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

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

МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

ПО РАСЧЕТУ МОСТОВЫХ ПРОЛЕТНЫХ СТРОЕНИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Москва 2019

gost.e-ecolog.ru

Содержание

1 Область применения 1
2 Нормативные ссылки 2
3 Термины и определения. 5
4 Материалы, назначаемые при проектировании композитных пролетных строений 12
5 Требования к назначению коэффициентов надежности и расчетных характеристик композитного материала 15
6 Требования к назначению расчетных характеристик композитов 24
7 Нагрузки и воздействия 24
8 Особенности конструктивных решений 26
8.1 Конструкции ферменных и балочных полимерно композитных пролетных строений 26
8.2 Сборные ферменные и балочные из пултрузионных профилей полимерно композитные пролетные строения 29
8.3 Полносборные балочные полимерно композитные пролетные строения из U–балок 32
9 Расчетные схемы. Общие положения 34
10 Расчет по прочности и устойчивости сечений композитных конструктивных элементов 38
10.1 Сборные ферменные пролетные троения..... 38
10.2 Полносборные балочные пролетные строения из U–балок..... 44
11 Расчет соединений..... 56
12 Расчет узлов соединений..... 59
13 Расчет прогибов 61
13.1 Сборные ферменные и балочные пролетные строения из пултрузионных профилей 61
13.2 Полносборные балочные пролетные строения из U–балок 62

14 Экспериментальные методы определения свойств полимерного композитного материала пролетных строений для подтверждения его качества 63
14.1 Метод определения морозостойкости 63
14.2 Метод определения влагостойкости 64
14.3 Метод определения термостойкости 64
14.4 Метод определения стойкости к климатическому старению 65
14.5 Метод определения стойкости к ползучести 68
Приложение А Характеристики ингредиентов, используемых в полимерных композитных материалах и конструкциях из полимерных композитов 69
Приложение Б Пример расчета деформационных характеристик многослойного полимерного композитного материала..... 72
Приложение В Допустимые отклонения размеров и формы полимерных композитных конструктивных элементов сборных пролетных строений из пултрузионных профилей 73
Приложение Г Пример расчета сечений и узлов соединений..... 75
Приложение Д Пример расчета полносборной U–балки пролетного строения из полимерных композитных материалов..... 79
Библиография 83

Введение

Методические рекомендации по расчету мостовых пролетных строений с применением полимерных композитных материалов (далее – Методические рекомендации) разработаны в развитие положений СП 35.13330.2011 «СНиП 2.05.03-84* Мосты и трубы», а также для практической реализации требований нормативных документов в области проектирования полимерных композитных пролётных строений мостов различного типа.

Методические рекомендации предназначены для специалистов и руководителей проектных учреждений и служб заказчика (инвестора) и других заинтересованных организаций, с целью обеспечения их проектными материалами, которые позволяют разрабатывать и применять высокоэффективные технические решения мостовых конструкций, обеспечивающие качество и конкурентоспособность строящихся объектов.

Методические рекомендации подготовлены на основе прошедших апробацию положений нормативных отечественных и зарубежных источников, а также результатов отечественных исследований в области композитного мостостроения [1]–[22].

Методические рекомендации разработаны авторским коллективом: ООО «НИИ МИГС» (кандидаты техн. наук *А.С. Бейвель*, *Б.И. Кришман)*, ООО «НТИЦ АпАТэК Дубна» (д-р. техн. наук *А.Е. Ушаков*, канд. техн. наук *Т.Г. Сорина*, инженеры *М.Е. Дьяков*, *Ю.Г. Кленин*, *А.Е. Муравьёв*, *Т.Е. Ушакова*); ОЮЛ «Союзкомпозит» (*С.Ю. Ветохин*, канд. техн. наук *В.П. Полиновский*).

1 Область применения

Методические рекомендации следует использовать при расчетах для проектирования полимерных композитных пролётных строений пешеходных мостов.

Основные положения методических рекомендаций могут быть использованы при:

- оценке фактического состояния сооружения в процессе его испытаний путём определения значений конструктивных коэффициентов приложения В СП 79.13330.2012;

- при расчетах настилов пешеходных и автодорожных мостов, опор вне действующих водотоков, лестничных сходов, пандусов, перил и других конструктивных элементов вне зоны постоянного увлажнения.

Рекомендуемые условия эксплуатации композитных мостов*, определяются следующими требованиями: интервал расчётных температур** от минус 50 °С до плюс 60 °С, географические зоны от сухой до влажной по СП 50.13330 и географический район сейсмичностью до 9 баллов.

Проектную продолжительность эксплуатации несущих конструкций пролетных строений пешеходных мостов рекомендуется принимать не менее 50 лет.

Методические рекомендации предпочтительно применять совместно с национальными стандартами и другими нормативными документами (далее – НД) в этой области.

Методические рекомендации разработаны в связи с отсутствием в СП 35.13330 положений, регламентирующих расчеты и конструктивные требования к полимерным композитным пролетным строениям пешеходных мостов различного типа.

---

* Допускается изменение температурного диапазона эксплуатации пролётных строений пешеходных мостов путем применения экспериментально полученных поправочных коэффициентов с обеспеченностью 0,98.

** За расчетную температуру в районе строительства моста следует принимать температуру наружного воздуха наиболее холодной пятидневки с обеспеченностью 0,98, а за расчетную температуру теплого времени года – абсолютную максимальную температуру воздуха согласно СП 131.13330.

2 Нормативные ссылки

В настоящих рекомендациях использованы нормативные ссылки на следующие документы:

ГОСТ 9.708–83 Единая система защиты от коррозии и старения. Пластмассы. Методы испытаний на старение при воздействии естественных и искусственных климатических факторов

ГОСТ 9.719–94 Единая система защиты от коррозии и старения. Материалы полимерные. Методы испытаний на старение при воздействии влажного тепла, водяного и соляного тумана

ГОСТ 12.1.044–2018 Система стандартов безопасности труда. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов. Номенклатура показателей и методы их определения

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 25.602–80 Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний композиционных материалов с полимерной матрицей (композитов). Метод испытания на сжатие при нормальной, повышенной и пониженной температурах

ГОСТ 4648–2014 (ISO 178:2010) Пластмассы. Метод испытания на статический изгиб

ГОСТ 4650–2014 (ISO 62:2008) Пластмассы. Методы определения водопоглощения

ГОСТ 4651–2014 (ISO 604:2002) Пластмассы. Метод испытания на сжатие

ГОСТ 10060–2012 Бетоны. Методы определения морозостойкости

ГОСТ 13087–81 Бетоны. Методы определения истираемости

ГОСТ 14359–69 Пластмассы. Методы механических испытаний. Общие требования

ГОСТ 15139–69 Пластмассы. Методы определения плотности (объемной массы)

ГОСТ 15173–70 (СТ СЭВ 2899-81) Пластмассы. Метод определения среднего коэффициента линейного теплового расширения

ГОСТ 18197–2014 (ISO 899-1:2003) Пластмассы. Метод определения ползучести при растяжении

ГОСТ 23630.2–79 Пластмассы. Метод определения теплопроводности

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

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

ГОСТ 26877–2008 Металлопродукция. Методы измерений отклонений формы

ГОСТ 27751–2014 Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения

ГОСТ 30244–94 Материалы строительные. Методы испытаний на горючесть

ГОСТ 30247.0–94 (ИСО 834–75) Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Общие требования

ГОСТ 30247.1–94 (ИСО 834–75) Конструкции строительные. Методы испытаний на огнестойкость. Несущие и ограждающие конструкции

ГОСТ 30402–96 Материалы строительные. Метод испытания на воспламеняемость

ГОСТ 32020–2012 Опорные части резиновые для мостостроения. Технические условия

ГОСТ 32618.2–2014 (ISO 11359-2:1999) Пластмассы. Термомеханический анализ. Часть 2. Определение коэффициента линейного теплового расширения и температуры стеклования

ГОСТ 32651–2014 Ткани мультиаксиальные. Общие технические требования и методы испытаний

ГОСТ 32656–2014 (ISO 527-4:1997, ISO 527-5:2009) Композиты полимерные. Методы испытаний. Испытания на растяжение

ГОСТ 32657–2014 (ISO 75-1:2004, ISO 75-3:2004) Композиты полимерные. Методы испытаний. Определение температуры изгиба под нагрузкой

ГОСТ 32658–2014 (ISO 14129:1997) Композиты полимерные. Методы испытаний. Определение характеристик напряжения деформации и сдвига в плоском состоянии, методом испытания на растяжение под углом ± 45 град

ГОСТ 32659–2014 (ISO 14130:1997) Композиты полимерные. Методы испытаний. Определение кажущейся межслойной прочности на сдвиг методом испытания балочек

ГОСТ 32667–2014 (ISO 11566:1996) Волокно углеродное. Определение свойств при растяжении элементарной нити

ГОСТ 32794–2014 Композиты полимерные. Термины и определения

ГОСТ 33119–2014 Конструкции полимерные композитные для пешеходных мостов и путепроводов. Технические условия

ГОСТ 33376–2015 Секции настилов полимерные для пешеходных и автодорожных мостов и путепроводов. Общие технические условия

ГОСТ 54928–2012 Пешеходные мосты и путепроводы из полимерных композитов. Технические условия

ГОСТ Р 55135–2012 Пластмассы. Дифференциальная сканирующая калориметрия (ДСК)

ГОСТ Р 55139–2012 Совместимость технических средств электромагнитная. Оборудование для контактной сварки. Часть 2. Требования и методы испытаний

ГОСТ Р 56812–2015 Композиты полимерные. Метод определения механических характеристик при комбинированной сжимающей нагрузке

СП 35.13330.2011 «СНиП 2.05.03-84* Мосты и трубы» (с изменениями № 1, № 2)

СП 50.13330.2012 «СНиП 23-02-2003 Тепловая защита зданий» (с изменением № 1)

СП 79.13330.2012 «СНиП 3.06.07-86 Мосты и трубы. Правила обследований и испытаний» (с изменениями № 1, № 2, № 3, № 4)

СП 131.13330.2018 «СНиП 23-01-99 Строительная климатология» (с изменением № 1)

СП 164.1325800.2014 Усиление железобетонных конструкций композитными материалами

Примечание – При пользовании настоящими рекомендациями целесообразно проверить действие ссылочных документов в информационной системе общего пользования – на официальном сайте Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии в сети Интернет или по ежегодному информационному указателю «Национальные стандарты», который опубликован по состоянию на 1 января текущего года, и по выпускам ежемесячного информационного указателя «Национальные стандарты» за текущий год. Если заменен ссылочный документ, на который дана недатированная ссылка, то рекомендуется использовать действующую версию этого документа с учетом всех внесенных в данную версию изменений. Если заменен ссылочный документ, на который дана датированная ссылка, то рекомендуется использовать действующую версию этого документа с указанным выше годом утверждения (принятия). Если после утверждения настоящего стандарта в ссылочный документ, на который датирована ссылка, внесено изменение, затрагивающее положение, на которое дана ссылка, то это положение рекомендуется применять без учета данного изменения. Если ссылочный 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 целесообразно проверить в Федеральном информационном фонде регламентов и стандартов.

3 Термины и определения

В настоящих рекомендациях применены следующие термины с соответствующими определениями:

3.1 **армирующий наполнитель:** Наполнитель, выполняющий роль арматуры в полимерном композите.

3.2 **базовое направление армирования пултрузионного профиля (базовое направление):** Нормаль к поперечному сечению профиля.

3.3 **вакуумная инфузия:** Технология изготовления изделия из полимерного композита в герметичных формах с использованием вакуума для нагнетания связующего в форму, формирования ламината и пропитки армирующих наполнителей.

3.4 **выкладка (укладка):** Заполнение полости формы сухим наполнителем (который может содержать небольшое количество смолы, необходимого для обеспечения стабильности формы) для дальнейшей пропитки связующим.

[ГОСТ 32794–2014, пункт 2.4.9]

3.5 **замасливатель (**аппрет): Вещество, наносимое на волокна в процессе изготовления для защиты поверхности от механических повреждений в процессе переработки и улучшающие адгезию между матрицей и наполнителем полимерного композита.

3.6 **конструктивные элементы (конструкции):** Отдельные составные части пешеходного моста, в том числе, пролетные строения, опоры, настилы (плиты) мостового полотна, лестничные сходы, перила, водоотводные лотки и светопрозрачные галереи, предназначенные для его сооружения.

3.7 **коробчатая балка пролетного строения:** Полносборная балка, замкнутого поперечного коробчатого сечения, которое образовано выполненными из ламината верхней и нижней горизонтальными плитами, объединенными сплошными продольными стенками и установленными вдоль пролета балки в ее внутреннем пространстве поперечными диафрагмами.

Примечание – Внутреннее пространство между стенками может быть заполнено, например, вспененной пластмассой.

3.8 **коэффициент надежности по материалу:** Коэффициент, учитывающий неоднородность свойств полимерного композита, связанный с методом изготовления и несоответствием фактических свойств полимерного композита в конструкциях при различных методах испытаний экспериментальных образцов.

3.9 **коэффициент сохранения свойств (коэффициент пересчета):** Коэффициент, учитывающий влияние длительных воздействий (температуры, влажности, ползучести, морозостойкости, усталости и др.) на снижение механических свойств полимерного композита, рассчитываемый как отношение значений сопротивлений до и после приложения воздействия.

3.10

ламель: Монослой многослойного полимерного композита, армированный одним видом армирующего наполнителя – ровингом, кордной тканью, тканью, мультиаксиальной тканью или матом.

Примечание – В зависимости от вида армирующего наполнителя ламель является однонаправленно-, двунаправленно-, многонаправленно- или хаотичноармированной.

[ГОСТ Р 54928–2012, пункт 3.1.22]

3.11

мат: Материал в форме листа, изготовленный из скреплённых вместе элементарных нитей, штапельного волокна или комплексных нитей, нарезанных или ненарезанных, ориентированных или неориентированных.

[ГОСТ 32794–2014, пункт 2.3.21]

3.12

слоистый полимерный композит (ламинат): Полимерный композит, состоящий из параллельно расположенных и соединённых между собой двух или более слоев материала или материалов.

[ГОСТ 32794–2014, пункт 2.1.321]

3.13

мультиаксиальная ткань: Текстильный нетканый материал, состоящий из двух или более параллельных слоев однонаправленных непрерывных нитей или ровингов, скрепленных с помощью системы переплетения.

Примечание – Ровинг – пучок непрерывных (стеклянных) волокон.

[ГОСТ 32651–2014, пункт 3.1]

3.14

наполнитель: Относительно инертный материал, соединенный с термоактивным или термопластичным полимером до начала процесса отверждения или стеклования, или кристаллизации, для изменения или придания требуемых свойств полимеру и/или матрице полимерного композита или для снижения стоимости конечной продукции.

[ГОСТ 32794–2014, пункт 2.1.148]

3.15

настил: Несущий элемент прохожей и/или проезжей части пролетного строения моста, по которому осуществляется движение пешеходов и/или транспортных средств.

[ГОСТ 33376–2015, пункт 3.1]

3.16

несущие конструкции пешеходного моста (путепровода): Конструктивные элементы пешеходного моста, воспринимающие постоянную и временные нагрузки и обеспечивающие его несущую способность.

[ГОСТ Р 54928–2012, пункт 3.1.4]

3.17 **нормативное значение сопротивления полимерного композита:** Значение сопротивления полимерного композита для данного вида напряженного состояния, полученное по результатам испытаний с учетом статистических показателей материала.

3.18 **однонаправленный слой многослойного композита:** Слой, в котором все волокна уложены в одном направлении.

