

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

СТАНДАРТ ОРГАНИЗАЦИИ

СТО 38276489.001-2017

**УСИЛЕНИЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ 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 акционерным обществом «Научно-исследовательский центр «Строительство» (Научно-исследовательским, проектно-конструкторским и технологическим институтом бетона и железобетона имени А.А. Гвоздева). Настоящий стандарт организации разработан авторским коллективом лаборатории №1 НИИЖБ им. А.А. Гвоздева АО «НИЦ «Строительство» (руководитель работы – к.т.н., С.А. Зенин, инж. О.В. Кудинов, инж. О.И. Попова), ООО «Нанотехнологический центр композитов» (к.т.н. П.В. Осипов, к.т.н. О.А. Симаков).

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

© НИИЖБ им. А.А.Гвоздева, 2017

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

## Содержание

|  |    |
|--|----|
| Предисловие.....   | 2  |
| 1 Область применения .....   | 5  |
| 2 Нормативные ссылки .....   | 6  |
| 3 Термины, определения, обозначения и сокращения .....   | 8  |
| 4 Общие требования.....  | 13 |
| 5 Материалы .....  | 15 |
| 6 Расчет железобетонных конструкций, усиленных СВА CarbonWrap® .....                           | 18 |
| 6.1. Основные расчетные положения .....  | 18 |
| 6.2. Расчет по предельным состояниям первой группы .....                                       | 19 |
| 6.2.1 Общие положения .....  | 19 |
| 6.2.2. Расчет изгибаемых элементов .....   | 21 |
| 6.2.3. Расчет сжатых и внецентренно сжатых элементов .....                                     | 25 |
| 6.2.4. Расчет по прочности центрально и внецентренно растянутых элементов .....                | 29 |
| 6.2.5. Расчет по прочности нормальных сечений на основе нелинейной деформационной модели ..... | 32 |
| 6.2.6. Расчет по прочности сечений, наклонных к продольной оси изгибаемого элемента.....       | 40 |
| 6.3. Расчет по предельным состояниям второй группы .....                                       | 45 |
| 6.3.1. Расчет по образованию трещин .....  | 45 |
| 6.3.2. Расчет по раскрытию трещин.....   | 48 |
| 6.3.3. Расчет железобетонных элементов по деформациям .....                                    | 52 |
| 7. Конструктивные требования к системам внешнего армирования.....                              | 57 |
| 7.1. Общие требования .....  | 57 |
| 7.2. Требования к проектированию анкерных жгутов .....   | 66 |
| 7.3. Требования к проектированию углеродных сеток на полимер-цементном составе                 | 69 |

|     |   |     |
|-----|---|-----|
| 8.  | Технология производства работ по усилению железобетонных конструкций полимерными композитными материалами ..... | 70  |
| 9.  | Контроль качества производства работ .....  | 89  |
| 9.1 | Общие положения .....   | 89  |
| 9.2 | Оценка состояния железобетонных конструкций .....   | 90  |
| 9.3 | Входной контроль .....  | 90  |
| 9.4 | Контроль соблюдения правил складирования и хранения .....   | 91  |
| 9.5 | Операционный контроль .....   | 92  |
| 9.6 | Приемочный контроль .....   | 96  |
| 10  | Безопасность труда и охрана окружающей среды .....  | 97  |
| 11  | Гарантии изготовителя и производителя работ .....   | 98  |
|     | Приложение А.....   | 100 |
|     | Библиография.....   | 124 |

**СТАНДАРТ ОРГАНИЗАЦИИ**

---

**УСИЛЕНИЕ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ 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) железобетонных (бетонных) конструкций зданий и сооружений различного функционального назначения путем устройства системы внешнего армирования композитными материалами из термореактивных адгезивов, армированных углеродными волокнами.

1.2 Система внешнего армирования предназначена для повышения и/или восстановления несущей способности, трещиностойкости и жесткости строительных конструкций, работающих на изгиб, кручение, центральное и внецентренное сжатие, а также в условиях воздействия взрывных и сейсмических нагрузок.

1.3 Стандарт устанавливает общие требования к проведению работ, требования к оборудованию, приспособлениям, инструменту и материалам, используемым в технологическом процессе, последовательность выполнения отдельных технологических операций, включая приемы выполнения отдельных видов работ, 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 ремонт, усиление, восстановление и реконструкцию железобетонных и бетонных конструкций различного назначения системами внешнего армирования из полимерных композитов CarbonWrap®.

## 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 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 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 166-89 Штангенциркули. Технические условия.

ГОСТ 427-75 Линейки измерительные металлические. Технические условия.

ГОСТ 2789-73 Шероховатость поверхности. Параметры и характеристики

ГОСТ 7502-98 Рулетки измерительные металлические. Технические условия.

ГОСТ 8736-2014 Песок для строительных работ.

ГОСТ 17624-87 Бетоны. Определение прочности ультразвуковым методом неразрушающего контроля.

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

ГОСТ 22690-88 Бетоны. Определение прочности механическими методами неразрушающего контроля.

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

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

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

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

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

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

СП 63.13330.2012 Свод правил. Бетонные и железобетонные конструкции. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 52-01-2003.

СП 164.1325800.2014 Свод правил. Усиление железобетонных конструкций композитными материалами.

**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, а также следующие термины с соответствующими определениями:

**3.1 анкерный жгут:** Изделие заводского изготовления, состоящее из углеродных волокон и вырабатываемое методом вязального плетения.

**3.2 усиление железобетонной (бетонной) конструкции:** комплекс конструктивных мероприятий и технологических работ, направленных на повышение несущей способности и эксплуатационной пригодности конструкции при увеличении действующих на нее нагрузок по сравнению с проектными значениями.

**3.3 восстановление (ремонт) железобетонной (бетонной) конструкции:** комплекс конструктивных мероприятий и технологических работ, направленных на восстановление несущей способности и эксплуатационных свойств конструкции, нарушенных вследствие дефектов изготовления или в процессе ее эксплуатации, до их проектных значений.

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

**3.5 система внешнего армирования из полимерных композитов:** система, состоящая из клеевого слоя, образованного отвержденным терморезактивным 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.

**3.6 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».

**3.7 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 железобетонной (бетонной) конструкции.

**3.8 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 и нетканых материалов) на основание железобетонной (бетонной) конструкции.

**3.9 праймер:** материал, применяемый для предварительной подготовки поверхности железобетонной (бетонной) конструкции перед нанесением адгезива.

**3.10 основание железобетонной (бетонной) конструкции (основание):** поверхность железобетонной (бетонной) 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.

**3.11 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.

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

**3.13 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.

**3.14 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.

**3.15 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.

**3.16 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).

**3.17 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.

**3.18 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.

**3.19 мокрый способ усиления:** способ монтажа элементов усиления из углеродных лент, тканей и сеток, при котором их пропитка (адгезивом) осуществляется ручным или механизированным способом до начала монтажа.

В Стандарте применены следующие сокращения:

- НДС – напряжённо-деформированное состояние;
- СВА – система внешнего армирования из композитных материалов на основе углеродных волокон;
- СТО – стандарт организации;
- ТУ – технические условия;
- ППР – проект производства работ.

### **Условные обозначения**

Основные условные обозначения характеристик СВА CarbonWrap®:

Усилия от внешних нагрузок

|       |   |  |
|-------|---|--|
| $M_f$ | – | изгибающий момент в усиливающем элементе |
| $N_f$ | – | продольная сила в усиливающем элементе   |
| $Q_f$ | – | поперечная сила в усиливающем элементе   |

#### Прочностные и деформационные характеристики

|                       |   |   |
|-----------------------|---|---|
| $R_{f,n}$             | – | нормативное сопротивление растяжению усиливающего элемента                                  |
| $R_f$                 | – | расчетное сопротивление растяжению усиливающего элемента                                    |
| $\varepsilon_f$       | – | относительные деформации усиливающего элемента при растяжении                               |
| $\varepsilon_{fe}$    | – | расчетное значение относительных деформаций усиливающего элемента при растяжении            |
| $\varepsilon_{f,ult}$ | – | расчетное значение предельных относительных деформаций усиливающего элемента при растяжении |
| $E_f$                 | – | модуль упругости усиливающего элемента  |
| $\sigma_f$            | – | расчетное значение осевых напряжений в усиливающем элементе при растяжении                  |

#### Геометрические характеристики

|          |   |   |
|----------|---|---|
| $t_f$    | – | толщина одного слоя углеродных волокон усиливающего элемента (для ламелей – толщина композитного изделия) |
| $b_f$    | – | ширина усиливающего элемента  |
| $d_f$    | – | высота усиливающего элемента по боковой грани конструкции   |
| $A_f$    | – | площадь поперечного сечения усиливающего элемента   |
| $A_{fw}$ | – | площадь поперечного сечения усиливающего элемента, пересекающего наклонное сечение                        |
| $I_f$    | – | момент инерции усиливающих элементов  |
| $S_f$    | – | статический момент инерции усиливающих элементов  |

$L_f$  – эффективная длина анкеровки усиливающего элемента

#### 4 Общие требования

4.1 Устройство системы внешнего армирования (далее – СВА) производится по специально разработанному проекту усиления конструкции при соответствующем расчетном обосновании и соблюдении технологии производства работ с учетом требований настоящего стандарта.

4.2 Работы по проектированию и устройству внешнего армирования бетонных и железобетонных конструкций должны выполняться в соответствии с проектной и технологической документацией специализированными организациями с учетом требований настоящего стандарта. Отступления от проектной и технологической документации допускаются только с согласия авторского надзора, о чем делается запись в журнале работ.

4.3 При восстановлении или усилении строительных конструкций СВА должно быть обеспечено включение в работу элементов усиления и их совместная работа со строительной конструкцией.

4.4 В качестве элементов внешнего армирования строительных конструкций применяются армирующие материалы на основе углеродных волокон:

- однонаправленные – ленты, ламинаты и анкерные жгуты;
- двунаправленные – сетки и ткани;
- мультиаксиальные – сетки и ткани.

4.5 Характеристики применяемых материалов для усиления (геометрия, механические характеристики и пр.) должны отвечать требованиям действующих нормативов и п. 5.2.2 настоящего стандарта.

4.6 Технологическая операция наклейки усиливающих элементов должна выполняться при температуре окружающей среды указанной производителем адгезива для элементов СВА.

4.7 При выполнении работ по усилению при температурах ниже заявленных производителем, рекомендуется использование специальных клеевых составов или устройство теплового контура.

4.8 Не допускается попадание осадков и загрязнений на зону наклейки во время нанесения и отверждения адгезива и связующего.

4.9 Перед наклейкой усиливающих элементов следует контролировать температуру и относительную влажность окружающей среды, а также температуру поверхности бетона и его влажность для определения точки росы.

4.10 Температура и влажность основания, подготовленного под наклейку усиливающих элементов, температурно-влажностный режим работ по устройству внешнего армирования принимается согласно п.8.1.5 настоящего стандарта.

4.11 Максимальная эксплуатационная температура работы без защитных (теплоизоляционных) покрытий не должна превышать температуру стеклования полимерной матрицы адгезива.

4.12 В конструкциях и их элементах, подверженных в процессе их эксплуатации воздействию агрессивных сред, необходимо дополнительно предусматривать защиту от таких воздействий. Работы по ее устройству необходимо начинать не ранее, чем через сутки после проведения работ по усилению конструкции, но не позднее, чем окончание времени полной полимеризации композита.

4.13 При проведении работ по устройству огнезащиты системы внешнего армирования необходимо обеспечивать требуемую согласно действующим нормативным документам огнестойкость конструкций.

4.14 Проектирование усиления или восстановления железобетонных (бетонных) конструкций следует проводить на основании результатов натурного обследования их технического состояния и поверочного расчета.

Обследование следует производить с учетом требований ГОСТ 18105, ГОСТ 22904, ГОСТ 28570, ГОСТ 31937.

Поверочные расчеты конструкций следует выполнять с учетом требований ГОСТ 54257, СП 63.13330.

4.15 Минимально допустимый фактический (условный) класс бетона по прочности на сжатие строительной конструкции, восстанавливаемой или усиливаемой СВА, для изгибаемых конструкций – В15, для сжатых и сжато-изгибаемых конструкций – В10.

4.16 При усилении сталебетонных и сталежелезобетонных конструкций, а также при работе с анкерными жгутами необходимо исключить прямой контакт углеродных элементов усиления со стальными частями конструкций.

## **5 Материалы**

### **5.1. Бетон и стальная арматура**

5.1.1. Нормативные и расчетные характеристики бетона строительных конструкций принимают в зависимости от фактического (условного) класса в соответствии с СП 63.13330.

Фактический класс бетона следует определять по ГОСТ 18105 с помощью переводных коэффициентов, обеспечивающих эквивалентную прочность по фактической средней прочности бетона, полученной по испытаниям бетона неразрушающими методами ГОСТ 22690, ГОСТ 17624 или по испытаниям отобранных из конструкции образцов по ГОСТ 28570.

5.1.2. Нормативные и расчетные характеристики стальной арматуры строительных конструкций принимают в соответствии с СП 63.13330 по данным проектной документации или в зависимости от условного класса, определяемого с помощью переводных коэффициентов, обеспечивающих эквивалентную прочность по фактическим значениям средней прочности арматуры, по данным испытаний отобранных из конструкции образцов.

При отсутствии проектных данных и невозможности отбора образцов допускается класс арматуры устанавливать по виду профиля арматуры, а расчетные сопротивления принимать на 20% ниже соответствующих значений действующих нормативных документов, отвечающих данному классу.

## 5.2. Элементы CBA CarbonWrap®

5.2.1. В качестве материалов для устройства внешнего армирования строительных конструкций системой CarbonWrap® применяются армирующие материалы (элементы усиления) – углеродные однонаправленные ленты и углеродные двунаправленные ткани CarbonWrap® Tape, 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+.

5.2.2. Физико-механические характеристики материалов, составляющих систему внешнего армирования должны соответствовать требованиям, установленных в технических условиях [1-12] и быть подтверждены при входном контроле материалов по ГОСТ 24297 до устройства системы внешнего армирования. Фактические значения указываются в документе, подтверждающем качество материала.

5.2.3. Нормативная прочность термореактивного адгезива при сдвиге для пропитки усиливающих элементов из углеродных волокон, в том числе на влажные поверхности должна составлять не менее 10 МПа. Прочность сцепления (адгезия) должна составлять – не менее 3,5 МПа, температура стеклования – не менее +50-55°C.

5.2.4. Нормативное сопротивление усиливающего элемента растяжению  $R_{fn}$ , модуль упругости  $E_f$ , относительные деформации растяжения  $\varepsilon_f$  и коэффициент поперечной деформации  $\mu_f$  следует принимать по данным механических испытаний образцов по ГОСТ 25.601 с обеспеченностью 0,95.

5.2.5. Расчетное сопротивление СВА CarbonWrap® растяжению  $R_f$  следует определять по формуле:

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

где  $\gamma_f$  – коэффициент надежности по материалу, принимаемый для всех усиливающих элементов из углеродных волокон при расчете по предельным состояниям второй группы – 1,0;

по первой группе равным:

1,2 – для однонаправленных углеродных лент и ламелей;

1,8 – для двунаправленных и мультиаксиальных углеродных тканей;

2,0 – для углеродных сеток и мультиаксиальных сеток на терморезистивных адгезивах.

При выполнении наклейки лент, тканей и сеток «мокрым» способом, согласно п.3.19, указанные значения коэффициента надежности  $\gamma_f$  увеличиваются на 15%;

$\gamma_{f1}$  – коэффициент условия работы усиливающих элементов, учитывающий условия эксплуатации строительной конструкции принимаемый равным:

- во внутренних помещениях 0,95 – для композитных ламелей и 0,9 – для лент, сеток и тканей.

- на открытом воздухе и в агрессивной среде 0,85 – для композитных ламелей и 0,8 – для лент, сеток и тканей.

При расчете строительной конструкции, усиленной СВА CarbonWrap® по предельным состояниям первой группы на действие только постоянных и длительных нагрузок расчетное сопротивление растяжению усиливающего элемента следует умножать на понижающий коэффициент 0,8.

5.2.6. Расчетное значение предельных относительных деформаций растяжения усиливающих элементов  $\varepsilon_{f,ult}$  определяют исходя из следующего условия:

$$\varepsilon_{f,ult} = 0.41 \cdot \sqrt{\frac{R_b}{n \cdot E_f \cdot t_f}} \leq 0.9 \cdot \varepsilon_f \quad (5.2)$$

где  $\varepsilon_f$  - относительные деформации растяжения усиливающего элемента исходя из линейной зависимости между напряжениями и деформациями вплоть до разрушения, определяемая по формуле:

$$\varepsilon_f = \frac{R_f}{E_f}, \quad (5.3)$$

$n$  – количество слоев усиливающих элементов из углеродных волокон;

$t_f$  – безразмерный параметр, численно равный толщине одного слоя усиливающих элементов из углеродных волокон, принимаемая в (мм):

- для элементов усиления из углеродных волокон, наклеиваемых терморезистивным адгезивом с его последующим отверждением на строительной площадке без учета толщины адгезива;

- для композитных ламелей заводского изготовления с учетом толщины пропитки терморезистивным адгезивом.

## **6 Расчет железобетонных конструкций, усиленных СВА CarbonWrap®**

### **6.1. Основные расчетные положения**

**6.1.1.** Проектирование усиления железобетонных конструкций с использованием СВА из полимерных композитов производится на восприятие растягивающих усилий из условия совместности деформаций установленной СВА CarbonWrap® и бетонным основанием до наступления предельного состояния.

**6.1.2.** В общем случае расчеты железобетонных конструкций с использованием систем внешнего армирования из полимерных композитов CarbonWrap® производятся по предельным состояниям первой и второй групп.

Допускается не производить расчет по 2-й группе предельных состояний в случае, если усиление с использованием СВА производится без последующего увеличения действующих нагрузок на железобетонные конструкции по сравнению с нагрузками на стадии эксплуатации (восстановление конструкции).

**6.1.3.** Расчет СВА следует выполнять с учетом несущей способности восстанавливаемой и усиливаемой железобетонной конструкции. Для сильно поврежденных конструкций (при разрушении 50% и более сечения бетона или площади сечения рабочей арматуры) несущую способность усиливаемой конструкции не учитывают.

**6.1.4.** Расчет железобетонных конструкций, усиленных СВА CarbonWrap®, необходимо выполнять с учетом их начального напряженно деформируемого состояния до усиления.

Начальное напряженно деформированное состояние конструкций следует определять исходя из упругой работы элемента с трещиной в растянутой зоне сечения конструкции на действие фактических нагрузок с коэффициентами надежности по нагрузке равными 1,0.

## **6.2. Расчет по предельным состояниям первой группы**

### **6.2.1 Общие положения**

6.2.1.1. Расчет по прочности железобетонных конструкций, усиленных СВА CarbonWrap®, следует производить:

- при действии изгибающих моментов и продольных сил (продольное сжатие или растяжение) для сечений, нормальных к их продольной оси;
- при действии поперечных сил на основе модели наклонных сечений.

6.2.1.2. В общем случае расчет по прочности нормальных сечений железобетонных конструкций, усиленных СВА CarbonWrap®, следует производить на основе нелинейной деформационной модели.

Допускается производить расчет по прочности нормальных сечений на основе предельных усилий:

- железобетонных элементов прямоугольного, таврового и двутаврового сечений со стальной арматурой и СВА CarbonWrap®, расположенной у перпендикулярной плоскости изгиба граней элемента, при действии усилий в плоскости симметрии нормальных сечений согласно раздела п. 6.2.2;

- внецентренно сжатых элементов круглого и кольцевого поперечных сечений согласно п. 6.2.3.

6.2.1.3. При расчете внецентренно сжатых железобетонных конструкций, усиленных СВА CarbonWrap®, следует учитывать влияние прогиба на их несущую способность путем расчета по деформированной схеме.

Допускается производить расчет конструкций по недеформированной схеме

6.2.1.4. При проектировании усиления строительных конструкций следует, как правило, предусматривать, чтобы действующая нагрузка во время усиления не превышала 65% расчетного значения, отвечающего несущей способности усиливаемой конструкции. В случае усиления под большей нагрузкой расчетные характеристики бетона и существующей арматуры следует умножать на коэффициенты условий работы: бетона  $\gamma_{br1} = 0,9$ ; арматуры —  $\gamma_{sr1} = 0,9$ .

6.2.1.5. Предельные усилия в сечении, нормальном к продольной оси усиленного железобетонного элемента, следует определять, исходя из следующих предпосылок:

- распределение относительных деформаций в бетоне, стальной арматуре и СВА по высоте поперечного сечения элемента принимают по линейному закону (гипотеза плоских сечений);

- сопротивление бетона растяжению принимается равным нулю;

- сопротивление бетона сжатию представляется напряжениями, равномерно распределенными по высоте сжатой зоны со значением равным не более  $R_b$ ;

- растягивающие и сжимающие напряжения в стальной арматуре принимают равными не более расчетных сопротивлений растяжению  $R_s$  и сжатию  $R_{sc}$  соответственно;

- расчетные значения предельных относительных деформаций  $\varepsilon_{f,ult}$  в СВА определяются исходя из линейной зависимости между напряжениями и деформациями усиливающих элементов вплоть до его разрушения и условием по отслаиванию усиливающих элементов от бетонного основания;

- деформация сдвига в клеевом слое не учитывается.

6.2.1.6. Расчет по прочности нормальных сечений следует производить из уравнений равновесия моментов и продольных сил от внешних нагрузок, принимая относительную деформацию крайнего волокна сжатой зоны бетона равной  $\varepsilon_{b,ult} = 0,0035$ , при которой предельное состояние элемента наступает с достижением в усиливающих элементах из полимерных композитов предельных деформаций  $\varepsilon_{f,ult}$

## 6.2.2. Расчет изгибаемых элементов

6.2.2.1. Расчет по прочности нормальных сечений изгибаемых железобетонных элементов, усиленных СВА из полимерных композитов CarbonWrap®, производят из условия:

$$M \leq M_{ult}, \quad (6.2.1)$$

где  $M_{ult}$  - предельный изгибающий момент, который может быть воспринят сечением усиленного элемента.

В предельном состоянии изгибаемого элемента усилия в сжатой зоне воспринимаются бетоном и сжатой стержневой арматурой, а в растянутой - стержневой арматурой и внешней композитной арматурой.

6.2.2.2. Для изгибаемых железобетонных элементов прямоугольного сечения (рис. 6.2.1), усиленных СВА на грани элемента из полимерных композитов, значение  $M_{ult}$  определяют по формуле:

$$M_{ult} = N_s \cdot (h_0 - a_c) + N_f \cdot (h - a_c), \quad (6.2.2)$$

где  $N_s$  и  $N_f$  – усилие в стальной растянутой арматуре и СВА соответственно;

$a_c$  – расстояние от равнодействующей в сжатой зоне бетона и сжатой стальной арматуре до крайнего сжатого волокна поперечного сечения строительной конструкции, принимается равным:

$$a_c = a' + \frac{N_b \cdot (x/2 - a')}{(N'_s + N_b)}, \quad (6.2.3)$$

$N_b$  - усилие бетона сжатой зоны, определяют по формуле:

$$N_b = \sigma_b \cdot b \cdot x, \quad (6.2.4)$$

$N'_s$  - усилие в сжатой арматуре допускается учитывать при обеспечении конструктивных требований по предотвращению выпучивания продольной арматуры согласно п.10.3.14 СП 63.13330 по формуле:

$$N'_s = \sigma_{sc} \cdot A'_s, \quad (6.2.5)$$

$x$  - высота сжатой зоны бетона, определяемая при обеспечении равенства:

$$(\sigma_b \cdot A_b + \sigma_{sc} \cdot A'_s) = (\sigma_s \cdot A_s + \sigma_f \cdot A_f), \quad (6.2.6)$$

где  $A_b = b \cdot x$ ;

$$A_f = n \cdot b_f \cdot t_f.$$

В первом приближении высота сжатой зоны может быть принята равной  $0,2h$ .

