

**ОБЩЕСТВО С ОГРАНИЧЕННОЙ ОТВЕТСТВЕННОСТЬЮ
«НАНОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ЦЕНТР КОМПОЗИТОВ»**

СТАНДАРТ ОРГАНИЗАЦИИ

СТО 38276489.003-2017

**УСИЛЕНИЕ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ
КОМПОЗИТНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ**

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА
РАБОТ**

Издание официальное

Москва 2017

Предисловие

Цели и принципы стандартизации в Российской Федерации установлены Федеральным законом от 27 декабря 2002 г. № 184-ФЗ «О техническом регулировании», а правила применения стандартов организации – ГОСТ Р 1.4-2004 «Стандартизация в Российской Федерации. Стандарты организаций».

1 РАЗРАБОТАН Обществом с ограниченной ответственностью «Нанотехнологический центр композитов» (ООО «НЦК») и федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования "Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет" (ФГБОУ ВО «НИУ МГСУ»). Настоящий стандарт организации разработан под руководством д.т.н., профессора НИУ МГСУ А.Р. Туснина, сотрудниками НИЛ СКСМ НИУ МГСУ – к.т.н. А.И. Даниловым, к.т.н. А.И. Демьяненко, к.т.н. В.А. Ушковым, ведущими инженерами Д.В. Гороян и М.В. Ушковым, сотрудниками ООО «Нанотехнологический центр композитов» – к.т.н. О.А. Симаковым и к.т.н. П.В. Осиповым.

2 ВНЕСЕН Обществом с ограниченной ответственностью «Нанотехнологический центр композитов» (ООО «НЦК»).

3 УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН в действие Приказом Генерального директора ООО «НЦК» от «12» января 2017 г. №4/1.

4 ВВЕДЕН ВПЕРВЫЕ.

© ООО «НЦК», 2017

© ФГБОУ ВО «НИУ МГСУ», 2017

Настоящий нормативный документ не может быть полностью или частично воспроизведен, тиражирован и распространен в качестве официального издания без письменного разрешения ООО «НЦК».

Содержание

1 Область применения.....	4
2 Нормативные ссылки	5
3 Термины, определения, обозначения и сокращения.....	6
4 Общие требования	10
5 Материалы.....	14
6 Требования к расчёту стержневых элементов металлических (стальных) конструкций, усиленных полимерными композитными материалами на основе углеродных волокон.....	17
7 Технология производства работ по усилению металлических (стальных) конструкций полимерными композитными материалами.....	25
8. Контроль качества производства работ	34
8.1 Общие положения	34
8.2 Оценка состояния металлических конструкций.....	34
8.3 Входной контроль	35
8.4 Контроль соблюдения правил складирования и хранения.....	36
8.5 Операционный контроль	36
8.6 Приемочный контроль.....	41
9 Безопасность труда и охрана окружающей среды	42
10 Гарантии изготовителя и производителя работ	43
Приложение А Примеры расчета растянутых элементов.....	44
Приложение Б Примеры расчета изгибаемых элементов.....	56
Приложение В Основные буквенные обозначения	60
Библиография	62

СТАНДАРТ ОРГАНИЗАЦИИ

**УСИЛЕНИЕ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ КОМПОЗИТНЫМИ
МАТЕРИАЛАМИ.
ПРОЕКТИРОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ПРОИЗВОДСТВА РАБОТ.**

Дата введения – 2017 – 01 – 12

1 Область применения

1.1 Настоящий стандарт организации является корпоративным нормативным документом и распространяется на проектирование и выполнение работ по усилению или восстановлению (ремонту) стальных (металлических) конструкций зданий и сооружений различного функционального назначения путем устройства системы внешнего армирования композитными материалами из терморезистивных адгезивов, армированных углеродными волокнами.

1.2 Стандарт организации устанавливает требования к расчету стальных (металлических) конструкций, усиленных или восстановленных системами внешнего армирования на основе полимерных композитных материалов и проектированию указанных систем для усиления или восстановления стальных (металлических) конструкций.

1.3 Стандарт организации устанавливает общие требования к проведению работ, требования к оборудованию, приспособлениям, инструменту и материалам, используемым в технологическом процессе, последовательность выполнения отдельных технологических операций, требования к технологическим режимам, методы контроля качества работ и материалов, а также требования безопасности и охраны окружающей среды.

1.4 Стандарт рекомендуется для использования проектными и подрядными организациями при разработке документации на усиление или восстановление стальных (металлических) конструкций различного назначения системами внешнего армирования из полимерных композитов.

2 Нормативные ссылки

В Стандарте организации использованы ссылки на следующие нормативные правовые акты, стандарты и своды правил:

Федеральный закон от 27.12.2002 № 184-ФЗ «О техническом регулировании».

Федеральный закон от 30.12.2009 № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений».

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

ГОСТ 12.0.004-90 Система стандартов безопасности труда. Организация обучения безопасности труда.

ГОСТ Р 12.0.009-2009 ССБТ. Система управления охраной труда на малых предприятиях. Требования и рекомендации по применению.

ГОСТ 12.0.230-2007 Система стандартов безопасности труда. Системы управления охраной труда.

ГОСТ 166-89 Штангенциркули. Технические условия.

ГОСТ 427-75 Линейки измерительные металлические. Технические условия.

ГОСТ 1497-84 Металлы. Методы испытаний на растяжение.

ГОСТ 7502-98 Рулетки измерительные металлические. Технические условия.

ГОСТ 15173-70 Пластмассы. Метод определения среднего коэффициента линейного теплового расширения.

ГОСТ 22761-77 Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Бринеллю переносными твердомерами статического действия.

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

ГОСТ 25.601-80 Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод

испытания плоских образцов на растяжение при нормальной, повышенной и пониженной температурах.

ГОСТ 54257-2010 Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения и требования.

СП 16.13330.2011 Свод правил. Стальные конструкции.

СП 20.13330.2011 Свод правил. Нагрузки и воздействия.

СП 28.13330.2012 Защита строительных конструкций от коррозии.

СП 48.13330.2011 Свод правил. Организация строительства.

СП 164.1325800.2014 Свод правил. Усиление железобетонных конструкций композитными материалами.

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

П р и м е ч а н и е – При пользовании настоящим стандартом целесообразно проверить действие ссылочных стандартов в информационной системе общего пользования – на официальном сайте национального органа Российской Федерации по стандартизации в сети Интернет или по ежегодно издаваемому информационному указателю «Национальные стандарты», который опубликован по состоянию на 1 января текущего года, и по выпускам ежемесячно издаваемого информационного указателя «Национальные стандарты» за текущий год. Если заменен ссылочный стандарт (документ), на который дана недатированная ссылка, то рекомендуется использовать текущую версию этого стандарта (документа) с указанием выше годом утверждения (принятия). Если после утверждения настоящего стандарта в ссылочный стандарт (документ), на который дана датированная ссылка, внесено изменение, затрагивающее положение, на которое дана ссылка, то это положение рекомендуется применять без учета данного изменения. Если ссылочный стандарт (документ) отменен без замены, то положение, в котором дана ссылка на него, рекомендуется применять в части, не затрагивающей эту ссылку. Сведения о действии сводов правил можно проверить в Федеральном информационном фонде технических регламентов и стандартов.

3 Термины, определения, обозначения и сокращения

В настоящем стандарте организации применены понятия в соответствии с Федеральным законом № 384-ФЗ от 30.12.2009, ГОСТ 31937, термины по СП 164.1325800.2014, а также следующие термины с соответствующими определениями:

3.1 усиление металлической (стальной) конструкции: комплекс конструктивных мероприятий и технологических работ, направленных на повышение несущей способности и эксплуатационной пригодности конструкции при увеличении действующих на нее нагрузок.

усиление: комплекс мероприятий, обеспечивающих повышение несущей способности и эксплуатационных свойств строительной конструкции или здания и сооружения в целом, по сравнению с фактическим состоянием или проектными показателями.

3.2 восстановление (ремонт) металлической (стальной) конструкции: комплекс конструктивных мероприятий и технологических работ, направленных на восстановление несущей способности и эксплуатационных свойств конструкции, нарушенных вследствие дефектов изготовления или в процессе ее длительной эксплуатации.

восстановление: комплекс мероприятий, обеспечивающих доведение эксплуатационных качеств конструкций, пришедших в ограниченно работоспособное состояние, до уровня их первоначального состояния, определяемого соответствующими требованиями нормативных документов на момент проектирования объекта.

3.3 внешнее армирование металлической (стальной) конструкции композитными материалами: установка наклеиванием на поверхность металлической (стальной) конструкции изделий заводского изготовления из композитных материалов (ламинатов) или послойное наклеивание терморезистивными адгезивами изделий из непрерывного углеродного волокна (лент, тканей, сеток и других тканых материалов) с последующим отверждением и образованием однослойного или многослойного полимерного композитного материала.

3.4 система внешнего армирования из полимерных композитов: система, состоящая из клеевого слоя, образованного отвержденным терморезистивным адгезивом, однослойного или многослойного композитного материала и, при необходимости, защитного слоя, обеспечивающего защиту системы от воздействий повышенных температур, открытого пламени, ультрафиолетового излучения или механических повреждений.

Примечание - защитный слой наносят на поверхность полимерного композита в соответствии с проектной документацией на усиление или восстановление металлических (стальных) конструкций.

3.5 ламинат из полимерного композита (ламинат): изделие заводского изготовления, состоящее из одного (однослойный полимерный композит) или нескольких слоев (многослойный полимерный композит), образованных термореактивной смолой, армированной непрерывным углеродным волокном.

Примечания:

1. Ламинаты изготавливают в виде полос или пластин различной длины, ширины и толщины, как правило, однонаправленно армированных.

2. В технической документации отдельных изготовителей вместо термина «ламинат» употребляют термин «ламель».

3.6 элементы усиления: ламинаты или их части, изделия из непрерывного углеродного волокна (ленты, ткани, сетки и другие тканые и нетканые материалы), различной длины и ширины, подготовленные для наклеивания на поверхность металлической (стальной) конструкции.

3.7 термореактивный адгезив (адгезив): клеящий состав из термореактивной смолы для наклейки ламинатов или пропитки и наклейки изделий из непрерывного углеродного волокна (лент, тканей, сеток и других тканых материалов) на основание металлической (стальной) конструкции.

3.8 праймер: материал, применяемый для предварительной подготовки поверхности металлической (стальной) конструкции перед нанесением адгезива.

3.9 основание металлической (стальной) конструкции (основание): поверхность металлической (стальной) конструкции, на которую наклеивают ламинаты или изделия из непрерывного углеродного волокна (ленты, сетки, ткани и другие тканые и нетканые материалы) при ее усилении или восстановлении внешним армированием из полимерных композитных материалов.

3.10 категория технического состояния: степень эксплуатационной пригодности несущей строительной конструкции или здания и сооружения в целом, установленная в зависимости от доли снижения несущей способности и эксплуатационных характеристик.

3.11 критерий оценки технического состояния: установленное проектом или нормативным документом количественное или качественное значение параметров, характеризующих деформативность, несущую способность и другие нормируемые характеристики строительной конструкции.

3.12 оценка технического состояния: установление степени повреждения и категории технического состояния строительных конструкций или зданий и сооружений в целом на основе сопоставления фактических значений количественно оцениваемых признаков со значениями этих же признаков, установленных проектом или нормативным документом.

3.13 нормативное техническое состояние: категория технического состояния, при котором количественные и качественные значения параметров всех критериев оценки технического состояния строительных конструкций зданий и сооружений соответствуют установленным в проектной документации значениям с учетом пределов их изменения.

3.14 работоспособное техническое состояние: категория технического состояния, при которой некоторые из числа оцениваемых контролируемых параметров не отвечают требованиям проекта или норм, но имеющиеся нарушения требований в конкретных условиях эксплуатации не приводят к нарушению работоспособности, а необходимая несущая способность конструкций с учетом влияния имеющихся дефектов и повреждений обеспечивается.

3.15 ограниченно-работоспособное техническое состояние: категория технического состояния строительной конструкции или здания и сооружения в целом при которой имеются крены, дефекты и повреждения, приведшие к снижению несущей способности, но отсутствует опасность внезапного разрушения, потери устойчивости или опрокидывания, функционирование конструкций и эксплуатация здания или сооружения возможны либо при контроле (мониторинге) технического состояния, либо при проведении необходимых мероприятий по восстановлению или усилению конструкций и

(или) грунтов основания и последующем мониторинге технического состояния (при необходимости).

3.16 аварийное состояние: категория технического состояния строительной конструкции или здания и сооружения в целом характеризующаяся повреждениями и деформациями, свидетельствующими об исчерпании несущей способности и опасности обрушения и (или) характеризующаяся кренами, которые могут вызвать потерю устойчивости объекта.