3.19 **ортотропный материал:** Материал с различными физико-механическими свойствами в различных направлениях, имеющий три взаимно ортогональные направления (оси ортотропии), по которым растяжение или сжатие материала не вызывает деформаций сдвига.

3.20

полимерный композит: Композит, матрица которого образована из термопластичных или термореактивных полимеров или эластомеров.

Примечание – Композит (композитный материал, композиционный материал) – Сплошной продукт, состоящий из двух или более материалов, отличных друг от друга по форме и/или фазовому состоянию и/или химическому составу и/или свойствам, скрепленных, как правило, физической связью и имеющих границу раздела между обязательным связующим материалом (матрицей) и ее наполнителями, включая армирующие наполнители.

[ГОСТ 32794–2014, пункт 2.1.234]

3.21 **полимерный композитный пултрузионный профиль (пултрузионный профиль):** Линейное профильное изделие из полимерного композита, изготавливаемое путём протягивания через фильеру пропитанных смолой непрерывных волокон и имеющее, как правило, постоянное по длине поперечное сечение.

3.22 **полносборное балочное пролетное строение из полимерного композитного профиля:** Пролетное строение монтируемое из отдельной (отдельных) толстостенной или коробчатой балки, изготовленной на заводе по технологии вакуумной инфузии.

3.23

препрег: Готовый для переработки армирующий наполнитель в форме тканей или нитей, предварительно пропитанный материалом, образующим матрицу полимерного композита.

Примечание – Материал, образующий матрицу полимерного композита, может содержать другие наполнители.

[ГОСТ 32794–2014, пункт 2.1.271]

3.24

пролетное строение пешеходного моста (путепровода) (пролетное строение); ПС**:** Несущая конструкция пешеходного моста, перекрывающая все пространство или его часть между двумя или несколькими опорами, воспринимающая нагрузку от элементов обустройства моста и пешеходов и передающая ее на опоры.

[ГОСТ Р 54928–2012, пункт 3.1.5]

3.25 **пропитка под вакуумом:** Технология изготовления полимерных композитных конструкций в формах, при которой формирование ламината и пропитка армирующего наполнителя связующим производится под действием перепада давления при нагнетании связующего в форму.

Примечание – Технология пропитки связующим под вакуумом используется при инфузии в разных модификациях:

- инфузия с использованием вакуума для нагнетания связующего в герметичные формы;
- Light RTM путем использования вакуума для нагнетания связующего в жёсткие герметичные формы;
- Flex moulding путем использования вакуума для нагнетания связующего в герметичную двустороннюю форму одна формообразующая сторона которой жесткая, а другая эластичная.

3.26

пултрузия (протяжка): Процесс изготовления изделий с постоянным профилем поперечного сечения непрерывным протягиванием пропитанных термореактивной смолой непрерывных волокон армирующего наполнителя через нагретую фильеру.

Примечания

1 Профильные изделия, изготовленные пултрузией, обладают высокой прочностью в направлении армирования.

2 При необходимости профильные изделия, изготовленные пултрузией, протягивают через камеру постоотверждения.

[ГОСТ 32794–2014, пункт 2.4.24]

3.27 **расчетное сопротивление полимерного композита:** Значение сопротивления для данного вида напряженного состояния материала, полученное путем деления нормативного сопротивления на коэффициент надежности по материалу и коэффициенты сохранения свойств.

3.28 **расчетный (проектный) срок эксплуатации:** Установленный в нормативных документах или в задании на проектирование период использования пролетного строения или конструктивного элемента по назначению в условиях его нормативного технического обслуживания до капитального ремонта и (или) реконструкции и (или) достижения предельного состояния.

Примечание – Расчетный срок эксплуатации отсчитывается с момента начала или возобновления эксплуатации объекта после капитального ремонта или реконструкции.

3.29 **сборное пролетное строение:** Решетчатая ферма, выполненная в виде расположенной между верхним и нижним поясом фермы решетки, собираемой на болтах из полимерных композитных пултрузионнных профилей, в том числе уголков, швеллеров, двутавров и пластин.

3.30 **температура стеклования (T_g):** Температура, соответствующая середине диапазона температур при котором происходит стеклование.

Стеклование: обратимые изменения в аморфном полимере в вязкое или высокоэластичное состояние из твердого и хрупкого состояния.

3.31 **термореактивное связующее:** Связующее, которое при отверждении в результате химической реакции необратимо превращается в твердый, неплавкий и нерастворимый материал с трехмерной сетчатой структурой полимера.

Примечание – К термореактивным относятся ненасыщенные полиэфирные, эпоксидные, винилэфирные, фенольные и другие виды органических смол.

3.32 **ультралам–брус:** Брус из многослойного клееного материала, выполненного из лущеного шпона хвойных пород.

3.32

формование из препрега: Процесс изготовления конструкции или изделия из полимерного композита из препрега, с использованием вакуума или избыточного давления и нагрева.

Примечание – Технология закрытого формования, при которой одна часть формы должна быть гибкой.

[ГОСТ Р 54928–2012, пункт 3.1.26]

3.33 **U–балка пролетного строения:** Полносборная толстостенная балка из многослойного полимерного композита, разомкнутого к верху или к низу поперечного сечения, содержащая две сплошные трехслойные продольные стенки, объединенные между собой нижней трехслойной плитой с дискретно расположенными внутри стенок и плиты поперечными диафрагмами, при этом заполнитель трехслойных стенок и плиты выполнен из вспененной пластмассы

Сокращения

ПВХ – поливинилхлорид;

ПКМ – полимерный композиционный материал (полимерный композит);

ПМИ – полиимид;

ППУ – пенополиуретан;

ФМХ – физико-механические характеристики.

4 Материалы, назначаемые при проектировании композитных пролетных строений

4.1 Пролетные строения пешеходных мостов и настилы из полимерных композитов рекомендуется изготавливать с применением термореактивных связующих (полиэфирное, винилэфирное, эпоксидное или фенольное) и волокон (стекловолокно, углеволокно или их комбинации), физико-механические свойства которых должны быть подтверждены документально стандартами предприятий-изготовителей или стандартами более высокого уровня.

4.2 Основные физические характеристики полимерных композитов приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – **Основные физические характеристики полимерных композитов**

Физическое свойство	Значение	Метод испытания
Твердость по Барколу	Не менее 30	ГОСТ Р 56761
Температура стеклования	Не менее +80 °С	ГОСТ Р 55135
Коэффициент температурного расширения*	По данным производителя	ГОСТ 15173
Водопоглощение	Не более 2 %	ГОСТ 4650
Температура хрупкости	Не выше –40 °С	ГОСТ 16782
Морозостойкость	Аналогично проектной марки бетона для данного элемента	ГОСТ 10060, ГОСТ 32656
Плотность	1900 кг/м^3	ГОСТ 15139
Коэффициент теплопроводности	Данные изготовителя	ГОСТ 23630.2
* При отсутствии данных производителя рекомендуется принимать с учётом таблицы 1 СП 164.1325800.2014, но не более $1{,}35 \cdot 10^{-5}$ $(°C)^{-1}$		

4.3 Полимерный композитный материал должен иметь документацию (паспорт качества, результаты входного контроля по ГОСТ 24297),

подтверждающую соответствие заявленных свойств материалов, входящих в состав ПКМ требованиям, установленным в проектной документации. Характеристики ингредиентов в составе ПКМ приведены в приложении А.

4.4 Для повышения долговечности, изменения эстетических, экономических и эксплуатационных характеристик полимерных композитов, например, для изменения цвета, защиты от ультрафиолетового излучения, снижения массы конструкции, повышения огнестойкости в состав ПКМ могут быть введены инертные наполнители, например, мел ($CaCO_3$), оксид кремния (SiO_2), стеклянные микросферы (полые или сплошные), полые полимерные микросферы из термопластичных или термореактивных полимеров, стабилизаторы ультрафиолетового излучения и озона, ингибиторы горения и др.

В расчетах ПКМ конструкций, содержащих указанные инертные наполнители следует учитывать возможное снижение уровня механических характеристик ПКМ с внесением соответствующих корректировок расчетных сопротивлений, модуля упругости и коэффициента Пуассона, которые допускается принимать по результатам испытаний.

4.5 Общая объемная доля армирующего наполнителя в полимерном композите для несущих конструктивных элементов пролетных строений мостов должна быть не менее 30 %.

4.6 Для пултрузионных профилей:

- массовая доля армирующего наполнителя, направление которого совпадает с базовым направлением, должна составлять не менее 30 % для фасонных элементов (например, уголков, тавров, труб и др.) и не менее 25 % для плоских элементов (плит) – расположение армирующего наполнителя должно быть симметричным относительно осей симметрии профиля.

4.7 Использование полимерных композитных матов в пешеходных мостах допускается в качестве конструктивного, косвенного, нерасчетного армирования.

4.8 Значения характеристик пожарной опасности полимерных композитов рекомендуется назначать не менее:

Г2 по ГОСТ 30244 ..... для горючести;

В2 по ГОСТ 30402 ..... для воспламеняемости;

Д2 по ГОСТ 12.1.044 ..... для дымообразующей способности;

Т2 по ГОСТ 12.1.044 ..... для токсичности продуктов горения.

4.9 В качестве армирующих материалов для монолитных пролетных строений следует использовать однонаправленные, двунаправленные, трехнаправленные или четырехнаправленные мультиаксиальные ткани.

4.10 При проектировании многослойного полимерного композита должны быть выполнены следующие требования:

- слои, из которых собирается многослойный композит, должны представлять собой ортотропные материалы;

- многослойный композит в целом должен представлять собой ортотропный материал;

- слои материала, уложенные в разных направлениях, должны чередоваться;

- пакет слоев должен быть симметричен (по материалам и углам армирования) относительно срединной поверхности.

В многослойных полимерных композитах рекомендуется применять армирование волокнами в направлениях: 0°; 90°; 45°; -45° (рисунок 4.1).

4.11 Массовая доля волокон в каждом направлении каждой ламели пакета многослойного полимерного композита, должна быть не менее 12 %.

4.12 Допускается для прошивки слоев мультиаксиальной ткани вводить в состав армирующего наполнителя, например, термопластичные, полиэфирные, полиамидные и хлопковые волокна.

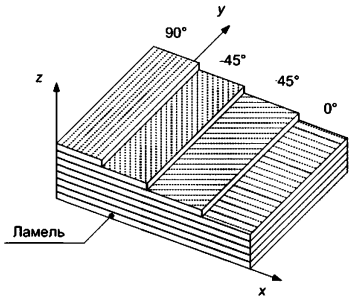


Рисунок 4.1 – **Строение пакета многослойного полимерного композита**

4.13 Для заполнения пространства между наружным и внутренним слоями ламината U-балок монолитных пролетных строений из ПКМ рекомендуется применять следующие виды не несущих заполнителей (приложение А):

- пенополиуретаны, в качестве технологического заполнителя для формообразования в процессе изготовления;

- ПВХ-пенопласты и ПМИ-пенопласты, работу которых допускается учитывать в расчетах на временную нагрузку после экспериментального подтверждения стабильности физико-механических свойств ПВХ (в т.ч. объема, геометрических размеров, прочности на смятие и т. д.) за период эксплуатации пролетного строения;

- слоистую древесину, ультралам–брус [23], а также древесину хвойных пород, соответствующую требованиям раздела 10 СП 35.13330.2011.

5 Требования к назначению коэффициентов надежности и расчетных характеристик композитного материала

5.1 Расчетные сопротивления и деформационные характеристики R полимерного композита рассчитываются с использованием значений нормативных сопротивлений R_n по формуле

$$R = \frac{R_n}{\gamma_m \cdot \gamma_c}, \qquad (5.1)$$

где R_n – нормативные значения сопротивлений и деформационных характеристик полимерного композита, МПа. Нормативные значения деформационных характеристик полимерного композита принимают равными их средним значениям;

γ_m – коэффициент надёжности по материалу, который вычисляется по формуле

$$\gamma_m = \gamma_{m1} \times \gamma_{m2} \qquad (5.2)$$

где γ_{m1} – частный коэффициент надёжности, учитывающий возможное несоответствие значений физико-механических свойств полимерного композита в конструкции значениям, полученным при различных методах испытания образцов.

Для полносборных балочных конструкций пролетных строений допускается γ_{m1} принимать 1,15, если ФМХ полимерного композита назначаются по результатам испытаний образцов, изготовленных по технологии и из материалов одинаковых с материалами и технологией изготовления пролетного строения. В случае определения ФМХ по данным испытания контрольных образцов, вырезанных из фрагмента балки в натуральную величину, γ_{m1} допускается принимать 1,0.

Для сборных ферменных пролетных строений из пултрузионных профилей допускается γ_{m1} принимать 1,0, если ФМХ полимерного композита назначаются по результатам испытаний контрольных образцов, вырезанных из партии пултрузионных профилей, применяемых в пролетном строении.

Для ферменных и балочных конструкций, ФМХ которых назначаются по нормативным документам, γ_{m1} принимается 1,35;

γ_{m2} – частный коэффициент надежности, учитывающий разброс свойств полимерного композита в конструкциях для разных технологий изготовления, принимается по таблице 5.1.

Для сборных ферменных пролетных строений из пултрузионных профилей допускается принимать γ_{m2} равным 1,0, если ФМХ полимерного композита назначаются по результатам испытаний контрольных образцов,

вырезанных из партии пултрузионных профилей, применяемых в пролетном строении.

Для полносборных балочных пролетных строений допускается принимать γ_{m1} равным 1,0, если ФМХ полимерного композита назначаются по результатам испытаний контрольных образцов, вырезанных из фрагмента балки в натуральную величину;

γ_c – обобщенный коэффициент пересчета, учитывающий снижение физико-механических характеристик полимерного композита в процессе эксплуатации вычисляют с использованием частных (поправочных) коэффициентов сохранения свойств K_i по формуле:

$$\gamma_c = K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot K_5 \cdot K_6 \qquad (5.3)$$

где K_1 – коэффициент, учитывающий влияние температуры;

K_2 – коэффициент, учитывающий влияние увлажнения конструкций;

K_3 – коэффициент, учитывающий влияние ползучести для постоянных нагрузок;

K_4 – коэффициент, учитывающий влияние усталости (для настилов автодорожных мостов);

K_5 – коэффициент, учитывающий влияние переменных циклов замораживания - оттаивания (морозостойкость);

K_6 – коэффициент, учитывающий влияние старения полимерного композита за время эксплуатации.

Таблица 5.1 – **Значения коэффициента надежности по материалу γ_{m2}**

Технология изготовления	Значение коэффициента γ_{m2} для полимерного композита	
	постотвержденного	без постотверждения
Инфузия (RTM)	1,2	1,4
Вакуумная инфузия (VaRTM)	1,2	1,4
Формование из препрега	1,1	1,3
Пултрузия	1,1	1,3
Ручная выкладка	1,4	1,7

5.2 Значения частных (поправочных) коэффициентов сохранения свойств полимерного композита K_i, определяются как отношение ФМХ материала до и после приложения к нему внешнего воздействия. При экспериментальном определении коэффициентов сохранения свойств, для каждой характеристики материала используется не менее 12 образцов из них шесть образцов подвергаются внешнему воздействию и шесть – контрольные. В случае отсутствия экспериментальных данных, коэффициенты сохранения свойств K_i принимаются по таблице 5.2.

Таблица 5.2 – **Коэффициенты сохранения свойств полимерного композита K_i**

Номер K_i	Характеристика сопротивления воздействию	Метод испытаний	Рекомендуемое значение частного коэффициента K_i
1	Термостойкость	ГОСТ 32656	1,2
2	Влагостойкость	ГОСТ 9.719	1,3
3	Ползучесть	ГОСТ 18197	1,37 – 2,50 (среднее значение 1,66)
4	Выносливость (для настилов мостов)	ГОСТ Р 54928	1,1
5	Морозостойкость	Марка F_2 300 ГОСТ 10060,	1,1
6	Климатическое старение	ГОСТ 9.708	1,3

5.3 Определять механические характеристики полимерного композита рекомендуется экспериментально методами, указанными в таблице 5.3.