При принятом значении высоты сжатой зоны выполняется определение относительных деформаций и действующих напряжения в слое СВА, в наиболее сжатом слое бетона, в растянутой и сжатой стальной арматуре:

$$\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{b,ult} \cdot \left( \frac{h-x}{x} \right) - \varepsilon_{bt}^0 \leq \varepsilon_{f,ult} \quad \sigma_f = E_f \cdot \varepsilon_{fe} \leq R_f ; \quad (6.2.7)$$

$$\varepsilon_b = \left( \varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bt}^0 \right) \cdot \left( \frac{x}{h-x} \right) ; \quad \sigma_b = E_b \cdot \varepsilon_b \leq R_b ; \quad (6.2.8)$$

$$\varepsilon_s = \left( \varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bt}^0 \right) \cdot \left( \frac{h_0 - x}{h-x} \right) ; \quad \sigma_s = E_s \cdot \varepsilon_s \leq R_s ; \quad (6.2.9)$$

$$\varepsilon'_s = \varepsilon_b \cdot \left( \frac{h-a'}{x} \right) \quad \sigma_{sc} = E_s \cdot \varepsilon'_s \leq R_{sc} \quad (6.2.10)$$

где:  $\varepsilon_{bt}^0$  – начальные относительные деформации растянутой грани железобетонного элемента, определяемые согласно п. 6.2.2.3.

Выполняется корректировка принятого значения высоты сжатой зоны бетона  $x$  до выполнения равенства (6.2.3).

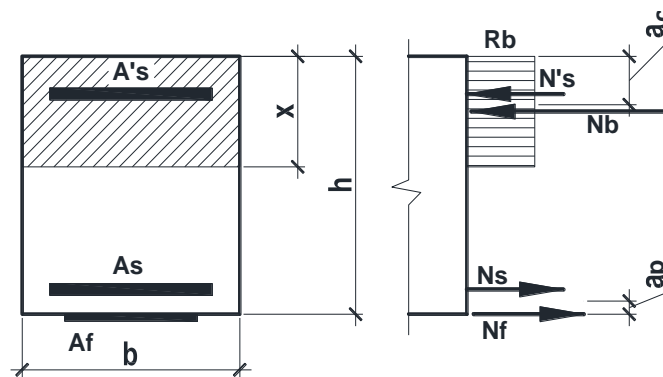


Рис. 6.2.1. Расчетная схема усиленного сечения

6.2.2.3. Учет начального напряженно-деформированного состояния железобетонного элемента, усиленного СВА, выполняется при действии начального изгибающего момента  $M_0$ , превышающего момент трещинообразования  $M_{cr}$ .

При  $M_0 \geq M_{cr}$  расчет железобетонного элемента до его усиления производится как для сечения с трещинами. При  $M_0 < M_{cr}$  влиянием начального НДС допускается пренебрегать.

Начальные относительные деформации растянутой грани железобетонного элемента, полученные им до выполнения усиления СВА при учете начального напряженно-деформированного состояния, определяют по формуле:

$$\varepsilon_{bt}^o = \frac{M_0 \cdot (h - x_0)}{E_{b,red} \cdot I_{red}}, \quad (6.2.11)$$

где  $E_{b,red} = \frac{R_b}{\varepsilon_{b1,red}}$  - приведенный модуль деформации бетона;

$\varepsilon_{b1,red} = 0,0015$  - для тяжелого бетона при непродолжительном действии нагрузки.

Для прямоугольных сечений высота сжатой зоны определяется по формуле:

$$X_0 = h_0 \cdot \left[ \sqrt{(\mu_s \cdot \alpha_s + \mu'_s \cdot \alpha'_s)^2 + 2 \cdot \left( \mu_s \cdot \alpha_s + \mu'_s \cdot \alpha'_s \cdot \frac{a'}{h_0} \right)} - (\mu_s \cdot \alpha_s + \mu'_s \cdot \alpha'_s) \right] \quad (6.2.12)$$

где  $\mu_s = \frac{A_s}{bh_0}$ ;  $\mu'_s = \frac{A'_s}{bh_0}$ ;  $\alpha_s = \frac{E_s}{E_{b,red}}$ .

6.2.2.4. В расчетах балок и ребер с шириной менее 300мм, выполненных с загибом ленты на боковые поверхности балок, в расчет вводится только часть площади поперечного сечения внешнего армирования, ограниченной шириной балки (рис. 6.2.2).

Учет работы внешнего продольного армирования на боковых поверхностях должен рассматриваться в каждом отдельном проекте по результатам соответствующих обследований и расчетов.

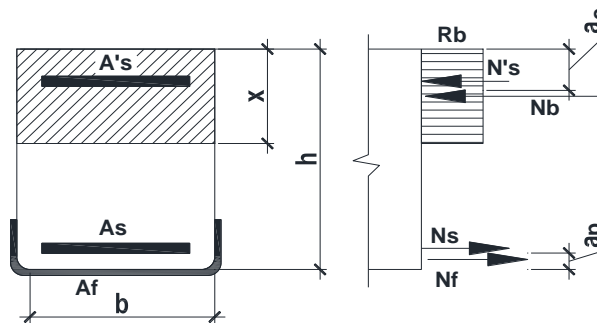


Рис. 6.2.2. Расчетная схема усиливаемого сечения с загибом ленты на боковые поверхности балок

### 6.2.3. Расчет сжатых и внецентренно сжатых элементов

6.2.3.1. Повышение несущей способности колонн при осевом и внецентренном сжатии достигается путем создания обойм наклейкой композитного материала CarbonWrap® в направлении перпендикулярном оси элемента.

Обоймы из композитных материалов способствуют созданию объемно-напряженного состояния бетона, повышая прочность бетона (эффект обоймы).

6.2.3.2. Данный способ усиления применяется для колонн круглого, квадратного, а также прямоугольного сечения при отношении сторон  $b/h \leq 1,5$ .

Для прямоугольных сечений с соотношением сторон, превышающим 1,5, или с размерами поперечного сечения более 900 мм эффектом обоймы следует пренебрегать.

6.2.3.3. Расчет сжатых и внецентренно сжатых железобетонных элементов прямоугольного поперечного сечения при эксцентриситете продольной силы  $e_0 \leq 0,1 \cdot h$  и  $l_0 \leq 20 \cdot h$  (для круглых сечений колонн  $e_0 \leq 0,1 \cdot D$  и  $l_0 \leq 20 \cdot D$ ), усиленных СВА, производится исходя из условия равновесия внутренних усилий и внешних сил с учетом влияния продольного изгиба (прогиба) из условия:

$$N \leq \varphi (R_{bc} A_c + R_{sc} A_{s, tot}), \quad (6.2.13)$$

где  $l_0$  — расчетная длина железобетонного элемента;

$h$  — минимальный размер сечения прямоугольной колонны или диаметр круглой колонны или.

$e_0$  — начальный эксцентриситет продольной силы, определяемый из статического расчета по формуле:  $e_0 = \frac{M}{N}$ ;

$\varphi$  — коэффициент, учитывающий влияние продольного изгиба, принимаемый по линейному закону равным  $\varphi = 0,9$  при  $l_0 / h = 10$  и  $\varphi = 0,85$  при  $l_0 / h = 20$ ;

$R_{bc}$  – прочность бетона сжатого элемента с учетом обжатия СВА, определяемая по формуле (6.2.14);

$A_c$  – площадь поперечного сечения бетона в сжатом элементе без учета площади стальной арматуры ( $A - A_{s,tot}$ );

$A_{s,tot}$  – суммарная площадь поперечного сечения всей продольной арматуры в сечении;

Расчетное сопротивление бетона сжатого элемента, усиленного сплошной облоймой из углеродного композитного материала по высоте, определяется по формуле:

$$R_{bc} = R_b + 3.3 \cdot \psi_f \cdot k_a \cdot k_e \cdot \sigma_R, \quad (6.2.14)$$

где  $\psi_f$  – поправочный коэффициент, полученный по результатам натурных испытаний, допускается принимать равным 0,95;

$k_a$  – коэффициент эффективности облоймы, принимаемый для круглых колонн, равным 1; для колонн прямоугольного сечения по формуле:

$$k_a = \frac{A_e}{A_c} \left( \frac{h}{b} \right)^2, \quad (6.2.15)$$

где  $A_e$  – площадь поперечного сечения обжатого бетона, определяемая согласно Рис. 6.2.3 с учетом округления углов (фасок) по формуле:

$$A_e = A_c - \frac{1}{3} \cdot \left[ \frac{b}{h} \cdot (h - 2r_c)^2 + \frac{h}{b} \cdot (b - 2r_c)^2 \right], \quad (6.2.16)$$

где  $h$  – меньшая сторона,  $b$  – большая;

$r_c$  – радиус округления углов прямоугольных сечений;

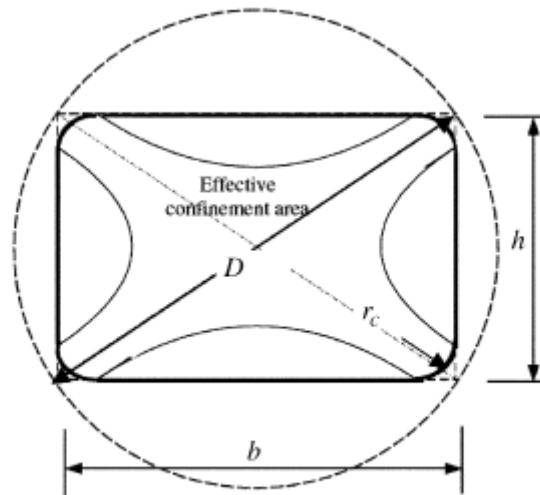


Рис. 6.2.3. Эквивалентное круглое поперечное сечение.

$k_e$  – коэффициент, учитывающий наличие разрывов по высоте обоймы, равный:

- для сплошных обойм (при  $S_w = 0$ ) - 1,0;

- для обойм с разрывами для элементов круглого сечения, вычисляемый по формуле:

$$k_e = \left(1 - \frac{S_w}{2D}\right)^2, \quad (6.2.17)$$

где  $S_w$  - расстояние между отдельными витками обоймы.

Для элементов прямоугольного поперечного сечения произведение  $k_a \cdot k_e$  в формуле (6.2.14) следует принимать не более 0,5.

$\sigma_R$  – максимальное значение обжатия бетона сжатого элемента в результате устройства сплошной обоймы СВА, определяемое из условия:

$$\sigma_R = \frac{2 \cdot n \cdot E_f \cdot t_f \cdot \varepsilon_{fe}}{D} \geq 0.08 R_b, \quad (6.2.18)$$

где  $D$  – диаметр сжатого элемента (круглой колонны). Для прямоугольных элементов определяется по формуле:  $D = \sqrt{b^2 + h^2}$  ;

$\varepsilon_{fe}$  – эффективный уровень деформаций СВА при разрушении, принимается равным  $0.55 \cdot \varepsilon_{fu}$

В случае, если условие (6.2.18) не выполняется и уровень напряжений в обжатом бетоне менее  $0.08R_b$ , то эффект обоймы не принимается в расчет.

Предельные деформации обжатого СВА бетона должны быть ограничены по формуле:

$$\varepsilon_{ccu} = \varepsilon_{b0} \left( 1.5 + 12 \cdot k_b \frac{\sigma_R}{R_b} \left( \frac{\varepsilon_{fe}}{\varepsilon_{b0}} \right)^{0.45} \right) \leq 0.01, \quad (6.2.19)$$

где  $k_b$  – коэффициент эффективности обоймы, принимаемый для круглых колонн, равным 1; для колонн прямоугольного сечения по формуле:

$$k_b = \frac{A_e}{A_c} \left( \frac{b}{h} \right)^{0.5}, \quad (6.2.20)$$

В случае превышения предельных деформаций обжатого бетона  $\varepsilon_{ccu} \geq 0.01$  необходимо уменьшить расчетное сопротивление обжатого бетона  $R_{bc}$ , вводимое в расчет до  $R_{bcc}$  по формуле:

$$R_{bcc} = R_b + \frac{0.01 \cdot (R_{bc} - R_b)}{\varepsilon_{ccu}} \quad (6.2.21)$$



Рис. 6.2.4. Усиление колонны отдельными бандажами по высоте.

6.2.3.4. При необходимости усиления колонн, для которых выполняется, по меньшей мере, одно из условий: сторона более 900 мм, соотношение сторон более 1,5, начальный эксцентриситет продольной силы более  $0,1h$  ( $0,1D$ ), расчет усиления необходимо производить посредством нелинейного моделирования в программных комплексах при обязательном научном сопровождении разработчиков настоящего стандарта».

#### 6.2.4. Расчет по прочности центрально и внецентренно растянутых элементов

6.2.4.1. Повышение несущей способности железобетонных элементов при осевом и внецентренном растяжении достигается путем наклейки СВА из полимерных композитов CarbonWrap® в продольном направлении.

6.2.4.2. Расчет по прочности нормальных сечений центрально растянутых железобетонных элементов, усиленных СВА из полимерных композитов, производится исходя из условия:

$$N \leq N_{ult}, \quad (6.2.22)$$

где  $N_{ult}$  – предельное значение продольной растягивающей силы, которое может быть воспринято элементом, определяется по формуле:

Значение  $N_{ult}$  определяется по формуле:

$$N_{ult} = R_s A_s + \sigma_f A_f, \quad (6.2.23)$$

Растягивающие напряжения, воспринимаемые СВА, определяются из условия:

$$\sigma_f = \varepsilon_{fe} E_f \leq R_f, \quad (6.2.24)$$

где расчетная деформация  $\varepsilon_{fe}$  ограничивается способностью передавать напряжение подложке через адгезив и определяется из условия:

$$\varepsilon_{fe} = k_v \varepsilon_f \leq 0,004, \quad (6.2.25)$$

Коэффициент запаса по сцеплению  $k_v$  определяется по формуле:

$$k_v = \frac{k_1 k_2 L_f}{11900 \cdot \varepsilon_f} \leq 0.75, \quad (6.2.26)$$

где  $L_f$  - эффективная длина анкеровки в мм, определяемая по формуле:

$$L_f = \frac{23300}{(n t_f E_f)^{0.58}}, \quad (6.2.27)$$

$k_1 = \left( \frac{R_b}{27} \right)^{2/3}$  - коэффициент, учитывающий прочность бетона элемента,  $R_b$  в

МПа;

$k_2$  – коэффициент, учитывающий схему наклейки композитного материала. При наличии анкеровки поперечными хомутами из композитного материала принимается равным 1,0. Без наличия хомутов по формуле:

$$k_2 = \frac{w_f - 2L_f}{w_f}, \quad (6.2.28)$$

6.2.4.3. Расчет по прочности нормальных сечений внецентренно растянутых элементов, усиленных СВА по наиболее и наименее растянутым граням элемента из полимерных композитов, производится аналогично расчету нормальных сечений изгибаемых

элементов исходя из условия равновесия внутренних усилий и внешних сил в зависимости от положения внешней продольной силы  $N$  по формуле:

$$N \cdot e \leq M_{ult}, \quad (6.2.29)$$

а) В случае расположения внешней продольной силы  $N$  между равнодействующими в арматуре наиболее и наименее растянутых зон несущая способность элемента определяется работой растянутой стальной арматуры и наклеенной системой внешнего армирования из композитных материалов в растянутой зоне. Предельное усилие, которое может воспринять элемент, определяется по формуле:

$$M_{ult} = (R_s A_s + \sigma_f A_f) \cdot (h_0 - a'), \quad (6.2.30)$$

где  $\sigma_f$  - растягивающие напряжения, воспринимаемые СВА, определяют из условия (6.2.24).

б) При расположении внешней продольной силы  $N$  за пределами расстояния между равнодействующими в арматуре наиболее и наименее растянутых зон несущая способность элемента определяется работой сжатого бетона и сжатой стальной арматуры в сжатой зоне поперечного сечения, а также растянутой стальной арматурой и наклеенной системой внешнего армирования из композитных материалов в растянутой зоне по формуле:

$$M_{ult} = (N_b + N'_s) \cdot (h - a_c - a_p), \quad (6.2.31)$$

где  $N_b = \sigma_b \cdot b \cdot x$  - усилие, действующее в бетоне;

$N'_s = \sigma_{sc} \cdot A'_s$  - усилие, действующее в сжатой стальной арматуре;

$N_s = \sigma_s \cdot A_s$  - усилие, действующее в растянутой стальной арматуре;

$N_f = \sigma_f \cdot A_f$  - усилие, действующее в СВА.

$$a_c = a' + \frac{N_b \cdot (x/2 - a')}{(N_s' + N_b)} - \text{расстояние от наиболее сжатого волокна сечения до равно-}$$

действующей в сжатом бетоне и сжатой стальной арматуре;

$$a_p = \frac{N_s \cdot a}{(N_s + N_f)} - \text{расстояние от наиболее растянутого волокна сечения до равнодей-}$$

ствующей в растянутой стальной арматуре и СВА.

Определение действующих напряжений и деформаций в слое СВА, растянутой стальной арматуре, сжатом бетоне и сжатой арматуре выполняется исходя из соответствующих деформаций из условий (6.2.7)-(6.2.10).

Относительные деформации определяются из условий:

Положение нейтральной оси определяется при обеспечении равенства:

$$(\sigma_b \cdot A_b + \sigma_{sc} \cdot A_s' + N) = (\sigma_s \cdot A_s + \sigma_f \cdot A_f), \quad (6.2.32)$$

В первом приближении высота сжатой зоны может быть принята равной  $0,2h$ .

Выполняется корректировка принятого значения высоты сжатой зоны бетона  $x$  до выполнения равенства (6.2.32).

## **6.2.5. Расчет по прочности нормальных сечений на основе нелинейной деформационной модели**

6.2.5.1. Расчет прочности сечений, нормальных к продольной оси элемента, по деформационной модели проводится в соответствии с положениями с п.8.1.20-8.1.30 СП 63.13330, дополненных следующими положениями:

- распределение относительных деформаций бетона, стальной арматуры и СВА из полимерных композитов по высоте сечения усиленного железобетонного элемента принимают по линейному закону (гипотеза плоских сечений);

- связь между осевыми напряжениями и относительными деформациями СВА из полимерных композитов принимают линейной;

- связь между осевыми напряжениями и относительными деформациями бетона и стальной арматуры принимается в виде двух линейных диаграмм при учете раздела 5.1 настоящего стандарта;

- связь бетона и СВА принимают жесткой;

- после усиления вплоть до наступления предельного состояния сохраняются условия совместности деформаций;

- следует учитывать напряженно-деформированное состояние (НДС) элемента до усиления.

6.2.5.2. В случае необходимости учета начального напряженно-деформированного состояния усиливаемого железобетонного элемента расчет выполняется двухэтапным. На первом этапе определяется НДС усиливаемой железобетонной конструкции до усиления. На втором этапе определяется НДС и несущая способность конструкции после усиления.

6.2.5.3. Расчет равнодействующих внутренних усилий осуществляется численным интегрированием эпюры напряжений в нормальном сечении элемента. Для этого сечение разбивается на малые по высоте полосы (Рис. 6.2.5). Расчетная схема деформационной модели представлена на рис. 6.2.6.

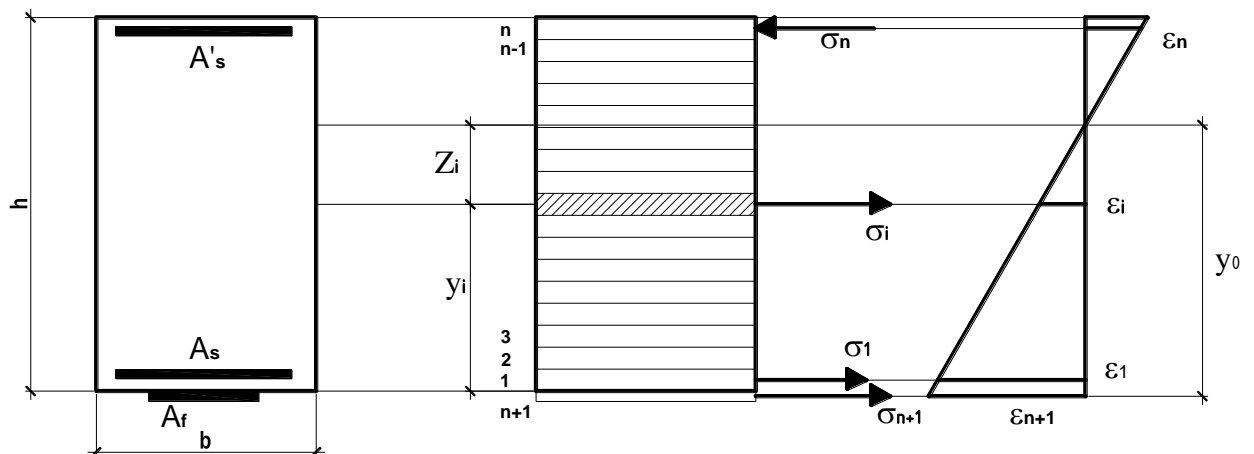


Рис. 6.2.5. Эпюры распределения деформаций и напряжений по высоте сечения

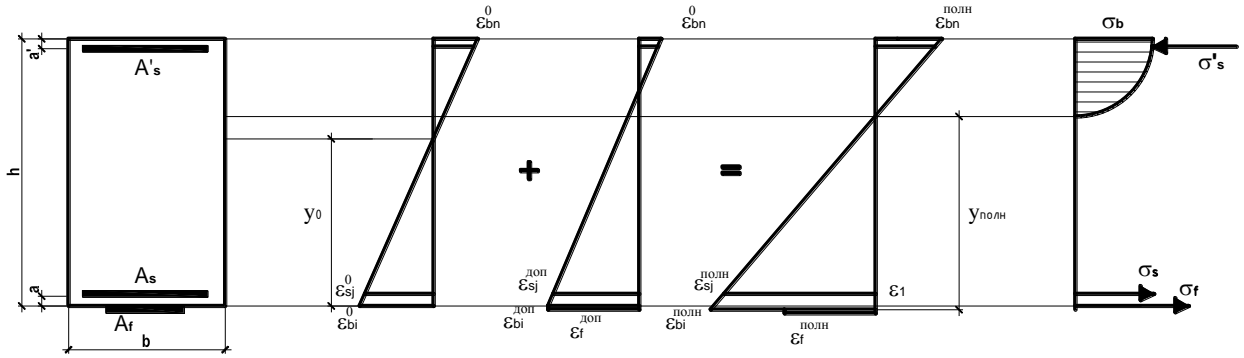


Рис. 6.2.6. Расчетная схема деформационной модели

### Расчет изгибаемых элементов

6.2.5.4. Для изгибаемых в плоскости симметрии поперечного сечения железобетонных элементов, и расположения оси  $X$  в этой плоскости, уравнения равновесия внешних сил и внутренних усилий в нормальном сечении железобетонного элемента могут быть преобразованы следующим образом:

$$M_x = D_{11} \frac{1}{r_x} \quad (6.2.33)$$

Кривизна элемента:

$$\frac{1}{r_x} = \frac{\varepsilon_{bi}}{Z_{bxi}} = \frac{\varepsilon_{sj}}{Z_{sxj}} = \frac{\varepsilon_{fk}}{Z_{fjk}} \quad (6.2.34)$$

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

$$D_{11} = \sum_i A_{bi} Z_{bxi}^2 E_b \nu_{bi} + \sum_j A_{sj} Z_{sxj}^2 E_{sj} \nu_{sj} + \sum_k A_{fk} Z_{fjk}^2 E_{fk} ; \quad (6.2.35)$$

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

где значения коэффициентов упругости  $\nu_{bi}$ ,  $\nu_{sj}$  определяют из соотношения значений напряжений и деформаций в рассматриваемых точках соответствующих диаграмм состояния материалов, деленных на модуль упругости материала:

$$\nu_{bi} = \frac{\sigma_{bi}}{E_{b,red} \varepsilon_{bi}}; \quad (6.2.36)$$

$$\nu_{sj} = \frac{\sigma_{sj}}{E_{sj} \varepsilon_{sj}} \quad (6.2.37)$$

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

$$y_0 = \frac{\sum_i A_{bi} y_i E_b \nu_{bi} + \sum_j A_{sj} y_j E_{sj} \nu_{sj}}{D_{33}} \quad (6.2.38)$$

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

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

$$\varepsilon_{bi}^0 = M_x \frac{Z_{bxi}^0}{D_{11}}, \quad \text{где } Z_{bxi}^0 = y_0 - y_i; \quad (6.2.39)$$

$$\varepsilon_{sj}^0 = M_x \frac{Z_{sxj}^0}{D_{11}} \quad \text{где } Z_{sxj}^0 = y_0 - y_j \quad (6.2.40)$$

В матрице  $D_{11}$  последнее слагаемое  $\sum_k A_{fk} Z_{fjk}^2 E_{fk}$  на первом этапе принимается равным нулю.

