columns / Journal of Structural Division, ASCE, ST5, 1982. – P. 1079-1102.

330. Schwegler, G. Verstärken von Mauerwerken mit Faserverbundwerkstoffen, Dissertation ETH Nr. 10672.

331. René Pinzelli. Kevlar Aramid Fiber for External Strengthening & Repair of Concrete Structures / Structurl Faults & Repair, 1999.

332. Cuninghame, J.R. and Sadka, B. Fibre Reinforced Plastic Strengthening of Bridge Suppprts to Resist Vehicle Impact / Proceedings of the 20th International SAMPE Europe Conference of the Society for the Advancement of Material and Process Engineering, Paris, April 1999.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 3

1. Фиброармированные пластики в современном строительстве 4

1.1. Основные определения 4

1.2. Общие особенности фиброармированных пластиков 5

1.3. Периоды внедрения фибропластиков в строительство 7

1.4. Перспективные направления применения фибропластиков в строительстве 8

1.4.1. Преимущества конструкций с использованием фибропластиков 8

1.4.2. Фибропластиковые конструкции в новом строительстве 9

1.4.3. Усиление, восстановление и реабилитация существующих строительных конструкций с использованием фибропластиков 25

1.5. Современные тенденции применения композиционных материалов в строительстве 41

2. Материалы, используемые для изготовления конструкционных фибропластиков 44

2.1. Состав фибропластиков 44

2.2. Армирующие волокна 48

2.2.1. Формы коммерчески доступных волокон 51

2.2.2. Виды армирующих волокон 52

2.2.2.1. Стеклянные волокна 52

2.2.2.2. Углеродные волокна 57

2.2.2.3. Арамидные волокна 63

2.2.2.4. Базальтовые волокна 66

2.2.2.5. Другие виды волокон 67

2.2.2.6. Сравнительная оценка различных видов конструкционных волокон 68

2.2.3. Технические характеристики волокон 71

2.3. Армирующие ткани 72

2.4. Армирующие маты 76

2.5. Связующие матрицы 77

2.5.1. Виды коммерчески доступных матриц 78

2.5.2. Эпоксидные смолы 79

2.5.3. Полиэфирные смолы 80
2.5.4. Другие виды матричных смол 81
2.6. Адгезивы и принципы их использования 81

3. Фибропластиковые системы 86

3.1. Механические характеристики конструкционных фибропластиков 89
3.2. Фибропластиковые конструкции заводской готовности 89
3.2.1. Основные методы изготовления 89
3.2.2. Используемые виды соединений 93
3.3. Фибропластиковые системы усиления существующих строительных конструкций 97
3.3.1. Виды систем фибропластикового усиления 98
3.3.2. Предварительно отвердженные фибропластиковые системы усиления 100
3.3.3. Фибропластиковые системы, изготавливаемые по месту усиления 104
3.3.3.1. Общая характеристика 104
3.3.3.2. Поперечные сечения элементов усиления 107
3.3.3.3. Механические характеристики 108
3.3.3.4. Обеспечение требуемой паро-влажностной передачи 110
3.3.4. Системы предварительно пропитанных фибропластиковых элементов усиления 111
3.4. Фибропластиковые системы внутреннего армирования строительных конструкций 111
3.5. Адгезивы коммерчески доступных систем усиления 117
3.6. Особенности углеродоволоконных систем конструкционных фибропластиков 118
3.6.1. Общая характеристика 118
3.6.2. Механические свойства при длительно действующих нагрузках 119
3.6.3. Физические и химические свойства 121
3.7. Выбор фибропластиковых систем 124
3.8. Предварительное напряжение при использовании фибропластиковых систем 129
3.9. Требования к наружным поверхностям усиливаемых строительных конструкций 130
3.10. Влияние окружающих сред 131

3.11. Влияние длительно действующих усилий 133
3.12. Ударные и взрывные воздействия, вандализм 134
3.13. Пожарные ограничения использования фибропластиковых систем усиления 135
3.14. Стойкость фибропластиковых систем к воздействиям радиационного излучения 137
3.15. Монтаж и мониторинг фибропластиковых систем усиления 138

4. Определение физико-механических свойств систем конструкционных фибропластиков 140