Таблица 5.3 – **Методы определения механических характеристик полимерных композитов**

Характеристика	Метод определения
Предел прочности при растяжении в направлении 0° и 90°	ГОСТ 32656
Предел прочности при сжатии в направлениях 0° и 90°	ГОСТ 4651 (ГОСТ Р 56812)
Предел прочности при изгибе в направлениях 0° и 90°	ГОСТ 4648
Временное сопротивление* при межслойном сдвиге (в т.ч. расчет на касательные напряжения и смятие)	ГОСТ 32659
Модуль упругости при растяжении в направлениях 0° и 90°	ГОСТ 32656
Модуль сдвига	ГОСТ 32658
Модуль упругости при сжатии и коэффициент Пуассона в направлениях 0° и 90°	ГОСТ 25.602
*Соответствует термину «кажущееся напряжение» при межслойном сдвиге (ГОСТ 32659–2014, пункт 3.1).	

5.4 Средние значения и коэффициенты вариации физико-механических характеристик полимерных композитов или нормативные сопротивления, а также значения коэффициентов сохранения свойств по материалу, примененные при расчетах конструкций и заявленные в НД на эти изделия, должны быть подтверждены для конкретного объекта предприятием-изготовителем конструкций в процессе приемо-сдаточных и периодических испытаний, выполненных в соответствии с разделом 8 ГОСТ 33119–2014.

5.5 Значения нормативных сопротивлений R_n необходимо рассчитывать по результатам испытаний полимерного композита с обеспеченностью 0,98 по формуле

$$R_n = R_{ср} \cdot (1 - 2{,}0 \cdot V) \qquad (5.4)$$

где $R_{ср}$ – средние значения сопротивлений полимерного композита, МПа, принимаются по результатам испытаний образцов или по НД на конкретную марку материала или по технической документации изготовителей материала. Нормативные значения деформационных характеристик допускается принимать равными средним значениям по результатам испытаний не менее шести образцов;

V – коэффициент вариации, доли единиц, характеризующий экспериментальный разброс свойств материала ПКМ, при отсутствии экспериментальных данных, допускается принимать равным 13 %.

5.6 Минимальные значения нормативных сопротивлений и деформативных характеристик стеклокомпозитных материалов для мостовых конструктивных элементов пешеходных мостов рекомендуется принимать в соответствии с таблицами 5.4–5.6 или по НД на конкретную марку конструкционного полимерного композита или по данным технической документации изготовителей материала.

Таблица 5.4 – **Нормативные сопротивления стеклокомпозитных пултрузионных профилей**

Вид напряженного состояния	Направление армирования	Минимальное значение нормативного сопротивления, МПа
Растяжение	базовое	184
	поперечное	38
Сжатие	базовое	151
	поперечное	55
Изгиб	базовое	184
	поперечное	77
Скалывание при расчёте соединений	базовое	29
	поперечное	19
Сдвиг		21

Таблица 5.5 – **Деформационные характеристики полимерных стеклокомпозитных пултрузионных профилей**

Деформационная характеристика	Минимальное среднее значение
Модуль упругости при растяжении профилей с толщиной стенки более 10 мм в базовом направлении, МПа	28000
Модуль упругости при растяжении профилей с толщиной стенки менее 10 мм в базовом направлении, МПа	23000
Модуль упругости при растяжении в поперечном направлении, МПа	8500
Коэффициент Пуассона в направлении 0°–90° (базовое–поперечное)	0,23
Модуль сдвига, МПа	3000

Таблица 5.6 – **Нормативные сопротивления и деформационные характеристики слоистых стеклопластиков, изготовленных по технологиям пропитки под вакуумом при общем содержании стекловолокон (55 ± 1) % от массы полимерного стеклопластика**

Характеристика	Направление	Массовая доля стекловолокон, % , от общей массы стекловолокон в полимерном композите по направлениям 0°; 90°; 45°; – 45° (рисунок 4.1)				
		100; 0; 0; 0	70;0;15;15	62;13;12,5;12,5	35;22;21,5;21,5	34;0;33;33
Нормативные сопротивления, МПа, при коэффициенте вариации 13 %						
Растяжение	продольное *X*	474	448	388	280	289
	поперечное *Y*	26	44	122	176	74
Сжатие	продольное *X*	274	272	222	170	185
	поперечное *Y*	61	70	96	129	85
Сдвиг в плоскости ламината		16	55	59	89	126
Деформационные характеристики (средние значения), МПа						
Модуль упругости при растяжении	продольное *X*	37000	30000	26500	19000	19500
	поперечное *Y*	2500	5500	9500	14000	9000
Модуль сдвига в плоскости		3500	5500	5000	6000	7500
Коэффициент Пуассона μ_{12}		0,25	0,417	0,22	0,215	0,468
Коэффициент Пуассона μ_{21}		0,017	0,082	0,08	0,165	0,214

5.7 Деформационные характеристики многослойного полимерного композита, имеющего отличные от указанных в таблице 5.6 соотношения

массовых долей и направления армирующих волокон, рекомендуется вычислять с учетом основных положений [14], [15], с учетом направлений волокон, указанных на рисунке 4.1 и, используя характеристики монослоя, приведенные в графе 1 таблицы 5.6 по формулам:

$$E_x = \frac{1}{\delta_\Sigma}\left(B_{11} - \frac{B_{12}^2}{B_{22}}\right);\ E_y = \frac{1}{\delta_\Sigma}\left(B_{22} - \frac{B_{12}^2}{B_{11}}\right);\ G_{xy} = \frac{B_{33}}{\delta_\Sigma}; \qquad (5.5)–(5.7)$$

$$\mu_{xy} = \frac{B_{12}}{B_{22}};\ \mu_{yx} = \frac{B_{12}}{B_{11}}; \qquad (5.8)–(5.9)$$

$$B_{11} = \delta_1\bar{E}_1 + \delta_2\bar{E}_2 + \delta\left[\frac{1}{2}(\bar{E}_1 + \bar{E}_2) + \bar{E}_1\mu_{21} + 2G_{12}\right]; \qquad (5.10)$$

$$B_{22} = \delta_1\bar{E}_2 + \delta_2\bar{E}_1 + \delta\left[\frac{1}{2}(\bar{E}_1 + \bar{E}_2) + \bar{E}_1\mu_{21} + 2G_{12}\right]; \qquad (5.11)$$

$$B_{12} = \bar{E}_1\mu_{21}(\delta_1 + \delta_2) + \delta\left[\frac{1}{2}(\bar{E}_1 + \bar{E}_2) + \bar{E}_1\mu_{21} - 2G_{12}\right]; \qquad (5.12)$$

$$B_{33} = G_{12}(\delta_1 + \delta_2) + \frac{\delta}{2}(\bar{E}_1 + \bar{E}_2 - 2\bar{E}_1\mu_{21}); \qquad (5.13)$$

$$\bar{E}_1 = \frac{E_1}{1 - \mu_{12}\mu_{21}};\ \bar{E}_2 = \frac{E_2}{1 - \mu_{12}\mu_{21}} \qquad (5.14), (5.15)$$

где E_x – модуль упругости многослойного композита в направлении X;

E_y – модуль упругости многослойного композита в направлении Y;

G_{xy} – модуль сдвига многослойного композита в плоскости;

μ_{xy} и μ_{yx} – коэффициенты Пуассона многослойного композита;

B_{11} ; B_{12} ; B_{22} ; B_{33} – коэффициенты, характеризующие жесткость пакета;

E_1 – модуль упругости ламели в направлении 1;

E_2 – модуль упругости монослоя в направлении 2;

G_{12} – модуль сдвига монослоя ламели в плоскостях 12;

μ_{12} и μ_{21} – коэффициенты Пуассона монослоя.

Индексами «1», «2», «12», «21» обозначены основные направления волокон в слое ламината;

δ_1 – суммарная толщина однонаправленных слоев материала с волокнами, уложенными в направлении 0°;

δ_2 – суммарная толщина однонаправленных слоев материала с волокнами, уложенными в направлении 90°;

δ – суммарная толщина однонаправленных слоев материала с волокнами, уложенными в направлении 45°, равная суммарной толщине однонаправленных слоев материала с волокнами уложенными в направлении – 45°;

$\delta_\Sigma = \delta_1 + \delta_2 + 2\delta$ – общая толщина многослойного пакета.

5.8 Для значений деформационных характеристик многослойного полимерного композита, рассчитанных по формулам (5.5–5.15) должны выполняться условия

$$E_x \mu_{yx} = E_y \mu_{xy} \quad (5.16)$$

$$\text{или } E_1 \mu_{21} = E_2 \mu_{12}. \quad (5.17)$$

Пример расчета деформационных характеристик многослойного ПКМ приведен в приложении Б.

6 Требования к назначению расчетных характеристик композитов

6.1 Расчетные характеристики полимерных композитов должны назначаться в соответствии с требованиями 5.1.

6.2 Расчетное значение характеристики истираемости прохожей части пешеходных мостов, определяемое по ГОСТ 13087 должно быть не более 10,0 мм^3/м.

6.3 При расчетах по прочности и устойчивости U-балок пешеходных пролетных строений мостов пенополиуретановое заполнение не учитывается в связи с низкой и не стабильной во времени прочностью на сжатие.

7 Нагрузки и воздействия

7.1 Конструкции полимерных композитных пролетных строений пешеходных мостов следует рассчитывать на нагрузки, воздействия и их сочетания в соответствии с разделом 6 СП 35.13330.2011 и настоящим разделом.

7.2 При определении нагрузки от собственного веса конструкций плотность полимерного композитного материала следует принимать по НД предприятий-изготовителей материала. Для предварительных расчетов с последующим уточнением значений у изготовителей материала допускается применять данные таблицы 7.1.

Таблица 7.1 – **Максимальная плотность полимерных композитных материалов**

Вид полимерного композита	Плотность полимерного композита, кг/м^3
1 Стеклокомпозит	1900
2 Углекомпозит	1650

7.3 При определении собственного веса сборных пешеходных пролетных строений ПКМ допускается не учитывать снижение их массы за счет отверстий под болты, вырезов и других конструктивных форм, снижающих массу пролетного строения.

7.4 Нагрузку от суммарного веса болтов и других металлических креплений полимерных композитных элементов допускается принимать равномерно распределенной по длине пролетного строения.

7.5 При расчете полимерных композитных элементов по предельным состояниям первой и второй групп коэффициенты надежности по нагрузке от собственного веса $\gamma_ф$ следует принимать для:

- пултрузионных элементов, стальных элементов (например, метизных) – 1,1 (0,9);
- элементов, формуемых методом ручной выкладки – 1,3 (0,9).

В скобках указаны значения $\gamma_ф$, которые принимаются в случаях, когда при уменьшении собственной массы полимерного композитного конструктивного элемента увеличивается степень неблагоприятного внешнего воздействия на конструкцию (например, собственная масса элемента в расчетах ветровые нагрузки).

7.6 При определении нормативной ветровой нагрузки по пункту 6.24 СП 35.13330.2011 логарифмический декремент затухания для конструкций из полимерных стеклокомпозитов следует принимать 0,2, а для конструкций из полимерных углекомпозитов 0,1.

8 Особенности конструктивных решений

8.1 Конструкции ферменных и балочных полимерно композитных пролетных строений

8.1.1 Пролетные строения пешеходных мостов рекомендуется проектировать в виде сборных ферменных конструкций, монтируемых из отдельных пултрузионных профилей и полносборных балочных конструкций (U-балок), изготавливаемых методами пропитки под вакуумом в соответствии с требованиями ГОСТ Р 54928 и ГОСТ 33119.

8.1.2 При проектировании пешеходных пролетных строений мостов из пултрузионных профилей рекомендуется учитывать следующие положения:

– назначать материал полимерных композитов, физико-механические характеристики которого соответствуют требованиям по устойчивости к воздействию окружающей среды в течении всего расчетного срока эксплуатации пешеходного пролётного строения, а в необходимых случаях с защитой полимерного композита согласно ГОСТ 33376, ГОСТ 33119;

– применять рациональные формы пултрузионных профилей минимальных сечений и с учетом сортаментов предприятий-изготовителей.

Сечения конструктивных элементов пешеходных пролетных строений должны быть проветриваемыми и не должны способствовать накоплению влаги (особенно это касается замкнутых профилей);

– принимать конструктивную схему пролетного строения с учетом недопущения возможности прогрессирующего обрушения пролетного строения и обеспечить его работу на постоянные нагрузки при выходе из строя одного из наиболее напряженных элементов в составе конструкции в случае экстремальных природных или техногенных воздействий. При этом

расчетные и деформативные характеристики полимерного композита должны быть приняты равными их нормативным значениям;

– обеспечить возможность замены конструктивных элементов пролетного строения в процессе эксплуатации в случае их повреждения;

– обеспечить возможность доступа для осмотра и обследования конструкций, с целью оценки их технического состояния, а также для выполнения профилактических и ремонтных работ;

– применять укрупненные полносборные блоки пролетных строений, собираемые на месте монтажа пролетного строения;

– обеспечить в местах соединений конструктивных элементов предотвращение касания резьбы болта поверхности стыкуемых элементов, в том числе путем назначения соответствующих размеров отверстий под болты или применения защитных муфт.

8.1.3 В рабочих чертежах конструкций пролетных строений пешеходных мостов рекомендуется указывать:

– значения физико-механических характеристик материалов, применяемых в конструкциях, если они выше значений, указанных в разделе 5;

– классы прочности и точности болтов;

– требования к защите поверхностей полимерных композитных конструкций.

8.1.4 В связи с облегченным собственным весом полимерных композитных пролетных строений пешеходных мостов узлы их опирания на опоры должны предотвращать отрыв пролетного строения от опор под действием сейсмических, ветровых и других, сдвигающих пролетное строение, нагрузок.

8.1.5 Конструкции пешеходных пролетных строений должны содержать элементы, обеспечивающие крепление перил, светопрозрачных

галерей и других обустройств, необходимых для обеспечения проектной эксплуатации пролетного строения.

8.1.6 На поверхностях конструктивных элементов и прохожей части (настилах по ГОСТ 33376) полимерных композитных пролетных строений пешеходных мостов следует предусматривать светостойкое и износостойкое защитные покрытия.

8.1.7 Пролетным строениям и конструктивным элементам в их составе, например, настилу, перильным ограждениям следует задавать строительный подъем, превышающий 1/1000 величины пролета, для компенсации вертикальных деформаций пролетного строения от постоянной нагрузки. Коэффициент надежности по нагрузке γ_f при расчете строительного подъема принимается равным 1.

8.1.8 При проектировании узлов соединений не допускаются типы соединений, приведенные на рисунке 8.1.