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

Условие сходимости итерационного процесса выполняется по кривизне элемента

$$\frac{1}{r_x}$$

6.2.5.6. Повторяя расчет и уточняя значения секущих модулей деформаций, в каждом сечении элемента определяем НДС, соответствующее заданной нагрузке. Найденные значения деформаций в каждом волокне на втором этапе (после усиления) рассматриваются как начальные.

6.2.5.7. На втором этапе расчета вводится слой СВА из полимерных композитов.

Для изгибаемых элементов влияние начального напряженно-деформированного состояния учитывается с использованием принципа суперпозиции. Элемент конструкции в общем случае до проведения усиления находится под нагрузкой и имеет некоторые деформации  $\varepsilon^0$ , определенные на первом этапе расчета. Деформации в основном сечении после усиления находятся как сумма независимых деформаций от нагрузки до усиления и дополнительных деформаций:

$$\varepsilon^{полн} = \varepsilon^0 + \varepsilon^{дон} \quad (6.2.41)$$

6.2.5.8. Исходя из предположения о жестком контакте внешней арматуры и бетона основного сечения, условие деформирования внешней арматуры под расчетной нагрузкой имеет вид:

$$\varepsilon_f^{полн} = \varepsilon_b^{дон} \quad (6.2.42)$$

где  $\varepsilon_b^{дон}$  - дополнительная деформация крайнего растянутого волокна бетона.

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

Полный момент, воспринимаемый сечением после усиления:

$$M_{полн} = M_0 + M_{дон}, \quad (6.2.43)$$

где  $M_0 = M_x$  - начальный изгибающий момент, равный действующему моменту на первом этапе.

6.2.5.9. Деформированное состояние изгибаемого элемента можно однозначно охарактеризовать кривизной и координатой центра тяжести сечения:

$$\frac{1}{r_x^0} = \frac{\varepsilon_{bi}^0}{Z_{bxi}^0} = \frac{\varepsilon_{sj}^0}{Z_{sxj}^0} \quad (6.2.44)$$

Значение кривизны на первом шаге расчета усиленного сечения принимается равным кривизне элемента конструкции до усиления  $\frac{1}{r_x^{полн}} = \frac{1}{r_x^0}$ , поскольку вес всей системы усиления незначителен и не оказывает влияния на напряженно-деформированное состояние конструкции.

Далее при расчете на действие дополнительного момента  $M_{дон}$ , определяем координату  $y_{полн}$  положения нейтральной оси и деформации в бетоне, стальной арматуре и арматуре усиления:

$$y_{полн} = \frac{\sum_i A_{bi} y_i E_b v_{bi} + \sum_j A_{sj} y_j E_{sj} v_{sj} + \sum_k A_{fk} y_k E_{fk}}{D_{33}} \quad (6.2.45)$$

$$\varepsilon_{bi}^{полн} = \varepsilon_{bi}^0 + M_x \frac{Z_{bxi}^0}{D_{11}}, \quad \text{где } Z_{bxi}^{полн} = y_{полн} - y_i; \quad (6.2.46)$$

$$\varepsilon_{sj}^{полн} = \varepsilon_{sj}^0 + M_{дон} \frac{Z_{sxj}^{полн}}{D_{11}} \quad \text{где } Z_{sxj}^{полн} = y_{полн} - y_j; \quad (6.2.47)$$

$$\varepsilon_f^{полн} = M_{дон} \frac{Z_{fjk}^{полн}}{D_{11}} \quad \text{где } Z_{fjk}^{полн} = y_{полн} - y_k \quad (6.2.48)$$

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

Дальнейший расчет с уточнением модуля деформаций усиленного сечения железобетонного элемента следует выполнять аналогично расчету конструкции без усиления (по аналогии с п. 6.2.5.4-6.2.5.6 настоящего стандарта).

6.2.5.10. Расчет нормальных сечений железобетонных элементов по прочности производят из условий:

$$|\varepsilon_{b,\max}| \leq \varepsilon_{b,ult} \quad (6.2.49)$$

$$|\varepsilon_{s,\max}| \leq \varepsilon_{s,ult} \quad (6.2.50)$$

$$|\varepsilon_{f,\max}| \leq \varepsilon_{f,ult} \quad (6.2.51)$$

Значения предельных деформаций бетона и арматуры  $\varepsilon_{b,ult}$  и  $\varepsilon_{s,ult}$  принимают согласно п. 8.1.24 СП63.13330.

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

$$|\varepsilon_{bt,\max}| \leq \varepsilon_{bt,ult} \quad (6.2.52)$$

$\varepsilon_{bt,ult}$  - определяется согласно п. 8.1.30 СП63.13330.

6.2.5.11. Значения предельных деформаций внешнего армирования  $\varepsilon_{f,ult}$  следует принимать согласно п. 5.2.6.

6.2.5.12. В результате расчета по предложенной методике определяется несущая способность исходной и усиленной конструкции, а также деформации и напряжения в материалах на любом этапе загрузки.

Подбор сечения внешнего армирования из полимерных композитов Carbon-Wrap® производится методом подстановки в исходные данные для расчета такой площади сечения СВА, которая обеспечит прочность сечения при заданном внешнем моменте.

### **Расчет внецентренно сжатых элементов**

6.2.5.13. Для сжато-изгибаемых элементов, усиленных системой внешнего армирования из композитных материалов, на которые действуют изгибающие моменты двух направлений и продольная сила, уравнения равновесия в нормальном сечении могут быть преобразованы следующим образом:

$$M_x = D_{11} \frac{1}{r_x} + D_{12} \frac{1}{r_y} \quad (6.2.53)$$

$$M_y = D_{12} \frac{1}{r_x} + D_{22} \frac{1}{r_y} \quad (6.2.54)$$

$$N = D_{13} \frac{1}{r_x} + D_{23} \frac{1}{r_y} \quad (6.2.55)$$

Жесткостные характеристики нормального сечения  $D_{22}$ ,  $D_{12}$ ,  $D_{13}$  следует определять по формулам:

$$D_{22} = \sum_i A_{bi} Z_{byi}^2 E_b \nu_{bi} + \sum_j A_{sj} Z_{syj}^2 E_{sj} \nu_{sj} + \sum_k A_{fk} Z_{fjk}^2 E_{fk} ; \quad (6.2.56)$$

$$D_{12} = \sum_i A_{bi} Z_{bxi} Z_{byi} E_b \nu_{bi} + \sum_j A_{sj} Z_{sxj} Z_{syj} E_{sj} \nu_{sj} + \sum_k A_{fk} Z_{fjk} Z_{fyk} E_{fk} \quad (6.2.57)$$

$$D_{13} = \sum_i A_{bi} Z_{bxi} E_b \nu_{bi} + \sum_j A_{sj} Z_{sxj} E_{sj} \nu_{sj} + \sum_k A_{fk} Z_{fjk} E_{fk} \quad (6.2.58)$$

## 6.2.6. Расчет по прочности сечений, наклонных к продольной оси изгибаемого элемента

6.2.6.1. Усиление наклонных к продольной оси сечений изгибаемых железобетонных элементов достигается путем наклеивания системы внешнего армирования из полимерных композитов в поперечном направлении к оси элемента или перпендикулярно потенциальным трещинам в опорном сечении.

Вклад системы внешнего армирования из полимерных композитов в увеличение прочности на сдвиг элемента основан на работе фибры соответствующего направления по отношению к предполагаемой траектории трещины.

6.2.6.2. Наклеивание СВА при усилении наклонных к продольной оси сечений производится в виде двух и трехсторонних хомутов («П»-образное), а также в виде общего обертывания, охватывающего все сечение железобетонного элемента (см. рис. 6.2.7).

6.2.6.3. В целом расчет по прочности наклонных сечений железобетонных элементов, усиленных внешним армированием, производится согласно п.п. 8.1.31-8.1.35 СП 63.13330 с учетом работы хомутов СВА.

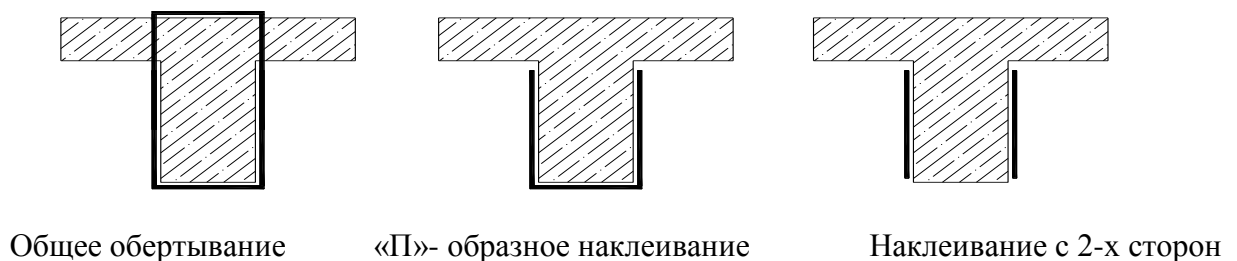


Рис. 6.2.7. Схемы усиления СВА наклонных сечений изгибаемых элементов

Рисунок 6.2.8 иллюстрирует параметры, которые используются для вычисления прочности наклонных сечений с учетом СВА.

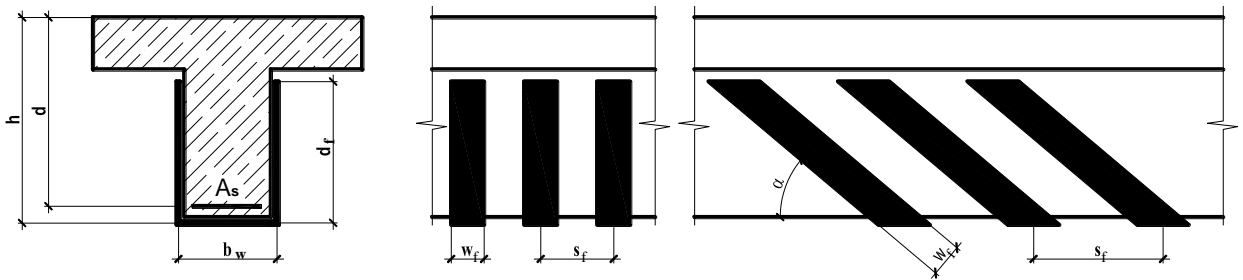


Рис. 6.2.8. Размещение СВА хомутов для усиления наклонных сечений

6.2.6.4. Расчет по прочности наклонных сечений железобетонных элементов, усиленных СВА, производится на действие поперечных сил по наклонной полосе между трещинами, по наклонной трещине и на действие изгибающего момента по наклонной трещине.

При этом учитывается наиболее опасное нагружение в пределах наклонного сечения.

6.2.6.5. Работа системы внешнего армирования при расчете по прочности наклонных сечений по наклонной полосе между трещинами не учитывается.

6.2.6.6. Расчет усиленных железобетонных элементов по наклонным сечениям на действие поперечных сил производится из условия:

$$Q \leq Q_b + Q_{sw} + Q_f, \quad (6.2.59)$$

где  $Q$  - поперечная сила в наклонном сечении с длиной проекции  $s$  на продольную ось элемента, определяемая от всех внешних сил, расположенных по одну сторону от рассматриваемого наклонного сечения;

$Q_b, Q_{sw}, Q_f$  - поперечные силы, воспринимаемые бетоном, поперечной арматурой, поперечной СВА из полимерных композитов в наклонном сечении соответственно.

Поперечная сила, воспринимаемая бетоном в наклонном сечении, определяется по формуле:

$$Q_b = \frac{1,5R_{bt}bh_0^2}{c} \quad (6.2.60)$$

При этом  $Q_b$  принимается равной  $0,5R_{bt}bh_0 \leq Q_b \leq 2,5R_{bt}bh_0$ .

Усилие  $Q_{sw}$  для поперечной арматуры, нормальной к продольной оси элемента, определяется по формуле:

$$Q_{sw} = 0,75q_{sw}c, \quad (6.2.61)$$

$q_{sw}$  - усилие в поперечной арматуре на единицу длины элемента:

$$q_{sw} = \frac{R_{sw}A_{sw}}{s_w} \quad (6.2.62)$$

Расчет производится для ряда расположенных по длине элемента наклонных сечений при наиболее опасной длине проекции наклонного сечения  $c$ . При этом длину  $c$  принимают  $c \leq 2h_0$ .

Усилие  $Q_f$  для поперечно направленного внешнего армирования из полимерных композитов, определяется по формуле:

$$Q_f = \psi_f \frac{A_{fw}\sigma_f}{s_f} c, \quad (6.2.63)$$

где  $c \leq 2d_f$ ;

$$A_{fw} = 2nt_f w_f$$

$$\sigma_f = \varepsilon_{fe} E_f$$

Коэффициент  $\psi_f$ , зависящий от схемы наклейки СВА, для полностью обернутых сечений принимается равным 0,95; для трехсторонних «П»-образных хомутов или приклеенных к наружной поверхности слоев – 0,85.

В случае наклеивания хомутов внешнего армирования под углом  $\alpha$  к продольной оси железобетонного элемента усилие  $Q_f$  определяется по формуле:

$$Q_f = \psi_f \frac{A_{fw} \sigma_f \sin \alpha}{s_f} c \quad (6.2.64)$$

Максимальная расчетная деформация СВА определяется в зависимости от схемы наклейки:

$\varepsilon_{f,ult} = 0,004 \leq 0,75 \varepsilon_f$  - для системы внешнего армирования, охватывающей все сечение железобетонных изгибаемых элементов (вкруговую);

$\varepsilon_{f,ult} = k_v \varepsilon_f \leq 0,004$  - для системы внешнего армирования, не охватывающей все сечение железобетонных изгибаемых элементов (двух и трехсторонние хомуты);

Коэффициент запаса по сцеплению  $k_v$  определяется по формуле:

$$k_v = \frac{k_1 k_2 L_f}{11900 \varepsilon_f} \leq 0,75, \quad (6.2.65)$$

где  $L_f$  - эффективная длина анкерования, определяемая по формуле (6.2.27);

$k_1$  - коэффициент, учитывающий прочность бетона элемента,  $R_b$  в МПа, определяют по формуле:

$$k_1 = \left( \frac{R_b}{27} \right)^{\frac{2}{3}}, \quad (6.2.66)$$

$k_2$  - коэффициент, учитывающий схему наклейки:

- для трехсторонних (Π-образных) хомутов

$$k_2 = \frac{d_f - L_f}{d_f}, \quad (6.2.67)$$

- для двухсторонних хомутов

$$k_2 = \frac{d_f - 2L_f}{d_f} \quad (6.2.68)$$

6.2.6.7. Расчет усиленных железобетонных элементов по наклонным сечениям на действие изгибающего момента по наклонной трещине производится из условия:

$$M \leq M_s + M_{sw} + M_f, \quad (6.2.69)$$

где  $M$  - изгибающий момент в наклонном сечении с длиной проекции  $C$  на продольную ось элемента, определяемый от всех внешних сил, расположенных по одну сторону от рассматриваемого наклонного сечения;

$M_s$ ,  $M_{sw}$ ,  $M_f$  - изгибающие моменты, воспринимаемые продольной, поперечной арматурой, поперечной СВА из полимерных композитов, пересекающие наклонное сечение относительно противоположного конца соответственно:

$$M_s = N_s z_s, \quad (6.2.70)$$

где  $z_s$  - плечо внутренней пары сил; допускается принимать равным  $0,9h_0$

$$M_{sw} = 0,5 \cdot Q_{sw} \cdot C; \quad (6.2.71)$$

$$M_f = 0,5 \cdot Q_f \cdot C \quad (6.2.72)$$

### 6.3. Расчет по предельным состояниям второй группы

#### 6.3.1. Расчет по образованию трещин

6.3.1.1. Расчет усиленных изгибаемых железобетонных элементов по образованию трещин следует проводить из условия:

$$M > M_{crc}, \quad (6.3.1)$$

где  $M$  - изгибающий момент от внешней нагрузки относительно оси, нормальной к плоскости действия момента и проходящей через центр тяжести приведенного поперечного сечения элемента;

$M_{crc}$  - изгибающий момент, воспринимаемый нормальным сечением элемента в момент образования трещин.

6.3.1.2. В общем случае изгибающий момент  $M_{crc}$  при образовании трещин следует определять по деформационной модели из решения приведенных в разделе 6.2.5 уравнений с учетом работы бетона в растянутой зоне нормального сечения. При этом расчетные характеристики материалов принимают для предельных состояний второй группы, а значение  $\varepsilon_{bt,ult}$  при непродолжительном действии нагрузки равным 0,00015.

Упрощенно для элементов прямоугольного, таврового или двутаврового сечения с арматурой, расположенной у верхней и нижней граней, момент образования трещин с учетом неупругих деформаций растянутого бетона допускается определять по формуле:

$$M_{crc} = R_{bt,ser} \cdot W_{pl} \pm N \cdot e_x, \quad (6.3.2)$$

где  $W_{pl}$  – упругопластический момент сопротивления сечения для крайнего растянутого волокна бетона;

$e_x$  - расстояние от точки приложения продольной силы  $N$  (расположенной в центре тяжести приведенного сечения элемента) до ядровой точки, наиболее удаленной от растянутой зоны, трещинообразование которой проверяют.

В формуле знак “плюс” принимают при сжимающей продольной силе  $N$ , “минус” - при растягивающей силе.

6.3.1.3. Для конструкций с прямоугольной, тавровой и двутавровой формами поперечных сечений значение  $W_{pl}$  при действии момента в плоскости оси симметрии допускается вычислять по формуле:

$$W_{pl} = \gamma \cdot W_{red}, \quad (6.3.3)$$

где  $\gamma$  - коэффициент, принимаемый для прямоугольных и тавровых сечений с полкой в сжатой зоне равным 1,3;

$W_{red}$  - упругий момент сопротивления приведенного сечения по растянутой зоне сечения, определяемый по формуле:

$$W_{red} = \frac{I_{red}}{y_t}; \quad (6.3.4)$$

$I_{red}$  - момент инерции приведенного поперечного сечения относительно его центра тяжести, определяемый с учетом наличия трещин и выполненного усиления композитными материалами

$y_t$  - расстояние от наиболее растянутого волокна бетона до центра тяжести приведенного поперечного сечения элемента:

$$y_t = \frac{S_{t,red}}{A_{red}}, \quad (6.3.5)$$

где  $S_{t,red}$  - статический момент площади приведенного поперечного сечения элемента относительно наиболее растянутого волокна бетона.

Момент инерции приведенного поперечного сечения относительно его центра тяжести определяется по формуле:

$$I_{red} = I_b + I_s \cdot \alpha_{s2} + I'_s \cdot \alpha_{s1} + I_f \cdot \alpha_f, \quad (6.3.6)$$

где  $I_b, I_s, I'_s, I_f$  - моменты инерции площадей сечения соответственно сжатой зоны бетона, растянутой арматуры, сжатой арматуры, внешнего усиления композитными материалами относительно центра тяжести приведенного без учета бетона растянутой зоны поперечного сечения;

$\alpha_{s2}, \alpha_{s1}, \alpha_f$  - коэффициенты приведения растянутой арматуры, сжатой арматуры и внешнего усиления композитными материалами к бетону.

Значения  $I_s \cdot$  и  $I'_s \cdot$  определяют по общим правилам сопротивления материалов, принимая расстояние от наиболее сжатого волокна бетона до центра тяжести приведенного (с коэффициентами приведения  $\alpha_{s1}$  и  $\alpha_{s2}$ ) поперечного сечения без учета бетона растянутой зоны  $y_{cm}$ .

Расстояние  $e_x$  определяется по формуле:

$$e_x = \frac{W_{red}}{A_{red}}, \quad (6.3.7)$$

$A_{red}$  - площадь сечения приведенного поперечного сечения элемента, определяемая по формуле:

$$A_{red} = A + A_s \cdot \alpha + A'_s \cdot \alpha + A_f \cdot \alpha_f, \quad (6.3.8)$$

$\alpha$  и  $\alpha_f$  - коэффициенты приведения стальной арматуры и арматуры из полимерных композитов к бетону, определяемые из соотношений:

$$\alpha = \frac{E_s}{E_b}; \quad \alpha_f = \frac{E_f}{E_b}, \quad (6.3.9)$$

$A, A_s, A'_s$  и  $A_f$  - площади поперечного сечения соответственно бетона, растянутой стальной арматуры, сжатой стальной арматуры и арматуры из полимерных композитов.

### 6.3.2. Расчет по раскрытию трещин

6.3.2.1. Расчет по раскрытию трещин железобетонных элементов, усиленных СВА из полимерных композитов, следует производить из условия:

$$a_{crc} \leq a_{crc,ult}, \quad (6.3.10)$$

где  $a_{crc}$  – ширина раскрытия трещин от действия внешней нагрузки;

$a_{crc,ult}$  – предельно допустимая ширина раскрытия трещин.

Значения  $a_{crc,ult}$  принимают равными:

а) из условия обеспечения сохранности арматуры:

0,3 мм – при продолжительном раскрытии трещин;

0,4 мм – при непродолжительном раскрытии трещин;

б) из условия ограничения проницаемости конструкций

0,2 мм – при продолжительном раскрытии трещин;

0,3 мм – при непродолжительном раскрытии трещин.

6.3.2.2. Расчет железобетонных элементов следует производить по продолжительному и по непродолжительному раскрытию нормальных и наклонных трещин.

Ширину продолжительного раскрытия трещин определяют по формуле:

$$a_{crc} = a_{crc1}, \quad (6.3.11)$$

Ширину непродолжительного раскрытия трещин – по формуле:

$$a_{crc} = a_{crc1} + a_{crc2} - a_{crc3}, \quad (6.3.12)$$

где  $a_{crc1}$  – ширина раскрытия трещин от продолжительного действия постоянных и временных длительных нагрузок;

$a_{crc2}$  – ширина раскрытия трещин от непродолжительного действия постоянных и временных (длительных и кратковременных) нагрузок;

$a_{crc3}$  – ширина раскрытия трещин от непродолжительного действия постоянных и временных длительных нагрузок.