3.17 реконструкция: изменение параметров объекта капитального строительства, его частей (высоты, количества этажей, площади, объема), в том числе надстройка, перестройка, расширение объекта капитального строительства, а также замена и (или) восстановление несущих строительных конструкций объекта капитального строительства, за исключением замены отдельных элементов таких конструкций на аналогичные или иные улучшающие показатели таких конструкций элементы и (или) восстановления указанных элементов.

4 Общие требования

4.1 Проектирование усиления или восстановления металлических (стальных) конструкций следует проводить на основании результатов натурного обследования их технического состояния, выполненного в соответствии с требованиями ГОСТ 31937 и проверочного расчета.

4.2 В результате натуральных обследований металлических (стальных) конструкций должны быть установлены: состояние конструкций, геометрические размеры конструкции и её элементов, состояние сварных и болтовых (заклепочных) соединений, прогибы элементов металлических конструкций и искажения каркаса, распространение коррозии и степень коррозионного износа, расположение трещин и ширина их раскрытия, расположение, размеры и характер других дефектов и повреждений, действительные нагрузки, статическая схема конструкций.

Натурные обследования строительных конструкций следует проводить с учетом требований ГОСТ 31937.

4.3 Поверочные расчеты металлических (стальных) конструкций следует проводить на основании проектных материалов и результатов натурных обследований с учетом требований ГОСТ 54257.

4.4 Расчетные схемы при проведении поверочных расчетов металлических (стальных) конструкций следует принимать с учетом установленных фактических геометрических размеров и конструктивных отклонений от проекта в отдельных элементах конструкции и их соединениях.

4.5 При проведении поверочных расчетов должны быть учтены дефекты и повреждения конструкций каркаса, выявленные в процессе натурных обследований:

- изменение механических свойств металла;
- местные повреждения элементов конструкций каркаса;
- дефекты в сварных и болтовых соединениях;
- коррозионный износ;
- нарушение условий опирания на фундамент или нижележащие конструкции.

4.6 Поверочные расчеты элементов металлических (стальных) конструкций следует проводить по предельным состояниям и предельным деформациям.

4.7 На основании поверочных расчетов следует установить пригодность элементов металлических конструкций к эксплуатации, необходимость их усиления или полную непригодность конструкций к дальнейшей эксплуатации.

Если по результатам поверочных расчетов металлические (стальные) конструкции не удовлетворяют требованиям второго предельного состояния (пригодности к нормальной эксплуатации), допускается не предусматривать их усиление, если фактические прогибы превышают допустимые значения, но не препятствуют нормальной эксплуатации, а также, если фактические искажения формы каркаса и его элементов превышают нормативные значения, но не создают опасности разрушения.

4.8 Допускается при восстановлении элементов металлических (стальных) конструкций не проводить поверочные расчеты по эксплуатационной пригодности, если перемещения в существующих конструкциях при максимальных фактических нагрузках не превосходят допустимых значений, а усилия в сечениях элементов конструкции от проектных нагрузок не превышают значений усилий от фактически действующих нагрузок.

4.9 Усиление стальных конструкций системой армирования их полимерных композиционных материалов должно обеспечивать включение в работу элементов усиления и их совместную работу с усиливаемой или восстанавливаемой металлической (стальной) конструкцией.

4.10 Не допускается непосредственный контакт углеродного волокна с металлом строительной конструкции из-за опасности возникновения электрохимической коррозии.

4.11 Не допускается проводить усиление элементов металлических (стальных) конструкций с корродированной поверхностью без устранения причин и продуктов коррозии.

4.12 Максимальная температура эксплуатации металлических (стальных) конструкций, усиленных или восстановленных системы армирования из полимерных композитных материалов без теплоизоляции, должна быть ниже на 5 °С температуры стеклования терморезистивного адгезива.

4.13 При проектировании системы внешнего армирования металлических (стальных) конструкций полимерными композитными материалами необходимо исключить попадание на систему прямых солнечных лучей в процессе их длительной эксплуатации, в том числе путем устройства защитного слоя.

4.14 В случае необходимости обеспечения требуемой огнестойкости металлических (стальных) конструкций и защиты от повреждений композитных материалов системы внешнего армирования, следует предусмотреть устройство защитного слоя из специальных огнезащитных составов.

4.15 При проектировании системы внешнего армирования из полимерных композитных материалов для металлических (стальных) конструкций, эксплуатируемых в условиях агрессивной среды, следует предусматривать соответствующие меры защиты полимерных материалов от вредных воздействий окружающей среды.

4.16 Определение огнестойкости конструкций, усиление или восстановление которых выполнено без устройства противопожарной защиты, следует проводить с учетом исключения из работы конструкции системы внешнего армирования.

4.17 Расчет металлических (стальных) конструкций, усиленных внешним армированием из полимерных композитных материалов, следует проводить по предельным состояниям.

5 Материалы

5.1 Основные требования к элементам системы внешнего армирования из композитных материалов на основе углеродных волокон.

5.1.1 Материалы, применяемые для усиления или восстановления стальных конструкций, должны соответствовать техническим условиям действующих нормативных документов, иметь сопроводительную документацию, подтверждающую их соответствие нормативным требованиям, включая паспорта качества и (или) протоколы испытаний и подвергаться входному контролю по ГОСТ 24297.

5.1.2 В качестве материалов для устройства внешнего армирования строительных конструкций системой CarbonWrap® применяются армирующие материалы – углеродные однонаправленные ленты CarbonWrap Tape® и углеродные двунаправленные ткани CarbonWrap® Fabric, углеродные сетки CarbonWrap® Grid, углепластиковые ламели CarbonWrap® Lamel, углеродные мультиаксиальные ткани, углеродные анкерные жгуты CarbonWrap® Anchor и термореактивные адгезивы – двухкомпонентные эпоксидные связующие CarbonWrap® Resin 230, CarbonWrap® Resin 230+, CarbonWrap® Resin 530+, CarbonWrap® Resin WS+, CarbonWrap® Resin HT+, двухкомпонентный эпоксидный клей CarbonWrap® Resin Laminate+, эпоксидные двухкомпонентные шпатлевки CarbonWrap® Putty.

5.1.3 Характеристики материалов, составляющих систему внешнего армирования должны соответствовать требованиям, установленным в технических условиях [1-13] и быть подтверждены при входном контроле материалов до устройства системы внешнего армирования. Фактические значения указываются в документе, подтверждающем качество материала.

5.2 Нормативные и расчетные характеристики полимерных композитных материалов на основе углеродных волокон.

5.2.1 Основными прочностными и деформационными характеристиками полимерных композитных материалов при расчете стальных конструкций, усиленных полимерными композиционными материалами, армированными углеродными волокнами, являются нормативные значения:

- сопротивления растяжению $R_{f,n}$;
- модуля упругости при растяжении $E_{f,n}$;
- предельных относительных деформаций $\varepsilon_{f,ult,n}$;
- коэффициента поперечной деформации $\mu_{f,n}$.

Примечание: коэффициент поперечной деформации используется для расчета конструкций при сложном напряженном состоянии и при определении модуля сдвига адгезионного слоя.

5.2.2 Значения прочности и модуля упругости при растяжении и коэффициента поперечной деформации определяют по ГОСТ 25.601.

5.2.3 Нормативные значения сопротивления растяжению, модуля упругости при растяжении, предельных относительных деформаций и коэффициента поперечной деформации следует принимать равными значениям, установленным по результатам испытаний образцов по ГОСТ 25.601 с обеспеченностью 0,95.

5.2.4 Расчетные значения модуля упругости и коэффициента поперечной деформации следует принимать равными их нормативным значениям.

5.2.5. Расчетное значение сопротивления растяжению R_f следует определять по формуле:

$$R_f = \gamma_{f1} \gamma_{f2} R_{f,n} / \gamma_f , \quad (5.1)$$

где γ_f – коэффициент надежности по композитному материалу, принимаемый при расчете по предельным состояниям второй группы равным 1,0, а при расчете по предельным состояниям первой группы равным 1,2.

γ_{f1} – коэффициент условий работы композитного материала, принимаемый по табл. 5.5. в зависимости от условий эксплуатации конструкции;

γ_{f2} – коэффициент условий работы полимерного композитного материала, учитывающий сцепление композитного материала с металлом:

$$\gamma_{f2} \leq 0.9 \quad (5.2)$$

Допускается при расчете по предельным состояниям первой группы значение коэффициента надежности γ_f для ламинатов принимать по данным изготовителя, но не менее, чем 1,1.

Таблица 5.1 - Коэффициенты условий работы γ_{f1} композитного материала

Условия эксплуатации конструкции	Значение коэффициента γ_{f1} для	
	ламинатов	тканых материалов
Во внутренних помещениях	0,95	0,9
На открытом воздухе	0,85	0,8
В агрессивной среде	0,85	0,8

5.2.6 Расчетное значение предельных относительных деформаций композитного материала $\epsilon_{f,ult}$ следует вычислять по формуле:

$$\epsilon_{f,ult} = R_f / E_{fn} \quad (5.4)$$

5.2.7 Расчетное сопротивление композитного материала растяжению при расчете прочности сечений, наклонных к продольной оси элемента, следует принимать согласно 6.4.3.

5.2.8 Расчетные диаграммы состояния (деформирования) композитного материала, устанавливающие связь между напряжениями и относительными деформациями при растяжении, следует принимать линейными.

5.3 Нормативные и расчетные характеристики металла

5.3.1 Фактический класс прочности металла устанавливается по данным испытаний неразрушающими методами или по данным испытаний отобранных из конструкции образцов.

6 Требования к расчёту стержневых элементов металлических (стальных) конструкций, усиленных полимерными композитными материалами на основе углеродных волокон

6.1 Общие положения

6.1.1 Посредством усиления полимерными композитными материалами, армированными углеродными волокнами, решаются следующие задачи:

- повышение или восстановление прочности растянутых элементов;
- повышение или восстановление прочности изгибаемых элементов;

6.1.2 Усиление стальных конструкций полимерными композитными материалами, армированными углеродными волокнами, дает эффект при работе полимерного композита на растяжение. В зоне сжатия его применение малоэффективно.

6.1.3 Проектирование усиления или восстановления стальных конструкций следует проводить на основе анализа состояния указанных конструкций на всех этапах их жизненного цикла, проводимого в соответствии с Федеральным законом от 30.12.2009 № 384-ФЗ, результатов специальных натуральных обследований, предусматриваемых проектами усиления и восстановления конструкции, а также результатов поверочных расчетов несущей способности и деформативности конструкций с учетом их реального состояния.

6.1.4 В результате специальных натуральных обследований должны быть установлены:

- фактические геометрические размеры конструкции;
- характер и геометрия дефектов и повреждений;
- прочностные характеристики стали;
- тип стали на основании исследований химического состава.

6.1.5 Натурные обследования следует проводить с учетом требований ГОСТ 31937, ГОСТ 1497 и ГОСТ 22761.

6.1.6 Поверочные расчеты следует проводить на основе проектных данных и результатов анализа данных натуральных наблюдений и результатов специальных натуральных

обследований в соответствии с требованиями 6.1.5 и с учётом указаний СП 16.13330.2011.

6.1.7 При проведении поверочных расчетов следует учитывать все изменения в геометрии конструкции, наличие дефектов и повреждений, наличие местных повреждений и нарушений, изменение величин действующих нагрузок и воздействий.

6.1.8 По результатам поверочных расчетов устанавливается возможность дальнейшей эксплуатации конструкции, необходимость ее восстановления или усиления.

6.2 Растянутые элементы

6.2.1 Первое предельное состояние.

В настоящем разделе рассматривается усиление стальных растянутых элементов. Усиление может быть направлено как на повышение несущей способности, так и на её восстановление для частично корродированных или иным образом поврежденных элементов стальных конструкций.

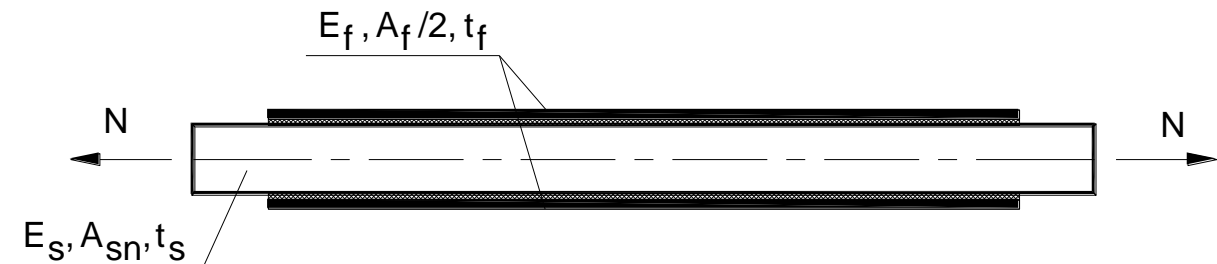


Рисунок 6.1. Схема усиления растянутого элемента

Рассматривается только симметричное армирование – без вторичных изгибающих моментов.