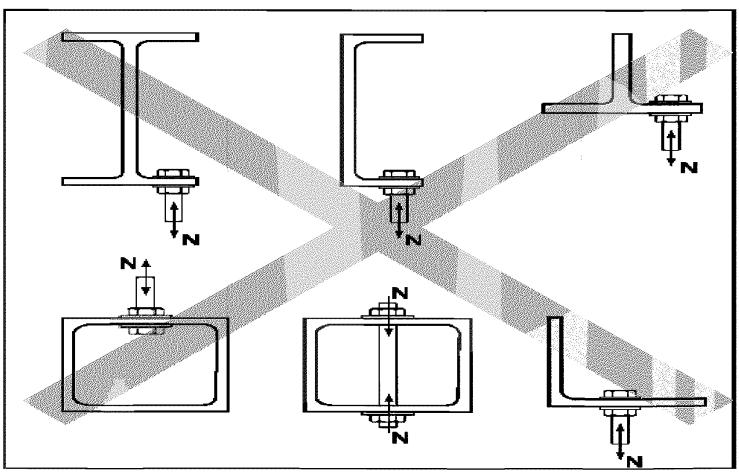
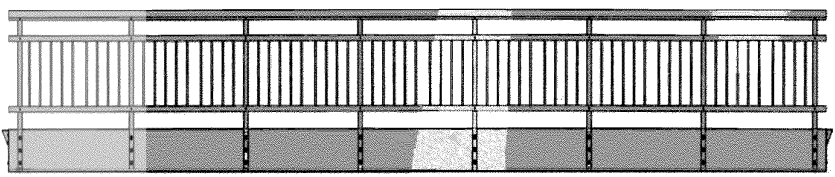


Рисунок 8.1 – **Недопустимые типы соединений конструктивных элементов**

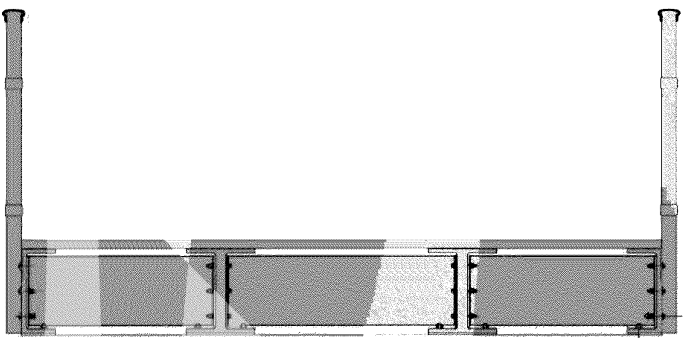
8.2 Сборные ферменные и балочные из пултрузионных профилей полимерно композитные пролетные строения

8.2.1 Сборные пролетные строения пешеходных мостов из пултрузионных профилей ПКМ рекомендуется проектировать из двух типов в виде балочной (рисунок 8.2) или ферменной конструкций (рисунки 8.3, 8.4), собираемых на болтовых соединениях или клееболтовых соединениях из пултрузонных профилей различной формы поперечного сечения по аналогии с конструкциями ферменных и балочных металлических пролетных строений мостов.

а



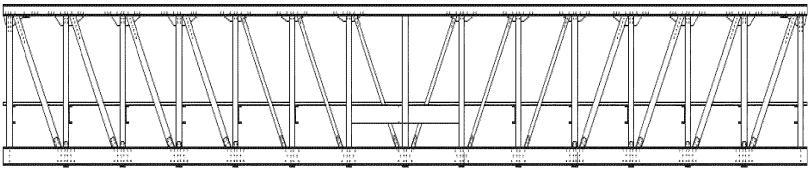
б



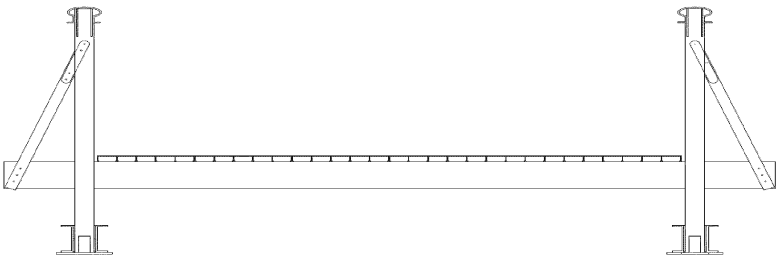
а – фасад; *б* – поперечный разрез

Рисунок 8.2 – **Схема балочного пролетного строения из пултрузионных профилей**

а



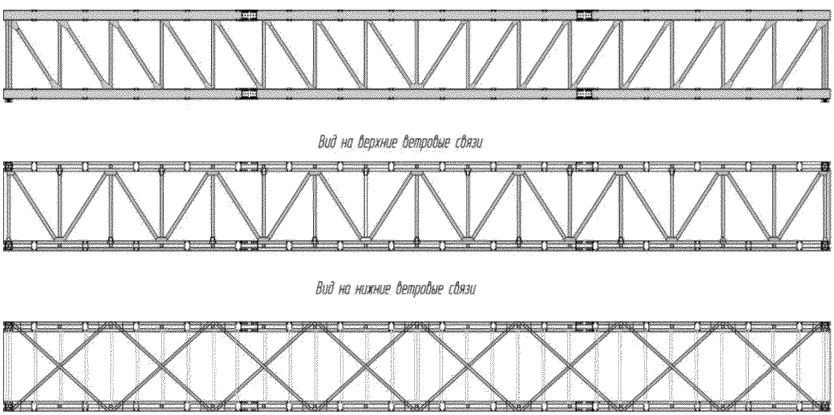
б



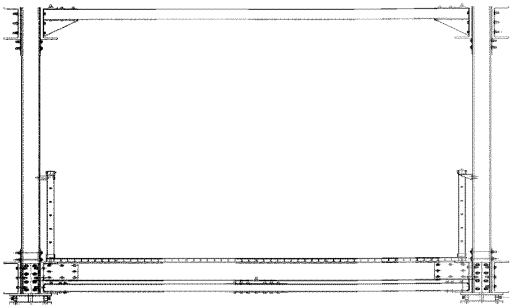
а – фасад, *б* – поперечное сечение

Рисунок 8.3 – **Ферменное пролетное строение из ПКМ без верхних поперечных связей**

а



б



а – фасад и виды на верхние и нижние ветровые связи,

б – поперечное сечение

***Рисунок 8.4* – Ферменное пролетное строение из ПКМ с закрытым верхним поясом**

8.2.2 Балочные конструкции пролетных строений из пултрузионных профилей рекомендуется рассчитывать и проектировать из размещенных в поперечном сечении нескольких продольных несущих элементов в виде двутавров или швеллеров, соединенными меду собой верхними и нижними поперечными связями (рисунок 8.2).

Рациональная длина пролета при применении таких конструкций не превышает 12 м.

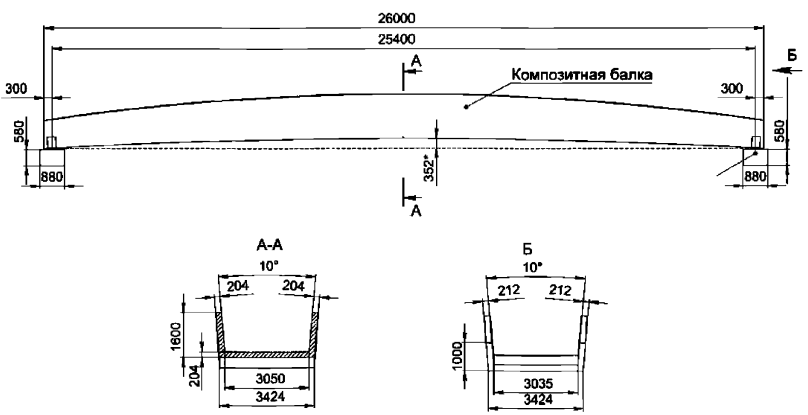
8.2.3 Ферменные пролетные строения пешеходных мостов следует рассчитывать и проектировать в виде ферм с прохожей частью по низу как без верхних поперечных связей с открытым верхним поясом (рисунок 8.3), так и с верхними поперечными связями закрытым верхним поясом (рисунок 8.4) при длине пролетов 12 и более м.

8.2.4 Для сборных ферменных полимерных композитных пролетных строений длиной пролетов 40 м и более рекомендуется применять конструкции ферм с верхними поперечными связями (закрытым верхним поясом) и несущими элементами из пултрузионных профилей с добавлением в состав ПКМ наполнителя углеродных волокон.

8.3 Полносборные балочные полимерно композитные пролетные строения из U–балок

8.3.1 Полносборные балочные конструкции пешеходных пролетных строений мостов могут быть выполнены в виде трехлойных сэндвич – элементов, общие правила конструирования и основные положения расчета которых изложены в [14], [18], [19]. Сэндвич – элементы состоят из двух несущих слоев ламината и размещенного в пространстве между слоями заполнителя. К заполнителю ([14], [18], [19]) относят жесткие несущие поперечные диафрагмы, ребра жесткости и пористый материал пониженной плотности, расположенный между несущими слоями.

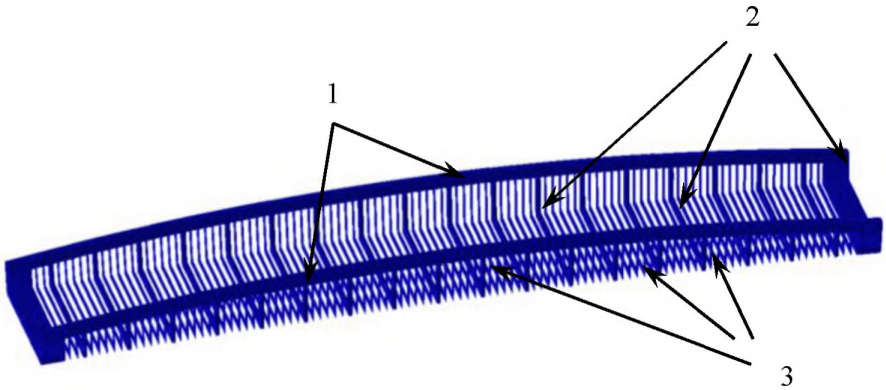
8.3.2 Полносборные балочные пролетные строения пешеходных мостов рекомендуется выполнять в виде U–образных трехслойных балок с двумя боковыми стенками и нижней плитой, внутренняя поверхность которой – прохожая часть [7]. Опирание балок на опоры может производится, например, через четыре стандартные резинометаллические опорные части по ГОСТ 32020, установленные под стенками балки по две на каждой опоре (рисунок 8.5).



*Размер без учета прогиба от собственного веса

Рисунок 8.5 **– Пример конструкции U–балки пролетного строения пешеходного моста**

8.3.3. U–балку следует выполнять в виде сэндвич - конструкции из двух тонкостенных несущих слоев – оболочек с установленными между ними продольными брусьями, поперечными диафрагмами и ребрами жесткости (рисунок 8.6). При этом продольные брусья размещаются в верхних частях стенок балки, а заполнение всего свободного пространства между несущими слоями должно быть выполнено из пористого заполнителя низкой плотности.



1 – продольные брусья; *2* – поперечные диафрагмы;
3 – ребра жесткости

Рисунок 8.6 **– Схема продольных и поперечных элементов жесткости полносборной U–балки**

8.3.4 Продольные брусья и поперечные диафрагмы U–балки следует выполнять из ультралам–бруса [23] или древесины хвойных пород с послойным формированием сечения бруса путем вклейки между слоями дерева стеклокомпозитных полотен.

8.3.5 Ребра жесткости следует выполнять из стеклокомпозита.

8.3.6 Рекомендуется следующий состав слоев U–балки послойно, начиная с поверхности:

- износостойкое, антискользящее покрытие (6–10 мм);

- несущий слой из многослойного стеклокомпозита со стороны прохожей части (7–15 мм);

- заполнитель (70–185 мм);

- наружный несущий слой из многослойного стеклокомпозита (7–15 мм);

- огнезащитный слой стеклокомпозита или иного материала (2–3 мм);

- декоративный, защищающий конструкцию от ультрафиолетового излучения слой – гелькоут (1–1,5 мм).

8.3.7 Рекомендуется применять следующие значения геометрических параметров несущих конструктивных элементов U–балки:

- толщина стенок и плиты – в диапазоне толщин от 100 до 200 мм;

- высота сечения продольного ультралам–бруса, установленного в верхнем поясе стенок от 150 до 400 мм;

- шаг диафрагм в пролете – от 900 до 1500 мм;

- ширина диафрагмы, установленной над опорой должна составлять от 1000 до 2000 мм;

- шаг ребер – от 100 до 200 мм.

8.3.8 Балочные пролетные строения из U–балок рекомендуется применять при длине пролетов свыше 9,0 м. Для пролетных строений длиной до 9,0 м рекомендуется применять балки замкнутого коробчатого сечения.

9 Расчетные схемы. Общие положения

9.1 Для полимерных композитных пролетных строений пешеходных мостов определяющим является второе предельное состояние второй группы, в соответствии с которым подбирают сечения конструктивных элементов из условия обеспечения деформативности конструктивного элемента, а затем, во вторую очередь, осуществляют проверку несущей способности элементов по предельному состоянию первой группы.

9.2 Расчеты конструктивных элементов пролетных строений из ПКМ следует выполнять в предположении, что упругие характеристики материала подчиняются линейному закону вплоть до достижения предельного состояния первой группы.

9.3 Расчет несущих конструкций из полимерных композитов выполняется с использованием следующего неравенства:

$$S \cdot \gamma_f \leq R, \qquad (9.1)$$

где S – напряжения (деформации) в конструкции от воздействия нормативных нагрузок, МПа;

γ_f – коэффициент надежности по нагрузке;

R – расчетное сопротивление (деформационная характеристика) полимерного композита, МПа.

9.4 В принятой расчетной схеме строительный подъем пролетного строения и деформации под нагрузкой допускается не учитывать.

9.5 Деформации, в том числе прогибы пролетных строений, должны быть рассчитаны с применением значений модуля упругости при максимальных температурах эксплуатации, а также с учетом изменения его значений в конце срока службы конструкции (ГОСТ Р 54928).

9.6 В расчетах по предельным состояниям балочных пролетных строений, изготовленных методами пропитки под вакуумом, следует принимать сочетания коэффициентов надежности по материалу γ_m и потерь свойств K_i в соответствии с таблицей 9.1:

Т а б л и ц а 9.1 – **Сочетание коэффициентов надежности по материалу γ_m и сохранения свойств K_i для различных видов расчетов**

Вид расчетов / применение к нормативным сопротивлениям или деформативным характеристикам	Коэффициенты, учитываемые в расчетах				
	γ_m	K_1	$K_{2,5}$	K_3	K_4
Предельное состояние первой группы					
Расчеты по прочности / к нормативным сопротивлениям материала	+	+	+	+	+
Расчеты на устойчивость / к модулям упругости и сдвига	+	+	+	+	+
Расчеты на выносливость/ к нормативным сопротивлениям материала	+	+	+	–	–
Предельное состояние второй группы (к модулям упругости и сдвига)					
Прогибы от постоянных нагрузок	+	+	+	+	+
Прогибы от временных подвижных нагрузок	+	+	+	–	+
Собственные частоты колебаний конструкции	+	+	+	–	+

9.7 При определении усилий и перемещений полимерных композитных пешеходных пролетных строений, в первую очередь сборных, площадь сечения конструктивных элементов в составе пролётного строения принимается брутто.

9.8 Строительный подъем, компенсирующий вертикальные деформации пролетного строения от постоянной нагрузки, коэффициент надежности по нагрузке, вертикальные упругие прогибы пролетных

строений, расчетные периоды собственных колебаний в пролетных строениях пешеходных мостов принимаются по СП 35.13330.

9.9 В расчетах следует использовать ортотропную модель свойств материалов.

9.10 Расчет напряженно–деформированного состояния многослойных полимерных композитов в составе U–балок (ламинаты стенок и плиты) проводится в двух ортогональных направлениях X и Y с определением нормальных напряжений σ_x, σ_y, а также сдвиговых напряжений в слоях ламината τ_{xy}.

9.11 Подбор сечений и назначение расчетных характеристик полимерного композита по полученым в результате расчетов усилиям в конструктивных элементах полносборной U–балки проводят в соответствии с неравенством (9.1).