4.1. Комплексная оценка свойств 140
4.2. Определение физико-механических характеристик 141
4.2.1. Общие регламенты 141
4.2.2. Особенности проведения испытаний 143
4.2.2.1. Испытания на растяжение 143
4.2.2.2. Испытания на сжатие 144
4.2.2.3. Испытания на сдвиг 144
4.2.2.4. Испытания на изгиб 145
4.2.2.5. Определение параметров сцепления фибропластиковых элементов внутреннего армирования с материалами строительных конструкций 145
4.2.2.6. Определение параметров сцепления фибропластиковых элементов внешнего армирования с материалами строительных конструкций 148
4.2.2.7. Особенности испытаний соединений фибропластиков с металлическими элементами 151
4.3. Определение механических характеристик при длительных воздействиях 155
4.3.1. Общие особенности исследований при длительных воздействиях 155
4.3.2. Методы испытаний на усталостное разрушение 156
4.3.3. Методы испытаний фибропластиковых элементов на ползучесть 158
4.4. Измерение параметров напряженно-деформированного состояния в соединениях, включающих фибропластиковые элементы 158

5. Фибропластиковое усиление бетонных и железобетонных конструкций 160

5.1. Области рационального использования 160
5.2. Нормативная база 161
5.3. Основные конструктивные ограничения 162

5.4. Общие принципы использования фибропластиковых систем 163
5.5. Изгибаемые элементы 168
5.5.1. Эффективность усиления 168
5.5.1.1. Элементы малой длины 168
5.5.1.2. Конструкции средних и больших пролетов 176
5.5.2. Монтаж и анкеровка фибропластиковых систем 190
5.5.2.1. Эффективная длина адгезионных соединений и их расчетная модель 190
5.5.2.2. Дополнительная анкеровка фибропластиковых элементов 193
5.5.2.3. Размещение фибропластиковых элементов в штрабах 198
5.5.3. Продольное усиление 200
5.5.3.1. Внешнее усиление ламинатами заводской готовности 201
5.5.3.2. Внешнее усиление армирующими лентами и полотнами 201
5.5.3.3. Усиление ламинатами, размещаемыми во внутренних штрабах 202
5.5.3.4. Усиление с использованием предварительного напряжения 204
5.5.4. Поперечное усиление 211
5.6. Колонны 214
5.6.1. Эффективность усиления 215
5.6.2. Монтаж и анкеровка фибропластиковых систем 217
5.6.3. Центрально сжатые колонны 218
5.6.3.1. Общая оценка напряженно-деформированного состояния 218
5.6.3.2. Расчет методом Ванг Янг-Чина 220
5.6.3.3. Предварительное напряжение элементов поперечного усиления 226
5.6.4. Колонны, воспринимающие сочетания изгибающих моментов и продольных сил 229
5.6.5. Усиление колонн, имеющих коррозионные разрушения стального армирования 229
5.7. Надежность и долговечность усилений бетонных и железобетонных конструкций 231
5.7.1. Влияния агрессивных сред 231
5.7.2. Выносливость 237
5.8. Результаты мониторинга эксплуатируемых конструкций 240
5.9. Общие технологические принципы производства работ 244
6. Фибропластиковое усиление металлических конструкций 249

6.1. Современные тенденции и области рационального использования 249
6.2. Специфические особенности 253
6.3. Соединений фибропластиков с металлическими элементами 254
6.3.1. Отличия в работе 254
6.3.2. Возможные схемы разрушения 255
6.3.3. Анализ напряженного состояния 257
6.3.4. Конструктивные решения 259
6.3.5. Проблема гальванической коррозии 261
6.4. Современные исследования работы фибропластиковых усилений металлических конструкций 261
6.4.1. Изгибаемые элементы 262
6.4.2. Цилиндрические конструкции 263
6.4.3. Циклически загружаемые элементы 263
6.4.4. Сжатые элементы 264
6.5. Осуществление усилений металлических конструкций фибропластиками 264
6.5.1. Выбор систем усиления 264
6.5.2. Подбор совместимых материалов 265
6.5.3. Проектирование 267
6.5.3.1. Концептуальное решение 267
6.5.3.2. Детальная разработка систем усиления 268
6.6. Особенности монтажа, эксплуатации и технического обслуживания фибропластиковых систем усиления металлических конструкций 270
6.6.1. Порядок монтажа 270
6.6.2. Подготовка поверхностей усиления 271
6.6.3. Контроль качества в процессе устройства систем усиления 272
6.6.4. Эксплуатация 275
6.6.5. Техническое обслуживание 276
6.7. Примеры фибропластикового усиления металлических конструкций 276
7. Фибропластиковое усиление деревянных конструкций 284
7.1. Современные тенденции 284
7.2. Области рационального использования 286
7.3. Специфические особенности 287
7.4. Общие требования 291