Разрушение, усиленных полимерными композитными материалами на основе углеродных волокон, растянутых стальных элементов может произойти вследствие:

- отказа стального элемента;
- отказа полимерного композитного материала;
- отслаивания композитного материала – разрушение адгезионного слоя на границе с композитом;

- отслаивания композитного материала – разрушение адгезионного слоя на границе с металлом.

При расчете, усиленных полимерными композитными материалами на основе углеродных волокон, растянутых стальных элементов принимаются следующие рабочие гипотезы:

- гипотеза плоских сечений;
- идеализированная работа адгезионного слоя;
- линейно-упругая работа всех материалов.

В запас несущей способности восстанавливаемых поврежденных элементов стальных конструкций предполагается, что усилие в поврежденных сечениях воспринимают полимерные композиты, а усиление рассчитывается с помощью неравенств:

- проверка прочности повреждённого стального сечения:

$$\frac{(N + E_f A_f (\alpha_f - \alpha_s) \Delta T) E_s}{E_f A_f + E_s A_s} R_y \gamma_c \leq 1 \quad (6.2.1)$$

- проверка прочности полимерного композита:

$$\frac{(N + E_s A_s (\alpha_s - \alpha_f) \Delta T) E_f}{0.95(E_f A_f + E_s A_s) R_f} \leq 1 \quad (6.2.2)$$

, где A_f - суммарное расчетное сечение полимерного композита, определяемое для углеродных тканых материалов как произведение ширины на расчетную толщину монослоя, и как произведение толщины на ширину;

E_f – модуль упругости полимерного композита;

α_f - коэффициент линейного теплового расширения полимерного композита;

A_s - ослабленное расчетное сечение усиливаемого стального элемента;

E_s - модуль упругости стали;

α_s - коэффициент линейного теплового расширения стали;

ΔT – расчетное значение изменения средних температур по сечению элемента в теплое или холодное время года, определяемое по СП 20.13330.2011 «Нагрузки и воздействия».

6.3 Изгибаемые элементы

6.3.1 Виды повреждений, усиленных полимерными композитными материалами, на основе углеродных волокон, изгибаемых стальных конструкций.

При изгибе стальных конструкций с внешним армированием из полимерных композитов возможны следующие виды отказа:

- разрушение металла (стали) в растянутой зоне;
- потеря местной устойчивости сжатого пояса балки;
- потеря местной устойчивости стенки балки;
- потеря общей устойчивости балки;
- разрушение полимерного композита при растяжении;
- нарушение сцепления адгезива с металлом;
- нарушение сцепления адгезива с композитным материалом.

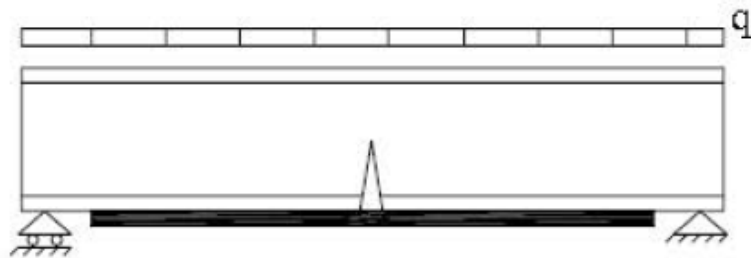


Рисунок 6.2. Разрушение металла в растянутой зоне элемента

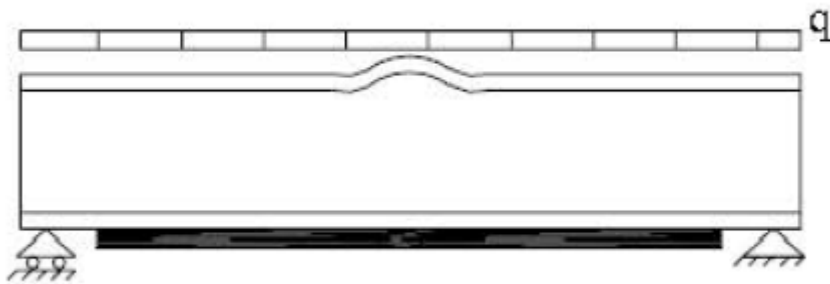


Рисунок 6.3. Потеря местной устойчивости сжатого пояса балки



Рисунок 6.4. Потеря местной устойчивости стенки в приопорных зонах балки

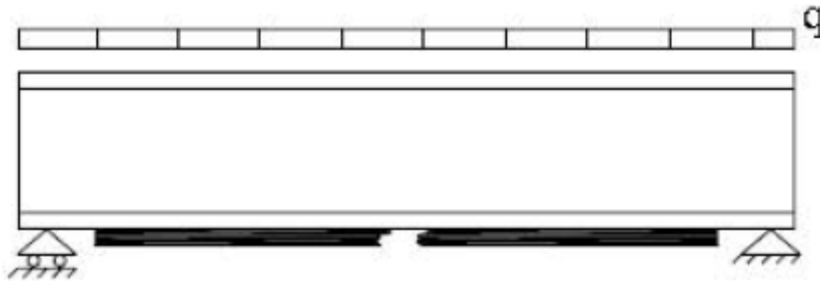


Рисунок 6.5. Разрушение полимерного композитного материала

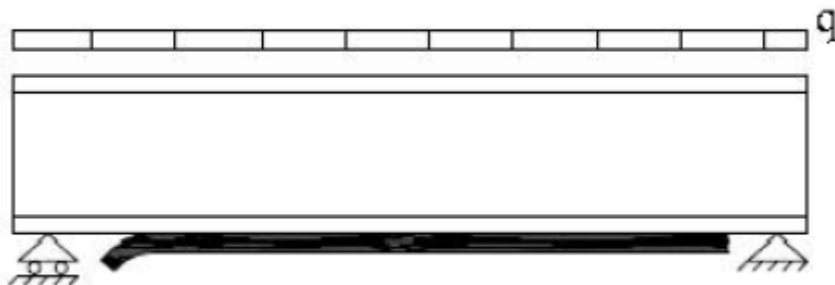


Рисунок 6.6. Отслоение полимерного композитного материала от стальной конструкции

6.3.2 Расчет, усиливаемых полимерными композитными материалами на основе углеродных волокон, изгибаемых элементов (балок) выполняется без учета развития пластических деформаций (в упругой стадии работы материала по критерию краевой текучести) или с учетом развития пластических деформаций. В упругой стадии работы рассчитываются балки 1-го класса (группы конструкций 1, 2, 3), которые применяются при действии всех видов нагрузок. Балки 2-го и 3-го классов (группа конструкций 4) применяются при действии статических нагрузок и могут рассчитываться с учетом развития

пластических деформаций. Классы балок и группы конструкций назначаются в соответствии с СП 16.13330.2011. Усиление композитными материалами изгибаемых элементов выполняется со стороны растянутой зоны сечения.

Распределение напряжений при упругой работе материала показано на рис.6.7.

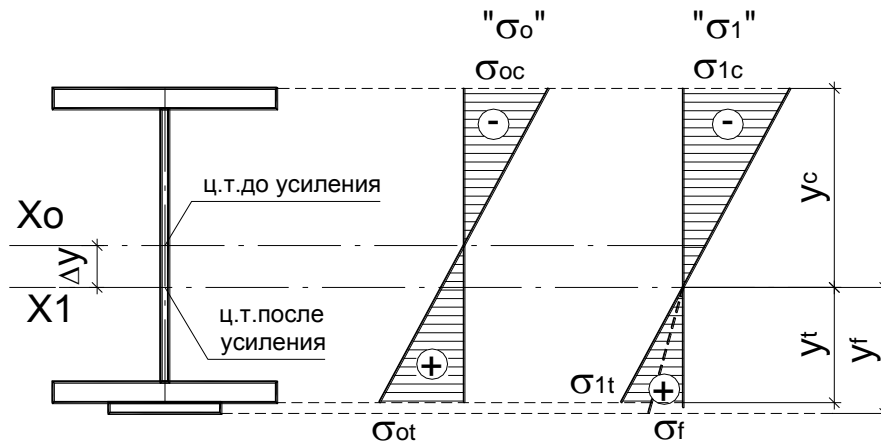


Рисунок 6.7. Распределение напряжений при упругой работе материала

Проверка прочности по критерию краевой текучести выполняется следующим образом:

- расчётные усилия:

- изгибающий момент до усиления балки: M_o ;
- дополнительный изгибающий момент после усиления балки: M_1 .

- нормальные напряжения:

- в верхней сжатой полке от изгибающего момента: $M_o : \sigma_{oc} = M_o / W_{xoc}$;
- в нижней растянутой полке от изгибающего момента: $M_o : \sigma_{ot} = M_o / W_{xot}$;
- в верхней сжатой полке от изгибающего момента: $M_1 : \sigma_{1c} = M_1 y_t / I_x$;
- в нижней растянутой полке от изгибающего момента: $M_1 : \sigma_{1t} = M_1 y_c / I_x$;
- в растянутом слое композитного материала от изгибающего момента: M_1 :

$$\sigma_{1f} = \alpha M_1 y_f / I_x ,$$

где $\alpha = E_f / E_s$;

E_f - модуль упругости композитного материала;

E_s - модуль упругости стали.

Геометрические характеристики, используемые при определении напряжений:

– W_{xoc} , W_{xot} - моменты сопротивления нетто стального сечения до усиления для верха и низа сечения соответственно;

– $I_x = I_{x0} + A_s \Delta y^2 + \alpha A_f y_f^2$ - момент инерции нетто приведённого сечения.

Проверка прочности по краевой текучести от суммарного момента $M_o + M_1$:

– верхней сжатой полки:

$$\frac{\sigma_{oc} + \sigma_{1c}}{R_y \gamma_c \gamma_m} \leq 1; \quad (6.3.1)$$

– нижней растянутой полки:

$$\frac{\sigma_{ot} + \sigma_{1t}}{R_y \gamma_c \gamma_m} \leq 1; \quad (6.3.2)$$

– в растянутом слое композитного материала:

$$\frac{\sigma_{1f}}{R_f} \leq 1 \quad (6.3.3)$$

В формулах (6.3.1) и (6.3.2) для элементов конструкций 1 группы принимается $\gamma_m = 0,95$; для элементов конструкций 2, 3 и 4 групп - $\gamma_m = 1$.

Расчёт усиленной балки с учётом развития пластических деформаций допускается, если уровень касательных напряжений в сечении удовлетворяет условию:

$$\tau \leq 0.5 R_s \quad (6.3.4)$$

Проверка прочности усиленного сечения с учётом развития пластических деформаций выполняется по формуле:

$$M \leq [M]_c \gamma_c, \quad (6.3.5)$$

где M - расчётный изгибающий момент, $[M]$ - предельный изгибающий момент, c_τ - поправочный коэффициент, учитывающий влияние поперечных сил и определяемый для двутавровых сечений по формуле:

$$c_{\tau} = \begin{cases} 1 & \text{при } \tau \leq 0,4R_s \\ 1,05 \sqrt{\frac{1 - (\tau / R_s)^2}{1 - 0,5(\tau / R_s)^2}} & \text{при } \tau > 0,4R_s \end{cases}; \quad (6.3.6)$$

$[M]$ - предельный изгибающий момент, который определяется по формуле:

$$[M] = (A_c y_c + A_t y_t + \alpha_R A_f y_f) R_y \gamma_M, \quad (6.3.7)$$

где $\alpha_R = R_f / R_y$;

$A_c = \frac{1}{2}(A_s + \alpha_R A_f)$ - площадь нетто сжатой зоны сечения усиливаемого элемента;

A_t - то же, растянутой зоны;

A_f - площадь нетто элементов усиления, расположенных со стороны растянутой зоны сечения (рис. 6.8).