9.12 В соответствии с принципом обеспечения надежности мостовых конструкций повышать несущую способность конструктивных элементов полносборной U–балки от изгибающего момента следует, в первую очередь, за счет увеличения геометрических параметров сечения – строительной высоты или толщины слоев ламината и, в последнюю очередь, за счет назначения более высокого уровня физико-механических характеристик полимерного композита.

9.13 При расчетах для проектирования полносборных U–балок следует назначать следующие параметры балок:

- толщина и армирование всех стеклокомпозитных ламинатов стенок и плиты принимаются одинаковыми;

- поперечное сечение должно быть симметричным относительно центральной вертикальной оси симметрии балки.

10 Расчет по прочности и устойчивости сечений композитных конструктивных элементов

10.1 Сборные ферменные пролетные строения

10.1.1 Расчет по прочности

В расчетных формулах размерности буквенных обозначений соответствуют размерностям и буквенным обозначениям, приведенным в СП 35.13330.

Расчет центрально растянутых (сжатых) элементов силой N следует выполнять по формуле

$$\frac{N}{A_n} \leq R_N^{t(c)} \tag{10.1}$$

где $R_N^{t(c)}$ – расчетное сопротивление растяжению (сжатию) по направлению действия силы N, МПа;

A_n – площадь сечения с учетом ослабления отверстиями, см^2.

Расчет напряжений изгибаемых, внецентренно растянутых и внецентренно сжатых элементов следует выполнять по формуле

$$\frac{|N|}{A_n} + \frac{|M_x|}{\xi_x W_{nx}} + \frac{|M_y|}{\xi_y W_{ny}} \leq R_N^b \tag{10.2}$$

где R_N^b – расчетное сопротивление изгибу по направлению действия силы N;

A_n, W_{nx}, W_{ny} – площадь и моменты сопротивления сечения нетто;

N, M_x, M_y – расчетные значения продольной силы («+» растяжение) и изгибающих моментов в горизонтальной и вертикальной плоскостях;

ξ_x, ξ_y – коэффициенты, учитывающие дополнительные моменты от продольной сжимающей силы, равны

$$\xi_{x(y)} = 1 + \frac{N}{N_{ex(y)}} \leq 1 \tag{10.3}$$

где $N_{ex(y)}$ – критическая сила при потере устойчивости в плоскостях x,y расчетного сечения. Допускается принимать $\xi_{x(y)}=1$ при $\lambda_{x(y)}\leq 60$, где $\lambda_{x(y)}$ определяется по формуле (10.5).

Значение критической силы допускается вычислять по формуле

$$N_{ex(y)} = \varphi_{x(y)} R_N^c A \tag{10.4}$$

где $\varphi_{x(y)}$ – коэффициент продольного изгиба определяется при $e_{ef}= 0$ по формулам (10.12), (10.13)

Значения гибкостей $\lambda_{x(y)}$ в различных плоскостях конструктивного элемента, которому принадлежит рассчитываемое сечение, с учетом требований СП 35.13330 вычисляются для сплошного сечения по формуле

$$\lambda_{x(y)} = \frac{l_{efx(y)}}{i_{x(y)}} \tag{10.5}$$

где $\ell_{efx(y)}$ – расчетная длина конструктивного элемента в плоскости изгиба с учетом фактических условий закрепления элемента в узлах и подвижности опорных закреплений, ее значения не могут быть меньше, установленных СП 35.13330;

$i_{x(y)}$ – радиус инерции сечения, вычисляемый для сечения брутто.

Значения касательных напряжений τ в сечении должны удовлетворять условию:

$$\tau \leq R^S \tag{10.6}$$

где R^S – расчетное сопротивление сдвигу.

Допускается вычислять значения τ по формуле

$$\tau = \frac{QS}{I_t} \tag{10.7}$$

Значения τ для пултрузионных профилей допускается определять с учетом данных таблицы 10.1 по формуле

$$\tau = \frac{Q}{kA_{сд}} \tag{10.8}$$

где I – момент инерции сечения брутто;

$A_{сд}$ – площадь сдвига;

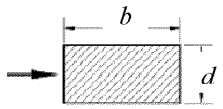
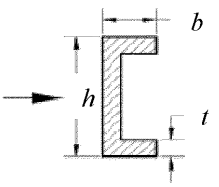
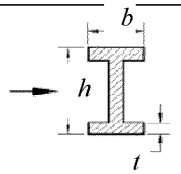
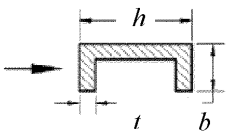
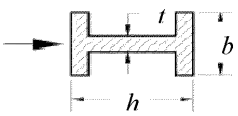
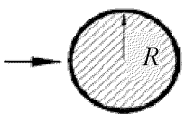
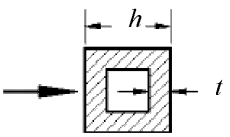
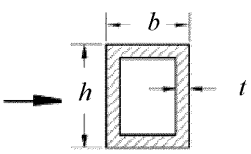
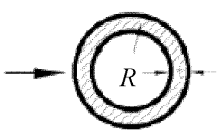
k – коэффициент сдвига;

S – статический момент отсеченной части сечения;

t – толщина стенки. При наличии ослаблений стенки отверстиями диаметра d, расположенных с шагом a, вместо значения t необходимо подставлять значение $t_{ef.}$

$$t_{ef} = t\frac{a-d}{a} \tag{10.9}$$

Т а б л и ц а 10.1 – **Сечения стеклопластиковых элементов**

Поперечное сечение*	Площадь	k	Поперечное сечение	Площадь	k
 Прямоугольник	$A_{сд} = ba$	2/3		$A_{сд} = 2tb$	0,85
	$A_{сд} = 2bt$	0,8		$A_{сд} = th$	0,9
	$A_{сд} = th$	0,9		$A_{сд} = \pi R^2$	8/9
 Труба квадратная	$A_{сд} = 2th$	0,9	Уголок	$A_{сд} = 2th$	0,9
 Труба прямоугольная	$A_{сд} = 2tb$	0,9	 Труба круглая	$A_{сд} = 2\pi Rt$	0,5
* Стрелка указывает направление усилия сдвига.					

Для стенок сечений должно выполняться условие, ограничивающее значение эквивалентного напряжения. (10.10)

$$\frac{\sigma_x^2}{S_1^2} - \frac{\sigma_x \sigma_y}{S_1 S_2} + \frac{\sigma_y^2}{S_2^2} + \frac{\tau^2}{S_{12}^2} \leq 1{,}1$$

где σ_x, σ_y – действующие напряжения в направлении осей x и y;

τ – действующие напряжения сдвига в плоскости элемента;

S_1, S_2 – предельные напряжения по направлению главных осей жесткости материала;

S_{12} – предельное сдвиговое напряжение слоя.

В зависимости от знака напряжений (растяжение «+», сжатие «–») в конструктивном элементе напряжения S_1, S_2, S_{12} определяются по зависимостям:

$$S_1 = \begin{cases} R_1^t & \sigma_x \geq 0 \\ R_1^t & \sigma_x < 0 \end{cases}, \quad S_2 = \begin{cases} R_2^t & \sigma_y \geq 0 \\ R_2^t & \sigma_y < 0 \end{cases}, \quad S_{12} = R^s \qquad (10.11)$$

где $R_1{}^t$,$R_1{}^c$, $R_2{}^t$, $R_2{}^c$ – расчетные сопротивления растяжению t и сжатию c по направлению главных осей 1, 2;

R^S – расчетное сопротивление сдвигу.

10.1.2 Расчет по устойчивости

Расчеты по устойчивости композитных конструктивных элементов сборных ферменных пролетных строений следует проводить в соответствии с требованиями настоящих рекомендаций, а также с учетом СП 35.13330.

Расчет при плоской форме потери устойчивости композитных пултрузионных профилей замкнутого или открытого сечения, подверженных центральному сжатию, сжатию с изгибом и внецентренному сжатию при изгибе в плоскости наибольшей гибкости рекомендуется выполнять по формуле

$$\frac{N}{A} \leq \varphi R_N^C \qquad (10.12)$$

где R_N^C – расчетное сопротивление композита сжатию по направлению действия силы N;

A – площадь сечения конструктивного элемента брутто;

φ – коэффициент продольного изгиба, зависящий от гибкости λ и эксцентриситета приложения нагрузки, определяемый экспериментально.

Значение коэффициента φ по СП 35.13330.2011 (таблица Ф3) в зависимости от значений гибкости λ и приведенного относительного эксцентриситета e_{ef} допускается определять:

$$e_{ef}:= \eta e_{rel} \tag{10.13}$$

где $e_{rel}=e/\rho$ – приведенный относительный эксцентриситет;

$\rho= W/A$ – ядровое расстояние по направлению эксцентриситета;

$e = M/N$ – эксцентриситет в плоскости изгиба при сжатии с изгибом;

W – момент сопротивления;

A – площадь сечения брутто;

N, M – расчетные значения продольной силы и изгибающего момента;

η – коэффициент влияния формы сечения, определяемый по СП 35.13330 (приложение Ф) применительно к стали 10ХСНД.

Расчет по устойчивости полок и стенок композитных профилей двутаврового, квадратного и прямоугольного сечений допускается, проводить в соответствии с формулами (8.55) – (8.57) СП 35.13330.2011 как для стальных элементов, с той лишь разницей, что вместо формул таблицы 8.23 СП 35.13330.2011 (пункт 8.45) значения приведенных критических напряжений σ^{xp} допускается определять по формуле

$$\sigma^{кр} = \frac{\pi^2}{12\gamma_E}(\frac{2t}{b})^2[\sqrt{q}\left(2\sqrt{E_1E_2}\right) + p(E_2\nu_{12} + 2G] \tag{10.14}$$

для двутаврового сечения

$$p = 0{,}3 + \frac{0{,}004}{\varsigma - 0{,}5}; q = 0{,}025 + \frac{0{,}065}{\varsigma + 0{,}4};\ \varsigma = \frac{2b_{cm}}{b} \tag{10.15}$$

для квадратных и прямоугольных труб

$$p = 2{,}0 + \frac{0{,}002}{\varsigma - 1{,}3}; q = 1{,}0 + \frac{0{,}08}{\varsigma + 0{,}2};\ \varsigma = \frac{b_{cm}}{b} \tag{10.16}$$

где ν_{12} – коэффициент Пуассона;

E_1,E_2 – модули упругости по взаимном перпендикулярным направлениями;

G – модуль сдвига;

t, b – толщина и ширина сжатой зоны конструктивного элемента;

$b_{ст}$ – высота стенки конструктивного элемента;

y_E – коэффициент надежности для модуля упругости.

10.2 Полносборные балочные пролетные строения из U–балок

10.2.1 Расчет по прочности U–балок

10.2.1.1 Расчет по прочности конструктивных элементов полносборных балочных пролетных строений из U–балок производится с определением нормальных напряжений σ_x (направление X – вдоль пролета), возникающих в ламинате стенок и плиты балки (рисунок10.1) от изгибающего момента M по формулам

$$\sigma^{в}_{x} = M \cdot (H\text{-}Z_{цт})/J\,, \qquad (10.17)$$

$$\sigma^{н}_{x} = M \cdot Z_{цт}/J. \qquad (10.18)$$

где $\sigma^{в}_{x}$ – нормальные напряжения в верхней (индекс «в») и нижней (индекс «н») фибрах сечения балки, МПа;

M – изгибающий момент от расчётных нагрузок, кН·м;

$Z_{цт}$ – координата центра тяжести сечения балки, м;

J – момент инерции сечения U–балки определяемый по формуле (10.21), м^4.

Нормальные напряжения $\sigma_{z|y}$, возникающие ламинате стенок и плиты в поперечном направлении Y и Z (рисунок 10.1) рассчитываются с использованием метода конечных элементов.

Расчет нормальных напряжений в направлении X в конструктивных элементах верхнего силового пояса (ультралам–брусе, стеклопластиковых прослойках между слоями ультралам–бруса) от изгибающего момента производится по формуле

$$\sigma^{в\ д/с}_{x} = k^{д/с} \times M \times z^{д/с}/J, \qquad (10.19)$$

где $\sigma^{в\ д/с}_{x}$ – нормальные напряжения $\sigma_x^{вд}$ в ультралам–брусе, $\sigma_x^{вс}$ в прослойке из стеклопластика в верхнем поясе балки, МПа;

$k^{п/с}$ – коэффициент учитывающий разницу в модулях упругости в ламинате стенок и в элементах верхнего пояса из ультралам–бруса или стеклокомпозита, рассчитывается по формуле

$$k^{э/с} = E_{хэ/с} / E_x, \qquad (10.20)$$

$z^{п/с}$ – координата (в системе координат $Y_{цт}Z_{цт}$ рисунок 10.1) элемента верхнего пояса, в котором определяется напряжение.

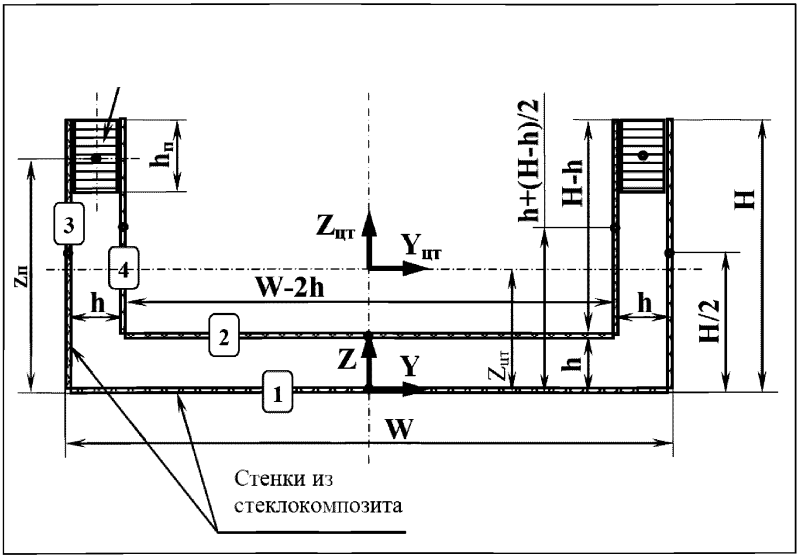


Рисунок 10.1 – **Схема поперечного сечения U–балки пролетного строения. Силовой пояс из ультралам–бруса**

10.2.1.2 Момент инерции сечения J м^4 для U-балки рекомендуется определять по формуле

$$J = F_1 a_1^2 + F_2 a_2^2 + 2F_3 a_3^2 + 2F_4 a_4^2 + 2F_п^* a_п^2 + \frac{tH^3}{6} + \frac{t(H-h)^3}{6} + 2J_п^*, \qquad (10.21)$$

где $F_1 \cdot a_1$, $F_2 \cdot a_1$ ... $F_n \cdot a_n$ – статический момент элементов сечения относительно центра тяжести всего сечения U–балки, м^3;

a_1, a_2 ... a_n – растояние от центра тяжести элемента сечения до центра тяжести всего сечения U–балки, м;

$J_п$ - приведенный момент инерции силового пояса из ультралам–бруса, рассчитанный относительно центра тяжести ультралам–бруса, м^4, по формуле

$$J_{\text{п}} = \frac{E_{xд}J_{\text{д}} + E_{xc}J_{\text{с}}}{E_x}, \quad (10.22)$$

где $J_{\text{д}}$ и $J_{\text{с}}$ – моменты инерции слоев дерева и прослоек стеклокомпозита относительно центра силового пояса соответственно, м^4.