6.3.2.3. Расчет ширины раскрытия трещин, нормальных к продольной оси усиленного железобетонного элемента, следует производить, принимая в расчетных формулах геометрические характеристики сечения элемента с учетом армирования композитными материалами по формуле:

$$a_{crc,i} = \varphi_1 \cdot \varphi_2 \cdot \varphi_3 \cdot \varphi_4 \cdot \psi_s \cdot \frac{\sigma_s}{E_s} l_s, \quad (6.3.13)$$

где  $\sigma_s$  – напряжение в продольной растянутой арматуре в нормальном сечении с трещиной от соответствующей внешней нагрузки;

$l_s$  – базовое (без учета влияния вида поверхности арматуры) расстояние между смежными нормальными трещинами;

$\psi_s$  – коэффициент, учитывающий неравномерное распределение относительных деформаций растянутой арматуры между трещинами допускается принимать равным 1,0. Если при этом  $a_{cr} > a_{crc,ult}$ , то для изгибаемых элементов значение коэффициента  $\psi_s$  допускается определять по формуле:

$$\psi_s = 1 - 0,8 \cdot \frac{M_{crc}}{M}, \quad (6.3.14)$$

$\varphi_1$  – коэффициент, учитывающий продолжительность действия нагрузки, принимаемый равным:

1,0 – при непродолжительном действии нагрузки;

1,4 – при продолжительном действии нагрузки;

$\varphi_2$  – коэффициент, учитывающий профиль продольной арматуры, принимаемый равным:

0,5 – для арматуры периодического профиля;

0,8 – для гладкой арматуры;

$\varphi_3$  – коэффициент, учитывающий характер нагружения, принимаемый равным:

1,0 – для элементов изгибаемых и внецентренно сжатых;

1,2 – для растянутых элементов.

$\varphi_4$  – коэффициент, учитывающий совместную работу усиленных композитными материалами железобетонных элементов, принимаемый равным 1,4;

Значения напряжения  $\sigma_s$  в растянутой арматуре изгибаемых элементов определяют по формуле

$$\sigma_s = \frac{M(h_0 - y_c)}{I_{red}} \cdot \alpha_{s1}, \quad (6.3.15)$$

где  $I_{red}, y_c$  – момент инерции и высота сжатой зоны приведенного поперечного сечения элемента, определяемые с учетом площади сечения только сжатой зоны бетона, площадей сечения растянутой и сжатой арматуры, усиления композитными материалами, принимая в соответствующих формулах значения коэффициента приведения арматуры к бетону  $\alpha_{s2} = \alpha_{s1}$ .

Для изгибаемых элементов  $y_c = x$ , где  $x$  – высота сжатой зоны бетона, определяемая согласно при  $\alpha_{s2} = \alpha_{s1}$ .

Значение коэффициента приведения арматуры к бетону  $\alpha_{s1}$  определяют по формуле:

$$\alpha_{s2} = \alpha_{s1} = \frac{E_s}{E_{b,red}}, \quad (6.3.16)$$

где  $E_{b,red}$  – приведенный модуль деформации сжатого бетона, учитывающий неупругие деформации сжатого бетона и определяемый по формуле:

$$E_{b,red} = \frac{R_{b,n}}{\varepsilon_{b1,red}}, \quad (6.3.17)$$

Коэффициент приведения внешнего усиления композитными материалами определяется по формуле:

$$\alpha_f = \frac{E_f}{E_{b,red}}, \quad (6.3.18)$$

Для изгибаемых элементов положение нейтральной оси (средняя высота сжатой зоны бетона) определяют из уравнения

$$S_{b0} = \alpha_{s2} \cdot S_{s0} - \alpha_{s1} \cdot S'_{s0} + \alpha_f \cdot S_f, \quad (6.3.19)$$

где  $S_{b0}, S_{s0}, S'_{s0}, S_f$  – статические моменты соответственно сжатой зоны бетона, растянутой и сжатой арматуры относительно нейтральной оси.

Для прямоугольных сечений с растянутой и сжатой арматурой и внешним армированием композитными материалами высоту сжатой зоны определяют по формуле:

$$x = h_0 \left[ \sqrt{(\mu_s \alpha_{s2} + \mu'_s \alpha_{s1} + \mu_f \alpha_f) + 2 \left( \mu_s \alpha_{s2} + \mu'_s \alpha_{s1} \frac{a'}{h_0} + \mu_f \alpha_f \right) - (\mu_s \alpha_{s2} + \mu'_s \alpha_{s1} + \mu_f \alpha_f)} \right] \quad (6.3.20)$$

,

$$\text{где } \mu_s = \frac{A_s}{bh_0}; \mu'_s = \frac{A'_s}{bh_0}; \mu_f = \frac{A_f}{bh_0}$$

Значения базового расстояния между трещинами  $l_s$  определяют по формуле

$$l_s = 0,5 \cdot \frac{A_{bt}}{A_s} \cdot d_s, \quad (6.3.21)$$

и принимают не менее  $10 d_s$  и  $100$  мм и не более  $40 d_s$  и  $400$  мм.

Здесь  $A_{bt}$  – площадь сечения растянутого бетона;

$A_s$  – площадь сечения растянутой арматуры;

$d_s$  – номинальный диаметр арматуры.

Значения  $A_{bt}$  определяют по высоте растянутой зоны бетона  $x_t$ , используя правила расчета момента образования трещин. При этом высота растянутой зоны бетона принимается не менее  $2a$  и не более  $0,5h$ .

Для прямоугольных, тавровых и двутавровых сечений высоту растянутой зоны  $x_t$  допускается определять по формуле:

$$x_t = y_t k, \quad (6.3.22)$$

где  $y_t$  - высота растянутой зоны бетона как для упругого материала при  $\alpha = \frac{E_s}{E_b}$ ;

$k$  – поправочный коэффициент, равный для прямоугольных сечений и тавровых с полкой в сжатой зоне – 0,90, для двутавровых – 0,95.

### 6.3.3. Расчет железобетонных элементов по деформациям

6.3.3.1. Расчет железобетонных изгибаемых элементов, усиленных СВА из полимерных композитов, следует проводить производить из условия:

$$f \leq f_{ult}, \quad (6.3.23)$$

где  $f$  – расчетный прогиб усиленного железобетонного элемента от действия внешней нагрузки;

$f_{ult}$  – значение предельно допустимого прогиба усиленного железобетонного элемента.

В общем случае прогибы железобетонных конструкций определяют по общим правилам строительной механики в зависимости от изгибных, сдвиговых и осевых деформационных характеристик железобетонного элемента в сечениях по его длине (кривизны, углов сдвига и т.д.).

Для изгибаемых железобетонных элементов постоянного поперечного сечения, работающих как свободно опертые или консольные балки, расчетный прогиб определяется по формуле:

$$f = \left( \frac{1}{r} \right) \cdot k \cdot S \cdot l^2, \quad (6.3.24)$$

где  $\left(\frac{1}{r}\right)$  - полная кривизна железобетонного элемента;

$k$  - коэффициент приведения, принимаемый для изгибаемых железобетонных балок равным 2,0;

$S$  - коэффициент, принимаемый для свободно опертых балок равным 5/48, для консольных балок – 1/3;

$l$  - расчетный пролет балки.

Кривизны железобетонных элементов, усиленных композитными материалами, в общем случае определяются на основе нелинейной деформационной модели.

Упрощенно для участков с трещинами железобетонных изгибаемых элементов полную кривизну определяют по формуле:

$$\frac{1}{r} = \left(\frac{1}{r}\right)_1 - \left(\frac{1}{r}\right)_2 + \left(\frac{1}{r}\right)_3, \quad (6.3.25)$$

$\left(\frac{1}{r}\right)_1$  – кривизна от непродолжительного действия всей нагрузки, на которую производят расчет по деформациям;

$\left(\frac{1}{r}\right)_2$  – кривизна от непродолжительного действия постоянных и временных длительных нагрузок;

$\left(\frac{1}{r}\right)_3$  – кривизна от продолжительного действия постоянных и временных длительных нагрузок.

Кривизну железобетонных элементов  $\left(\frac{1}{r}\right)$  от действия соответствующих нагрузок определяют по формуле:

$$\frac{1}{r} = \frac{M}{D}, \quad (6.3.26)$$

где  $M$  – изгибающий момент от внешней нагрузки (с учетом момента от продольной силы  $N$ ) относительно оси, нормальной плоскости действия изгибающего момента и проходящей через центр тяжести приведенного поперечного сечения элемента;

$D$  – изгибная жесткость приведенного поперечного сечения элемента, определяемая по формуле:

$$D = E_{b1} \cdot I_{red}, \quad (6.3.27)$$

где  $E_{b1}$  – модуль деформации сжатого бетона, определяемый в зависимости от продолжительности действия нагрузки и с учетом наличия трещин равным  $E_{b,red}$ ;

$I_{red}$  – момент инерции приведенного поперечного сечения относительно его центра тяжести, определяемый с учетом наличия трещин и выполненного усиления композитными материалами по формуле:

$$I_{red} = I_b + I_s \cdot \alpha_{s2} + I'_s \cdot \alpha_{s1} + I_f \cdot \alpha_f, \quad (6.3.28)$$

где  $I_b, I_s, I'_s, I_f$  – моменты инерции площадей сечения соответственно сжатой зоны бетона, растянутой арматуры, сжатой арматуры, внешнего усиления композитными материалами относительно центра тяжести приведенного без учета бетона растянутой зоны поперечного сечения;

$\alpha_{s2}, \alpha_{s1}, \alpha_f$  – коэффициенты приведения растянутой арматуры, сжатой арматуры и внешнего усиления композитными материалами к бетону.

Значения  $I_s \cdot$  и  $I'_s \cdot$  определяют по общим правилам сопротивления материалов, принимая расстояние от наиболее сжатого волокна бетона до центра тяжести приведенного (с коэффициентами приведения  $\alpha_{s1}$  и  $\alpha_{s2}$ ) поперечного сечения без учета бетона растянутой зоны  $y_{cm}$ .

Для изгибаемых элементов:

$$y_{cm} = x_m, \quad (6.3.29)$$

где  $x_m$  – средняя высота сжатой зоны бетона, учитывающая влияние работы растянутого бетона между трещинами.

Значения  $I_b$  и  $y_{cm}$  определяют по общим правилам расчета геометрических характеристик сечений упругих элементов.

Значения коэффициентов приведения растянутой и сжатой арматуры определяются по формуле:

$$\alpha_{s2} = \alpha_{s1} = \frac{E_s}{E_{b,red}}, \quad (6.3.30)$$

Коэффициент приведения внешнего усиления композитными материалами определяется по формуле:

$$\alpha_f = \frac{E_f}{E_{b,red}}, \quad (6.3.31)$$

Для изгибаемых элементов положение нейтральной оси (средняя высота сжатой зоны бетона) определяют из уравнения

$$S_{b0} = \alpha_{s2} \cdot S_{s0} - \alpha_{s1} \cdot S'_{s0} + \alpha_f \cdot S_f, \quad (6.3.32)$$

где  $S_{b0}, S_{s0}, S'_{s0}, S_f$  – статические моменты соответственно сжатой зоны бетона, растянутой и сжатой арматуры относительно нейтральной оси.

Для прямоугольных сечений с растянутой и сжатой арматурой и внешним армированием композитными материалами высоту сжатой зоны определяют по формуле:

$$x_m = h_0 \left[ \sqrt{(\mu_s \alpha_{s2} + \mu'_s \alpha_{s1} + \mu_f \alpha_f) + 2 \left( \mu_s \alpha_{s2} + \mu'_s \alpha_{s1} \frac{a'}{h_0} + \mu_f \alpha_f \right)} - (\mu_s \alpha_{s2} + \mu'_s \alpha_{s1} + \mu_f \alpha_f) \right], \quad (6.3.33)$$

$$\text{где } \mu_s = \frac{A_s}{bh_0}; \mu'_s = \frac{A'_s}{bh_0}; \mu_f = \frac{A'_s}{bh_0}$$

Для изгибаемых железобетонных элементов прямоугольного сечения момент инерции приведенного поперечного сечения определяется по формуле:

$$I_{red} = \frac{bx^3}{12} + bx\left(\frac{x}{2}\right)^2 + \alpha_{s2}A_s(h-x-a)^2 + \alpha_{s2}A'_s(x-a')^2 + \alpha_f A_f(h-x)^2 \quad (6.3.34)$$

Кривизны усиленных железобетонных элементов с нормальными трещинами в растянутой зоне напряжение в арматуре, пересекающей трещины, определяют по формуле:

- для стальной арматуры:

$$\sigma_{sj} = \frac{E_{sj} \cdot \nu_{sj} \cdot \varepsilon_{sj}}{\psi_{sj}}, \quad (6.3.35)$$

где

$$\psi_{sj} = 1 - \frac{1}{1 + 0,8 \frac{\varepsilon_{sj,crc}}{\varepsilon_{sj}}} \quad (6.3.36)$$

Здесь  $\varepsilon_{sj,crc}$  - относительная деформация растянутой арматуры в сечении с трещиной сразу после образования нормальных трещин;

$\varepsilon_{sj}$  - усредненная относительная деформация растянутой арматуры, пересекающей трещины, в рассматриваемой стадии расчета;

- для арматуры из полимерных композитов:

$$\sigma_{fk} = \frac{E_f \cdot \varepsilon_{fk}}{\psi_{fk}}, \quad (6.3.37)$$

где

$$\psi_{fk} = 1 - \frac{1}{1 + 0,8 \frac{\varepsilon_{fk,crc}}{\varepsilon_{fk}}}, \quad (6.3.38)$$

Здесь  $\varepsilon_{fk,crc}$  - относительная деформация арматуры из полимерных композитов в сечении с трещиной сразу после образования нормальных трещин;

$\varepsilon_{fk}$  - усредненная относительная деформация арматуры из полимерных композитов.

## **7. Конструктивные требования к системам внешнего армирования**

### **7.1. Общие требования**

**7.1.1.** Устройство внешнего армирования строительных конструкций системой CarbonWrap® должно выполняться строго в соответствии с технологической документацией проекта производства работ (ППР) по усилению или восстановлению конструкций с учетом п 4.2 настоящего стандарта.

При возникновении противоречий ППР и конструктивных требований настоящего стандарта разработку проекта усиления или восстановления рекомендуется проводить при научно-техническом сопровождении разработчиков настоящего стандарта.

**7.1.2.** Предусмотренная проектом схема устройства внешнего армирования CarbonWrap® должна обеспечивать миграцию влаги из тела бетона. Для этого в плитных конструкциях соседние элементы усиления рекомендуется наклеивать с интервалом между ними в свету не менее 200мм. В случае, если одна из горизонтальных поверхностей плиты является открытой для миграции влаги, то по другой поверхности наклейка лент и тканей может выполняться без интервалов. Наклейка продольных лент в балочных элементах должна быть выполнена так, чтобы в каждом поперечном сечении лентами было охвачено не более 50% периметра поперечного сечения усиливаемого элемента балки.

**7.1.3.** Не допускается производить наклейку элементов усиления на внутренних углах (в местах пересечения балок, стыков стенок и полок балок и др.), а также криволинейных поверхностях по внутреннему радиусу.

**7.1.4.** Наклейка элементов усиления на основание с трещинами шириной раскрытия более 0,2 мм без их заделки не допускается. Заделка трещин с раскрытием более 0,2 мм выполняется инъектированием низковязким составом на основе эпоксидных смол, трещины с меньшим раскрытием допускается затирать полимерцементным раствором.

**7.1.5.** Пересечение элементов усиления допускается только при условии обеспечения их взаимного сцепления путем склеивания.

**7.1.6.** Устройство системы внешнего армирования из многослойных полимерных композитов на вертикальных и горизонтальных поверхностях в продольном и поперечном направлениях следует производить путем последовательного послойного наклеивания элементов усиления поочередно в двух направлениях.

**7.1.7.** При устройстве обоем и хомутов из лент, сеток или тканей в поперечном направлении и при загибе продольных лент, сеток или тканей через углы конструкции на углах необходимо выполнить фаски с катетом не менее 20 мм, либо галтель с радиусом не менее 20 мм (рис. 7.1).

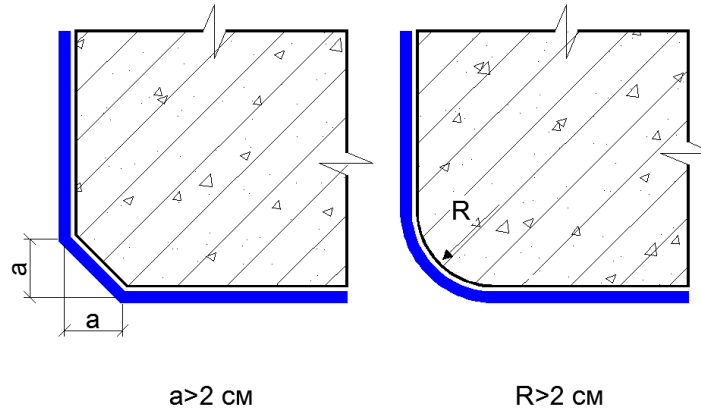


Рис. 7.1. Подготовка углов конструкции перед наклеиванием лент, сеток или тканей

**7.1.8.** Допустимое значение радиуса загиба при наклейке ламинатов при усилении криволинейной поверхности элементов следует принимать по данным производителя.

**7.1.9.** Количество слоев многослойного полимерного композита системы внешнего армирования следует ограничивать в зависимости от силы сцепления полимерного композита с поверхностью бетонного основания. Рекомендуется количество слоев принимать: для ламината – не более трех, для лент, сеток, тканей – не более 5.

**7.1.10.** Ширину элементов усиления внешнего поперечного армирования  $w_f$  следует принимать не менее 50 мм и не более 600 мм. Шаг наклейки в свету элементов усиления поперечного армирования  $s_f$  принимается не менее  $w_f$  и не более меньшего значения из:  $h_0 / 2$ ;  $3w_f$ .

**7.1.11.** Максимальное расстояние в свету между элементами усиления внешнего продольного армирования изгибаемого элемента  $s_{f \max}$  следует принимать не более меньшего значения из:  $0.2L$ ;  $5h$ , где  $L$  - пролет изгибаемого элемента или удвоенный вылет консоли,  $h$  – высота сечения изгибаемого элемента.

**7.1.12.** Расстояние от края элемента усиления внешнего продольного армирования до боковой грани изгибаемого элемента следует принимать равным величине защитного слоя стальной арматуры усиливаемого элемента, но не более 20 мм.

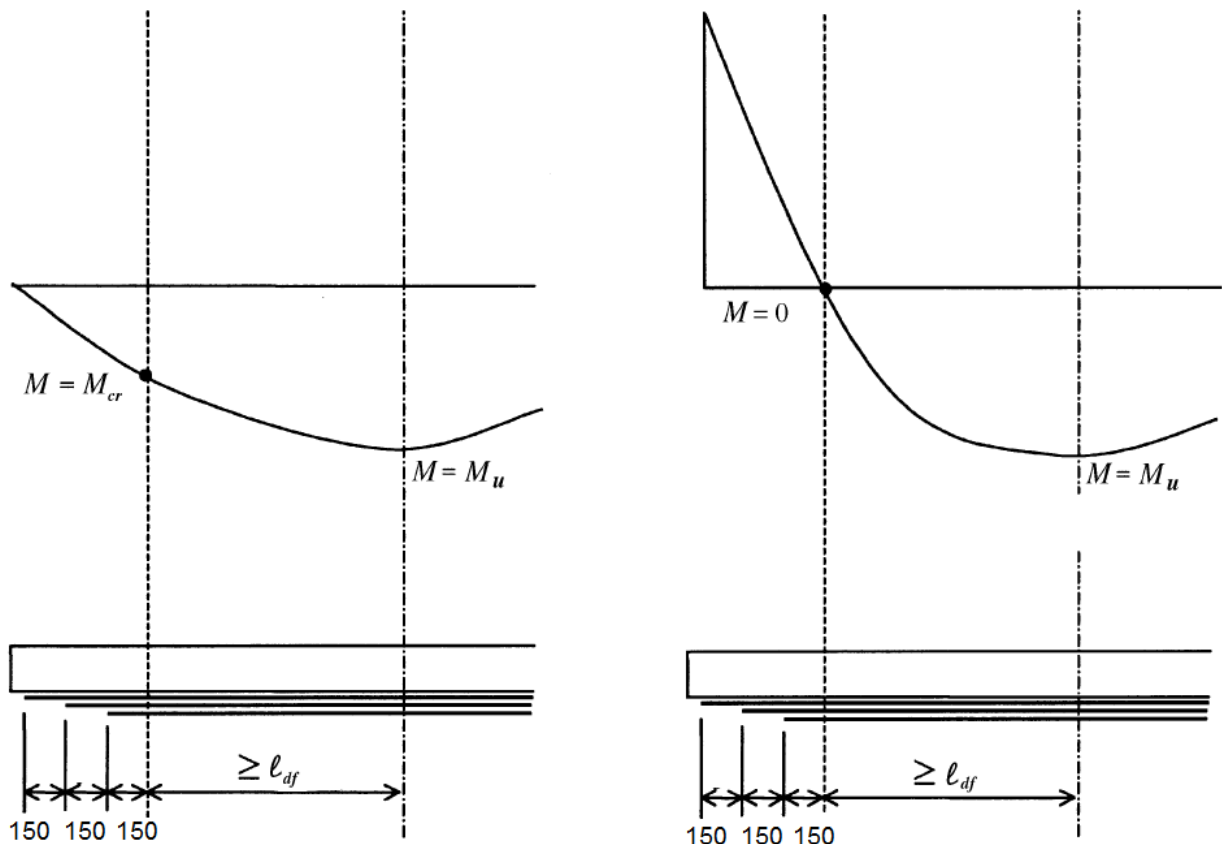
**7.1.13.** При усилении растянутой зоны изгибаемого элемента первый слой элемента усиления в продольном направлении следует заводить в сжатую зону (неразрезные элементы) или в зону, где действующие усилия не приводят к образованию трещин (свободно опертые элементы), а каждый последующий слой следует обрезать не ближе 150 мм обреза предыдущего слоя (рис. 7.2).

Элементы усиления должны быть заведены за нормальное к продольной оси усиливаемого элемента сечение, в котором они учитываются с расчетным сопротивлением  $R_f$ , на длину, не меньшую, чем:

$$l_{df} = \sqrt{\frac{nE_f t_f}{\sqrt{R_{b,n}}}} \quad (\text{мм}), \quad (7.1)$$

но не менее, чем на 100 мм - при прочности бетона основания на сжатие более 25 МПа, и на 150 мм - при прочности бетона менее 25 МПа.

Параметры формулы (7.1) принимают как безразмерные величины, а числовое значение  $t_f$  - в мм.



а) свободно опертый элемент    б) неразрезной элемент

Рис. 7.2. Усиление растянутой зоны элемента

**7.1.14.** Для обеспечения анкеровки элементов усиления допускается устройство дополнительных механических креплений стальными пластинами, заведение лент, сеток или тканей в пазы в бетоне, устройство химических анкеров и анкеров из углеродных жгутов.

**7.1.15.** При усилении нормальных сечений из расчета по изгибающим моментам зоны, где действующая расчетная поперечная сила превышает  $\frac{2}{3}Q_b$  концы элементов усиления в продольном направлении для предотвращения отслоения следует анкеровать приклейкой трехсторонних хомутов или сплошным обертыванием в поперечном направлении.