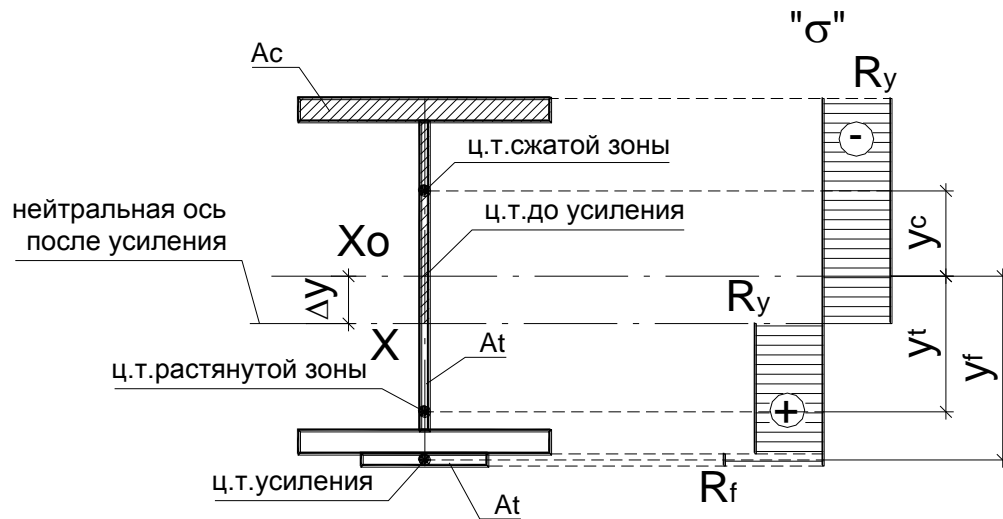


Рисунок 6.8. Распределение напряжений при пластической работе материала

Коэффициент γ_M в формуле (6.3.7) следует принимать при одностороннем усилении элементов со стороны растянутых волокон:

$$\gamma_M = 0,95, \quad (6.3.8)$$

При расчете и проектировании стальных элементов, усиленных полимерами, следует корректно учитывать влияние фактора усталости. Усталостные разрушения могут

иметь место как в металле, так и в полимере, и на границе раздела фаз. Методика расчета на усталость в настоящем СТО не рассматривается.

7 Технология производства работ по усилению металлических (стальных) конструкций полимерными композитными материалами

7.1 Основные положения

7.1.1 Устройство системы внешнего армирования производится по специально разработанному проекту усиления конструкции при соответствующем расчетном обосновании и соблюдении технологии производства работ.

7.1.2 Работы по устройству внешнего армирования должны выполняться в соответствии с проектной и технологической документацией специализированными организациями.

Отступления от проектной и технологической документации допускаются только с согласия авторского надзора, о чем делается запись в журнале работ. Все изменения должны быть отражены в Исполнительной документации.

7.1.3 При возникновении противоречий проекта и настоящего СТО, следует руководствоваться положениями первого.

7.1.4 Работы по усилению (восстановлению) металлических (стальных) конструкций методом внешнего армирования композитными материалами включает в себя следующие этапы:

- подготовка поверхности конструкции в местах устройства усиливающих элементов внешнего армирования;
- раскрой армирующих элементов СВА (ленты, ткани, ламината, сетки, жгута);
- приготовление связующего (адгезива);
- наклейка элементов СВА;
- нанесение защитного покрытия.

7.1.5 В качестве основных материалов для внешнего армирования (СВА) применяются ленты, ткани, сетки, ламинаты из углеродных волокон и связующее (адгезив) на эпоксидной основе.

Тип элемента усиления и связующего (адгезива) устанавливается проектом.

7.1.6 Приготовление и использование материалов следует вести в соответствии с инструкциями производителя.

При подготовке эпоксидных связующих (адгезивов) должны строго соблюдаться рекомендации производителя по количественному соотношению компонентов по массе.

7.1.7 Устройство СВА допускается осуществлять в диапазоне температур окружающего воздуха и конструкций от +5 °С до +45 °С и влажности воздуха не более 80 %. Температура конструкции должна быть выше температуры точки росы минимум на 3 °С.

7.1.8 При необходимости устройства СВА на металлические (стальные) конструкций, эксплуатирующиеся в условиях повышенной температуры (до 110⁰С) следует применять соответствующее эпоксидное двухкомпонентное связующее марки CarbonWrap® Resin HT+ согласно [12].

7.1.9 Не допускается попадание осадков и загрязнений на участки наклейки элементов усиления в момент их устройства и последующие трое суток после завершения работ.

7.2. Подготовка поверхности элементов стальных конструкций

7.2.1 Подготовка поверхности элементов стальных конструкций имеет основополагающее значение для хорошего клеевого соединения полимерных композитов с металлической конструкцией.

7.2.2 Металлические (стальные) поверхности до устройства внешнего армирования должны быть очищены и удалены частицы, присутствие которых может отрицательно влиять на качество соединения полимерных композитных материалов с усиливаемой стальной конструкцией.

7.2.3 Подготовка поверхности элементов стальных конструкций включает следующие этапы обработки:

- механическое удаление с поверхности усиливаемых металлических конструкций лакокрасочного покрытия, ржавчины и других продуктов коррозии;
- обезжиривание поверхности растворителем;
- пескоструйная обработка поверхности;
- сушка поверхности;
- химическое травление (в случае необходимости);
- разметка размещения элементов внешнего армирования;
- нанесение праймера и выравнивание поверхности.

7.2.4 Механическое удаление покрытий с металлических поверхностей выполняется с помощью металлических щеток или путем пескоструйной обработки. Особая осторожность требуется в случае обработки хрупких чугунных элементов конструкций: необходимо избегать отстукивания, а также использования перфораторов.

7.2.5 Растворители должны быть подобраны таким образом, чтобы обеспечить эффективное обезжиривание поверхности.

7.2.6 Сухая или мокрая пескоструйная обработка элементов стальных конструкций должна быть использована для обработки поверхности усиления металлических конструкций и обеспечения ее шероховатости. Остатки песка и пыль должны быть удалены с поверхности с использованием высоконапорной промывки водой.

7.2.7 Влажная поверхность металлических (стальных) конструкций после пескоструйной обработки и очистки должна быть немедленно высушена во избежание образования оксидной пленки на поверхности металла.

7.2.8 При наличии на поверхности стальных элементов (оцинкованная и нержавеющая сталь) усиливаемой конструкции оксидной пленки требуется химическое травление поверхности и дальнейшая нейтрализация продуктов травления.

Травление не требуется, если поверхность выполнена из стали или чугуна.

7.2.9 В течение не более 2 часов, после завершения операции очистки поверхности необходимо нанести грунтовочный слой адгезива. Адгезив не допускается наносить на влажную поверхность.

7.2.10 Неровность поверхности металлических конструкций не должна превышать 5,0 мм на длине 2,0 м или 1,0 мм на длине 0,3 м. Мелкие дефекты (раковины, трещины, углубления до 5 мм) устраняют с применением наполненных молотым кварцевым песком эпоксидных адгезивов. Большие неровности, возникшие в результате сильно корродированных или деформированных металлических элементов, могут быть отремонтированы с помощью специальных составов.

7.2.11 На поверхность металлических конструкций наносят мелом линии разметки в соответствии с принятой проектной схемой.

7.2.12 Для устранения возможности появления электрохимической коррозии необходимо нанесение защитного покрытия (изоляционного слоя между металлической поверхностью и углеродным волокном). Защитное покрытие не требуется при использовании ламинатов.

7.2.13 В качестве изоляционного слоя могут выступать слой адгезива толщиной более 1 мм или стеклоткань.

7.2.14 Адгезивы, которые используются при нанесении защитного покрытия или наклейки стеклоткани, должны быть одной марки, что и при устройстве системы внешнего армирования на основе углеродных волокон.

7.3 Раскрой армирующих элементов системы внешнего армирования

7.3.1 Геометрические параметры армирующих элементов системы внешнего армирования (длина, ширина, толщина) измеряют штангенциркулями по ГОСТ 166, металлическими линейками по ГОСТ 427 или рулетками по ГОСТ 7502.

7.3.2 Во избежание повреждения и загрязнения элементов системы внешнего армирования все работы необходимо производить в защитных перчатках. Не допускается попадание на армирующие элементы песка, воды, пыли, масел, растворителей и иных посторонних веществ.

7.3.3 Подготовка элементов системы внешнего армирования должна производиться в специальном помещении на строительной площадке или в заводских условиях.

7.3.4 Раскрой армирующих элементов осуществляется на гладком столе (верстаке), покрытом полиэтиленовой пленкой. Стол должен быть снабжен приспособлением для разматывания лент, тканей и ламинатов с бобины. Для резки лент, тканей и жгутов используют ножницы или острый нож, а резку ламинатов осуществляют с помощью специальных отрезных машин, снабженных алмазными отрезными дисками.

При необходимости резки ленты (ткани, сетки) в продольном направлении на нее с двух сторон следует наклеить малярный скотч, и резку осуществлять по нему.

7.3.5 Элементы системы внешнего армирования должны быть раскроены на заготовки, геометрические размеры и количество которых определяются в соответствии с проектной документацией. Раскроенные заготовки должны быть смотаны в рулон. К каждому рулону должна быть прикреплена этикетка с указанием номера, размера и количества заготовок. Рулоны помещаются в упаковочную тару.

7.3.6 Во избежание повреждения элементов системы внешнего армирования не допускается их складывание (перегиб) в направлении поперек волокон. Не допускается разделение лент, тканей, сеток на жгуты и повреждение волокна.

7.4 Приготовление связующего (адгезива)

7.4.1 Подготовка двухкомпонентного связующего (адгезива) должна производиться на строительной площадке и включать в себя смешение компонентов А и В в соотношениях и при условиях, рекомендованных производителем.

7.4.2 Количество адгезива в одной порции не должно превышать технологические возможности его использования в течение времени его жизнеспособности.

7.4.3 Дозирование компонентов А и В терморезистивного адгезива осуществляют взвешиванием отдельно каждого компонента с погрешностью измерений не более 1%.

7.4.4 Смешение компонентов А и В должно производиться в чистой емкости объемом не менее 3-х литров с помощью низкооборотной дрели с насадкой. Скорость вращения не должна превышать 500 оборотов в минуту (с целью ограничения аэрации смеси). Смешение должно осуществляться не менее 3-х минут до образования однородной смеси. Для исключения образования пузырьков воздуха запрещается при перемешивании поднимать ворошитель из смеси. Емкость с подготовленным адгезивом следует плотно закрыть крышкой и немедленно передать к месту производства работ.

7.5 Наклейка элементов системы внешнего армирования

7.5.1 Наклейка элементов системы внешнего армирования должна включать в себя выполнение следующих видов работ:

- нанесение на защитное покрытие слоя адгезива;
- укладку подготовленных элементов СВА;
- прикатку элементов СВА к основанию;
- нанесение на поверхность армирующих элементов финишного слоя адгезива;
- нанесение защитного покрытия.

7.5.2 Первый слой адгезива наносят на защитное покрытие, препятствующее возникновению электрохимической коррозии металлической конструкции тонким равно-

мерным слоем толщиной 0,5-1,0 мм с помощью шпателя, кисти, валика с коротким ворсом.

При устройстве ламинатов шпателем на подготовленное основание без защитного слоя следует нанести слой адгезива толщиной 1,0-2,0 мм. Аналогичный слой (1,0-2,0 мм) следует нанести на предварительно протертую ацетоном поверхность ламината.

7.5.3 Ориентация волокон каждого элемента системы внешнего армирования должна соответствовать принятому проектному решению. Отклонение волокон от принятого проектного решения не должно превышать 5°.

7.5.4 Элементы системы внешнего армирования, подготовленные в соответствии с п.7.3, необходимо укладывать на слой нанесенного адгезива путем их прижатия и разглаживания тыльной стороной руки (в перчатке) вдоль волокон элемента от центра к краям. В процессе укладки необходимо следить, чтобы кромка усиливающего элемента была параллельна линии разметки, нанесенной на основание или кромке предыдущего элемента. Элементы СВА должны укладываться с натяжением. Образование складок и перекосов волокон не допускается.

7.5.5 При устройстве системы внешнего армирования допускается применение неподготовленных усиливающих элементов. В этом случае углеродные ленты и ткани следует постепенно разматывать с бобины и обрезать по месту в процессе наклейки.

7.5.6 После укладки усиливающего элемента на основе углеродных наполнителей требуется осуществить его прикатку, в процессе которой происходит его пропитка. Прикатка осуществляется с помощью жесткого резинового валика или шпателя от центра к краям строго в направлении вдоль волокон. Прикатка в направлении поперек волокон не допускается. После прикатки и пропитки усиливающий элемент должен быть слегка липким на ощупь, но без явно видимого присутствия адгезива.

Ламинаты укладываются на основание «клей к клею» и прикатываются жестким валиком для удаления избытков адгезива. Излишки адгезива удаляют с укрывом краев ламината.

7.5.7 В случае применения углеродных наполнителей с повышенной поверхностной плотностью осуществляется предварительная пропитка адгезивом с двух сторон с последующей укладкой в соответствии с п.7.5.4.

7.5.8 При устройстве системы внешнего армирования, состоящей из нескольких слоев, следует:

- перед укладкой второго слоя усиливающих материалов на пропитанные и прикатанные усиливающие элементы первого слоя необходимо равномерно нанести адгезив из расчета 0,5-1,2 кг/м²;

- укладку и прикатку второго и последующих слоев следует производить в соответствии с п.7.5.4 и п.7.5.6.

Работы повторяются до достижения необходимого количества слоев в соответствии с проектным решением.

В случае, если проектом усиления предусматривается устройство двух или нескольких слоев ламината, производится предварительное склеивание предусмотренного количества слоев на рабочем столе, выдержка в течение срока полимеризации адгезива и последующее приклеивание всего пакета к основанию.