10.2.1.3 Положение центра тяжести сечения, м, на вертикальной оси симметрии балки следует определять по формуле

$$Z_{\text{цт}} = \frac{t(2H^2 - 3h^2 + Wh) + 2F_{\text{п}}\ z_{\text{п}}}{4t(H + 0{,}5W - h) + 2F_{\text{п}}^*}, \quad (10.23)$$

где $F_п$ – приведенная площадь верхнего силового пояса из ультралам – бруса (м^2), определяемая по формуле

$$F_{\text{п}} = \frac{E_{xд}F_{\text{д}} + E_{\text{хс}}F_{\text{с}}}{E_x}, \text{м}^2 \quad (10.24)$$

где $E_{xд}$ – модуль упругости ультралам–бруса в направлении вдоль пролета, Па;

$E_{xс}$ – модуль упругости прослойки стеклокомпозита вдоль пролета, Па;

E_x – модуль упругости ламината стенок и плиты U–балки вдоль пролета, Па;

$F_{\text{д}}$ – расчётная площадь сечения ультралам–бруса, м^2;

$F_{\text{с}}$ – суммарная площадь сечения прослоек стеклокомпозита в ультралам–брусе, м^2.

10.2.1.4 Геометрические характеристики сечения и расчётные сопротивления ПКМ конструктивных элементов в составе U–балки назначаются по результатам расчётов балки по формулам (10.17) – (10.24) и с учетом пункта 9.13.

10.2.1.5 Расчет на поперечную силу (рисунок 10.1) с определением касательных напряжений сдвига слоев ПКМ в конструктивных элементах U-балок проводится:

- для ультралам–бруса ($\tau_д$, Па) и ламинатов стенок ($\tau_с$, Па) в зоне опирания балок на опоры по формулам

$$\tau_д = \frac{3Q_{оп}}{2Hh}, \quad (10.25)$$

$$\tau_с = \frac{3Q_{оп}}{2t(2H - h)} \quad (10.26)$$

где $Q_{оп}$ – опорная реакция в одной точке опирания, H;

H – высота балки (рисунок 6.2), м.

- для ребер жесткости от сосредоточенной нагрузки (СП 35.13330.2011, пункт 6.21), установленной над указанными ребрами по формуле

$$\tau = Q / t \cdot h, \quad (10.27)$$

где τ – касательное напряжение сдвига в ребре жесткости плиты балки под сосредоточенной нагрузкой, Па;

t – толщина ребра, м.;

h – высота ребра, м;

Q – сосредоточенная нагрузка, кН.

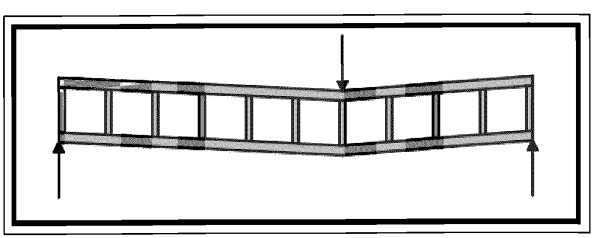
- для пористого заполнителя от сосредоточенной нагрузки (СП 35.13330.2011, пункт 6.21), установленной между ребрами жесткости по формуле

$$\sigma_з = Q / A \quad (10.28)$$

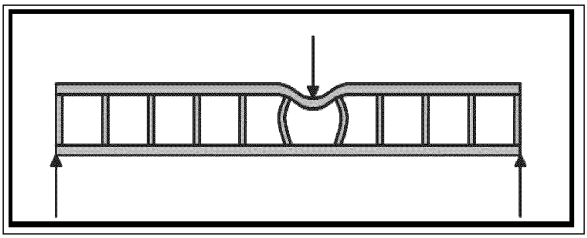
где $\sigma_з$ – напряжение сжатия в пористом заполнителе плиты прохожей части без учета влияния ламинатов несущих слоев плиты, Па;

A – площадь распределения сосредоточенной нагрузки Q по пункту 6.21, подп. 3а СП 35.13330.2011, м^2.

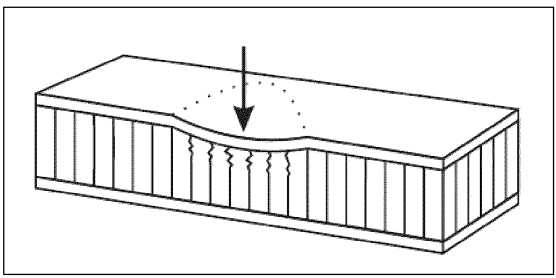
а



б



в



а – нагрузка над ребром жесткости;
б, в – нагрузка между ребрами жесткости

Рисунок 10.2 **– Схемы разрушение заполнителя от действия локальной установленной нагрузки**

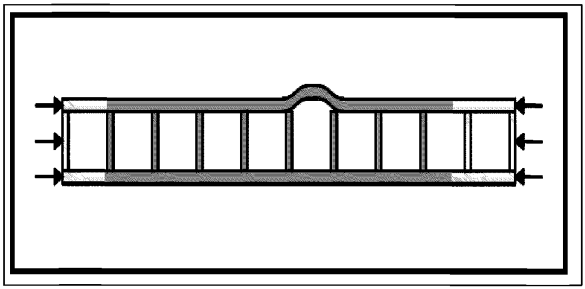
10.2.1.6 Полученные по формулам (10.25) – (10.27) расчетные значения напряжений сдвига следует сравнивать с расчетными значениями ПКМ для многослойного композита ламинатов, ребер и ультралам–бруса с использованием неравенства 9.1.

10.2.1.7 Пример расчета прочности U–балки пролетного строения приведен в приложении Д.

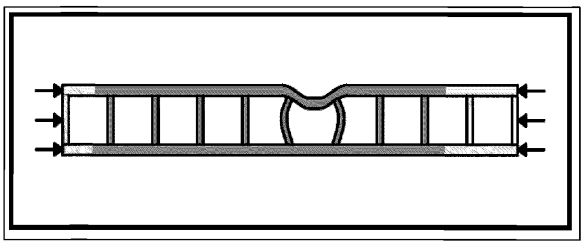
10.2.2 Расчет по устойчивости полносборных U–балок

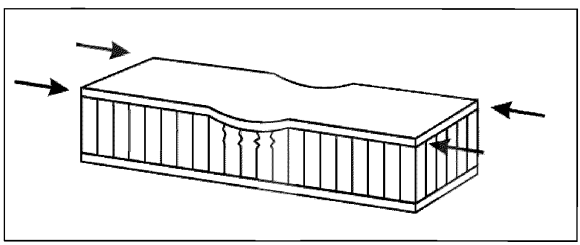
10.2.2.1 На начальном этапе проектирования рекомендуется проверять возможность возникновения потери устойчивости участков ламината, расположенных между поперечными ребрами балок, при действии в их плоскости сжимающих усилий (рисунок 10.3).

а



б





а – выпучивание несущего слоя, *б* – вдавливание несущего слоя

Рисунок 10.3 – **Локальная потеря устойчивости несущего слоя**

Расчет критической силы, при действии сжимающих усилий в несущем слое (обшивке) между ребрами рекомендуется проводить по формуле

$$N_{\text{кр}} = \frac{\pi^2 t^2}{48 h_p^2} B_{11} \left(1 - \frac{B_{12}^2}{B_{11} B_{22}}\right), \qquad (10.29)$$

где $N_{\text{кр}}$ – критическое усилие потери устойчивости, Н/м;

t – толщина обшивки, м;

$h_{\text{р}}$ – шаг поперечных ребер, м;

B_{11}, B_{22}, B_{12} – коэффициенты жесткости несущего слоя, рассчитываемые по формулам (5.10) – (5.12), Н/м.

10.2.2.2 В расчетах по устойчивости несущих слоев ламината между ребрами на действие сжимающих напряжений или сдвигающих усилий рекомендуется применять формулы [19].

10.2.2.3 Критическое усилие потери устойчивости несущего слоя $N_{кр}$, рассчитанное по формуле (10.29) следует сравнивать с действующим в несущем слое усилием по неравенству (9.1).

10.2.2.4 На последующих этапах проектирования, включая рабочую стадию, расчеты по устойчивости конструктивных элементов U–балок пролетных строений рекомендуется проводить методом конечных элементов (пункты 10.2.2.5 – 10.2.2.17).

10.2.2.5 При расчетах полносборных балочных пролетных строений методом конечных элементов рекомендуется применять программный комплекс, соответствующий следующим требованиям:

- программа позволяет рассчитывать трехмерные модели;

- программа имеет интерфейс (или отдельную программу, программы) позволяющий подготавливать трехмерные расчетные модели конструкции и затем, после расчета, проводить анализ возникших напряжений, деформаций, прогибов, визуализировать усилия и т.п.;

- программа имеет полное описание библиотеки конечных элементов, моделей заложенных в конечные элементы, алгоритмы расчета и т.п.;

- программа не имеет ограничений по числу степеней свободы для расчетной модели или ограничение степеней свободы установлено на достаточно высоком уровне, составляющем не менее 5 млн. степеней свободы);

- программа позволяет моделировать и рассчитывать ортотропные двух– и трехмерные материалы;

- в библиотеке конечных элементов программы есть четырехузловые элементы изгибаемых пластин и оболочек с линейной аппроксимацией напряжений вдоль сторон элемента, такие элементы могут работать с

двухмерным ортотропным материалом, для них выполняется «patch-тест» с целью проверки качества работы конечных элементов, который состоит в следующем. При расчете пластины, разбитой на конечные элементы неправильной формы (например, трапеции) и с заданным однородным полем деформаций в результате расчетов должны быть получены постоянные деформации в каждом конечном элементе;

- в библиотеке конечных элементов программы есть восьмиузловые объемные с линейной аппроксимацией напряжений вдоль сторон элемента, такие элементы могут работать с трехмерным ортотропным материалом, для них выполняется patch-тест;

- программа позволяет выполнять следующие виды расчетов: линейная статика, линейная устойчивость (баклинг); расчет собственных частот колебаний.

10.2.2.6 Для применяемой компьютерной программы должен быть сформирован или быть в наличии пакет задач, с теоретическим решением или достоверными экспериментальными данными, показывающие, что результаты, получаемые при расчетах конструкций из ПКМ с использованием этой программы верны.

10.2.2.7 При численном моделировании многослойных элементов балочных конструкций из ПКМ рекомендуется следующий подход.

Многослойный композит моделируется как однородный по толщине ортотропный материал со значениями нормативных сопротивлений и

деформационных характеристик, полученных экспериментально при испытаниях такого же многослойного композита.

Либо нормативные сопротивления и деформационные характеристики принимаются по таблице 5.6 или рассчитываются по формулам (5.5) – (5.15), исходя из параметров отдельных слоев композита. Анализ напряженно–деформированного состояния конструктивного элемента из многослойного ламината проводится для ламината в целом с проверкой выполнения неравенства (9.1).

10.2.2.8 При построении конечно-элементной модели полносборных балок пролетного строения из ПКМ рекомендуется:

- несущие слои (обшивки) трехслойных конструкций из многослойного ПКМ, поперечные стенки (ребра) заполнителя моделировать четырех-узловыми элементами изгибаемых пластин и оболочек с заданием свойств соответствующего ортотропного материала;

- конструктивные элементы выполненные из ультралам–бруса или хвойной древесины моделировать объемными восьмиузловыми элементами с заданием свойств ортотропного материала.

10.2.2.9 При построении сетки конечных элементов рекомендуется применять регулярные сетки. При этом форма двухмерных конечных элементов должна быть близкой к прямоугольной, с отношением длинной стороны к короткой не более рекомендуемого значения, указанного в описании к программе. Трехмерные элементы должны иметь форму близкую к параллелепипеду, с отношением длинной стороны к короткой не более рекомендуемого значения указанного в описании к программе. Расчетная модель U–балки пролетного строения из ПКМ показана на рисунке 10.4.

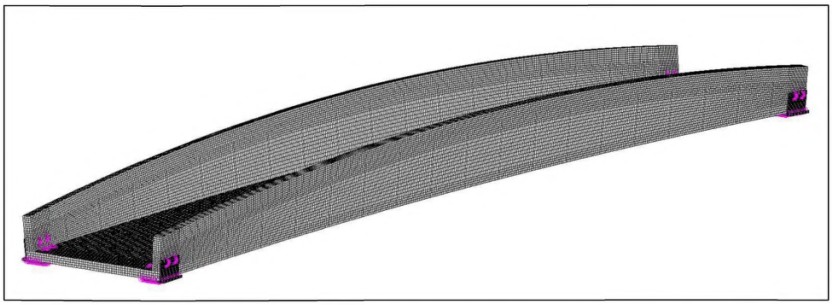


Рисунок 10.4 – **Расчетная конечно–элементная модель U–балки пролетного строения пешеходного моста из ПКМ**

10.2.2.10 Размеры и число конечных элементов выбираются так, чтобы в моделях обшивок (несущих слоев) между поперечными стенками (поперечными ребрами) было не менее четырех конечных элементов в

направлении вдоль пролета. В поперечных стенках заполнителя по высоте также было не менее четырех конечных элемента.

10.2.2.11 Рекомендуется выполнять закрепление конечно-элементной расчетной модели балочного пролетного моста из ПКМ по схеме, показанной на рисунке 10.5 и в таблице 10.2.

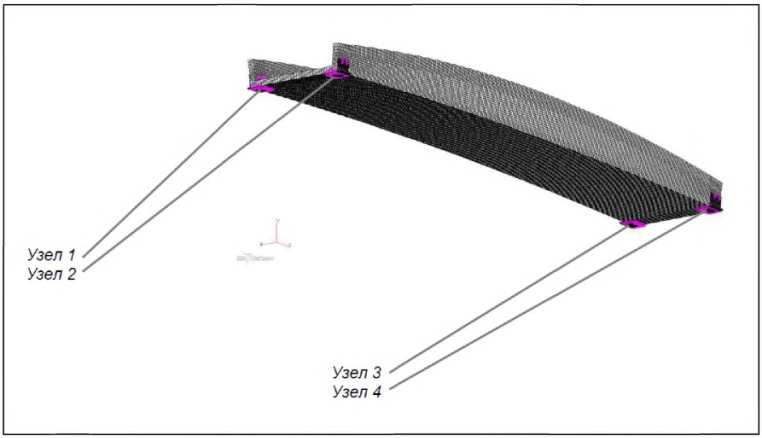


Рисунок 10.5 – **Схема закрепления U–балки пролетного строения из ПКМ**

Т а б л и ц а 10.2 – **Закрепление узлов опор U–балки пролетного строения**

Номер узла (рисунок 10.5)	Закрепленные поступательные степени свободы в узлах		
	вдоль пролета	вертикально	поперек пролета
1	–	+	–
2	+	+	+
3	–	+	–
4	+	+	–

10.2.2.12 После построения конечно-элементной модели балочного пролетного строения из ПКМ рекомендуется выполнять следующие проверки:

- связности соседних сопрягаемых конечных элементов;
- отсутствия дублирующихся конечных элементов;

- отсутствия узлов, не связанных ни с одним конечным элементом;

- правильной ориентации материалов в конечных элементах;

- наличия шести нулевых собственных частот колебаний соответствующих смещениям не закрепленной модели, как твердого тела;

- модель пролета, нагруженная равномерной нагрузкой должна иметь деформированный вид качественно соответствующий деформациям реального пролетного строения, без скачков перемещений в отдельных узлах, кривая графика перемещений узлов лежащих на одной линии вдоль пролета должна быть плавной без скачков и разрывов;

- масса расчетной модели должна отличаться от массы реального пролета не более чем на 5 %;

- сумма нагрузок в вертикальном направлении в закрепленных узлах опор должна соответствовать приложенной внешней нагрузке;

- соотношение максимального и минимального элементов матрицы жесткости, приведенных к диагональной форме должно быть не больше 10^8.