**7.1.16.** Длину нахлёста при сращивании элементов усиления по длине в продольном направлении или при устройстве обойм следует принимать по указаниям его изготовителя или по данным испытаний. При этом при устройстве обойм длину нахлестки рекомендуется принимать не менее, чем 150 мм.

Для углеродных лент, тканей и сеток сращивание следует производить только в направлении армирования элемента усиления. Стыковка ламелей по длине не допускается.

Нахлест элементов усиления следует располагать «вразбежку» не более 50% в одном расчетном сечении, и кроме того, для элементов усиления в продольном направлении – в зонах с наименьшими усилиями в полимерном композите.

Испытания образцов с участком стыка элементов усиления по длине следует выполнять согласно требованиям ГОСТ 25.601.

Длина нахлестки должна обеспечивать прочность сечения элементов усиления со стыком не ниже прочности сечения без стыка.

**7.1.17.** Поперечные хомуты следует наклеивать поверх продольного элемента усиления. Вертикальные поперечные хомуты следует выполнять из цельного отрезка элемента усиления (рисунок 7.3), наклонные поперечные хомуты – из двух отрезков, стыкуемых на нижней поверхности балки (ребра балки) (рисунок 7.4). При этом в определении несущей способности по наклонному сечению учитываются только прямолинейные части композитных элементов усиления и соответствующие проекции их наклонных частей.

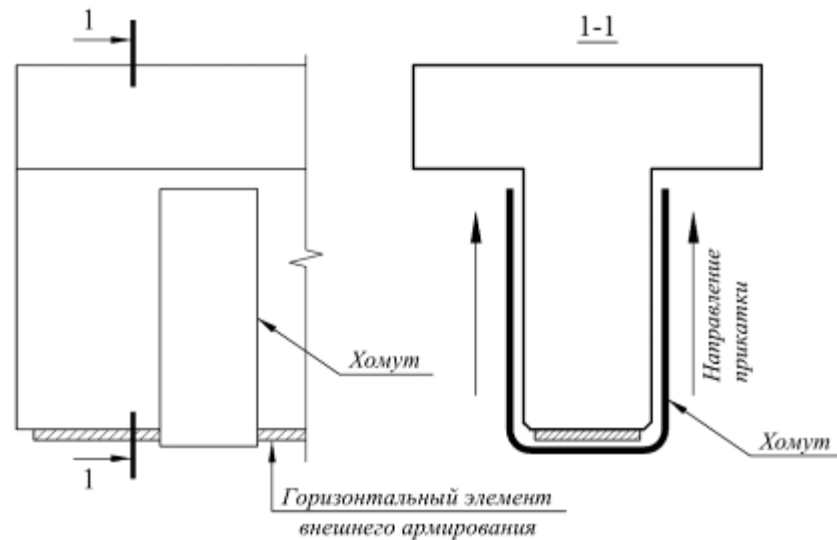


Рис. 7.3. Схема установки вертикальных хомутов в балочных конструкциях

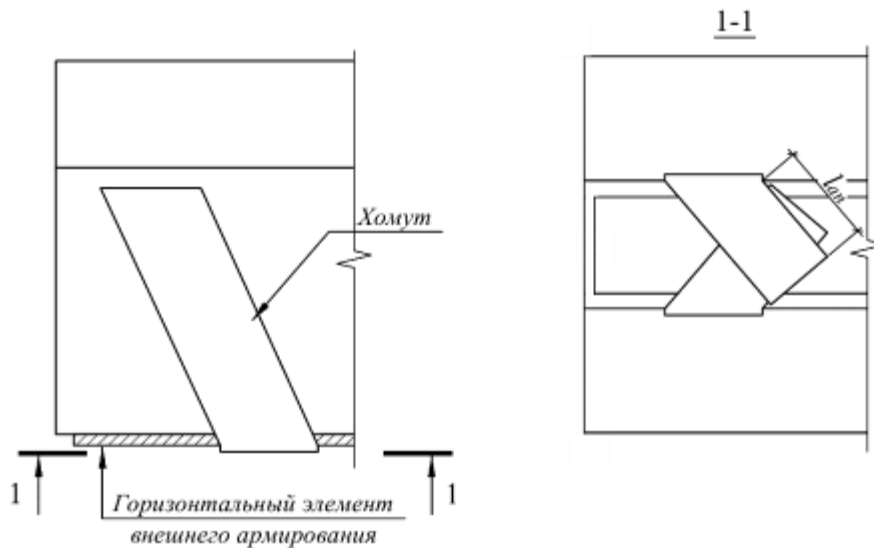


Рис. 7.4. Схема установки наклонных хомутов в балочных конструкциях

**7.1.18.** При усилении нормальных сечений изгибаемых балочных конструкций и ребристых плит ленты, холсты или ткани для улучшения их анкеровки и предотвращения отслаивания защитного слоя бетона рекомендуется загибать на боковые поверхности балки на 100 мм (рисунок 7.5).

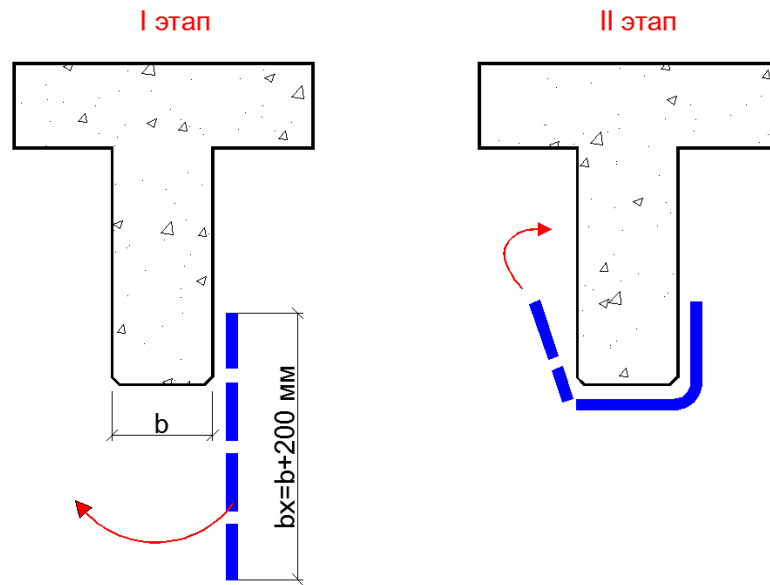


Рис. 7.5. Схема установки лент на балочные конструкции

**7.1.19.** Конструктивную схему усиления жестких узлов конструкций рекомендуется принимать согласно рисунка 7.6.

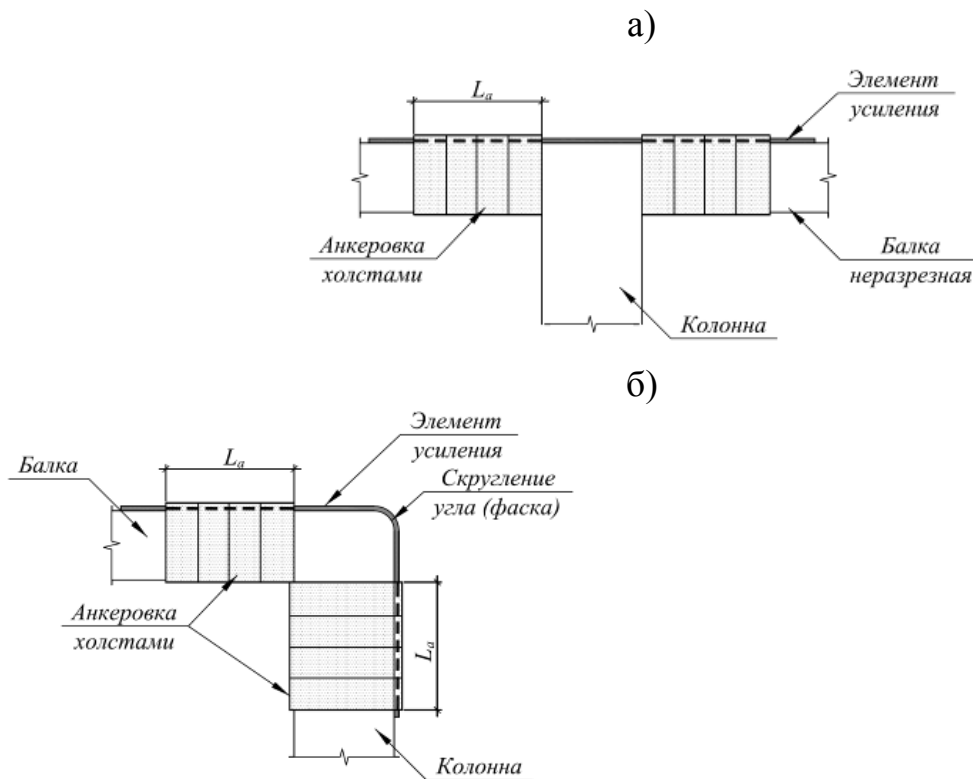


Рис. 7.6. Схема анкеровки лент или тканей

**7.1.20.** При усилении изгибаемых в двух направлениях плит в продольном и поперечном направлениях вначале следует приклеивать элементы усиления вдоль длинной стороны плиты (рисунок 7.7). Элементы усиления следует принимать из ламинатов, лент или тканей.

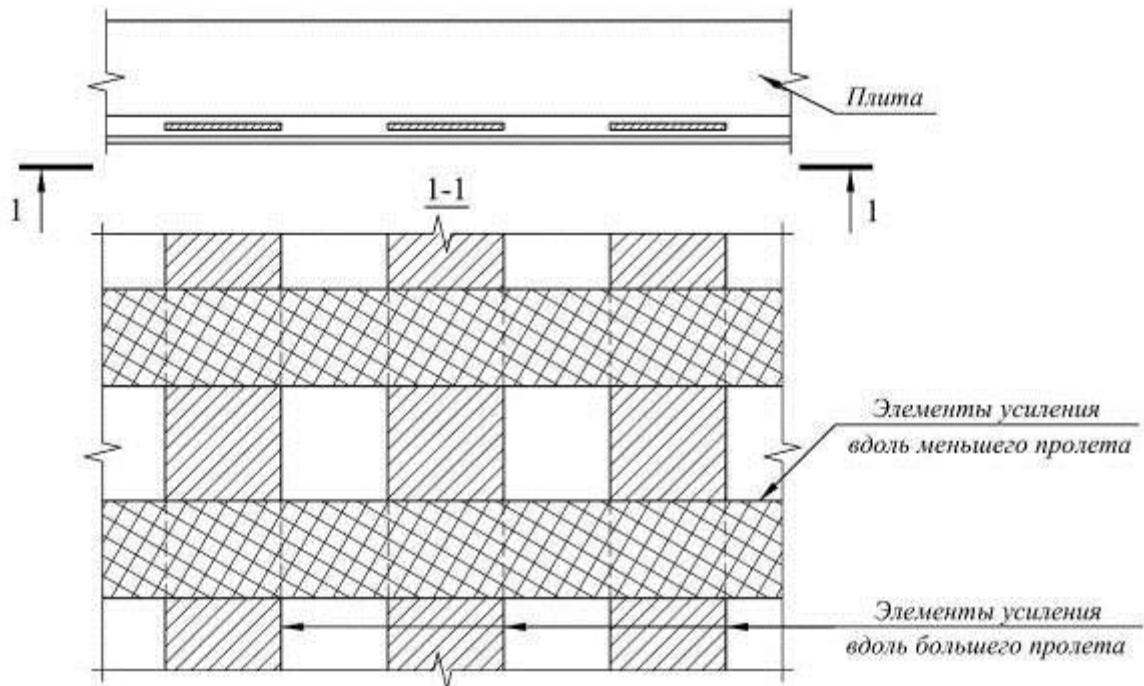


Рис. 7.7 Схема расположения элементов усиления изгибаемых в двух направлениях плит

**7.1.21.** При усилении сжатых конструкций путем устройства обойм в поперечном направлении обоймы следует устанавливать по всей высоте конструкций.

Обоймы колонн рекомендуется устраивать непрерывно по всей длине колонны (рисунок 7.8, а) или с разрывами по высоте (рисунок 7.8, б)

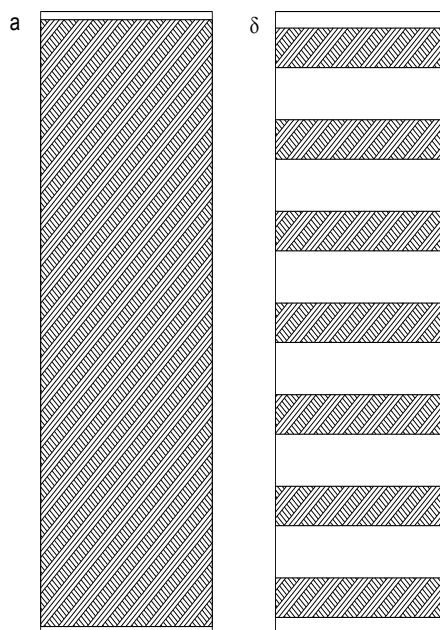


Рис. 7.8. Способы усиления колонн обоями

**7.1.22.** При усилении конструкций, эксплуатируемых в условиях постоянной влажности (внутри помещения), допускается наклеивание ламинатов, лент, холстов или тканей и по всей поверхности основания. При этом обоймы колонн следует располагать не ближе 20 мм до перекрытия.

**7.1.23.** Примеры конструктивных решений усиления отдельных представителей несущих железобетонных конструкций и узлов их сопряжения системой внешнего армирования CarbonWrap® приведены в Альбоме технических решений [16].

**7.1.24.** При усилении и восстановлении железобетонных конструкций углеродными сетками на ремонтных составах в соответствии с ТУ [13, 14, 15] необходимо соблюдать следующие толщины слоев:

- базового слоя (слой, укладываемый на основание) не менее 2мм и не более 5мм;
- промежуточный слой (между углеродных сеток) не менее толщины сетки и не более 3мм;
- укрывного слоя (защитный слой внешнего усиления) – не менее 2мм и не более 5мм;

- общая толщина внешнего армирования с применением углеродных сеток на ремонтных составах не должна превышать 15мм.

Для восстановления железобетонных конструкций рекомендуется использовать не более 2 слоев углеродных сеток.

При этом для восстановления железобетонных конструкций следует использовать углеродные сетки на ремонтных составах с относительным содержанием волокна не более 30% от площади усиления.

## **7.2. Требования к проектированию анкерных жгутов**

7.2.1. Анкера из углеродных жгутов CarbonWrap® Anchor наиболее целесообразно применять для анкеровки композитных материалов усиления (ламинаты, углеродные ленты и ткани, сетки и др.) железобетонных конструкций. Допускается при соответствующем экспериментальном обосновании применять углеродные анкерные жгуты для предотвращения отслоения композитного материала от бетона основания.

При использовании анкеров из углеродных жгутов для анкеровки композитных материалов усиления, несущую способность конструкций следует принимать с учетом понижающих коэффициентов условий работы, принимаемых равным для ламелей 0,85, для остальных материалов – 0,9.

7.2.2. Анкера из углеродных жгутов CarbonWrap® Anchor применяют диаметрами 4-18 мм. Применение анкеров диаметром более 18мм неэффективно.

7.2.3. Анкерные углеродные жгуты CarbonWrap® Anchor могут быть установлены различными способами: в виде одиночной анкеровки, двойной анкеровки и параллельной анкеровки (см. п. 8.5.4.3.1).

Расположение анкеров из углеродных жгутов CarbonWrap® Anchor относительно композитного материала усиления рекомендуется преимущественно применять в виде решения, приведенного на рис. 7.9. Установка производится на первоначально установленные системы внешнего усиления с последующей установкой углеродного анкера

поверх финишного слоя. При необходимости устанавливают дополнительный внешний слой из элемента усиления.

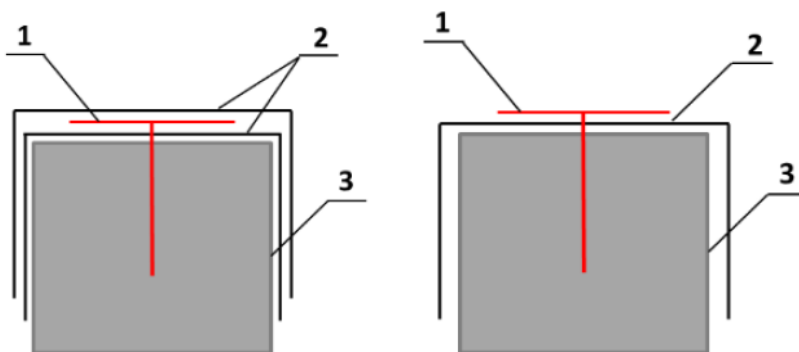


Рис. 7.9. Схемы установки углеродных анкеров в системе внешнего армирования.

1 – углеродный анкер, 2 – композитный материал усиления, 3 – усиливаемая конструкция

7.2.4. Рекомендуется устанавливать один анкер на принятую ширину каждой полосы ленты, сетки или ткани (ламели) композитного материала усиления.

Анкера, устанавливаемые вдоль элемента усиления, должны размещаться максимально близко к нему. Анкера должны всегда помещаться в теле железобетона.

7.2.5. Отверстия под анкера выполняют по возможности без отклонений от нормали к поверхности бетона. Перед сверлением отверстий необходимо выполнить оценку расположения арматуры в усиливаемой конструкции неразрушающими методами согласно ГОСТ 22904. Следует предусматривать радиус закругления кромки отверстия 5-10мм.

7.2.6. Глубина заделки внутренней части анкеров из углеродных жгутов в тело бетона принимается не менее 10 диаметров анкера и не менее 100мм. Длину внешней части волокон жгута («волана») рекомендуется принимать не менее 10 диаметров анкера и не менее 100мм.

7.2.7. Площадь поперечного сечения анкера из углеродного жгута при его работе на действие продольных вырывающих сил рекомендуется определять из условия:

$$N \leq N_{ult} = k_3 R_{an} A_{an}, \quad (7.2)$$

где:

$R_{an}$  - расчетное сопротивление анкера растяжению;

$A_{an}$  - площадь поперечного сечения анкера;

Расчетное сопротивление анкера на растяжение принимают в соответствии с указаниями СП 164.1325800 по формуле (4.2), определяя  $\gamma_f$  и  $\gamma_{f1}$  как для углекомпозита;

$\gamma_{f2}$  - коэффициент условий работы полимерного композита, учитывающий его сцепление с бетоном, определяемый по формуле:

$$\gamma_{f2} = \frac{1}{2.5 \cdot \varepsilon_{f,ult}} \sqrt{\frac{R_b}{E_f d_{an}}} \leq 0.9, \quad (7.3)$$

$d_{an}$  - диаметр анкера из углеродного жгута, мм.

Остальные показатели в формуле (7.2) определяются в соответствии с указаниями СП 164.1325800.

Коэффициент  $k_3$  принимают равным:

при  $4 \leq d_{an} \leq 8$  мм  $k_3 = 1 + 0.05d_{an}$

при  $8 < d_{an} \leq 12$  мм  $k_3 = 3,2(1 - 0.07d_{an})$

при  $d_{an} > 12$  мм  $k_3 = 0.5$

$d_{an}$  - в мм.

При действии поперечных сил площадь поперечного сечения анкера из углеродного жгута рекомендуется определять из условия:

$$Q \leq Q_{ult} = k_{\kappa} R_{an} A_{an}, \quad (7.4)$$

где:  $R_{an}$  и  $A_{an}$  - то же, что в формуле (7.1);

Коэффициент  $k_{\kappa}$  принимать равным:

при  $4 \leq d_{an} \leq 8$  мм  $k_k = 1,2$ ;

при  $d_{an} > 8$  мм  $k_k = 1$ .

При совместном действии продольной силы вдоль анкера (вырыв) и поперечной силы поперек оси анкера (срез) допускается несущую способность определять из условия:

$$\frac{N}{N_{ult}} + \frac{Q}{Q_{ult}} \leq 1, \quad (7.5)$$

7.2.8. Рекомендуется анкера усилить дополнительно двумя участками композитного материала, устанавливаемого поверх «волана». При этом направления волокон композитного материала должны быть разнонаправленными.

### **7.3. Требования к проектированию углеродных сеток на полимер-цементном составе**

7.3.1. Допускается выполнять восстановление и усиление нормальных и наклонных сечений железобетонных конструкций путем устройства систем внешнего армирования с применением углеродных сеток, монтируемых на ремонтные составы согласно ТУ [13, 14, 15].

7.3.2. Расчет усиления железобетонных конструкций необходимо производить при обязательном научном сопровождении разработчиков настоящего стандарта с учетом требований раздела 5, п. 7.3.3 и 7.1.24.

7.3.3. При отсутствии достаточных опытных данных от разработчиков настоящего стандарта допускается проводить оценочный расчет в соответствии со следующими положениями:

- а) Расчетное сопротивление углеродной сетки принимается по формуле 5.1 с коэффициентом надежности по материалу 2,5;

б) Расчетное значение предельных относительных деформаций принимается не более  $0,5 \varepsilon_f$ , определенной по формуле 5.3;

в) Расчет нормальных сечений изгибаемых элементов проводится в соотв. с п. 6.2.2;

г) Расчет наклонных сечений изгибаемых элементов проводится в соотв. с п. 6.2.6

При этом, при определении площади сечения хомута в качестве толщины допускается принимать приведенное значение, определенное по поверхностной площади сетки. Максимальная расчетная деформация СВА определяется по формуле:

$$\varepsilon_{f,ult} = k_v \varepsilon_f \leq 0,004, \text{ где } \varepsilon_f, \text{ определенной в соответствии с п. 7.3.2а и б.}$$

Длина анкеровки при этом принимается не менее 200 мм.

## **8. Технология производства работ по усилению железобетонных конструкций полимерными композитными материалами**

### **8.1. Основные положения**

8.1.1 Работы по усилению железобетонных конструкций путем внешнего армирования композитными материалами включает в себя следующие этапы:

- восстановление целостности и геометрической формы усиливаемой конструкции (включая, при необходимости, антикоррозионные мероприятия);
- подготовка поверхности конструкции в местах устройства усиливающих элементов внешнего армирования;
- разметка размещения элементов внешнего армирования в соответствии с принятой проектом схемой наклейки;
- раскрой усиливающих элементов (ленты, ткани, ламината, сетки, анкерного жгута);
- приготовление связующего (адгезива);
- наклейка усиливающих элементов;
- нанесение защитного покрытия.

8.1.2 В качестве основных материалов для внешнего армирования (СВА) применяются армирующие материалы на основе углеродных волокон и связующее (термореактивные адгезивы) на эпоксидной основе согласно п.5.2.1 настоящего стандарта.

8.1.3 Марка усиливающего элемента для ленты, ткани, сетки, ламината и связующего (адгезива) устанавливается проектом усиления или восстановления строительных конструкций.

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

8.1.5 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. Влажность конструкции в зоне усиления не должна превышать 4 %.

8.1.6 При необходимости устройства СВА для железобетонных конструкций, эксплуатирующихся в условиях повышенной влажности (более 4%) следует применять эпоксидное двухкомпонентное связующее типа CarbonWrap® Resin WS+. Применение настоящего связующего на сухих поверхностях не допускается.

8.1.7 При необходимости устройства СВА для железобетонных конструкций, эксплуатирующихся в условиях повышенной температуры (до 110°С) следует применять соответствующее эпоксидное двухкомпонентное связующее типа CarbonWrap® Resin HT+ согласно [7].

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

## **8.2. Требования к поверхности усиливаемой конструкции**

8.2.1 Основание не должно иметь неотремонтированных дефектов и повреждений: сколов, раковин, каверн глубже 5 мм площадью более 25 мм<sup>2</sup>, трещин, участков непрочного, «бухтящего» бетона, признаков коррозии и пр.