7.5.8 При устройстве внешнего армирования металлических конструкций в соответствии с п.7.5.6 и недостаточной длине углеродного наполнителя допускается выполнение усиливающих элементов, составленных из нескольких лент или тканей, при условии их перехлеста. Длина перехлеста для каждого вида лент или тканей должна указываться в проектном решении. Зоны перехлеста соседних лент следует располагать в разбежку на расстоянии не менее 400 мм.

Стыковка и соединение внахлест ламелей по длине недопустимы.

7.5.9 После укладки последнего слоя системы внешнего армирования (ленты, ткани, сетки) на его поверхность необходимо нанести финишный слой адгезива в количестве 0,5 кг/м².

7.5.10 Поверхность финишного слоя адгезива сразу же после его нанесения следует

присыпать мелким сухим песком фракцией от 0,5 до 1,0 мм. Присыпку неотвержденного покрывочного слоя адгезива песком рекомендуется производить для обеспечения повышенного сцепления последующих слоев отделочных материалов.

7.5.11 При устройстве внешнего армирования по п. 7.5.8 наклейку усиливающих элементов всех слоев системы рекомендуется выполнить в течение одной рабочей смены с последующим отверждением всего сечения.

7.5.12 При устройстве внешнего армирования на вертикальных и горизонтальных металлических поверхностях снизу, наклейка более 2-х слоев усиливающих элементов в течение одной рабочей смены не допускается и слой адгезива на второй слой усиливающих элементов не наносится.

7.5.13 Полное отверждение терморезистивных адгезивов при нормальных условиях происходит в течение 5-14 суток и в значительной мере зависит от температуры окружающей среды. Время высыхания адгезива должно составлять не менее 24 часов при температуре выше 20° С и не менее 48 часов при температуре менее 15°С.

7.5.14 После отверждения всех слоев системы внешнего армирования, состоящих из пропитанных и прикатанных усиливающих элементов, на поверхность кистью или шпателем наносится защитное покрытие в соответствии с проектной документацией на усиление или восстановление стальной конструкции с учетом требований СП 28.13330.

7.5.15 В качестве защитного покрытия могут применяться огнезащитные составы и материалы, обеспечивающие требуемую огнезащитную эффективность конструкции с учетом достижения предельного состояния на поверхности углепластика (60-65)°С.

8. Контроль качества производства работ

8.1 Общие положения

8.1.1 Общие принципы строительного контроля изложены в СП 48.13330.2011 и СП 16.13330.2011.

8.1.2 Проверка качества работ по усилению или восстановлению металлических (стальных) конструкций внешним армированием композитными материалами включает в себя следующие основные виды контроля:

- оценка соответствия состояния конструкций принятому в проекте усилению;
- входной контроль качества поступающих на строительную площадку строительных материалов и изделий;
- контроль соблюдения правил складирования и хранения материалов и изделий;
- операционный контроль;
- приемочный контроль законченного этапа работ.

8.1.3 При осуществлении контроля следует учитывать требования настоящего СТО к температуре окружающей среды и усиливаемых конструкций во время производства работ, а также придерживаться инструкции производителя СВА по контролю качества при проведении авторского надзора над производством работ по усилению металлических конструкций композитными материалами.

8.2 Оценка состояния металлических конструкций

8.2.1 Перед началом работ по усилению или восстановлению металлических конструкций композитными материалами ответственный производитель работ с привлечением представителей авторского надзора проводит осмотр конструкции и проверяет соответствие видимых дефектов, учтенным при проектировании усиления (восстановления).

8.2.2 При выявлении дополнительных дефектов составляется акт осмотра. Для

начала производства работ требуется заключение и рекомендации проектной организации по их устранению с оформлением соответствующего документа.

8.3 Входной контроль

8.3.1 Входной контроль осуществляют при получении строительных материалов и изделий на строительной площадке ответственный производитель работ, либо назначенный им специалист.

8.3.2 Входной контроль распространяется на все используемые при производстве работ материалы и изделия.

8.3.3 Входной контроль специальных ремонтных материалов осуществляют в соответствии с действующими нормативами или инструкциями производителя на каждый из них.

8.3.4 Входной контроль поставляемых на строительную площадку строительных материалов включает:

- проверку наличия этикеток на упаковках материалов;
- идентификацию материалов по накладным (сверку соответствия названий материалов на этикетках сопроводительным документам);
- проверку номенклатуры и количества поставленных материалов;
- проверку сохранности упаковки;
- проверку наличия и содержания документов поставщиков, содержащих сведения о качестве поставленной ими продукции (сертификаты, паспорта качества и пр.), ее соответствия требованиям проекта;
- проверку срока годности материала (фактический срок хранения всех материалов не должен превышать допустимый срок хранения, указанный на упаковке).

8.3.5 В случаях выявления нарушений при осуществлении 8.3.4 материал возвращается поставщику для замены.

8.3.6 Результаты входного контроля заносятся в журнал входного контроля.

8.4 Контроль соблюдения правил складирования и хранения

8.4.1 Контроль соблюдения правил складирования и хранения материалов и изделий осуществляет ответственный производитель работ, либо назначенный им специалист.

8.4.2 Контроль правил складирования включает в себя периодическую проверку соответствия условий, в которых хранятся материалы и изделия на строительной площадке, ТУ и рекомендациям производителя.

8.4.3 Контроль соблюдения правил складирования и хранения материалов и оборудования включает контроль:

- температуры окружающей среды;
- влажности воздуха (не больше 80 %);
- отсутствия попадания на место хранения осадков, прямых солнечных лучей;
- проветриваемости (воздухообмена) помещения;
- соблюдения требований к ограничению доступа;
- зонирования расположения материалов по названию, горючести и т.д.

8.4.4 Результаты контроля заносятся в журнал хранения и учета строительных материалов и оборудования.

8.5 Операционный контроль

8.5.1 Операционный контроль усиления или восстановления должен выполнять ответственный производитель работ или назначенные им специалисты, прошедшие обучение.

8.5.2 Операционный контроль включает в себя проверку соответствия состава, последовательности, метода выполнения и качества осуществляемых технологических операций требованиям проектной документации и настоящего СТО.

8.5.3 Операционный контроль ведения работ включает в себя:

- контроль подготовки поверхности конструкции под наклейку усиливающих

элементов;

- контроль устройства элементов внешнего армирования;
- контроль устройства защитного покрытия.

8.5.4 Контроль подготовки поверхности конструкции под наклейку усиливающих осуществляется непосредственно в процессе выполнения работ и включает в себя проверку:

- соответствия выбранных в проекте материалов для выравнивания поверхности параметрам ремонтируемых дефектов (по минимальному/максимальному слою нанесения, типу поверхности);

- правильности нанесения разметки поверхности конструкции – инструментально с помощью рулетки;

- отсутствия на поверхности усиливаемых конструкций остатков отделки, масляных пятен и пр. загрязнений – визуально;

- ровности основания – инструментально 2-х метровым правилом, линейкой длиной 30 см, щупом, наличие шероховатости – визуально;

- отсутствия пыли на поверхности – с помощью влажной ветоши;

- влажности основания – с помощью влагомера;

- температуры основания инструментально с помощью бесконтактного термометра.

8.5.5 Контроль устройства элементов внешнего армирования включает в себя:

а) контроль раскроя ленты, ткани, сетки или ламели с проверкой:

1) соответствия типа используемого материала проекту – визуально по ярлыкам на упаковках.

2) отсутствие дефектов материалов – визуально в процессе раскроя:

- наличие физических повреждений и брака;
- наличия загрязнения, нарушения структуры.

3) длину и ширину материалов – инструментально с помощью рулетки (погрешность длины не должна превышать 30 мм, ширины – 5 мм).

4) чистоту поверхности верстака для раскроя материалов – визуально по наличию пыли, мусора и других загрязнений.

б) контроль приготовления адгезива, при котором наблюдают за внешними признаками его качества (в соответствии с инструкциями производителя), при этом:

1) обычно следят за:

- консистенцией, цветом, прозрачностью, отсутствием посторонних включений, однородности компонентов по отдельности и после смешения;

- наличием нехарактерного запаха компонентов (при наличии информации о характерном запахе в описании производителя);

- отсутствием расслоения компонентов.

2) контролируют:

- чистоту используемой тары;

- точность дозирования компонентов адгезива (по массе);

- объем навесок (он должен быть таким, чтобы его можно было выработать в пределах времени жизнеспособности адгезива);

- соответствие длительности и способа смешения рекомендациям производителя;

- соответствие температуры окружающего воздуха требованиям СТО.

в) контроль наклейки усиливающих элементов, в ходе которого:

1) непосредственно в процессе выполнения работ контролируют:

- отсутствие не загрунтованных адгезивом участков основания;

- количество адгезива, нанесенного на загрунтованное основание – органолептический контроль;

- качество прикатки усиливающего элемента – визуально;

- достаточность адгезива – визуально и по расходу адгезива;

- продолжительность перерыва между наклейкой первых двух слоев и последующих при многослойной (не более 5 слоёв) наклейке;
- последовательность наклейки в каждом направлении при наклейке в двух направлениях – визуально;
- длина перехлеста, правильность стыковки «в разбежку» при выполнении усиливающих элементов, составленных из нескольких композитных материалов – визуально;
- отсутствие отслаивания, провисаний, образования воздушных мешков (пузырей) и прочих дефектов после наклейки усиливающих элементов до отверждения адгезива –визуально;
- температура окружающей среды в процессе наклейки усиливающих элементов –инструментально.

2) контролируют после окончания работ и твердения адгезива:

- расположение и геометрические параметры усиливающих элементов – визуально;
- соответствие геометрических параметров (длина, ширина) и мест расположения (привязка на конструкции) СВА – инструментально;
- соответствие фактического направления волокон проектному – визуально (отклонение не более 5 градусов, волокна должны выглядеть натянутыми, плотно прилегающими к основанию, без складок и провисаний, утковая нить не должна быть смещена);
- соответствие количества слоев – визуально;
- наличие изменения цвета отдельных участков СВА – визуально;
- степень высыхания адгезива – органолептический контроль (липнет/не липнет) и инструментально (твёрдость по шкале Мооса);
- наличие избыточного содержания адгезива;

- качество пропитки адгезивом армирующих элементов (недостаточность адгезива) – визуально (проверяется отсутствие незаполненных участков между прядями углеродного наполнителя, наплывов, потеков, избыточного содержания адгезива). Определение наличия «сухих» участков углеродного наполнителя проводится при визуальном осмотре СВА под разным углом к свету, а также легким царапанием острым предметом – при этом волокна шевелятся, пушатся;

- отсутствие на поверхности выступающей текстуры армирующего наполнителя – визуально;

- наличие «бухтящих» участков СВА, отслоений – инструментально (легким простукиванием молотком весом 100 г., звук должен быть звонким, однотонным по всей СВА – глухой тон свидетельствует о наличии дефекта.

3) после окончания работ и твердения адгезива проверяют:

- фактическую адгезию СВА к металлической поверхности (для конструкций, где адгезия играет существенную роль для усиленной конструкции). В отдельных случаях, при необходимости (если это предусмотрено проектом усиления) проводятся испытания образцов-представителей СВА.

4) вырезают дефектные участки, выявленные после окончания работ и твердения адгезива, и устанавливают на их месте заплатки с таким же количеством слоев (равнопрочные заплатки); при этом качество ремонтных работ также подлежит дополнительному контролю.

г) контроль нанесения накрывочного слоя адгезива, при котором контролируется:

- отсутствие непокрытых адгезивом участков СВА – визуально;
- отсутствие наплывов, потеков и других признаков излишнего количества адгезива – визуально;

- равномерность нанесения песка на не отвердевший накрывочный слой – визуально;

- высушивание СВА – органолептический контроль (после окончания сроков твердения – липнет/не липнет);

- ровность поверхности СВА (не должно быть незаполненных адгезивом участков между прядями углеродного наполнителя, наплывов и потеков).

8.5.6 Контроль устройства защитного покрытия, при котором контролируется:

- правильность приготовления материала;
- равномерность нанесения материала на поверхность СВА– визуально;
- толщина слоя материала – инструментально после твердения (с помощью острой части молотка делают скол и измеряют толщину с помощью щупа);
- отсутствие отслоений защитного слоя, бухтящих зон – инструментально (простукиванием молотком весом 100 г).

8.6 Приемочный контроль

8.6.1 Приемочный контроль законченного этапа работ включает в себя проверку соответствия полноты и результата их выполнения требованиям проектной документации по усилению или восстановлению.

8.6.2 Приемочный контроль законченного этапа работ осуществляет ответственный производитель работ с участием представителей заказчика и авторского надзора.

8.6.3 Приемочный контроль законченного этапа работ осуществляют после завершения всего комплекса работ по усилению или восстановлению.

8.6.4 При приемке законченного этапа работ:

- проверяется вся исполнительная документация;
- выполняется осмотр выполненных работ для определения отсутствия дефектов и повреждений элементов усиления.