10.2.2.13 При расчете прочности полносборной U–балки из ПКМ методом конечных элементов, для всех элементов балки из многослойного композита необходимо проводить сравнение напряжений, определенных в результате расчета с допустимыми в соответствии с неравенством (9.1). Анализ напряжений проводится в двух ортогональных направлениях X и Y, соответствующих осям ортотропии материала. Сравниваются компоненты напряжений: нормальные напряжения σ_x, σ_y (отдельно для сжатия и для растяжения), сдвиговые напряжения в слоях ламината τ_{xy}, τ_{xz}, τ_{yz}.

10.2.2.14 Расчеты локальной (10.2.2.15) и глобальной (10.2.2.16) устойчивостей конструкции U–балки из ПКМ рекомендуется проводить на общей конечно-элементной модели конструкции, построение которой описано в 10.2.2.5 – 10.2.2.12. Рекомендуется рассчитывать не менее 10 первых форм потери устойчивости и соответствующие им коэффициенты нагрузок. Проводя анализ форм потери устойчивости, рекомендуется удостоверяться, что среди первых форм потери устойчивости отсутствуют

локальные формы потери устойчивости многослойных стенок из ПКМ между ребрами жесткости и самих ребер жесткости.

10.2.2.15 Локальная или местная потеря устойчивости предполагает, что устойчивость теряет один или несколько элементов конструкции, расположенных в одной локальной области конструкции. На рисунке 10.6 показана локальная потеря устойчивости стенок заполнителя U–балки – внутренних поперечных ребер конструкции вблизи середины пролета. Локальная форма потери устойчивости, показанная на рисунке 10.6. рассчитана по общей расчетной конечно-элементной модели пролетного строения.

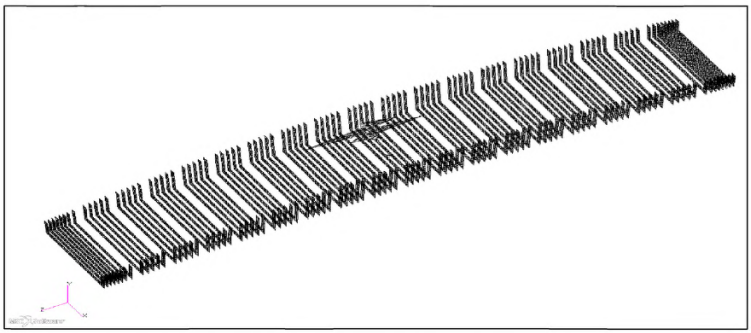


Рисунок 10.6 **– Локальная форма потери устойчивости стенок и внутренних поперечных ребер U–балки**

10.2.2.16 На рисунке 10.7 показана глобальная форма потери устойчивости всей конструкций U–балки пролетного строения из ПКМ, рассчитанная с использованием конечно-элементной модели конструкции.

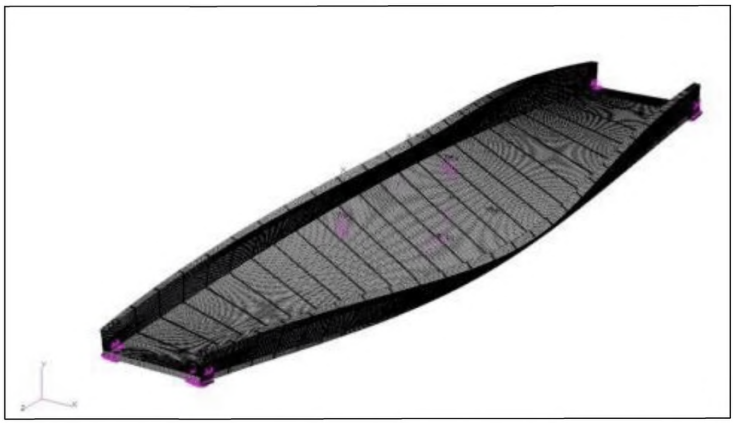


Рисунок 10.7 – **Глобальная форма потери устойчивости U–балки из ПКМ**

10.2.2.17 Для подтверждения требования п. 5.48 СП 35.13330.2011 (запрещенные диапазоны собственных частот колебаний пролетов мостов), необходимо проводить расчет собственных частот и форм колебаний пролетного строения. Рекомендуется проводить расчеты не менее 10 первых собственных частот и соответствующих им форм колебаний.

При анализе необходимо выявлять формы колебаний в горизонтальной и вертикальной плоскостях и сравнивать их частоты с запрещенным диапазоном.

11 Расчет соединений

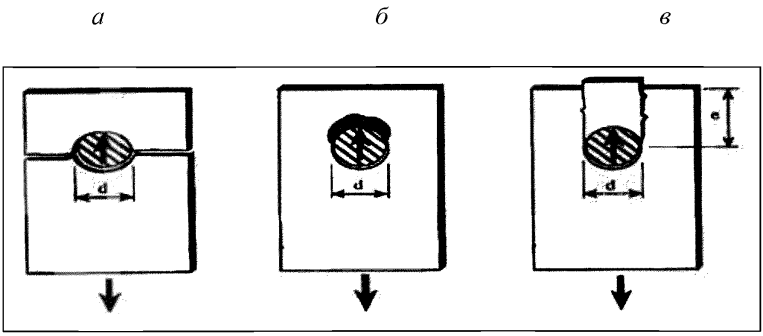
11.1 В расчетной схеме решетчатых ферм сборного ферменного пролетного строения соединения конструктивных элементов следует принимать в виде шарниров.

11.2 В плоскости ферм отношение высоты сечения к длине стыкуемых конструктивных элементов должно быть не более соотношения 1:12.

11.3 При расчете соединений допускается не учитывать силы трения, действующие по контактным плоскостям стыкуемых элементов, за исключением случаев, когда силы трения создают отрицательный эффект, увеличивающий нагрузку на соединение.

11.4 Не допускается передача усилий стыкуемых конструктивных элементов через их торцы.

11.5 Проверка по прочности болтовых соединений элементов из пултрузионных профилей, проводится как по болтам, так и по стеклопластику стыкуемых конструктивных элементов в зависимости от трёх схем разрушения (рисунок 11.1).



а – разрыв элемента в зоне отверстия; *б* – смятие контактной с болтом поверхности; *в* – сдвиг по плоскости

d – диаметр отверстия, *е* – шаг болтов в продольном направлении или расстояние до торца элемента

Рисунок 11.1 – **Схемы разрушения болтовых соединений**

11.6 При проектировании и экспериментальной проверке по прочности узлов соединений следует избегать схемы разрушения, представленной на рисунке 11.1,а, для этого параметры болтовых соединений должны соответствовать указанным в таблице 11.1.

Т а б л и ц а 11.1 – **Рекомендуемые параметры болтовых соединений**

Наименование параметра	Нагружение вдоль оси профиля (базовое направление)	
Расстояние до продольной кромки профиля от центра отверстия или шаг болтов в поперечном направлении	минимальное допустимое	рекомендуемое
Минимальное расстояние от центра отверстия до продольной кромки профиля или поперечный шаг болтов в поперечном направлении	3d	4d
Удвоенное расстояние от центра отверстия до торца элемента e или шаг болтов в продольном	5d	6,5d
Нагружение поперек оси профиля		
Минимальное расстояние от центра отверстия до продольной кромки профиля или поперечный шаг болтов в поперечном направлении	4d	4d
Удвоенное расстояние от центра болта до торца элемента e или шаг болтов в продольном направлении	4d	4d

11.7 В соединениях расчет по прочности конструктивных элементов, ослабленных отверстиями, выполняется с учетом ослабления сечения отверстием диаметром d' по формуле

$$d' = max\{d_{от}; d + 2\}, \qquad (11.1)$$

где $d_{от}$ – диаметр отверстия, мм;

d – диаметр болта, мм.

12 Расчет узлов соединений

12.1 В узлах соединений пултрузионных профилей расчетное усилие N_b, передаваемое на профиль одним болтом, следует определять как наименьшее из двух значений, вычисленных по формулам

- на смятие: $$N_b = m_b m_{b1} dt R^c_{1(2)}, \quad (12.1)$$

- на сдвиг: $$N_b = m_b m_{b1} dt R^{sb}_{1(2)} \cdot 2\left(\frac{e}{d} - \frac{1}{2}\right), \quad (12.2)$$

где d – диаметр болта;

t – толщина элемента из пултрузионного профиля;

e – шаг болтов в продольном направлении или расстояние до свободной грани элемента, при этом значение $\boldsymbol{e/d}$ должно быть не меньше 2,5;

m_{b1} – коэффициент условий работы, принимаемый в соответствии с таблицей 8.15 СП 35.13330.2011 равным 0,9;

m_b – коэффициент условий работы, принимаемый в соответствии с таблицей 8.36 СП 35.13330.2011.

12.2 Рекомендуется усилие, действующие в многоболтовом узловом соединении, расчитывается как распределённое по всем болтам

– от осевой нагрузки пропорционально их жесткости

$$P_{ij} = \frac{P_j}{N}, \quad (12.3)$$

где j – индекс направления x и y, $i = 1 \ldots N$, N – число болтов,

P_j – суммарная нагрузка в $\boldsymbol{j}$–ом направлении;

– от момента в плоскости по формулам

$$P_{xi} = \gamma k\varphi cos a_i;\ P_{yi} = k\varphi cos a_i, \quad (12.4)$$

где $k\varphi$ – константа;

γ – отношение модуля упругости материала профиля в продольном (x) и поперечном (y) направлениях;

α_i – угол между осью Y и радиусом-вектором i–го болта относительно центра тяжести соединения.

Произведение $k\varphi$, определяемое из уравнения равновесия моментов

$$k\varphi = \frac{M}{\sum_{i=1}^{N} r_i^2(\gamma cos^2 a_i + sin^2 a_i)}, \qquad (12.5)$$

где M – суммарный момент относительно центра тяжести соединения;

r_i – радиус–вектор i-го болта относительно центра тяжести соединения.

12.3 При действии на болт нагрузок по двум направлениям следует проверить соотношение:

$$\sqrt{\left(\frac{P_x}{N_{bx}}\right)^2 + \left(\frac{P_y}{N_{by}}\right)^2} \le 1 \quad \text{или} \quad \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{P_x}{N_{bx}}\right)^2 + \left(\frac{P_y}{N_{by}}\right)^2}} \ge 1, \qquad (12.6)$$

где P_x и P_y – усилия действующие на болт согласно формулам (12.3) и (12.4) в направлениях параллельном и перпендикулярном продольной оси профиля соответственно;

N_{bx} и N_{by} – расчетные усилия на болт согласно формулам (12.1) и (12.2) в направлениях параллельном и перпендикулярном к продольной оси профиля соответственно.

12.4 В расчетах по прочности на смятие стыкуемых конструктивных элементов из ПКМ, при наличии резьбовой части болта внутри отверстия конструктивного элемента толщина такого элемента, расположенная против резьбы, не учитывается.

12.5 Конструкция балочного пролетного строения из U–балок не содержит узлов сединений конструктивных элементов. подлежащих расчету. При необходимости расчета стыков монолитных балок с другими

конструкциями рекомендуется применять указания раздела 8 [14], а также подразделы 8.3 и 8.4 [20].

13 Расчет прогибов

13.1 Сборные ферменные и балочные пролетные строения из пултрузионных профилей

13.1.1 Расчет по прогибам сборных пролетных строений из пултрузионных профилей допускается выполнять с использованием формул:

- определение относительного прогиба для балочной конструкции

$$\frac{\delta}{L} = \frac{5qBL^3}{384EJ} + \frac{qBL}{2GF} \tag{13.1}$$

- определение относительного прогиба для ферменной конструкции с открытым верхним поясом

$$\frac{\delta}{L} = \frac{5qBL^3}{384EJ} = \frac{5qBL^3}{192EFH^2} \tag{13.2}$$

- определение относительного прогиба для ферменной конструкции с закрытым верхним поясом

$$\frac{\delta}{L} = \frac{5qBL^3 ln2}{32EJ_0} = \frac{qWL^3 ln2}{16EFH_0^2} \tag{13.3}$$

где L – длина пролёта, мм;

B – ширина моста, мм;

E – модуль упругости материала профилей, МПа;

G– модуль сдвига материала профилей, МПа;

q – вертикальная равномерно распределенная нагрузка, кг/мм;

η_f – коэффициентом надежности;

J – момент инерции, мм^4;

W – момент сопротивления, мм^3;

M – изгибающий момент, кг·мм;

H_0 – расстояние между поясами моста в среднем сечении моста, мм;

$J_0 = \frac{FH_0^2}{2}$ – момент инерции в среднем сечении моста, мм^4;

l – шаг между стойками (поперечными балками), мм;

13.1.2 Расчет прогибов ферменных пролетных строений длиной более 20 м рекомендуется выполнять только с помощью методов конечно-элементного моделирования.

13.2 Полносборные балочные пролетные строения из U–балок

13.2.1 Для расчета максимального прогиба Δ, м в середине пролета U–балки пролетного строения пешеходного моста от распределенной нагрузки рекомендуется применять формулу, учитывающую деформации сдвига слоев ламината

$$\Delta = \frac{5qL^4}{384E_xJ} + \frac{qL^2}{8GS} \qquad (13.4)$$

где q – расчетная распределенная нагрузка на единицу длины U–балки, Н/м;

L – расчетная длина пролета балки, м;

E_x – модуль упругости ПКМ в продольном направлении, Па;

J – момент инерции сечения балки, м^4;

G – модуль сдвига ПКМ балки, Па;

S – площадь сечения балки, работающая на сдвиг, рекомендуется рассчитывать по формуле

$$S = 2t(2H - h) + \frac{hh_{\text{п}}G_{\text{д}}}{G}, \qquad (13.5)$$

где H, h, $h_п$ – размеры сечения U–балки (рисунок 10.1), м;

$G_д$ – модуль сдвига ультралам–бруса или хвойной древесины, Па.

13.2.2 Пример расчета прогибов U–балки пролетного строения из ПКМ приведен в приложении Д.

14 Экспериментальные методы определения свойств полимерного композитного материала пролётных строений для подтверждения его качества

14.1 Метод определения морозостойкости

Сущность метода заключается в том, что образцы полимерного композита конструкций подвергают многократному замораживанию–оттаиванию и определяют стойкость к этому воздействию по изменению предела прочности при растяжении.

Оборудование и реактивы по ГОСТ 10060–2012 (пункт 5.2.1).

Подготовка к проведению испытаний

Для испытания применяют образцы по ГОСТ 32656.

Основные и контрольные образцы перед испытанием выдерживают в 5 %-ном водном растворе хлорида натрия.

Контрольные образцы извлекают из раствора, обтирают влажной тканью, взвешивают и испытывают на растяжение по ГОСТ 32656.

Проводят испытания основных образцов и обработку результатов по ГОСТ 10060–2012 (пункты 5.2.3, 5.2.4).

Коэффициент сохранения свойств (морозостойкость) K_M вычисляют по формуле

$$K_{\text{М}} = \frac{\overline{\sigma}_p}{\overline{\sigma}_{mp}} \qquad (14.1)$$

где σ_p – среднеарифметическое значение предела прочности при растяжении контрольных образцов композитного материала конструкций, МПа;

$\sigma_{мр}$ – среднеарифметическое значение предела прочности при растяжении основных образцов композитного материала конструкций, МПа.

Среднеарифметическое значение предела прочности при растяжении контрольных образцов композитного материала конструкций $\overline{\sigma}_p$ и среднеарифметическое, и среднелогарифмическое значения предела

прочности при растяжении основных образцов композитного материала конструкций $\sigma_{мр}$ вычисляют в соответствии с ГОСТ 14359–69 (пункт 4.3).

14.2 Метод определения влагостойкости

Влагостойкость определяют по ГОСТ 9.719–94 (раздел 4).