8.2.2 Неплоскостность усиливаемой поверхности должна находиться в пределах 5 мм на базе 2 м или 1 мм на базе 0,3 м.

8.2.3 Основание должно быть чистым, без остатков отделки, грязи, жирных пятен, цементной пленки, пыли.

8.2.4 Поверхность конструкции, на которые наносятся элементы усиления, должна быть шероховатой (до 0,3 мм) для обеспечения надежного сцепления связующего с поверхностью конструкции.

8.2.5 При устройстве замкнутых бандажей, хомутов внешнего армирования, усиливаемая конструкция в местах наклейки усиливающих элементов не должна иметь острых углов (они срезаются, образуя фаски).

8.2.6 Фактическая прочность бетона конструкции должна быть подтверждена документально и определена согласно п.5.1.1 настоящего стандарта.

### **8.3. Восстановление целостности и геометрической формы усиливаемых конструкций**

8.3.1 Участки непрочного, кавернозного, бухтящего бетона расчищаются механическим способом до прочного основания; при этом следует исключить возможность повреждения «здоровых» участков бетона ремонтируемой конструкции.

8.3.2 Слабо держащиеся частицы бетона, высолы, грязь, ржавые пятна, пластовая коррозия обнаженных участков арматуры и закладных деталей (при наличии) удаляются металлическими щетками. При очистке стальных элементов не выполняется зачистка металла до блеска.

8.3.3 Поверхность бетона в зоне дефектов обеспыливается продувкой сжатым воздухом под давлением 6-8 атм.

8.3.4 На прокорродировавшую поверхность обнаженной арматуры и закладных деталей с помощью кисти наносят грунт-преобразователь ржавчины.

8.3.5 На поверхность бетона в зоне обнаженной арматуры и закладных деталей, обработанных грунтом-преобразователем ржавчины, а также на участках, где имеются

следы протечек, высолов, ржавых пятен и прочих признаков снижения защитных свойств бетона по отношению к арматуре, следует нанести мигрирующий ингибитор коррозии.

8.3.6 Геометрию конструкции восстанавливают ремонтным составом на основе высокомарочного цемента, микронаполнителя, фракционированного песка и функциональных добавок.

8.3.7 Для восстановления железобетонных конструкций могут быть использованы материалы CarbonWrap® Repair. В зависимости от условий работы необходимо применять различные модификации ремонтных материалов (быстротвердеющие, противоморозные, оказывающее повышенное сопротивление к изгибающим нагрузкам). Наносить состав можно при помощи мастерка, кельмы, шпателя или автоматизированной штукатурной станции с последующим уплотнением и заглаживанием. Максимальная толщина слоя за 1 проход не более 5,0 мм для CarbonWrap® Repair FS согласно [13], не более 30 мм для CarbonWrap® Repair ST [14], не более 25 мм для CarbonWrap® Repair Shotcrete согласно [15]. Дополнительные слои могут выполняться после того как предыдущий слой полностью высохнет.

8.3.8 При ветреной или жаркой погоде, интенсивной инсоляции в период твердения и набора прочности ремонтного состава необходимо принять меры по предотвращению испарения влаги с отремонтированной поверхности (например, накрыть полиэтиленовой пленкой после начала твердения на период не менее суток после завершения укладки ремонтного состава).

8.3.9 Трещины с раскрытием более 0,3 мм должны быть заинъектированы низковязкими эпоксидными составами, трещины с меньшим раскрытием после зачистки должны быть отремонтированы ремонтными составами.

## **8.4. Подготовка поверхности конструкции к устройству внешнего армирования**

8.4.1 На поверхность усиливаемой конструкции мелом (маркерами или пр.) в соответствии с проектной схемой наносят линии разметки зон, подготавливаемых под наклейку усиливающих элементов. При этом используют рулетки, тонкую веревку и пр.

8.4.2 Ширину зон, подготавливаемых под наклейку усиливающих элементов, следует принимать в 1,2 раза больше ширины применяемого армирующего элемента (при этом запас составит 1 - 3 см с каждого края).

8.4.3 Основание следует зачистить от цементной пленки, остатков отделки, масляных пятен и пр., и выровнять в соответствии с установленными требованиями углошлифовальными машинками с насадками «чашками» с алмазным напылением.

8.4.4 В случаях, когда выравнивание шлифовкой невозможно ввиду ограниченного доступа к конструкции или связано с большими трудозатратами, выравнивание допускается выполнять ремонтными материалами.

8.4.5 Тщательно продуть основание сжатым воздухом под давлением 6-8 атм. Пистолет компрессора держать на расстоянии 50 - 70 мм от основания. Рекомендуется выполнять обеспыливание за 2 - 3 раза. Перерывы в процессе обеспыливания связаны с необходимостью дать пыли осесть.

8.4.6 Повторно выполнить разметку зон наклейки ленты аналогично 8.4.2.

## **8.5. Устройство элементов внешнего армирования**

### **8.5.1. Устройство внешнего армирования на основе углеродной ленты (ткани)**

8.5.1.1 Последовательность операций по наклейке ленты (ткани) включает в себя выполнение следующих основных видов работ:

- раскрой ленты (ткани);
- приготовление связующего (адгезива);
- нанесение на подготовленное основание слоя связующего (адгезива);

- укладку подготовленной ленты (ткани);
- пропитку и прикатку ленты (ткани) к основанию;
- нанесение на поверхность ленты финишного слоя связующего;
- нанесение защитного покрытия.

8.5.1.2 Раскрой ленты (ткани) выполняют в соответствии со спецификацией в проекте усиления или восстановления строительной конструкции.

8.5.1.3 Раскрой следует осуществлять на ровной, плоской, чистой поверхности. Резать ленту (ткань) следует с помощью ножа для картона, ножниц. При необходимости резки ленты (ткани) в продольном направлении на нее с двух сторон наклеить малярный скотч, и резку осуществлять по нему (см. рис. 8.1). Непосредственно после наклейки ленты (ткани), ее часть, находящаяся под скотчем, удаляется вместе с ним с помощью ножа.

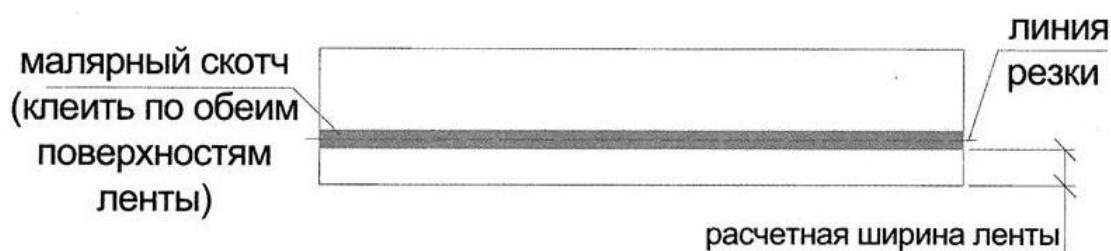


Рисунок 8.1 – Схема раскроя ленты при необходимости разделения вдоль волокон

8.5.1.4 Приготовление связующего производится в соответствии с инструкциями производителя.

8.5.1.5 Связующее (адгезив) наносится с помощью шпателя или кисти на поверхность усиливаемой конструкции (основание) до приобретения характерного «мокрого» вида.

8.5.1.6 На основание должно быть нанесено связующее в количестве, достаточном, чтобы пропитать ленту (ткань). Если связующего для этого недостаточно для полной и

равномерной пропитки ленты, то его добавляют; излишки связующего (капли, потеки) – удаляют. Расход связующего на данную операцию определяется производителем.

8.5.1.7 Ленту (ткань) необходимо укладывать на слой нанесенного связующего путем их прижатия и разглаживания 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.

8.5.1.8 Ленты (ткани) должны укладываться с натяжением. Образование складок и перекосов волокон не допускается.

8.5.1.9 «Прикатка» ленты (ткани) осуществляется сухими шпателями или жесткими резиновыми валиками от центра к краям строго в продольном направлении. «Прикатка» выполняется до плотного прижатия ленты (ткани) к основанию, пока сквозь ленту (ткань) не выступит связующее. Волокна ленты (ткани) должны быть смоченными связующим. Лента (ткань) не должна скользить по поверхности конструкции (это является признаком того, что под углеродным наполнителем имеются излишки связующего, либо оно имеет слишком низкую вязкость).

8.5.1.10 Поверх «прикатанной» ленты (ткани) наносят дополнительный слой связующего для пропитки ее с внешней стороны и вновь осуществляется прикатка. Расход связующего на данную операцию определяется производителем.

8.5.1.11 Продолжительность операций, указанных в 8.5.1.5 - 8.5.1.10, не должна превышать времени жизнеспособности используемого связующего.

8.5.1.12 Устройство внешнего армирования на основе углеродной ленты (ткани) в несколько слоев выполняют аналогично 8.5.1.1 - 8.5.1.11.

8.5.1.13 При требуемом количестве слоев больше двух, устройство лент (тканей) следует выполнять в несколько этапов. На первом этапе в течение времени жизнеспособности связующего «мокрым» способом наклеиваются первые два слоя ленты (ткани). На следующих этапах, после твердения связующего предыдущих слоев, наклеиваются последующие слои (на каждом этапе не более двух слоев).

8.5.1.14 Углеродные ленты (ткани) с повышенной поверхностной плотностью следует пропитывать низковязкими связующими с помощью валиков с двух сторон перед устройством на основание, усиливаемой конструкции.

8.5.1.15 При устройстве внешнего армирования в нескольких направлениях, последовательность наклейки ленты (ткани) в каждом из направлений регламентируется проектом.

8.5.1.16 Допускается выполнение усиливающих элементов, составленных из нескольких лент по длине, при условии соблюдения требуемой длины перехлеста, которая должна быть указана в проекте. Стыковка осуществляется вдоль ленты (ткани) по направлению волокон. Ось перехлеста не должна находиться в одном сечении. Стыковка многослойной СВА осуществляется в разбежку по длине (в разных сечениях).

8.5.1.17 После окончания наклейки углеродной ленты (ткани) до окончательного отверждения связующего следует периодически осматривать состояние выполненного усиления, не допуская провисания углеродного наполнителя, образования пузырей. Найденные дефекты немедленно устраняют с помощью шпателей.

8.5.1.18 В случае, если проектом определено нанесение защитного покрытия из полимерцементного состава, то после отверждения связующего на поверхность наносят финишный слой связующего, который «чипсуется» сухим мелким песком для обеспечения его сцепления с внешним армированием.

## **8.5.2. Устройство внешнего армирования на основе углепластиковых ламелей (ламинатов)**

8.5.2.1 Последовательность операций по наклейке углепластиковых ламелей (ламинатов) включает в себя выполнение следующих основных видов работ:

- раскрой углепластиковой ламели (ламината);
- приготовление адгезива;
- нанесение на подготовленное основание слоя адгезива;

- обезжиривание поверхности ламели и нанесение на нее слоя адгезива;
- укладка подготовленной ламели;
- прикатка ламели к основанию;
- удаление излишков адгезива;
- нанесение защитного покрытия.

8.5.2.2 Раскрой ламели выполняют в соответствии со спецификацией в проекте, на ровной, плоской, чистой поверхности специальным отрезным инструментом.

8.5.2.3 Приготовление адгезива производится в соответствии с инструкциями производителя.

8.5.2.4 Шпателем на подготовленную поверхность бетона (основание) следует нанести слой адгезива толщиной 1,0-2,0 мм. Аналогичный слой (1,0-2,0 мм) нанести на предварительно протертую ацетоном поверхность ламели.

8.5.2.5 Слой адгезива на основании должен быть на 10 мм шире, чем ширина ламината (с напуском по 5 мм с каждой стороны ламели). При этом рекомендуется выполнять откосы к краям под углом 45°.

8.5.2.6 Ламель необходимо укладывать на слой нанесенного адгезива путем их прижатия и прикатки. В процессе укладки необходимо следить, чтобы кромка усиливающего элемента была параллельна линии разметки, нанесенной на основание.

8.5.2.7 Образование перекосов и отклонений ламели не допускается.

8.5.2.8 «Прикатка» ламели осуществляется сухими шпателями или жесткими резиновыми валиками вдоль ламели от центра к краям. «Прикатка» выполняется до плотного прижатия ламели к основанию, пока из-под ламели не выступят излишки адгезива. Ламель не должна скользить по поверхности конструкции (это является признаком того, что под ламелью имеются излишки адгезива, либо он имеет слишком низкую вязкость).

8.5.2.9 Продолжительность операций, указанных в 8.5.2.4 - 8.5.2.8 не должна превышать времени жизнеспособности используемого адгезива.

8.5.2.10 Наклейка внешнего армирования необходимого количества слоев производится исключительно при изготовлении элемента СВА, состоящего из нескольких слоев ламелей, склеиваемых в многослойный пакет до начала монтажа.

8.5.2.11 При требуемом количестве слоев больше двух, устройство пакетов следует выполнять в несколько этапов. На первом этапе в течение времени жизнеспособности адгезива наклеиваются первые два слоя ламели. На следующих этапах, после твердения адгезива предыдущих слоев, наклеиваются последующие слои (на каждом этапе не более двух слоев).

8.5.2.12 При устройстве внешнего армирования на основе ламелей в нескольких направлениях, последовательность наклейки ламели в каждом из направлений регламентируется проектом.

8.5.2.13 При устройстве усиления системой внешнего армирования строительных конструкций, состоящей из нескольких слоев, ориентированных в двух направлениях (типа «сетка»), технологическая операция монтажа усиливающих элементов должна включать в себя выполнение следующих видов работ:

- нанесение слоя адгезива на подготовленное основание и на элемент усиления в первом направлении;
- укладку подготовленных усиливающих элементов в первом направлении;
- прикатку усиливающих элементов к основанию;
- удаление излишек адгезива;
- выравнивание основания для укладки ламелей во втором направлении;
- нанесение слоя адгезива на подготовленное основание и на элемент усиления во втором направлении;
- укладку подготовленных усиливающих элементов во втором направлении;
- прикатку усиливающих элементов к основанию;
- удаление излишек адгезива.

8.5.2.14 Стыковка ламелей по длине недопустима.

8.5.2.15 После окончания наклейки углепластиковой ламели до окончательного отверждения адгезива следует периодически осматривать состояние выполненного усиления, не допуская провисания ламели. Найденные дефекты немедленно устраняют с помощью шпателей.

8.5.2.16 В случае, если проектом определено нанесение защитного покрытия из полимерцементного состава, то ламели придают шероховатость и на поверхность наносят слой связующего, который «чипсуется» сухим мелким песком для обеспечения сцепления защитного покрытия с внешним усилением.

### **8.5.3. Устройство внешнего армирования на основе углеродных сеток**

8.5.3.1 Монтаж элементов усиления на цементном вяжущем должен включать в себя выполнение следующих видов работ:

- раскрой углеродной сетки;
- приготовление связующего;
- нанесение первого слоя связующего на основание;
- укладку и вдавливание подготовленных усиливающих элементов;
- нанесение второго (укрывочного) слоя связующего.

8.5.3.2 Раскрой сетки выполняют в соответствии со спецификацией в проекте на ровной, плоской, чистой поверхности. Резать сетку следует с помощью косого ножа для картона, ножниц.

8.5.3.3 При необходимости резки сетки в продольном направлении на нее с двух сторон наклеить малярный скотч, и резку осуществлять по нему. Непосредственно после наклейки сетки, ее часть, находящаяся под скотчем, удаляется вместе с ним с помощью ножа.

8.5.3.4 В случае, если углеродная сетка не пропитана, следует произвести ее пропитку стирол-бутадиеновой композицией или акриловой эмульсией.

8.5.3.5 Для монтажа углеродной сетки используются специальные составы на цементной основе. Приготовление связующего производится в соответствии с инструкциями производителя. Для регулировки параметров связующего возможно применение различных добавок, допускаемых производителем.

8.5.3.6 Количество связующего в одной порции не должно превышать технологические возможности его использования в течение времени его жизнеспособности.

8.5.3.7 При нанесении состава механизированным способом (торкретирование, набрызг) следует осуществлять приготовление связующего с запасом, обусловленным отскоком смеси от поверхности основания.

8.5.3.8 Связующее наносится на основание металлическим зубчатым шпателем или механизированным способом.

8.5.3.9 Толщина первого слоя связующего принимается по указаниям производителя, но не менее 3-4 мм.

8.5.3.10 Углеродная сетка укладывается на основание и утапливается в цементное связующее таким образом, чтобы верхняя плоскость элементов усиления была на одном уровне с поверхностью связующего.

8.5.3.11 После укладки и утапливания элементов усиления выполняется нанесение укрывочного слоя. Укрывочный слой выравнивается при помощи шпателя.

8.5.3.12 Толщина укрывочного слоя связующего принимается по указаниям производителя, но не менее 2-3 мм.

8.5.3.13 Отверждение композитного материала системы внешнего армирования, состоящего из цементного связующего и армирующего углеродного наполнителя происходит согласно технической документации производителя с учетом температуры производства работ, но не ранее чем через 12 часов.

8.5.3.14 При устройстве системы внешнего армирования, состоящей из нескольких слоев углеродной сетки, монтаж второго и последующего слоев производится в той же последовательности, что и для первого слоя СВА.

8.5.3.15 При устройстве СВА, состоящей из нескольких слоев углеродной сетки, укрывочный слой наносится только на последний (верхний) элемент усиления.

8.5.3.16 При устройстве многослойных элементов усиления допускается установка без перерыва не более двух слоев «мокрым» способом. При количестве слоев, большем двух, необходимо устроить технологический перерыв и дождаться отверждения связующего, после чего монтировать следующие слои аналогичным образом. Продолжительность технологического перерыва принимается согласно указаниям производителя, но не менее 12 ч. При этом на последний слой углеродной сетки, установленный до начала технологического перерыва, укрывочный слой связующего не наносится.

8.5.3.17 После механической подготовки поверхности необходимо выполнить увлажнение основания водой. Увлажнение выполняется до насыщения основания, но при этом на поверхности не должна оставаться непитавшаяся влага (не должно быть луж, конденсата и т.д.).

Увлажнение может выполняться ручным способом (кистью) или механизированным (распылителем).

После увлажнения излишки воды удаляются ветошью, сушкой сжатым воздухом.

8.5.3.18 После окончания устройства СВА на основе углеродных сеток в процессе отверждения связующего требуется выполнять уход за поверхностью. Уход за поверхностью СВА выполняется согласно рекомендациям производителя.

8.5.3.19 Допускается устройство углеродных сеток с помощью полимерных связующих на эпоксидной основе и ремонтных составах в соответствии с ТУ [15]. В этом случае, необходимо придерживаться требований и рекомендаций согласно 8.5.1.

#### **8.5.4. Устройство анкеровки для элементов внешнего армирования**

8.5.4.1 В местах сопряжения продольных и поперечных стен, стен и перекрытий, пилонов со стенами и т.д. при необходимости выполняется дополнительная анкеровка

усиливающих элементов. Она обеспечивается путем установки специальных анкеров из углеродных волокон, пропитанных связующим. Необходимость устройства анкеров устанавливается проектом.

8.5.4.2 Анкеры производятся, как в виде анкерных жгутов заводского изготовления, так и могут быть изготовлены из углеродной ленты. Конструкция анкера устанавливается проектом.

#### 8.5.4.3 Анкерные углеродные жгуты заводского изготовления

8.5.4.3.1 Анкерные углеродные жгуты являются элементами системы внешнего армирования и применяются для анкерования углеродных лент, тканей, сеток и ламинатов.

8.5.4.3.2 Анкерные углеродные жгуты могут быть установлены следующими способами:

- Одиночная анкеровка – В подготовленное в основании отверстие перпендикулярно углеродному наполнителю (лента, ткань, сетка) устанавливается анкерный жгут, внешняя часть волокон жгута («волан») распределяется по кругу (рис. 8.2);

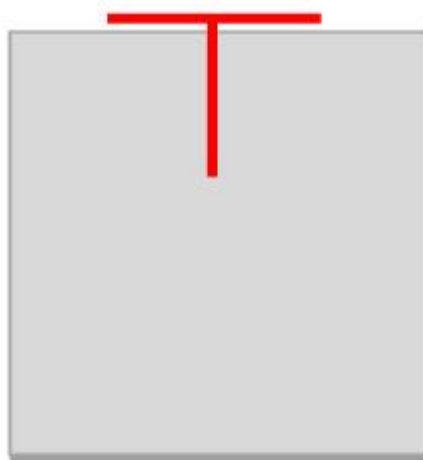


Рисунок 8.2 – Одиночная анкеровка

- Двойная анкеровка – В подготовленное в основании сквозное отверстие перпендикулярно углеродному наполнителю (лента, ткань, сетка) устанавливают анкерный жгут, внешние волокна жгута распределяются по кругу на обеих сторонах сквозного отверстия (рис. 8.3);

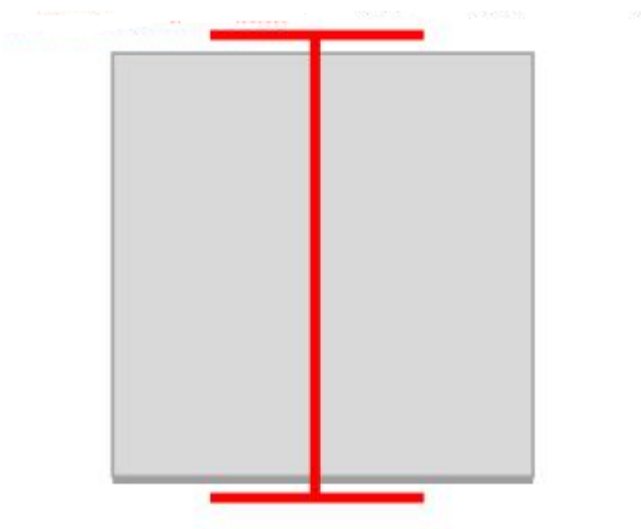


Рисунок 8.3 – Двойная анкеровка

- Параллельная анкеровка – В подготовленное в основании отверстие, параллельно или под углом к углеродному наполнителю ткани устанавливают анкерный жгут, внешняя часть волокон жгута распределяется V-образно (рис.8.4).

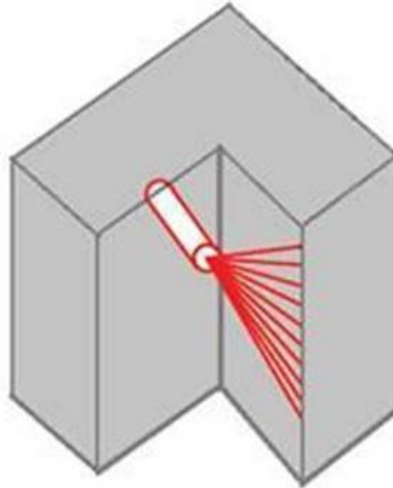


Рисунок 8.4 – Параллельная анкеровка

8.5.4.3.3 Устройство анкеровки СВА с применением углеродных жгутов производится в следующей последовательности выполнения технологических операций:

- подготовка отверстий и основания для установки анкеров;
- подготовка элементов анкеровки;
- подготовка адгезива;
- установка анкера;
- крепление анкера к элементам СВА.

8.5.4.3.3.1 Подготовка отверстий выполняется с разметки мест установки анкеров согласно проектному решению и определения типа анкеровки (сквозная, наклон углеродного жгута к поверхности установки).

8.5.4.3.3.2 Диаметр высверливаемого отверстия для установки анкерного жгута должен быть на 3-6 мм больше диаметра жгута.