8.6.5 По результатам выполнения п.8.6.4 представителем заказчика и авторского надзора с участием ответственного производителя работ составляется Заключение о соответствии номенклатуры, объема и качества выполненных работ требованиям проекта

или перечень необходимых доработок.

8.6.6 После исправления замечаний повторно выполняются требования п.8.6.4 и п. 8.6.5.

9 Безопасность труда и охрана окружающей среды

9.1 При выполнении работ необходимо выполнять требования по безопасности ГОСТ 12.0.004, ГОСТ 12.0.230, ГОСТ Р 12.0.009.

9.2 Компоненты адгезива, растворители, краски, используемые для устройства СВА, опасны как для здоровья персонала, так и для окружающей среды. В затвердевшем виде СВА опасности не представляет.

9.3 При обработке и подготовке поверхностей под наклейку следует использовать респираторы. Также респираторы необходимы при работе с композитными материалами для защиты органов дыхания. Необходимость использования респираторов диктуется тем, что при нарезании углеродных наполнителей и последующей работе с ними на поверхности может скапливаться тонкодисперсная углеродная пыль.

9.4 Готовый к использованию адгезив может вызвать раздражение кожи и слизистых, а также ожоги. Перед началом работы следует обработать руки и открытые участки кожи защитным кремом. Обязательно следует использовать спецодежду, а также резиновые перчатки и защитные очки. При попадании в глаза и на слизистые оболочки следует тщательно промыть пораженные места теплой водой и незамедлительно обратиться к врачу.

9.5 Обучение и инструктаж по безопасности труда должен носить непрерывный многоуровневый характер и проводиться на строительных площадках по ГОСТ 12.0.004.

9.6 Компоненты СВА ни при каких условиях не должны попадать в почву и водоемы. Все отходы производства в ходе работ и после их завершения должны быть утилизированы согласно рекомендациям поставщиков и изготовителей материалов.

10 Гарантии изготовителя и производителя работ

10.1 Изготовитель гарантирует соответствие системы внешнего армирования CarbonWrap® требованиям настоящего стандарта при соблюдении общих требований и правил устройства.

10.2 Гарантийный срок эксплуатации стальных конструкций, усиленных или восстановленных системой CarbonWrap®, в течение которого производитель работ обязан устранять обнаруженные потребителем дефекты, устанавливается договором на устройство настоящей системы.

10.3 Сроки эксплуатации усиленных конструкций во многом определяются качеством выполненных работ и условиями эксплуатации конструкций. Рекомендуется производить мониторинг состояния выполненного усиления или восстановления путем визуального контроля. В случае отсутствия видимых дефектов не менее одного раза в 5 лет следует производить плановое обследование усиленных или восстановленных конструкций на предмет установления целостности системы и надежности ее совместной работы с металлической конструкцией по специальной программе обследования

10.4 В случае обнаружения дефектов следует провести внеплановое обследование с установлением причин возникновения дефектов и установлением категории технического состояний усиленных (восстановленных) конструкций согласно СП 13-102-2003.

Приложение А
(справочное)
Примеры расчета

Растянутый элемент со сквозной поперечной трещиной

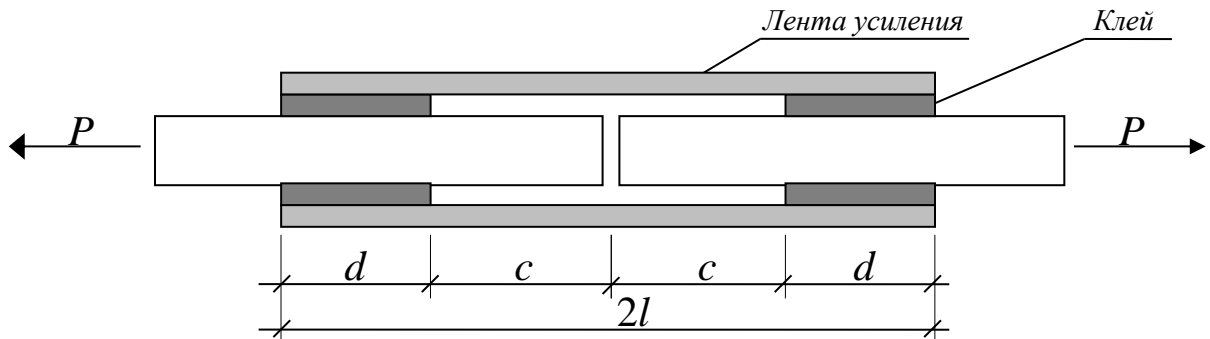


Рисунок П.А.1. Растянутый элемент без повреждений

Рассматривается симметричное армирование – без вторичных изгибающих моментов. Максимальная величина растягивающего усилия из условий прочности клеевого соединения определяется из уравнения:

$$P \leq [P] = \frac{b_p}{\beta} \cdot R_{as} \quad (\text{П.А.1})$$

$$\beta = \sqrt{\frac{G_a}{t_a} b_p \cdot \left(\frac{1}{E_s A_s} + \frac{1}{E_p A_p} \right)} \quad (\text{П.А.2})$$

R_{as} – расчетное сопротивление клея сдвигу (по табл. 5.4);

R_{ay} – расчетное сопротивление клея (предоставляется изготовителем);

E_s – модуль упругости материала балки (стали);

A_s – площадь сечения усиливаемого стержня;

E_p – модуль упругости усиливающего материала (предоставляется изготовителем);

A_p – суммарная площадь сечения лент;

G_a – модуль сдвига адгезионного слоя (предоставляется изготовителем);

t_a – толщина адгезионного слоя;

b_p – ширина ленты (лент).

Минимальная длина клеевого слоя равна:

$$d \geq d_{min} = \frac{1}{2\beta} \ln \frac{1+Y}{1-Y} \quad (\text{П.А.3})$$

$$Y \equiv \frac{b_p}{\beta} \cdot \frac{R_{as}}{P} \quad (\text{П.А.4})$$

Рациональная при заданном значении $P \leq [P]$ длина клеевого слоя (дальнейшее увеличение длины клеевого слоя не снижает максимальных касательных напряжений) может быть определена путем последовательных итераций с помощью выражения

$$\tau_{max} = P \cdot \frac{\beta}{b_p} \cdot \text{cth}(\beta d) \leq R_{as} \quad (\text{П.А.5})$$

Приближенно длину склейки можно принять равной $(3 \div 4)d_{min}$.

Пример 1

Исходные данные:

Соединение внахлестку – две стальных полосы -50x5мм обклеены симметрично с двух сторон полимерным композитом на основе углеродных лент в 2 слоя суммарной шириной 100 мм и толщиной 1.2 мм (рис. П1.1). Определить требуемую минимальную и рациональную длину адгезионного слоя.

Исходные данные:

Сталь:

b	t	A_s	E_s	$(AE)_s$
50	5	250	206000	51500000
мм	мм	мм ²	Мпа	Н

Лента:

b_p	t_p	A_p	E_p	$(AE)_p$
100	1.2	120	300000	36000000
мм		мм ²	Мпа	Н

Клей:

G_a	t_a	G_a / t_a	R_{as}
700	1	700	15
МПа	мм		МПа

По формуле (П1.2) определяется $\beta = 0.057478$.

По формуле (П1.1) определяется $[P] = 26097$ Н.

Принимается $P = 25000$ Н

По формуле (П1.4) определяется $Y = 0.958$

По формуле (П1.3) определяется $d_{min} = 33$ мм

По формуле (П1.5) при $d = 33$ мм определяется $\tau_{max} = 15.031$ мм

при $d = 50$ мм определяется $\tau_{max} = 14.461$ мм

при $d = 100$ мм определяется $\tau_{max} = 14.370$ мм

при $d = 150$ мм определяется $\tau_{max} = 14.369$ мм

при $d = 200$ мм определяется $\tau_{max} = 14.369$ мм

Таким образом, при заданных параметрах клеевого соединения определено допустимое приложенное растягивающее усилие, минимально необходимая длина участка приклеивания и длина участка приклеивания (≈ 125 мм), обеспечивающая минимум максимального касательного напряжения в сдвиговом слое, возможный для принятой нагрузки.

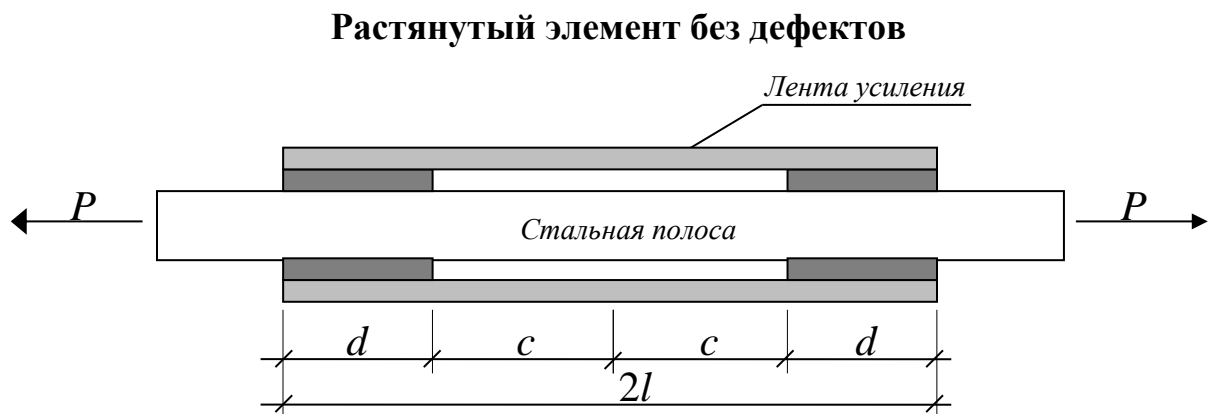


Рисунок П.1.2. Растянутый элемент без повреждений. P – дополнительная растягивающая нагрузка после выполнения усиления

Рассматривается симметричное армирование – без вторичных изгибающих моментов. Максимальная величина дополнительной растягивающей силы P из условий прочности клеевого соединения равна:

$$P \leq [P] = R_{as} \cdot \beta \cdot \frac{t_a}{G_a} \cdot (AE)_s \quad (\text{П.А.6})$$

$$(AE)_s = A_s E_s$$

Минимальная длина клеевого слоя равна:

$$d \geq d_{min} = \frac{1}{2\beta} \ln \frac{1+Y}{1-Y} \quad (\text{П.А.7})$$

$$Y = \frac{c \cdot \beta - R_0}{R_0 \cdot c \cdot \beta - 1} \quad (\text{П.А.8})$$

$$R_0 = \frac{1}{P} \cdot R_{as} \cdot \beta \cdot \frac{t_a}{G_a} \cdot (AE)_s \quad (\text{П.А.9})$$

Распределение приложенной дополнительной силы P между лентой усиления (N_{pd}) и усиливаемым стальным элементом (N_{sd}) на свободном участке между зонами склеивания определяется выражениями:

$$N_{pd} = P \cdot \frac{G_a}{t_a} \cdot \frac{1}{(AE)_s} \cdot \frac{b_p}{\beta^2} \cdot \left(\frac{(th(\beta d) + c \cdot \beta)}{(c \cdot \beta \cdot th(\beta d) + 1)} \cdot sh(\beta d) - ch(\beta d) + 1 \right) \quad (\text{П.А.10})$$

Или достаточно точно

$$N_{pd} = P \cdot \frac{G_a}{t_a} \cdot \frac{1}{(AE)_s} \cdot \frac{b_p}{\beta^2} \cdot (sh(\beta d) - ch(\beta d) + 1)$$

$$N_{sd} = P - N_{pd} \quad (\text{П.А.10})$$

Рациональная при заданном значении $P \leq [P]$ длина клеевого слоя (дальнейшее увеличение длины не дает увеличения усилия в элементе усиления) может быть определена путем последовательных итераций с помощью приведенного выражения.

Практически можно принять $(3 \div 4)d_{\min}$ и более.

Пример 2

Исходные данные:

Растягиваемая стальная полоса на участке, требующем усиления, сечением - 50x5мм, обклеена симметрично с двух сторон композитом на основе углеродных лент в 2 слоя, суммарной шириной 100 мм и толщиной 1.2 мм (рис. П1.1). Требуется при заданных параметрах композита и адгезива определить, какое максимальное дополнительное растягивающее усилие может быть приложено и какой длиной участка приклеивания можно ограничиться.