7.5. Особенности взаимной работы материалов 295
7.5.1. Влияние влажности древесины 295
7.5.2. Изменение характера пластической работы 296
7.5.3. Особенности адгезивов, используемых при фибропластиковом усилении древесины 299
7.6. Соединения фибропластиков с древесиной 302
7.6.1. Адгезионные соединения 302
7.6.1.1. Основные требования 302
7.6.1.2. Регламентирующие стандарты 304
7.6.1.3. Совместимость адгезивов с древесиной 306
7.6.1.4. Оценка эффективности различных видов адгезивов 308
7.6.1.5. Общий характер работы адгезивов в соединениях с древесиной 309
7.6.2. Механические связи 309
7.6.3. Повышение работоспособности соединений с использованием фибропластиковых элементов 313
7.6.3.1. Плоскостное фибропластиковое усиление 313
7.6.3.2. Стержневое фибропластиковое усиление 314
7.7. Изгибаемые и внецентренно сжатые элементы 315
7.7.1. Общие особенности 315
7.7.1.1. Области рационального применения 315
7.7.1.2. Работа изгибаемых деревянных элементов с фибропластиковым усилением 316
7.7.1.3. Экспериментальное обоснование особенностей работы изгибаемых элементов 317
7.7.2. Методы усиления 320
7.7.3. Отслаивание усиливающих фибропластиков в процессе изгиба деревянных элементов 321
7.7.4. Особенности расчета 323
7.8. Повышение пространственной жесткости плоскостных конструкций 328
7.8.1. Предпосылки усиления 328
7.8.2. Работа не усиленных настилов деревянных перекрытий при действии горизонтальных нагрузок 329
7.8.3. Усиление настилов деревянных перекрытий при действии горизонтальных нагрузок 331

7.9. Примеры фибропластикового усиления деревянных конструкций исторических зданий и сооружений 333

8. Сейсмостойкое усиление 338

8.1. Методы усиления с использованием фибропластиковых систем 338

8.2. Эффективность фибропластиковых систем сейсмостойкого усиления 342

8.2.1. Здания и сооружения 342

8.2.2. Соединения элементов внутреннего армирования 345

8.3. Усиление железобетонных конструкций 348

8.3.1. Колонны 348

8.3.1.1. Повышение общей сейсмостойкости 349

8.3.1.2. Повышение пластичности при изгибе 351

8.3.1.3. Усиление соединений элементов внутреннего стального армирования 354

8.3.1.4. Усиление, воспринимающее действие поперечных сил 355

8.3.1.5. Усиление, воспринимающее изгиб 356

8.3.1.6. Сравнительная оценка различных методов усиления 357

8.3.2. Элементы каркасов 358

8.3.2.1. Разрушение «коротких» стоек 358

8.3.2.2. Разрушение узловых сопряжений 359

8.3.2.3. Появление пластических шарниров 360

8.3.2.4. Эффективные системы сейсмостойкого усиления 360

8.4. Усиление каменных конструкций 362

8.4.1. Усиление кладок стекловолоконными полотнами 363

8.4.2. Усиление кладок углеродоволоконными ламинатами 363

8.4.3. Системы, увеличивающие сейсмостойкость каменных стен 365

9. Использование фибропластиковых систем для защиты от взрывов и ударных воздействий 367

9.1. Защита от взрывов 367

9.2. Защита от ударных воздействий 368

ЛИТЕРАТУРА 371

ОГЛАВЛЕНИЕ 401

УДК 624.011.78:[624.011.01+624.012+624.014+624.016+624.042.7]

В работе обобщен опыт применения фибропластиковых систем в современном строительстве. Даны описание, общие технические характеристики и оценка материалов, используемых для изготовления конструкционных фибропластиков: армирующих волокон, тканей, матов, связующих матриц и адгезивов. Рассмотрены различные виды фибропластиковых систем, даны рекомендации по их выбору при производстве строительных работ. Приведен порядок определения физико-механических свойств систем конструкционных фибропластиков. На основе существующих экспериментально-теоретических исследований раскрыты общие особенности фибропластикового усиления железобетонных, металлических и деревянных конструкций. Дана оценка возможности фибропластикового сейсмостойкого усиления, а также соответствующей защиты строительных конструкций от взрывов и ударных воздействий.

Для научных и инженерно-технических работников научно-исследовательских и проектных организаций, а также аспирантов и студентов специальности 192 Строительство и гражданская инженерия.

ISBN 978-617-7195-56-5

© Одесская государственная академия строительства и архитектуры, 2017