8.5.4.3.3.3 Глубина, тип и наклон к плоскости основания высверливаемого отверстия определяется проектным решением.

8.5.4.3.3.4 Для исключения возможности повреждения волокон жгута, устье отверстия должно быть раззенковано. Размер фаски устья отверстия принимается согласно проектному решению (рекомендуется принимать размер фаски не менее 1-2 см).

8.5.4.3.3.5 При установке жгута сквозь основание необходимо выполнить высверливание отверстий с двух сторон навстречу друг к другу. Не допускается сверление насквозь. При сверлении отверстий навстречу друг к другу необходимо соблюдать их соосность.

8.5.4.3.3.6 Отверстие для установки анкерного жгута должно быть очищено и обеспылено. Очистку устья отверстия рекомендуется осуществлять металлическими щетками. Обеспыливание рекомендуется производить продувкой с использованием насоса или компрессора.

8.5.4.3.3.7 Подготовка усиливающих элементов должна производиться в заводских условиях или в специальном помещении на стройплощадке и включает в себя нарезку углеродного анкерного жгута в соответствии с проектной документацией, маркировку и упаковку раскрытых элементов.

Анкерные жгуты должны быть нарезаны на заготовки, длина и количество которых определяются в соответствии с проектной документацией.

Нарезка жгута должна осуществляться на гладком столе (верстаке), покрытом полиэтиленовой пленкой. Для резки жгута рекомендуется использовать нож или ножницы.

Не допускается смещение оплетки жгута при резке для защиты от вытягивания волокон.

Раскрытые заготовки помещаются в упаковочную тару и снабжаются этикеткой с указанием номера, размера и количества заготовок.

8.5.4.3.3.8. По отношению к установке анкерный жгут состоит из двух частей:

- анкерная часть, закрепляемая в основании;
- распущенная веером часть, соединяющая анкерную часть с элементом СВА.

Длина каждой части определяется в соответствии с проектной документацией.

8.5.4.3.3.9 Пропитка анкерного жгута адгезивом осуществляется на всю его длину. Для этого рекомендуется сместить оплетку жгута примерно до середины длины жгута и пропитать оголенную часть. После пропитки оплетка перемещается обратно. Таким же образом необходимо осуществить пропитку второй части жгута. Полное снятие оплетки во время пропитки анкерного жгута не допускается.

8.5.4.3.3.10 Нанесение адгезива рекомендуется осуществлять с помощью кисти. После пропитки анкерного жгута рекомендуется поместить металлическую спицу в центр на всю длину жгута. Диаметр спицы подбирается в зависимости от диаметра углеродного жгута так, чтобы исключить повреждение и вытягивание волокон анкера в процессе монтажа (рекомендуемый диаметр спицы от 1 до 3 мм).

8.5.4.3.3.11 Отверстие в основании заполняется адгезивом на всю его глубину. Для заполнения рекомендуется применять пистолет или пластиковую воронку. Заполнение адгезивом сквозного отверстия рекомендуется вести с двух сторон.

8.5.4.3.3.12 Пропитанный жгут вместе с оплеткой и (при необходимости) установленным металлическим стержнем помещается в отверстие на проектную глубину. После установки оплетка со свободной стороны снимается, и металлический стержень вынимается из анкерного жгута. При выполнении данной технологической операции необходимо исключить вытягивание волокон анкера наружу.

В процессе установки анкерного жгута в отверстие необходимо исключить вовлечение воздуха в адгезив.

8.5.4.3.3.13 Крепление распущенных частей анкерного жгута («веера») и распределение волокон осуществляется в соответствии с проектной документацией.

При креплении распущенной части анкерного жгута к подготовленной поверхности основания конструкции до начала установки жгута следует нанести адгезив на поверхность основания.

8.5.4.3.3.14 Соединение распущенной части жгута и элемента усиления (ленты, ткани, сетки) рекомендуется двумя способами:

- установка под элементы СВА (на основание);

- установка поверх не полимеризованного (в течение времени жизнеспособности) накрывочного слоя адгезива элементов СВА.

Работы по креплению жгута к элементу СВА должны быть выполнены в течение срока жизнеспособности адгезива.

#### 8.5.4.4 Изготовление анкера из углеродной ленты

8.5.4.4.1 Изготовление анкера из углеродной ленты включает в себя следующие операции:

- на половине длины отрезка ленты (длиной 300-400 мм) вынимается уточная нить;
- часть ленты с уточной нитью пропитывается связующим;
- непосредственно после пропитки связующим, отрезок ленты сворачивается в поперечном направлении и фиксируется несколькими скрутками из уточной нити;
- после полимеризации связующего образуется заготовка анкера с жесткой стержневой частью (100-150мм) и венчиком –«воланом» (100-150мм).

8.5.4.4.2 Последовательность выполнения работ при установке анкера из углеродной ленты:

- в усиливаемой конструкции, высверлить отверстия. Расположение, диаметр и глубина отверстий устанавливается проектом;
- вход в отверстие расширить (раззенковать) для возможности свободно разворачивания волокна «венчика». Для расширения используют сверло диаметром 25 мм, формируя конусообразный вход;
- продуть отверстия сжатым воздухом для удаления пыли от сверления. Воздух подают внутрь скважины по трубке меньшего диаметра;
- перед установкой анкера, скважину более чем на половину заполнить адгезивом;
- жесткую часть анкера погрузить в скважину. При этом конец жесткой части со стороны «венчика» должен быть утоплен примерно на 1 см от поверхности, а избыток адгезива выдавлен на поверхность и удален шпателем;

- после установки свободную непропитанную часть расправить, придав ей форму треугольника, затем выполнить пропитку «венчика» и его фиксацию в проектом положении на поверхности конструкции.

#### 8.5.5 Нанесение защитного покрытия

8.5.5.1 Через 6-12 часов после нанесения финишного слоя связующего, на поверхность внешнего армирования с помощью распылителя, кисти или шпателя наносят защитный слой полимерцементного защитного состава толщиной 3 мм (если иное не установлено проектом).

8.5.5.2 После твердения полимерцементного состава при необходимости нанести огнезащитное покрытие, выравнивающую штукатурку или отделочное покрытие. Подбор огнезащитного покрытия осуществляют в соответствии с требованиями Технического задания и действующими нормами.

## 9. Контроль качества производства работ

### 9.1 Общие положения

9.1.1 Общие принципы строительного контроля изложены в СП 48.13330.2011.

9.1.2 Проверка качества работ по усилению или восстановлению железобетонных (бетонных) 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.

9.1.3 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 железобетонных конструкций композитными материалами.

## **9.2 Оценка состояния железобетонных конструкций**

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

9.2.2 При выявлении дополнительных дефектов составляется акт осмотра. Для начала производства работ требуется заключение и рекомендации проектной организации по их устранению с оформлением соответствующего документа.

## **9.3 Входной контроль**

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

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

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

9.3.4 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).

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

9.3.6 Результаты входного контроля заносятся в журнал входного контроля.

#### **9.4 Контроль соблюдения правил складирования и хранения**

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

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

9.4.3 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.

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

## **9.5 Операционный контроль**

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

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

9.5.3 Операционный контроль ведения работ включает в себя:

- контроль подготовки поверхности конструкции под наклейку усиливающих элементов;
- контроль устройства элементов внешнего армирования;
- контроль устройства защитного покрытия.

9.5.4 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.

9.5.5 Контроль устройства элементов внешнего армирования включает в себя:

а) контроль раскроя ленты, ткани, сетки или ламината 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 отверждения 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 (твердость 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;
- высыхание 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).

9.5.6 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).

## **9.6 Приемочный контроль**

9.6.1 Приемочный контроль законченного этапа работ включает в себя проверку

соответствия полноты и результата их выполнения требованиям проектной документации по усилению или восстановлению.

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

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

9.6.4 При приемке законченного этапа работ:

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

9.6.5 По результатам выполнения п.9.6.4 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.

9.6.6 После исправления замечаний повторно выполняются требования п.9.6.4 и п. 9.6.5.

## **10 Безопасность труда и охрана окружающей среды**

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

10.2 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.

10.3 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.

10.4 Готовый к использованию адгезив может вызвать раздражение кожи и слизистых. 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.

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

10.6 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.

## **11 Гарантии изготовителя и производителя работ**

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

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

11.3 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 железобетонной конструкцией по специальной программе обследования.

11.4 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 расчетов железобетонных конструкций, усиленных системой внешнего армирования

#### Пример 1. Расчет прочности нормальных сечений изгибаемых железобетонных элементов

##### Исходные данные:

Железобетонная балка прямоугольного сечения

-Ширина прямоугольного сечения  $b = 147$  мм;

-Высота сечения  $h = 300$  мм;

-Защитный слой  $a = 30$  мм;  $a' = 30$  мм;

-Бетон – В15;  $R_b = 8,5$  МПа;  $E_b = 24000$  МПа.

-Растянутая арматура  $2\varnothing 10$  А500;  $A_s = 157$  мм<sup>2</sup>

-Сжатая арматура  $2\varnothing 6$  А500;  $A's = 57$  мм<sup>2</sup>

- $R_s = 435$  МПа;  $R_{sc} = 400$  МПа;  $E_s = 200000$  МПа.

Изгибающий момент, действующей на конструкцию после усиления:  $M = 27,5$  кНм;

Внешнее армирование системой CarbonWrap® производится с нижней бетонной поверхности балки:

- Толщина композитного материала  $t_f = 0,128$  мм;

- Нормативное значение сопротивления растяжению композитного материала  $R_{f,n} = 3600$  МПа;

- Нормативное значение модуля упругости композитного материала  $E_{f,n} = 245000$  МПа;

- Число слоев композитных материалов  $n = 2$  ;

- Ширина композитного материала  $b_f = 15 \text{ см} = 15 / 100 = 0,15 \text{ м}$ ;

- Расчетное значение модуля упругости композитного материала:

$$E_f = E_{f,n} = 245000 \text{ МПа.}$$

Требуется определить предельный изгибающий момент, способный воспринять усиленная железобетонная балка.

### **Выполнение расчета:**

Коэффициент условий работы композитного материала:

$$\gamma_{f1} = 0,8$$

Коэффициент надежности по материалу:

$$\gamma_f = 1,2$$

Расчетное значения сопротивления растяжению композитного материала:

$$R_f = \frac{\gamma_{f1}}{\gamma_f} \cdot R_{f,n} = 0,8/1,2 \cdot 3600 = 2400 \text{ МПа.}$$

Расчетное значение относительных деформаций:

$$\varepsilon_f = \frac{R_f}{E_f} = 2400/245000 = 0,0098.$$

Проверка сцепления композитного материала с бетоном:

$$\varepsilon_{f,u} = 0,41 \cdot \sqrt{\frac{R_b}{n \cdot E_f \cdot t_f}} \leq 0,9 \cdot \varepsilon_f$$

$$\varepsilon_{f,u} = 0,41 \cdot \sqrt{\frac{8,5 \cdot 1000}{2 \cdot 245000 \cdot 0,128}} = 0,0048 \leq 0,9 \cdot \varepsilon_f = 0,9 \cdot 0,0098 = 0,0088$$

условие соблюдается

### **Определение положения нейтральной оси.**

Подбор высоты сжатой зоны  $X$  при обеспечении равенства:

$$(\sigma_b \cdot A_b + \sigma_{sc} \cdot A_s') = (\sigma_s \cdot A_s + \sigma_f \cdot A_f) ,$$

При  $X=0,081$  м относительные деформации составят:

$$\varepsilon_{fe} = \varepsilon_{b,ult} \cdot \left( \frac{h-x}{x} \right) - \varepsilon_{bt}^0 \leq \varepsilon_{f,u} \quad \varepsilon_{fe} = 0.0035 \cdot \left( \frac{0.3-0.081}{0.081} \right) - 0 > 0.0048$$

$$\varepsilon_{fe} = 0,0048$$

$$\varepsilon_b = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bt}^0) \cdot \left( \frac{x}{h-x} \right) \quad \varepsilon_b = (0.0048 + 0) \cdot \left( \frac{0.081}{0.3-0.081} \right) = 0.00177$$

$$\varepsilon_s = (\varepsilon_{fe} + \varepsilon_{bt}^0) \cdot \left( \frac{h_0-x}{h-x} \right) \quad \varepsilon_s = (0.0048 + 0) \cdot \left( \frac{0.27-0.081}{0.3-0.081} \right) = 0.00412$$

$$\varepsilon'_s = \varepsilon_b \cdot \left( \frac{h-a'}{x} \right) \quad \varepsilon'_s = 0.0035 \cdot \left( \frac{0.3-0.03}{0.081} \right) = 0.00111$$

Тогда действующие напряжения составят:

$$\sigma_f = E_f \cdot \varepsilon_{fe} \leq R_{fu} \quad \sigma_f = E_f \cdot \varepsilon_{fe} = 245000 \cdot 0.0048 = 1169 \text{ МПа}$$

$$\sigma_b = E_b \cdot \varepsilon_b \leq R_b \quad \sigma_b = E_b \cdot \varepsilon_b = 2400 \cdot 0.00177 = 42 \text{ МПа} > 8,5 \text{ МПа}$$

$$\sigma_s = E_s \cdot \varepsilon_s \leq R_s \quad \sigma_s = 200000 \cdot 0.00412 = 824 \text{ МПа} > 435 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{sc} = E_s \cdot \varepsilon'_s \leq R_{sc} \quad \sigma_{sc} = 200000 \cdot 0.00111 = 222 \text{ МПа} < 435 \text{ МПа}$$

Определение высоты сжатой зоны:

$$x = \left( \frac{\sigma_s A_s + \sigma_f A_f - \sigma_{sc} \cdot A'_s}{\sigma_b \cdot b} \right) = \left( \frac{435 \cdot 1.57 + 1169 \cdot 0.384 - 222 \cdot 0.57}{8.5 \cdot 0.146} \right) \cdot 10^{-4} = 0.081$$

Положение нейтральной оси определено.

Определение усилия, действующие в сечении железобетонного элемента:

$$N_f = \sigma_f \cdot A_f = 1169000 \cdot 0,000384 = 44,9 \text{ кН};$$

$$N_b = \sigma_b \cdot b \cdot x = 8500 \cdot 0,146 \cdot 0,081 = 100,5 \text{ кН};$$

$$N_s = \sigma_s \cdot A_s = 435000 \cdot 0,00157 = 68,3 \text{ кН};$$

$$N'_s = \sigma_{sc} \cdot A'_s = 222000 \cdot 0,000057 = 12,7 \text{ кН};$$

Определение положения равнодействующих сжатой и растянутой зон:

$$a_c = a' + \frac{N_b \cdot (x/2 - a')}{(N'_s + N_b)} = 0,03 + 100,5 \cdot (0,081/2 - 0,03) / (12,7 + 100,5) = 0,0393 \text{ м};$$

$$a_p = \frac{N_s \cdot a}{(N_s + N_f)} = 68,3 \cdot 0,03 / (68,3 + 44,9) = 0,0181 \text{ м}.$$

Предельный изгибающий момент равен:

$$M_{ult} = N_s \cdot (h_0 - a_c) + N_f \cdot (h - a_c) = 68,3 \cdot (0,27 - 0,0393) + 44,9 \cdot (0,3 - 0,0393) = 27,5 \text{ кНм}.$$

**Пример 2. Расчет по прочности наклонных сечений железобетонных элементов****Исходные данные:**

Железобетонная балка прямоугольного сечения

-Ширина прямоугольного сечения  $b = 147$  мм;

-Высота сечения  $h = 300$  мм;

-Защитный слой  $a = 30$  мм;  $a' = 30$  мм;

-Бетон – В15;  $R_b = 8,5$  МПа;  $E_b = 24000$  МПа.

-Растянутая арматура  $2\varnothing 10$  А500;  $A_s = 157$  мм<sup>2</sup>

-Сжатая арматура  $2\varnothing 6$  А500;  $A's = 57$  мм<sup>2</sup>

- $R_s = 435$  МПа;  $R_{sc} = 400$  МПа;  $E_s = 200000$  МПа.

- Поперечная сила, действующей на конструкцию после усиления:  $Q = 100$  кН;

Внешнее армирование железобетонной балки системой CarbonWrap® производится в виде замкнутых хомутов:

- Толщина монослоя композитного материала  $t_f = 0,128$  мм;

- Нормативное значение сопротивления растяжению композитного материала  $R_{f,n} = 3600$  МПа;

- Нормативное значение модуля упругости композитного материала  $E_{f,n} = 245000$  МПа;

- Число слоев композитных материалов  $n = 1$  ;

- Вид хомутов - замкнутые.

- Высота наклейки хомутов из композитного материала

$h_{fw} = 30$  см =  $30 / 100 = 0,3$  м;

- Угол наклона хомутов из композитного материала к продольной оси элемента

$\alpha = 90$  град;

- Ширина хомутов из композитного материала  $w_f = 30$  см =  $30 / 100 = 0,3$  м;

- Длина проекции наклонного сечения  $c = 35 \text{ см} = 35 / 100 = 0,35 \text{ м}$ ;

Требуется выполнить проверку прочности наклонных сечений железобетонной балки.

### **Выполнение расчета:**

Расчет изгибаемых железобетонных элементов по бетонной полосе между наклонными сечениями определяется из условия:

$$Q \leq 0,3 \cdot R_b \cdot b \cdot h_0 = 0,3 \cdot 8500 \cdot 0,146 \cdot 0,27 = 100,5 \text{ кН}$$

Расчет усиленных железобетонных элементов по наклонным сечениям на действие поперечных сил производится из условия:

$$Q \leq Q_b + Q_{sw} + Q_f$$

Поперечная сила, воспринимаемая бетоном  $Q_b$  принимается равной  $0,5R_{bt} \cdot b \cdot h_0 \leq Q_b \leq 2,5R_{bt} \cdot b \cdot h_0$ .

$$0,5R_{bt} \cdot b \cdot h_0 = 0,5 \cdot 750 \cdot 0,146 \cdot 0,27 = 14,78 \text{ кН};$$

$$Q_b = 1,5R_{bt} \cdot b \cdot h_0^2 / c = 1,5 \cdot 750 \cdot 0,146 \cdot 0,27^2 / 0,35 = 34,21 \text{ кН};$$

$$2,5R_{bt} \cdot b \cdot h_0 = 2,5 \cdot 750 \cdot 0,146 \cdot 0,27 = 73,91 \text{ кН};$$

### **Деформационные характеристики композитного материала:**

Площадь поперечного сечения композитного материала:

$$A_{s,sh} = 2n \cdot t_f \cdot w_f = 2 \cdot 1 \cdot 0,128 \cdot 10^{-3} \cdot 0,3 = 7,68 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$$

Коэффициент условий работы композитного материала:

$$\gamma_{f1} = 0,8$$

Коэффициент надежности по материалу:

$$\gamma_f = 1,2$$

Расчетное значения сопротивления растяжению композитного материала:

$$R_f = \frac{\gamma_{f1}}{\gamma_f} \cdot R_{f,n} = 0,8/1,2 \cdot 3600 = 2400 \text{ МПа.}$$

Расчетное значение относительных деформаций:

$$\varepsilon_f = \frac{R_f}{E_f} = 2400/245000 = 0,0098.$$

Максимальная расчетная деформация СВА для системы внешнего армирования, охватывающей все сечение железобетонных элементов (вкруговую), определяется из условия:

$$\varepsilon_{fe} = 0,004 \leq 0,75\varepsilon_f = 0,00735$$

Напряжение в композитном материале:

$$\sigma_f = E_f \cdot \varepsilon_{fe} = 245000 \cdot 0,004 = 980 \text{ МПа}$$

Поперечная сила, воспринимаемая внешним армированием из композитного материала  $Q_f$  принимается равной  $\psi_f \cdot A_{s,sh} \cdot \sigma_{fu} \cdot \sin \alpha \cdot c / s_f$ .

$$Q_f = 0,95 \cdot 7,68 \cdot 10^{-5} \cdot 980 \cdot 10^3 \cdot \sin(90) = 71,50 \text{ кН}$$

Ограничение по суммарной сдвиговой прочности усиленного элемента:

$$Q_{sw} + Q_f \leq 2,5R_{br}bh_0$$

$$(Q_{sw} + Q_f) = (0 + 71,5) \leq 73,91 \text{ кН условие выполняется}$$

Суммарное значение прочности усиленного элемента:

$$Q_b + Q_{sw} + Q_f = (34,21 + 0 + 71,50) = 105,71 \text{ кН}$$

Проверка прочности усиленного элемента

$$Q \leq Q_b + Q_{sw} + Q_f$$

$$100 \leq 105,71 \text{ кН условие выполнено}$$

**Пример 3. Расчет сжатых и внецентренно-сжатых железобетонных элементов****Исходные данные:**

Железобетонная колонна прямоугольного сечения

- Ширина прямоугольного сечения  $b= 200$  мм;
- Высота сечения  $h= 200$  мм;
- Длина колонны  $l=800$  мм;
- Защитный слой  $a= 25$  мм;  $a'= 25$  мм;
- Бетон – В15;  $R_b = 8,5$  МПа;  $E_b = 24000$  МПа.
- Продольная арматура  $4\varnothing 8$  А500;  $A_s= 202$  мм<sup>2</sup>
- $R_s = 435$  МПа;  $R_{sc} = 400$  МПа;  $E_s= 200000$  МПа.
- Продольная сила, действующей на конструкцию после усиления:  $N=480$ кН;
- Изгибающий момент действующей на конструкцию после усиления:  $M=8$ кН\*м;

Внешнее армирование железобетонной колонны системой CarbonWrap® производится в виде сплошной обмотки по высоте колонны:

- Толщина композитного материала  $t_f = 0,128$  мм;
- Нормативное значение сопротивления растяжению композитного материала  $R_{f,n}$  = 3600 МПа;
- Нормативное значение модуля упругости композитного материала  $E_{f,n} = 245000$  МПа;
- Число слоев композитных материалов  $n = 2$  ;
- Ширина композитного материала  $b_f = 15$  см =  $15 / 100 = 0,15$  м;
- Шаг композитного материала  $s_f = 15$  см =  $15 / 100 = 0,15$  м;

Требуется определить несущую способность железобетонной колонны после усиления

**Выполнение расчета:**

Начальный эксцентриситет продольной силы  $e_0 = \frac{M}{N} = \frac{8}{480} = 0.017 \leq 0.1h$

Коэффициент, учитывающий влияние продольного изгиба:

$$\varphi = 0.9 \text{ при } l_0 / h = 0.8 / 0.2 = 4$$

Площадь поперечного сечения композитного материала:

$$A_{s,sh} = 2n \cdot t_f \cdot (b + h) = 2 \cdot 2 \cdot 0.128 \cdot 10^{-3} \cdot (0.2 + 0.2) = 2.048 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2$$

Коэффициент условий работы композитного материала:

$$\gamma_f = 0,8$$

Коэффициент надежности по материалу:

$$\gamma_f = 1,2$$

Расчетное значения сопротивления растяжению композитного материала:

$$R_f = \frac{\gamma_{f1}}{\gamma_f} \cdot R_{f,n} = 0,8 / 1,2 \cdot 3600 = 2400 \text{ МПа.}$$

Расчетное значение относительных деформаций:

$$\varepsilon_f = \frac{R_f}{E_f} = 2400 / 245000 = 0,0098.$$

Максимальная расчетная деформация СВА для системы внешнего армирования, охватывающей все сечение железобетонных элементов (вкруговую), определяется из условия:

$$\varepsilon_{fe} = 0,004 \leq 0,55\varepsilon_f = 0.00539$$

Напряжение в композитном материале:

$$\sigma_f = E_f \cdot \varepsilon_{fe} = 245000 \cdot 0.004 = 980 \text{ МПа}$$

Площадь поперечного сечения бетона в сжатом элементе:

$$A_c = (A - A_{s,tor}) = (0.2 \cdot 0.2 - (1.01 + 1.01) \cdot 10^{-4}) = 0.0398;$$

Площадь поперечного сечения обжатого бетона с учетом фасок:

$$A_e = A_c - \frac{1}{3} \cdot \left[ \frac{b}{h} \cdot (h - 2r_c)^2 + \frac{h}{b} \cdot (b - 2r_c)^2 \right],$$

$$A_e = 0.0398 - \frac{1}{3} \cdot \left[ \frac{0.2}{0.2} \cdot (0.2 - 2 \cdot 0.025)^2 + \frac{0.2}{0.2} \cdot (0.2 - 2 \cdot 0.025)^2 \right] = 0.0248$$

$$\frac{A_e}{A_c} = 0.0248 / 0.0398 = 0.623$$

Коэффициент, учитывающий наличие разрывов по высоте облоймы:  $k_e = 1$

Коэффициент эффективности облоймы для колонн прямоугольного сечения:

$$k_a = \frac{A_e}{A_c} \left( \frac{h}{b} \right)^2 = 0.623 \cdot 1 = 0.623,$$

Проверка произведение  $k_a \cdot k_e$  для элементов прямоугольного поперечного сечения:

$$k_a \cdot k_e \leq 0.5$$

$$0.623 \cdot 1 > 0.5$$

$$k_a \cdot k_e = 0.5$$

Максимальное значение обжатия бетона сжатого элемента в результате устройства сплошной облоймы СВА, определяемое по формуле:

$$\sigma_R = \frac{2 \cdot n \cdot E_f \cdot t_f \cdot \varepsilon_{fe}}{D} = 2 \cdot 2 \cdot 245000 \cdot 0.128 \cdot 10^{-3} \cdot 0.004 / 0.283 = 1.77 \text{ МПа},$$

$$D = \sqrt{b^2 + h^2} = \sqrt{0.2^2 + 0.2^2} = 0.283 \text{ м}$$

Проверка минимального обжатия бетона сжатого элемента  $\sigma_R \geq 0.08R_b$ .