Сталь						Лента				
b	h	A	E	$(AE)_s$	R_y	b	h	A	E	$(AE)_p$
50	5	250	206000	51500000	230	100	1.4	140	300000	42000000
мм	мм	мм ²	МПа	Н	МПа	мм		мм ²	МПа	Н
Клей										

G_a	t_a	G_a / t_a	R_{as}
700	1	700	14
МПа	мм		МПа
Длина участка усиления принята		$2 l = 2000$ мм	
По формуле (П1.2) определяется		$\beta = 0.055008$	
По формуле (П1.6) определяется		$[P] = 56658$ Н.	
Принимается		$P = 50000$ Н	
По формуле (П1.9) определяется		$R_0 = 1.1332$	
По формуле (П1.8) определяется		$Y = 0.880$	
По формуле (П1.7) определяется		$d_{\min} = 25$ мм	

При этом приложенное дополнительное усилие P в стальной полосе и в ленте усиления распределяются следующим образом:

Таблица П.А.1

Рациональный выбор длины адгезионного слоя

Длина клея, мм	Усилие в ленте, Н	Усилие в стальной полосе, Н	Приложенное дополни- тельное усилие, Н
d	N_{pd}	N_{sd}	P
25	22349	27651	50000
50	22433	27567	50000
100	22458	27542	50000
128	22460	27540	50000
150	22460	27540	50000
200	22460	27540	50000
250	22460	27540	50000

Из результатов, представленных в табл. П1.1 следует, что, начиная с длины 128 мм при дальнейшем увеличении длины адгезионного слоя доля дополнительного усилия в стальном элементе не снижается. Далее следует проверить напряжение в лентах усиления и полное напряжение (начальное на момент усиления плюс дополнительное) в стальной полосе.

Растянутый элемент без дефектов с учётом возможных изменений температуры и начальных напряжений

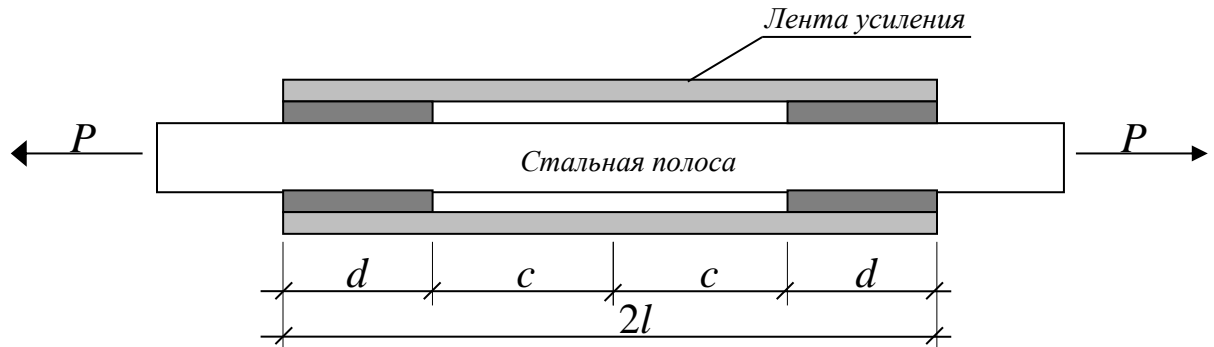


Рисунок П.А.3. Растянутый элемент без повреждений. P – дополнительная растягивающая нагрузка после выполнения усиления

Рассматривается симметричное армирование – без вторичных изгибающих моментов. Максимальная допустимая величина дополнительной приложенной растягивающей силы P из условий прочности клеевого соединения на сдвиг в начале и в конце участка склеивания и обеспечения прочности стали и углекомпозиата.

Максимальная допустимая величина дополнительной приложенной растягивающей силы P из условий прочности клеевого соединения на сдвиг в начале участка склеивания $\tau(x = 0) \leq R_{as}$ может быть определена из выражения

$$P \leq [P] = R_{as} \cdot \beta \cdot \frac{t_a}{G_a} \cdot (AE)_s + R \cdot (AE)_s \quad (\text{П.А.11})$$

$$(AE)_s = A_s E_s$$

$$R = -(\alpha_p \cdot \Delta T_p - \alpha_s \cdot \Delta T_s) + \left(\frac{F_p}{(AE)_p} - \frac{2 \cdot F_s}{(AE)_s} \right) \quad (\text{П.А.12})$$

Далее необходимо контролировать величину касательных напряжений в адгезиве в конце участка склеивания

$$\tau(x = d) = \frac{1}{\beta} \cdot \frac{G_a}{t_a} \cdot \left(\frac{P}{(AE)_s} \cdot A1 + R \cdot (A2 - A1) \right) \leq R_{as} \quad (\text{П.А.13})$$

$$A1 = ch(\beta d) - sh(\beta d)$$

$$A2 = \frac{\beta \cdot c}{(\beta \cdot c \cdot th(\beta d) + 1)}$$

α_p и α_s – коэффициенты температурного расширения лент усиления и стального элемента соответственно

ΔT_p и ΔT_s – изменение температуры после устройства усиления в лентах усиления и в стальном элементе соответственно

F_p и F_s – усилия натяжения лент усиления и стального элемента соответственно до устройства усиления

P – дополнительное растягивающее усилие, прикладываемое после выполнения усиления. Суммарное приложенное усилие составит $(F_s + P)$.

Остальные параметры рассмотрены в предыдущих примерах.

Коэффициенты линейного расширения принимаются:

вдоль волокна $\alpha_p = (-1-0) \cdot 10^{-6}$,

в поперечном направлении $\alpha_p = (22-55) \cdot 10^{-6}$ (по ГОСТ 15173) для элементов усиления на основе углеродного волокна и $\alpha_s = 12 \cdot 10^{-6}$ для стального усиливаемого элемента (по СП 16.13330.2011).

Минимальная длина клеевого слоя d_{\min} может быть подобрана из условия удовлетворения условия прочности клея на срез при $x = 0$ и $x = d$

$$\tau(x = 0) \leq R_{as} \quad \text{и} \quad \tau(x = d) \leq R_{as} \quad (\text{П.А.14})$$

Приближённо можно принять:

$$\tau(0) = \frac{1}{\beta} \cdot \frac{G_a}{t_a} \cdot \left(\frac{P}{(AE)_s} - R \cdot \left(\frac{A2}{ch(\beta d)} - 1 \right) \right) \quad (\text{П.А.15})$$

Распределение приложенной дополнительной силы P между лентой усиления (N_{pd}) и усиливаемым стальным элементом (N_{sd}) на свободном участке между зонами склеивания определяется выражениями (П1.14) - (П1.15):

$$N_{pd} = \frac{b_p}{\beta^2} \cdot \frac{G_a}{t_a} \cdot \left(\frac{P}{E_s A_s} - R \right) \cdot (1 - ch(\beta d)) + B \cdot \frac{b_p}{\beta} \cdot sh(\beta d) \quad (\text{П.А.16})$$

где с достаточной точностью можно принять:

$$B = \frac{P}{(AE)_s} \cdot \frac{1}{\beta} \cdot \frac{G_a}{t_a} - R \cdot \frac{1}{\beta} \cdot \frac{G_a}{t_a} \cdot \left(\frac{A2}{ch(\beta d)} - 1 \right)$$

$$\text{и} \quad N_{sd} = P + F_s - N_{pd} \quad (\text{П.А.17})$$

Рациональная при заданном значении $P \leq [P]$ длина клеевого слоя (дальнейшее увеличение длины не дает увеличения усилия в элементе усиления) может быть определена путем последовательных итераций с помощью приведенных выражений (П.А.16) - (П1.17).

Также необходимо контролировать напряжения в усиливаемом стальном элементе и в элементах усиления (N_{pd}/A_p и N_{sd}/A_s соответственно).

Пример 3.

Исходные данные:

Растягиваемая стальная полоса на участке, требующем усиления, сечением - 50x5мм, обклеена симметрично с двух сторон композитом на основе углеродных лент в 2 слоя, суммарной шириной 100 мм и толщиной 1.2 мм (рис. П1.1). Требуется определить, какое дополнительное растягивающее усилие может быть приложено при заданных параметрах композита и клея и приемлемую длину участка приклеивания.

Исходные данные:

Сталь

b	h	A	E	$(AE)_s$	R_y	σ_s	F_s	α_s	ΔT_s
50	5	250	206000	51500000	230	75	18750	1.20E-05	30
<i>мм</i>	<i>мм</i>	<i>мм²</i>	<i>МПа</i>	<i>Н</i>	<i>МПа</i>	<i>МПа</i>	<i>Н</i>		<i>°С</i>

Лента

b	h	A	E	$(AE)_p$	R_y	σ_p	F_p	α_p	ΔT_p
100	1.4	140	300000	42000000	2000	0	0	-1.00E-06	30
<i>мм</i>		<i>мм²</i>	<i>МПа</i>	<i>Н</i>	<i>МПа</i>	<i>МПа</i>	<i>Н</i>		<i>°С</i>

Клей

G_a	t_a	G_a / t_a	R_{as}
700	1	700	14
<i>МПа</i>	<i>мм</i>		<i>МПа</i>

По формуле (П1.2) определяется

$$\beta = 0.0550081$$

По формуле (П1.12) определяется

$$R = 0.0003382$$

По формуле (П1.11) определяется

$$[P] = 74075 \text{ Н}$$

Принимается

$$P = 70000 \text{ Н}$$

С помощью формул (П.А.13 - 15) путем перебора значений d определяется его минимальное значение, при котором удовлетворяются условия прочности адгезионного слоя $[d] = 44 \text{ мм}$.

При этом распределение касательных напряжений по длине адгезионного слоя имеет представленный на рис. П.А.4 вид.

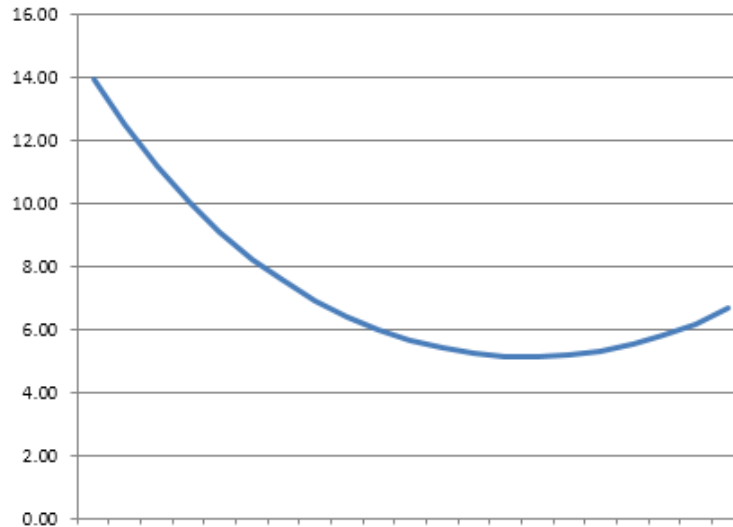


Рисунок П.А.4. Распределение касательных напряжений в адгезионном слое

Как видно из рис. П.А.4, требование прочности на срез для адгезионного слоя выполняется.

Далее по формулам (П1.16) - (П1.17) определяется:

$$N_{pd} = 31369 \text{ Н} \quad \sigma_p = 224 \text{ МПа} < R_y = 2000 \text{ МПа}$$

$$N_{sd} = 57381 \text{ Н} \quad \sigma_s = 230 \text{ МПа} < R_y = 230 \text{ МПа}$$

Таким образом, при заданном начальном напряжении в стальном элементе и повышении температуры на $+30^\circ\text{C}$ максимальное дополнительное приложенное растягивающее усилие составляет $\approx 5.738 - 1.875 = 3.863 \text{ т}$ и доминирующим критерием является прочность не адгезионного слоя, а стального элемента. Стальной элемент может переходить в пластическую стадию работы. При этом прочность системы в целом обеспечивается за счет перераспределения усилия на элемент усиления, имеющий большой запас прочности.

Например, при дополнительном нагружении $P = 74000$ Н следуют результаты:

$[d] = 112$ мм и

$$N_{pd} = 33191 \text{ Н} \quad \sigma_p = 237 \text{ МПа} < R_y = 2000 \text{ МПа}$$

$$N_{sd} = 59559 \text{ Н} \quad \sigma_s = 238 \text{ МПа} > R_y = 230 \text{ МПа}$$

Доминирующим фактором является прочность стального элемента.

При понижении температуры на -30°C максимально допустимой величиной дополнительного приложенного растягивающего усилия является $[P] \approx 7.00$ т и доминирующим критерием является прочность стального элемента.

$$N_{pd} = 31291 \text{ Н} \quad \sigma_p = 224 \text{ МПа} < R_y = 2000 \text{ МПа}$$

$$N_{sd} = 57459 \text{ Н} \quad \sigma_s = 230 \text{ МПа} < R_y = 230 \text{ МПа}$$

При этом в адгезионном слое при его длине $d = [d] = 112$ мм касательные напряжения распределяются согласно рис. П.1.5.