1.77  $\geq$  0.68 МПа. Условие выполнено.

Расчетное сопротивление бетона сжатого элемента, усиленного сплошной облоймой из углеродного композитного материала по высоте, определяется по формуле:

$$R_{bc} = R_b + 3.3 \cdot \psi_f \cdot k_a \cdot k_e \cdot \sigma_R,$$

$$R_{bc} = 8.5 + 3.3 \cdot 0.95 \cdot 0.5 \cdot 1.77 = 11.28 \text{ МПа}$$

Ограничение предельных деформации обжатого СВА бетона:

$$\varepsilon_{ccu} = \varepsilon_{b0} \left( 1.5 + 12 \cdot k_b \frac{\sigma_R}{R_b} \left( \frac{\varepsilon_{fe}}{\varepsilon_{b0}} \right)^{0.45} \right) \leq 0.01$$

$$k_b = \frac{A_e}{A_c} \left( \frac{b}{h} \right)^{0.5} = \frac{0.0248}{0.0398} \left( \frac{0.2}{0.2} \right)^{0.5} = 0.623$$

$$\varepsilon_{ccu} = 0.00035 \cdot \left( 1.5 + 12 \cdot 0.623 \frac{1.77}{8.5} \left( \frac{0.004}{0.00035} \right)^{0.45} \right) = 0.00241 \leq 0.01.$$

Условие выполнено

Расчетное сопротивление бетона сжатого элемента не корректируется.

Несущая способность сжатого элемента прямоугольного поперечного сечения:

$$N_{ult} = \varphi(R_{bc}A_c + R_{sc}A_{s,tot}) = 0.9(11280 \cdot 0.0398 + 400000 \cdot 2.02 \cdot 10^{-4}) = 483 \text{ кН}$$

**Пример 4. Расчет центрально растянутых железобетонных элементов****Исходные данные:**

Железобетонный элемент прямоугольного сечения

- Ширина прямоугольного сечения  $b= 150$  мм;
- Высота сечения  $h= 300$  мм;
- Длина колонны  $l= 600$  мм;
- Защитный слой  $a= 25$  мм;  $a'= 25$  мм;
- Бетон – В15;  $R_b = 8,5$  МПа;  $E_b = 24000$  МПа.
- Продольная арматура  $4\varnothing 8$  А500;  $A_s= 202$  мм<sup>2</sup>
- $R_s = 435$  МПа;  $R_{sc} = 400$  МПа;  $E_s= 200000$  МПа.
- Продольная сила, действующей на конструкцию после усиления:  $N=140$ кН;

Внешнее армирование железобетонной колонны системой CarbonWrap® производится в виде продольных лент шириной 300мм с двух сторон железобетонного элемента по всей высоте элемента.

- Толщина композитного материала  $t_f = 0,128$  мм;
- Нормативное значение сопротивления растяжению композитного материала  $R_{f,n} = 3600$  МПа;
- Нормативное значение модуля упругости композитного материала  $E_{f,n} = 245000$  МПа;
- Число слоев композитных материалов  $n = 2$  ;
- Ширина композитного материала  $b_f = 30$  см = 0,3 м;

Требуется определить несущую способность железобетонного элемента после усиления

**Выполнение расчета:**

Площадь поперечного сечения композитного материала:

$$A_f = 2n \cdot t_f \cdot w_f = 2 \cdot 2 \cdot 0.128 \cdot 10^{-3} \cdot 0.3 = 15.36 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$$

Коэффициент условий работы композитного материала:

$$\gamma_{f1} = 0,8$$

Коэффициент надежности по материалу:

$$\gamma_f = 1,2$$

Расчетное значения сопротивления растяжению композитного материала:

$$R_f = \frac{\gamma_{f1}}{\gamma_f} \cdot R_{f,n} = 0,8/1,2 \cdot 3600 = 2400 \text{ МПа.}$$

Расчетное значение относительных деформаций:

$$\varepsilon_f = \frac{R_f}{E_f} = 2400/245000 = 0,0098.$$

Коэффициент, учитывающий прочность бетона элемента в МПа

$$k_1 = \left( \frac{R_b}{27} \right)^{2/3} = (8.5/27)^{2/3} = 0.463$$

Коэффициент, учитывающий схему наклейки композитного материала:

$$k_2 = 1.0$$

Эффективная длина анкеровки композитного материала:

$$L_f = \frac{23300}{(n t_f E_f)^{0.58}} = \frac{23300}{(2 \cdot 0.128 \cdot 245000)^{0.58}} = 38.4 \text{ мм}$$

Коэффициент запаса по сцеплению определяется из условия:

$$k_v = \frac{k_1 k_2 L_f}{11900 \cdot \varepsilon_f} = \frac{0.463 \cdot 1 \cdot 38.4}{11900 \cdot 0.0098} = 0.153 \leq 0.75 \text{ условие выполняется}$$

Расчётная деформация  $\varepsilon_{fe}$  ограничивается способностью передавать напряжение

подложке через адгезив:

$$\varepsilon_{fe} = k_v \varepsilon_f \leq 0,004$$

$$\varepsilon_{fe} = 0.153 \cdot 0.0098 = 0.0015 \leq 0,004$$

Растягивающие напряжения, воспринимаемые СВА:

$$\sigma_{fu} = \varepsilon_{fe} E_f \leq R_{fu},$$

$$\sigma_{fu} = \varepsilon_{fe} E_f = 0.0015 \cdot 245000 = 367.5 \leq R_{fu} = 2400 \text{ МПа}$$

Условие выполняется

Предельное значение продольной растягивающей силы:

$$N_{ult} = R_s A_s + \sigma_f A_f = 435 \cdot 10^3 \cdot 2.01 \cdot 10^{-4} + 367.5 \cdot 15.36 \cdot 10^{-5} = 143.9 \text{ кН}$$

Расчет по прочности центрально растянутых элементов производится исходя из условия:

$$N \leq N_{ult},$$

$$140 \leq 143,9 \text{ кН}$$

Условие выполнено

**Пример 5. Расчет изгибаемых железобетонных элементов по образованию и раскрытию нормальных трещин**

**Исходные данные:**

Железобетонная балка прямоугольного сечения

-Ширина прямоугольного сечения  $b = 150$  мм;

-Высота сечения  $h = 300$  мм;

-Защитный слой  $a = 25$  мм;  $a' = 25$  мм;

-Бетон – В15;  $R_{bn} = 11,0$  МПа;  $E_b = 24000$  МПа.

-Растянутая арматура  $2\varnothing 10$  А500;  $A_s = 157$  мм<sup>2</sup>

-Сжатая арматура  $2\varnothing 6$  А500;  $A's = 57$  мм<sup>2</sup>

- $R_{sn} = 500$  МПа;  $R_{sc,n} = 460$  МПа;  $E_s = 200000$  МПа.

Нормативное значение изгибающего момента при действии постоянных и полных временных нагрузок после усиления элемента:  $M = 18,5$  кНм;

Внешнее армирование системой CarbonWrap® производится с нижней бетонной поверхности балки:

- Толщина композитного материала  $t_f = 0,128$  мм;

- Нормативное значение сопротивления растяжению композитного материала  $R_{f,n} = 3600$  МПа;

- Нормативное значение модуля упругости композитного материала  $E_{f,n} = 245000$  МПа;

- Число слоев композитных материалов  $n = 2$  ;

- Ширина композитного материала  $b_f = 15$  см =  $15 / 100 = 0,15$  м;

Требуется определить предельный изгибающий момент, способный воспринять усиленная железобетонная балка.

**Выполнение расчета:**

Коэффициент условий работы композитного материала:

$$\gamma_{f1}=0,8$$

Коэффициент надежности по материалу:

$$\gamma_f = 1,2$$

Расчетное значения сопротивления растяжению композитного материала:

$$R_f = \frac{\gamma_{f1}}{\gamma_f} \cdot R_{f,n} = 0,8/1,2 \cdot 3600 = 2400 \text{ МПа.}$$

Расчетное значение относительных деформаций:

$$\varepsilon_f = \frac{R_f}{E_f} = 2400/245000 = 0,0098.$$

Площадь поперечного сечения композитного материала СВА:

$$A_f = n \cdot t_f b_f = 2 \cdot 0,128 \cdot 10^{-3} \cdot 0,15 = 3,84 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2$$

Проверка сцепления композитного материала с бетоном:

$$\varepsilon_{f,u} = 0,41 \cdot \sqrt{\frac{R_b}{n \cdot E_f \cdot t_f}} \leq 0,9 \cdot \varepsilon_f$$

$$\varepsilon_{f,u} = 0,41 \cdot \sqrt{\frac{8,5 \cdot 1000}{2 \cdot 245000 \cdot 0,128}} = 0,0048 \leq 0,9 \cdot \varepsilon_f = 0,9 \cdot 0,0098 = 0,0088$$

условие соблюдается

Определение коэффициентов приведения стальной арматуры и арматуры из полимерных композитов к бетону:

$$\alpha = \frac{E_s}{E_b} = \frac{2 \cdot 10^5}{2,4 \cdot 10^4} = 8,33$$

$$\alpha_f = \frac{E_f}{E_b} = \frac{2,45 \cdot 10^5}{2,4 \cdot 10^4} = 10,21$$

Площадь сечения приведенного поперечного сечения элемента, определяемая по формуле:

$$A_{red} = A + A_s \cdot \alpha + A'_s \cdot \alpha + A_f \cdot \alpha_f = 0,15 \cdot 0,3 + 8,33 \cdot (1,57 + 0,565) \cdot 10^{-4} + 10,21 \cdot 3,84 \cdot 10^{-5} = 0,0472 \text{ м}^2$$

Статический момент площади приведенного поперечного сечения элемента относительно наиболее растянутого волокна бетона.

$$S_{t,red} = 0,15 \cdot 0,3 \cdot 0,3/2 + 8,33 \cdot 1,57 \cdot 10^{-4} \cdot 0,025 + 8,33 \cdot 0,565 \cdot 10^{-4} \cdot (0,3 - 0,025) + 10,21 \cdot 3,84 \cdot 10^{-5} \cdot 0 = 0,006912 \text{ м}^3$$

Расстояние от наиболее растянутого волокна бетона до центра тяжести приведенного поперечного сечения элемента

$$y_t = \frac{S_{t,red}}{A_{red}} = 0,006912 / 0,0471 = 0,1465 \text{ м}$$

Момент инерции приведенного поперечного сечения относительно его центра тяжести:

$$I_{red} = I_b + I_s \cdot \alpha_{s2} + I'_s \cdot \alpha_{s1} + I_f \cdot \alpha_f = 0,15 \cdot 0,3^3 / 12 + 0,15 \cdot 0,3 \cdot (0,3/2 - 0,1465)^2 + 8,33 \cdot 1,57 \cdot 10^{-4} \cdot (0,1465 - 0,025)^2 + 8,33 \cdot 0,565 \cdot 10^{-4} \cdot (0,3 - 0,1465 - 0,025)^2 + 10,21 \cdot 3,84 \cdot 10^{-5} \cdot 0,1465 = 0,000475 \text{ м}^4$$

Момент сопротивления приведенного сечения по растянутой зоне сечения:

$$W_{red} = \frac{I_{red}}{y_t} = 0,000475 / 0,1465 = 0,003244 \text{ м}^3$$

Упругопластический момент сопротивления сечения для крайнего растянутого волокна бетона:

$$W_{pl} = \gamma \cdot W_{red} = 1,3 \cdot 0,003244 = 0,004217$$

Момент образования трещин с учетом неупругих деформаций растянутого бетона:

$$M_{crc} = R_{bt,ser} \cdot W_{pl} \pm N \cdot e_x = 1100 \cdot 0,004217 + 0 = 4,64 \text{ кН} \cdot \text{м} > 18,5 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

Трещины образуются

Расчет по раскрытию трещин, нормальных к продольной оси элемента, производится из условия:

$$a_{crc} \leq a_{crc,ult}$$

$a_{crc,ult} = 0,4$  мм – предельно допустимая ширина раскрытия трещин при непродолжительном раскрытии трещин;

Расчет ширины раскрытия трещин производится по формуле:

$$a_{crc,i} = \varphi_1 \cdot \varphi_2 \cdot \varphi_3 \cdot \varphi_4 \cdot \psi_s \cdot \frac{\sigma_s}{E_s} l_s$$

Коэффициент, учитывающий продолжительность действия нагрузки при непродолжительном действии нагрузки:

$$\varphi_1 = 1.0$$

Коэффициент, учитывающий профиль продольной арматуры:

$$\varphi_2 = 0.5$$

Коэффициент, учитывающий характер нагружения:

$$\varphi_3 = 1.0$$

Коэффициент, учитывающий неравномерное распределение относительных деформаций растянутой арматуры между трещинами:

$$\psi_s = 1 - 0,8 \cdot \frac{M_{crc}}{M} = 1 - 0,8 \cdot 4,64 / 18,5 = 0,799$$

Значение коэффициента приведения арматуры к бетону  $\alpha_{s1}$  определяют по формуле

$$\alpha_{s1} = \alpha_{s2} = \frac{E_s}{E_{b,red}} = 200000 / 11 \cdot 0,0015 = 27,27$$

$$\mu_s = \frac{A_s}{bh_0} = 1,57 \cdot 10^{-4} / (0,15 \cdot 0,275) = 0,00381$$

$$\mu'_s = \frac{A'_s}{bh_0} = 0,565 \cdot 10^{-4} / (0,15 \cdot 0,275) = 0,00137$$

Коэффициент приведения внешнего усиления композитными материалами:

$$\alpha_f = \frac{E_f}{E_{b,red}} = 245000 / 11 \cdot 0,0015 = 33,41$$

$$\mu_f = \frac{A_f}{bh_0} = 3,84 \cdot 10^{-5} \cdot (0,15 \cdot 0,3) = 0,00085$$

Высота сжатой зоны определяется по формуле:

$$x = h_0 \left[ \sqrt{(\mu_s \alpha_{s2} + \mu'_s \alpha_{s1} + \mu_f \alpha_f) + 2 \left( \mu_s \alpha_{s2} + \mu'_s \alpha_{s1} \frac{a'}{h_0} + \mu_f \alpha_f \right)} - (\mu_s \alpha_{s2} + \mu'_s \alpha_{s1} + \mu_f \alpha_f) \right] = 0,104$$

Момент инерции приведенного поперечного сечения элемента с учетом площади сечения только сжатой зоны бетона, площадей сечения растянутой и сжатой арматуры, усиления композитными материалами:

$$I_{red} = \frac{bx^3}{12} + bx \left( \frac{x}{2} \right)^2 + \alpha_{s2} A_s (h - x - a)^2 + \alpha_{s2} A'_s (x - a')^2 + \alpha_f A_f (h - x)^2$$

$$= 0,15 \cdot 0,104^3 / 12 + 0,15 \cdot 0,104 \cdot (0,104 / 2)^2 + 27,27 \cdot (1,57 \cdot 10^{-4} \cdot (0,3 - 0,104 - 0,025))^2 + 0,565 \cdot 10^{-4} \cdot (0,104 - 0,025)^2 + 33,41 \cdot 3,84 \cdot 10^{-5} \cdot (0,3 - 0,104)^2 = 0,00024 \text{ м}^4$$

Напряжения в растянутой арматуре изгибаемых элементов:

$$\sigma_s = \frac{M(h_0 - y_c)}{I_{red}} \cdot \alpha_{s1} = 18,5 \cdot (0,275 - 0,104) / 0,00024 \cdot 27,27 = 358806 \text{ кН/м}^2$$

Высота растянутой зоны бетона:

$$x_t = y_t k = 0,1465 \cdot 0,9 = 0,1319 \text{ м}$$

$$2 \cdot 0,025 \leq 0,1319 \leq 0,5 \cdot 0,3 \text{ условие выполняется}$$

Площадь сечения растянутого бетона:

$$A_{bt} = 0,15 \cdot 0,1319 = 0,01978 \text{ м}^2$$

Базовое расстояния между трещинами:

$$l_s = 0,5 \cdot \frac{A_{bt}}{A_s} \cdot d_s = 0,5 \cdot 0,01978 / 1,57 \cdot 10^{-5} \cdot 0,01 = 0,630$$

$10 \cdot 0,01 \leq 0,630 \leq 40 \cdot 0,1$  условие не выполняется.

Принимаем  $l_s = 0,4$  м

Ширину непродолжительного раскрытия трещин определяется по формуле:

$$a_{crc} = 1,0 \cdot 0,5 \cdot 1,0 \cdot 1,4 \cdot 0,842 \cdot 358806 / 200000 \cdot 0,630 = 0,40 \leq 0,4 \text{ мм}$$

Условие выполняется.

**Пример 6. Расчет изгибаемых железобетонных элементов по прогибам****Исходные данные:**

Железобетонная балка прямоугольного сечения 150х300мм.

Исходные данные и промежуточные результаты из примера раздела 6.5

**Выполнение расчета:**

Определяется изгибная жесткость приведенного поперечного сечения элемента с трещиной:

$$D = E_{b1} \cdot I_{red} = 11000/0,0015 * 0,00024 = 1763 \text{ кН*м}^2$$

Полная кривизна железобетонного элемента:

$$\frac{1}{r} = \frac{M}{D} = 18,5/1763 = 0,010493$$

Расчетный прогиб усиленного железобетонного элемента от действия внешней нагрузки:

$$f = \left(\frac{1}{r}\right) \cdot k \cdot S \cdot l^2 = 0,008744 * 2 * 5/48 * 1,95^2 = 0,0083 \text{ м}$$

Значение предельно допустимого прогиба усиленного железобетонного элемента согласно СП20.13330.2011 составляет 1/134 пролета или 14,5мм.

Проверка условия:

$$f \leq f_{ult}$$

8,3 мм ≤ 14,5 мм условие выполнено.

### Пример 7. Расчет анкера

#### Исходные данные:

-Бетон – В15;  $R_b = 8,5$  МПа;  $R_{bt} = 0,75$  Мпа;  $E_b = 24000$  МПа.

- Анкер – CarbonWrap® Anchor, диаметр  $d_{an}=8$ мм, на связующем CarbonWrap® Resin 230+, устанавливаемый вдоль оси композитного элемента усиления.

Глубина заделки – конструктивная (100мм).

Модуль упругости анкера  $E_f = 110000$  МПа.

Нормативное сопротивление растяжению анкера  $R_{fn} = 750$  МПа

Композитный элемент усиления – углеродная лента CarbonWrap® Tape.

Эксплуатация конструкции – на открытом воздухе.

- Усилие вырыва, действующее на анкер:  $N=8$ кН;

Требуется проверить несущую способность анкера на вырыв.

#### Выполнение расчета:

Расчет анкера выполняется из условия:

$$N \leq N_{an} = k_3 R_{an} A_{an}$$

С учетом диаметра анкера коэффициент  $k_3$  принимается равным:

$$\text{при } 4 \leq d_{an} \leq 8 \text{ мм } k_3 = 1 + 0.05d_{an} = 1 + 0.05 \cdot 8 = 1.4$$

$$A_{an} = 3.14 \cdot 8^2 / 4 = 50.27 \text{ мм}^2 - \text{площадь поперечного сечения анкера.}$$

Расчетное сопротивление анкера на растяжение принимаем в соответствии с указаниями СП 164.1325800 по формуле (4.2), определяя  $\gamma_f$  и  $\gamma_{f1}$  как для углекомпозита;

$$\gamma_f = 1.2; \gamma_{f1} = 0.8$$

$\gamma_{f2}$  - коэффициент условий работы полимерного композита, учитывающий его сцепление с бетоном, определяемый по формуле:

$$\gamma_{f2} = \frac{1}{2.5 \cdot \varepsilon_{f,ult}} \sqrt{\frac{R_b}{E_f d_{an}}} \leq 0.9,$$

$\varepsilon_{f,ult}$  - значение предельно допустимых относительных деформаций, определяемое согласно указаниям п. 5.2.5 СП 164.1325800:

$$\varepsilon_{f,ult} = \frac{R_f}{E_f} = \frac{R_{fn} \cdot \gamma_{f1} \cdot 1}{E_f \cdot \gamma_f} = \frac{750 \cdot 0.8 \cdot 1}{110000 \cdot 1.2} = 0.004545$$

Таким образом,  $\gamma_{f2} = \frac{1}{2,5 \cdot 0.004545} \sqrt{\frac{8.5}{110000 \cdot 8}} = 0.274 < 0.9.$

Отсюда, расчетное сопротивление анкера:

$$R_{an} = R_{fn} \cdot \gamma_{f1} \cdot \gamma_{f2} / \gamma_f = 750 \cdot 0.8 \cdot 0.274 / 1.2 = 137 \text{ Мпа.}$$

#### Проверка прочности анкера

Несущая способность анкера на вырыв составляет

$$N_{an} = k_3 R_{an} A_{an} = 1.4 \cdot 137 \cdot 10^3 \cdot 50.27 \cdot 10^{-6} = 9.64 \text{ кН} > N = 8 \text{ кН}$$

Прочность анкера обеспечена.

## 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 5745-052-38276489-2017. Смесь сухая «Ремонтный состав CarbonWrap® Repair FS».
- [14] ТУ 5745-053-38276489-2017. Смесь сухая «Ремонтный состав CarbonWrap® Repair ST».

- [15] ТУ 5745-054-38276489-2017. Смесь сухая «Ремонтный состав Carbon-Wrap® Repair Shotcrete».
- [16] Альбом технических решений по усилению железобетонных конструкций системой внешнего армирования, разработанный ООО «НЦК». М.- 2017г.