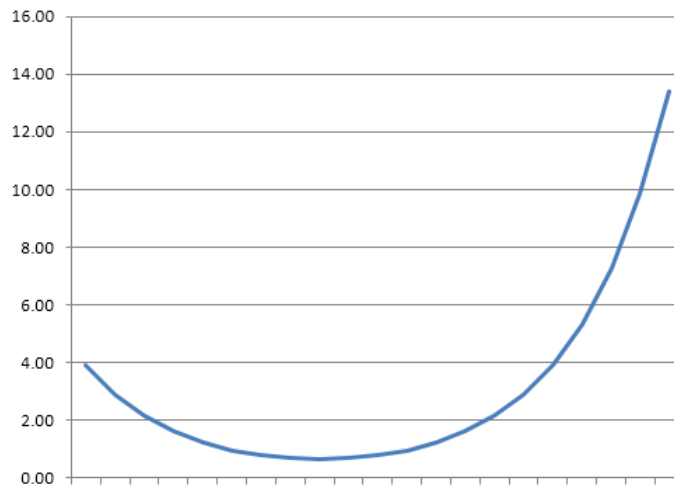


Рисунок П.А.5. Распределение касательных напряжений в адгезионном слое

Максимальное усилие в стальном элементе без усиления составляет:

$$50 \times 5 \times 230 = 57500 \text{ Н} \approx 5.53 \text{ т.}$$

Примеры расчета по инженерной методике

В таблице П.А.2 выполнен расчёт усиленного растянутого элемента по методике раздела 6.

Рассмотрим пластину сечением 50×5 мм из стали С245, расчётное сопротивление 23.5 кН/см^2 . Пластина растянута усилием 100 кН . Несущая способность при упругой работе материала пластины: $N = 23.5 \cdot 5 \cdot 0.5 = 58,75 \text{ кН}$. Таким образом, стальная пластина не способна нести расчетную нагрузку 100 кН .

Пластина усиливается с обеих сторон ламелями на основе углеродного волокна шириной 50 мм и толщиной 1.4 мм с модулем упругости 300000 МПа , прочность на растяжение $R_{f,n} = 150 \text{ кН/см}^2$. Толщина клеевого слоя – 0.5 мм .

Таблица П.А.2

Расчёт усиленного растянутого элемента

Параметр	Величина
N, кН	100,00
Перепад температуры dT, град.	0
Стальной элемент	
Ширина элемента, см	5,0
Толщина элемента, см	0,5
Площадь A_s , см ²	2,50
R_y , кН/см ²	23,50
Модуль упругости E_s , кН/см ²	20600,00
Коэфф.линейного расширения α_s , град.-1	0,000012
Прочность стального элемента без усиления, кН	58,75
Углепластик	
Ширина элемента, см	5,0
Толщина элемента, см	0,1400
Число элементов	2
Площадь A_f , см ²	1,400
$R_{f,n}$, кН/см ²	150,00
Модуль упругости E_f , кН/см ²	30000,00
Коэфф.линейного расширения α_f , град.-1	-0,000010
Коэффициент γ_f	1,20
Коэффициент γ_{f1}	0,95
Коэффициент γ_{f3}	0,80
R_f , кН/см ²	95,00
Прочность углепластикового элемента, кН	133,00
Результаты расчёта усиленного элемента	
Проверка прочности стального элемента (ф.6.2.1)	0,938
Проверка прочности углепластика (ф.6.2.2)	0,356

На основании проведённого расчёта прочность стального элемента и усиления обеспечены.

Приложение Б
(справочное)
Примеры расчета

Изгибаемые элементы

В таблице П.Б.1 выполнен расчёт в соответствии с положениями раздела 6 усиления изгибаемого элемента в упругой стадии работы стали. В таблице П.Б.2 - расчёт балки в пластической стадии работы.

Рассмотрим шарнирно опёртую балку пролётом 1 м. Балка выполнена из прокатного двутавра №10. Сталь С245, расчётное сопротивление 23.5 кН/см^2 . Балка загружена посередине сосредоточенной силой. Несущая способность при упругой работе материала балки: $M = 23.5 \cdot 39.7 = 932.95 \text{ кН}\cdot\text{см}$. Соответствующее значение сосредоточенной силы: $F = 932.95 \cdot 4 / 100 = 37.32 \text{ кН}$. При выполнении усиления на балку действует сосредоточенная сила 20 кН, что соответствует моменту $M_0 = 20 \cdot 100 / 4 = 500.00 \text{ кН}\cdot\text{см}$.

Балка усиливается со стороны растянутой части сечения ламелью (ламинатом) на основе углеродного волокна шириной 50 мм и толщиной 1.4 мм с модулем упругости 300000 МПа, прочность на растяжение $R_{f,n}=150 \text{ кН/см}^2$. Толщина клеевого слоя – 0.5 мм.

Исходные данные для расчёта усиленного изгибаемого элемента в упругой стадии работы

Параметр	Величина
Mo, кН см	500.00
M1, кН см	494.00
Mo+M1, кН см	994.00
Стальной элемент	
Высота профиля, см	10.0
Площадь сечения, см ²	12.0
Момент сопротивления, см ³	39.70
Момент инерции, см ⁴	198.00
Модуль упругости Es, кН/см ²	20600.00
Ry, кН/см ²	23.50
Несущая способность стального элемента без усиления, кН см	932.95
Углепластик	
Ширина элемента, см	5.0
Толщина элемента, см	0.1400
Площадь Af, см ²	0.700
Rfn, кН/см ²	150.00
Модуль упругости Ef, кН/см ²	30000.00
Коэффициент γ_f	1.20
Коэффициент γ_{f1}	0.95
Коэффициент γ_{f2}	0.90
Rf, кН/см ²	106.88
Результаты расчёта усиленного элемента	
Координата ц.т. усиленного сечения отн. центра балки, см	0.397
Момент инерции усиленного сечения, см ⁴	215.177
Момент сопротивления верха усиленного сечения, см ⁴	39.870
Момент сопротивления низа усиленного сечения, см ⁴	45.367
Напр. σ_0 в верхней полке стальной балки от Mo, кН/см ²	12.59
Напр. σ_1 в верхней полке усиленного сечения от M1, кН/см ²	10.89

При расчёте в упругой стадии (балка относится к 1 группе конструкций):

По формуле 6.2.3 определяются напряжения в стальной балке: 23.48 кН/см². Разделив напряжения в стали на расчётное сопротивление и коэффициент условия работы $(\sigma_0 + \sigma_1) / (R_y \gamma_c)$ получим коэффициент использования стального сечения: 1.00. По формуле 6.2.4 определяем напряжения в углепластике: 15.86 кН/см². Коэффициент использования углепластика σ_{1f} / R_f равен 0.15.

На основании проведённых расчётов несущая способность балки в упругой стадии работы после усиления возрастает на 6.5%.

Исходные данные для расчёта балки с учётом развития пластических деформаций представлены в таблице П.Б.2.

Таблица П.Б.2

Исходные данные для расчёта усиленного изгибаемого элемента в пластической стадии работы

Параметр	Величина
Мо, кН см	500.00
М, кН см	1220.00
Стальной элемент	
Высота профиля, см	10.0
Площадь сечения, см ²	12.0
Толщина стенки, см	0.45
Толщина полки, см	0.72
Ширина полки, см	5.5
Площадь полки, см ²	3.96
Момент сопротивления, см ³	39.70
Момент инерции, см ⁴	198.00
Модуль упругости Es, кН/см ²	20600.00
Напряжения σ_{os} , кН/см ²	12.59
Ry, кН/см ²	23.50
Уровень начального нагружения β_0	0.536
Несущая способность стального элемента без усиления, кН см	932.95
Углепластик	
Ширина элемента, см	5.0
Толщина элемента, см	0.1400
Площадь Af, см ²	0.700
Rfn, кН/см ²	150.00
Модуль упругости Ef, кН/см ²	30000.00
Коэффициент γ_f	1.20
Коэффициент γ_{f1}	0.95
Коэффициент γ_{f2}	0.90
Коэффициент γ_{f3}	0.80
Rf, кН/см ²	85.50
Координата u_f , см	5.14
Результаты расчёта усиленного элемента	
α_R	3.64
Площадь сжатой части сечения As, см ²	7.27
Площадь растянутой части сечения At, см ²	4.73
Площадь стенки в сжатой части сечения, см ²	3.31
Площадь стенки в растянутой части сечения, см ²	0.77
Δt , см	3.083
Координата ц.т.сжатой части сечения отн.ц.т.балки ус, см	2.799
Координата ц.т.растянутой части сечения отн.ц.т.балки ут, см	4.526

По формуле 6.3.6 определяются коэффициент $c_{\tau} : 1.00$.

По формуле 6.3.7 определяется несущая способность усиленной балки в пластической стадии работы $[M]: 1224.27 \text{ кН}\cdot\text{см}$. При расчёте $[M]$ использованы требования формулы 6.2.10 для определения γ_M равного 0.95. Из формулы 6.3.7 определяется коэффициент использования $1220/(1224.27 \times 1 \times 1) = 0.997$.

Таким образом, в пластической стадии работы усиление ведёт к росту несущей способности балки на 31%.

Приложение В

Основные буквенные обозначения

Усилия от внешних нагрузок и воздействий в поперечном сечении элемента

M – изгибающий момент;

N — продольная сила;

Q — поперечная сила.

Характеристики материалов усиления

$R_{b,n}$ — нормативное сопротивление осевому сжатию;

$R_b, R_{b,ser}$ — расчетное сопротивление осевому сжатию для предельных состояний соответственно первой и второй групп;

$R_{bt,n}$ — нормативное сопротивление осевому растяжению;

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

$E_{f,n}, E_f$ — нормативное и расчетное значение модуля упругости композитного материала;

$R_{f,n}, R_f$ — нормативное и расчетное сопротивление растяжению композитного материала;

R_{fw} — расчетное значение сопротивления композитного материала растяжению при расчете прочности сечений, наклонных к продольной оси элемента;

$\varepsilon_{f,ult}$ — расчетное значение предельных относительных деформаций композитного материала при растяжении.

Геометрические характеристики

b — ширина прямоугольного сечения; ширина ребра таврового и двутаврового сечений;

b_f, b'_f — ширина полки таврового и двутаврового сечений соответственно в растянутой и сжатой зонах;

h — высота прямоугольного, таврового и двутаврового сечений;

h_f, h'_f — высота полки таврового и двутаврового сечений соответственно в растянутой и сжатой зонах;

h_0, h'_0 — рабочая высота сечения, равная, соответственно, $h-a$ и $h-a'$;

s_w — расстояние между хомутами, измеренное по длине элемента;

e_0 — эксцентриситет продольной силы N относительно центра тяжести приведенного сечения, определяемый с учетом указаний 4.2.6;

A — площадь в поперечном сечении;

A_b — площадь сечения сжатой зоны;

A_{bt} — площадь сечения растянутой зоны;

A_{red} — площадь приведенного сечения элемента;

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

A_f — площадь сечения продольной арматуры из композитного материала;

A_{fw} — площадь сечения поперечного хомута из композитного материала;

W — момент сопротивления сечения элемента для крайнего растянутого волокна;

h_{fw} — высота наклейки поперечного хомута из композитного материала.

Библиография

- [1] ТУ 1916-041-38276489-2017 Углеродные однонаправленные ленты для системы внешнего армирования.
- [2] ТУ 1916-042-38276489-2017. Углеродные двунаправленные ткани для системы внешнего армирования.
- [3] ТУ 1916-043-38276489-2017. Углеродные сетки для системы внешнего армирования.
- [4] ТУ 1916-066-38276489-2017. Углеродные мультиаксиальные ткани.
- [5] ТУ 2257-046-38276489-2017. Эпоксидное двухкомпонентное связующее CarbonWrap® Resin 230 для пропитки систем внешнего армирования.
- [6] ТУ 2257-047-38276489-2017. Эпоксидное двухкомпонентное связующее CarbonWrap® Resin 230+ для пропитки систем внешнего армирования.
- [7] ТУ 2257-048-38276489-2017. Эпоксидное двухкомпонентное связующее CarbonWrap® Resin 530+ для пропитки систем внешнего армирования.
- [8] ТУ 2252-051-38276489-2017. Клей эпоксидный двухкомпонентный CarbonWrap® Resin Laminate+ для систем внешнего армирования.
- [9] ТУ 2256-044-38276489-2017. Углепластиковые ламели CarbonWrap® Lamel.
- [10] ТУ 1916-045-38276489-2017. Углеродные анкерные жгуты CarbonWrap® Anchor.
- [11] ТУ 2257-049-38276489-2017. Эпоксидное двухкомпонентное связующее CarbonWrap® Resin WS+ для пропитки систем внешнего армирования.
- [12] ТУ 2257-050-38276489-2017. Эпоксидное двухкомпонентное связующее CarbonWrap® Resin HT+ для пропитки систем внешнего армирования.
- [13] ТУ 2312-069-38276489-2017. Эпоксидная двухкомпонентная шпатлевка CarbonWrap® Putty.