Сущность метода заключается в том, что образцы по ГОСТ 32656 подвергают воздействию водяного тумана в течение не менее 168 ч и определяют изменение предела прочности при растяжении.

Коэффициент сохранения свойств (влагостойкость) K_B вычисляют по формуле

$$K_B = \frac{\overline{\sigma}_p}{\overline{\sigma}_{bp}} K_B = \frac{\overline{\sigma}_p}{\overline{\sigma}_{bp}} \quad (14.2)$$

где σ_p – среднеарифметическое значение предела прочности при растяжении образцов композитного материала конструкций до испытаний (в исходном состоянии), МПа;

σ_{bp} – среднеарифметическое значение предела прочности при растяжении образцов композитного материала конструкций после испытаний, МПа.

Среднеарифметическое значение предела прочности при растяжении образцов композитного материала конструкций до испытаний (в исходном состоянии) σ_p и среднеарифметическое значение предела прочности при растяжении образцов композитного материала конструкций после испытаний σ_{bp} вычисляют в соответствии с ГОСТ 14359–69 (пункт 4.3).

14.3 Метод определения термостойкости

Сущность метода заключается в том, что образцы полимерного композита конструкций подвергают нагреву до заданной температуры и определяют стойкость к указанному воздействию по изменению предела прочности при растяжении. Оборудование по ГОСТ 32656, а также термокамера для испытательных машин. Для испытания применяют образцы по ГОСТ 32656.

На контрольных образцах определяют исходный предел прочности при растяжении по ГОСТ 32656. Основные образцы нагревают в термокамере до температуры 60 °С. Время выдержки образцов при заданной температуре должно быть не менее 20 мин на 1 мм его толщины. Проводят испытания основных образцов и обработку результатов по ГОСТ 32656–2014 (раздел 7 и пункт 8.1).

Коэффициент сохранения свойств (термостойкость) K_T вычисляют по формуле

$$K_{\text{Т}} = \frac{\overline{\sigma}_p}{\overline{\sigma}_{mp}} \qquad (14.3)$$

где σ_p – среднеарифметическое значение предела прочности при растяжении образцов композитного материала конструкций до испытаний (в исходном состоянии), МПа;

σ_{mp} – среднеарифметическое значение предела прочности при растяжении образцов композитного материала конструкций после испытаний, МПа.

Среднеарифметическое значение предела прочности при растяжении образцов композитного материала конструкций до испытаний (в исходном состоянии) σ_p и среднеарифметическое значение предела прочности при растяжении образцов композитного материала конструкций после испытаний σ_{mp} вычисляют в соответствии с ГОСТ 14359–69 (пункт 4.3).

14.4 Метод определения стойкости к климатическому старению

Стойкость к климатическому старению для подтверждения технических требований при типовых, периодических и приемо-сдаточных испытаниях определяют по ГОСТ 9.708–83, метод 2.

Сущность метода заключается в том, что образцы по ГОСТ 32656 подвергают воздействию искусственно созданных факторов в аппарате искусственной погоды в течение заданной продолжительности испытаний и определяют изменение предела прочности при растяжении.

Искусственные факторы и время воздействия устанавливают в соответствии с таблицами 14.1, 14.2. После одного периода испытаний должно быть не менее пяти образцов.

Стойкость к климатическому старению для подтверждения расчетного срока службы и гарантийных обязательств определяют по ГОСТ 9.708–832 (метод 1) с обязательным согласованием программы испытаний с Заказчиком при учете зоны эксплуатации конструкции.

Коэффициент сохранения свойств (стойкость к климатическому старению) K_K вычисляют по формуле

$$K_K = \frac{\overline{\sigma}_p}{\overline{\sigma}_{Kp}} \qquad (14.4)$$

где σ_p – среднеарифметическое значение предела прочности при растяжении образцов композитного материала конструкций до испытаний (в исходном состоянии), МПа;

$\sigma_{кр}$ – среднеарифметическое значение предела прочности при растяжении образцов композитного материала конструкций после испытаний, МПа.

Среднеарифметическое значение предела прочности при растяжении образцов композитного материала конструкций до испытаний (в исходном состоянии) σ_p и среднеарифметическое значение предела прочности при растяжении образцов композитного материала конструкций после испытаний $\sigma_{кр}$ вычисляют в соответствии с ГОСТ 14359–69 (пункт 4.3).

Образцы испытывают в порядке и условиях, приведенных в таблице 14.1.

Испытания на светостойкость проводятся при сухом режиме выдерживания образцов.

Таблица 14.1 – **Порядок и условия испытания образцов**

Номер цикла	Период экспонирования	Тип лампы	Плотность потока излучения	Температура черной панели	Относительная влажность, %
1	Сухой период – 8 ч	1А (UVA-340) ГОСТ	0,76 Вт·м$^{-2}$·нм$^{-1}$ при длине волны 340 нм	(60 ± 3) °С	Не контролируется

	Конденсация влаги – 4 ч	54928	Источник света включен	(50 ± 3) °С	
2	Сухой период – 8 ч	1А (UVA-340) ГОСТ 54928	0,76 Вт·м$^{-2}$·нм$^{-1}$ при длине волны 340 нм	(50 ± 3) °С	Не контролируется
	Дождевание – 0,25 ч			Не контролируется	
	Конденсация влаги – 3,75 ч		Источник света включен	(50 ± 3) °С	
3	Сухой период – 5 ч	Комбинированный Тип 1А	45 Вт·м$^{-2}$ при длине волны 290 – 400 нм	(50 ± 3) °С	< 15
	Дождевание – 1 ч			(25 ± 3) °С	Не контролируется
4	Сухой период – 5 ч	Комбинированный Тип 1А	45 Вт·м$^{-2}$ при длине волны 290 – 400 нм	(70 ± 3) °С	< 15
	Дождевание – 1 ч			(25 ± 3) °С	Не контролирует-ся
Примечание – Характеристики ламп типа 1А и комбинированного типа приведены в таблице 14.2. Допускается использование другого оборудования, обеспечивающего аналогичные воздействия на образцы материала.					

Таблица 14.2 – **Относительная плотность потока излучения в ультрафиолетовом спектре для ламп типа 1А и комбинированного типа 1А ГОСТ 54928**

Длина волны λ, нм	Тип 1А (UVA–340)		Комбинированный тип 1А	
	Минимум, %	Максимум, %	Минимум, %	Максимум, %
$\lambda < 290$	–	0,01	–	0
$290 \le \lambda \le 320$	5,9	9,3	4	7
$320 < \lambda \le 360$	60,9	65,5	48	56
$360 < \lambda \le 400$	26,5	32,8	38	46

14.5 Метод определения стойкости к ползучести

Сущность метода заключается в том, что к образцам по ГОСТ 32656 в течение расчетного срока службы и гарантийного срока эксплуатации прикладывают нагрузку, таким образом, чтобы напряжение составляло 0,300 ± 0,005 предела прочности при растяжении, определенного по ГОСТ 32656, после чего вычисляют модуль ползучести при растяжении и строят кривую «модуль ползучести при растяжении – время».

Контроль ползучести в процессе испытаний проводят через 1; 3; 6; 9; 12; 36; 60 мес., в дальнейшем не реже одного раза в 10 лет. После одного периода испытаний должно быть не менее шести образцов.

Коэффициент сохранения свойств (ползучесть) $K_П$ вычисляют по формуле

$$K_П = \frac{\bar{E}_р}{\bar{E}_{Нр}} \qquad (14.5)$$

где $\bar{E}_р$ – среднеарифметическое значение модуля упругости при растяжении образцов композитного материала конструкций до испытаний (в исходном состоянии), МПа;

$\bar{E}_{нр}$ – среднеарифметическое значение модуля ползучести при растяжении образцов композитного материала конструкций после испытаний, полученного экстраполяцией по кривой «модуль ползучести при растяжении – время», МПа.

Среднеарифметическое значение модуля упругости при растяжении образцов композитного материала конструкций до испытаний (в исходном состоянии) $\bar{E}_р$ и среднеарифметическое значение модуля ползучести при растяжении образцов композитного материала конструкций после испытаний $\bar{E}_{нр}$ вычисляют в соответствии с ГОСТ 14359–69 (пункт 4.3).

Приложение А

Характеристики ингредиентов, используемых в ПКМ и конструкциях из полимерных композитов

Таблица А.1 – **Характеристики эпоксивинилэфирных смол**

Наименование показателя	Значение показателя	Метод испытания
Жидкие смолы		
Плотность, г/см^3	1,00-1,20	По ГОСТ 18329
Динамическая вязкость, Па·с	0,35-0,45	По сопроводительной документации
Время гелеобразования	В соответствии с нормативной или технической документацией	
Отвержденные смолы		
Предел прочности при растяжении, МПа, не менее	80	По ГОСТ 32656
Модуль упругости при растяжении, МПа, не менее	3100	
Относительная деформация при растяжении, %, не менее	5	
Изгибающее напряжение, МПа, не менее	120	По ГОСТ 4648
Модуль упругости при изгибе, МПа, не менее	3300	
Температура изгиба под нагрузкой, °С, не ниже	100	По ГОСТ 32657
Температура стеклования, °С, не ниже	50	По ГОСТ 32618.2

Таблица А.2 – **Характеристики армирующих наполнителей**

Тип армирующего наполнителя	Значения показателя		
	Предел прочности при растяжении не менее, МПа	Модуль упругости при растяжении (ГОСТ 32667) не менее, ГПа	Удлинение при разрыве, %, не более
Высокопрочное углеродное волокно	3500 (ГОСТ 32667)	220	2,0 (ГОСТ 32667)
Высокомодульное углеродное волокно	2700 (ГОСТ 32667)	300	1,14 (ГОСТ 32667)
Сверхвысокомодульное углеродное волокно	2100 (ГОСТ 32667)	540	0,4 (ГОСТ 32667)
E–стекло	2000 (ГОСТ 6943.5)	70	4,3 (ГОСТ 6943.5)
S–стекло	3500 (ГОСТ 6943.5)	85	5,3 (ГОСТ 6943.5)

Таблица А.3 – **Физико-механические характеристики пористых заполнителей**

Наименование материала	Плотность, кг/м^3	Прочность при сжатии, МПа	Сдвиговая прочность, МПа	Модуль упругости, МПа	Модуль сдвига, МПа
Пенополиуретан (ППУ)	50	0.3–0.5	~0.2	6–10	4–5
	100	0.6–1.0	0.3–0.5	~30	~10
ПВХ-пенопласты	40	0.5–0.8	0.3–0.4	20-30	~10
	80	1.2–2.0	0.7–1.0	60–90	20–30
	80	~0.9	0.5–1.0	~50	20
ПМИ-пенопласт	30	~0.5	~0.3	~30	~15
	70	~1.5	~1.0	~90	~30

Таблица А.4 – **Физико-механические характеристики ультралам–бруса тип 2 [16], [17]**

Характеристика	Направление	Нормативное значение
Нормативные временные сопротивления, МПа		
Растяжение	Вдоль волокон	27
	Поперек волокон	6,7
Сжатие	Вдоль волокон	27
	Поперек волокон на ребре	12
	Поперек волокон на пласту	3,5
Сдвиг (скалывание)	В плоскости шпона	3,9
	Поперек слоев шпона	1,7
Деформационные характеристики (средние значения, МПа)		
Модуль упругости	Вдоль волокон	7000
	Поперек волокон	3500
Модуль сдвига		900
Коэффициент Пуассона		0,3
Плотность		600 кг/м^3

Приложение Б

Пример расчета деформационных характеристик многослойного полимерного композитного материала

Б.1. Рассчитаем по формулам (5.5–5.15) характеристики многослойного композита с армированием: 0° – 70 % волокон; 90° – 0 % волокон; 45° – 15,0 % волокон; –45° – 15,0 % волокон.

Б.2. В качестве упругих характеристик монослоя примем данные ПКМ материала с армированием 0° – 100 % волокон; 90° – 0 % волокон; 45° – 0 % волокон; –45° – 0 % волокон: однонаправленного материала из графы 1 таблицы 5.6.

E_1 = 37000 МПа; E_y = 2500 МПа; G = 3500 МПа; μ_{12} = 0,25; μ_{21} = 0,017.

Б.3 Принимаем общую толщину многослойного композита равной δ_Σ = 1,0, поскольку упругие характеристики не зависят от конкретных значений толщин, а только от соотношения долей волокон, уложенных в разных направлениях.

Тогда δ_1 = 0,70; δ_2 = 0,00; δ = 0,15.

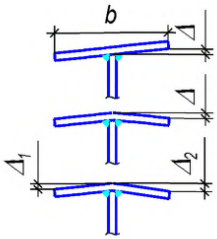
Б.4 По формулам (5.5) получаем: B_{11} = 30006 МПа; B_{22} = 5856 МПа; B_{12} = 2444 МПа; B_{33} = 5390 МПа; E_x = 29986 МПа; E_y = 5657 МПа; G = 5390 МПа; μ_{12} = 0,417; μ_{21} = 0,082.

Полученные в результате расчетов деформированные характеристики ПКМ хорошо совпадают со значениями таких характеристик из графы 2 таблицы 5.6, которые были получены на основе обобщения экспериментальных данных.

Приложение В
Допустимые отклонения размеров и формы полимерных композитных конструктивных элементов сборных пролетных строений из пултрузионных профилей

Таблица В.1 – **Параметры допустимых отклонений**

Наименование отклонения	Предельное отклонение, мм
1 Отклонение длины балки или фермы, при длине L, мм: до 50000 включ. св.50000	 ± 10 0,0002L
2 Отклонение расстояний между соседними узлами ферм или связей решетки при расстоянии ℓ: до 9000 включ. св. 9000	 0,0003ℓ ± 3
3 Отклонение от проектных значений величин строительного подъема пролетного строения, h: до 100 включ. св. 100	 ± 10 ±0,1h
4 Отклонение от проектного положения в плане оси главной балки или фермы при пролете L	0,0002L
5 Отклонение в плане узла от прямой, соединяющей два соседних с ним узла при длине L	0,001L
6 Отклонение расстояний между осями вертикальных стенок балок	± 4
7 Отклонение расстояний между смежными вертикальными ребрами жесткости, а также отклонение расстояний между поперечными балками	±2
8 Отклонение расстояний между осями продольных ребер в зоне стыков и пересечений с поперечными балками - на других участках	 ±2 ±4

Наименование отклонения	Предельное отклонение, мм
9 Отклонения по высоте балок в зоне стыков	±2
10 Допускаемый выгиб осей элементов длиной ℓ: -отдельных элементов главных ферм, балок, балок настила -элементов связей	0,001ℓ но не более 10 0,0015ℓ но не более 15
11 Грибовидность, перекос, грибовидность с перекосом поясов балок, коробчатых профилей, плит (для коробчатых профилей и плит b – значение свободного свеса пояса или настила, для двутавровых балок – ширина пояса) 11.1 В стыках, в местах сопряжения балок с другими элементами, в зонах установки опорных частей 11.2 На других участках	 b/200, но не более 1 b/100 при $\Delta_1-\Delta_2 \le 3$

Приложение Г

Пример расчета сечений и узлов соединений

Г.1 Пример расчета сечения стойки ферменного пролетного строения моста в надопорной зоне по прочности

По результатам загружения расчетной конечно-элементной модели пролетного строения максимальное усилие сжатия в крайней опорной стойке $N = -297640$ Н, $M = M_{zmax} = 17387200$ Н·мм.

Стойка выполнена из двух пултрузионных стеклопластиковых труб сечением 130·130·10.

Характеристики сечения трубы 130·130·10:

- площадь сечения $A = 9772$ мм^2;

- момент сопротивления сечения $W_z = 364300$ мм^3.

– расчетное сопротивление стеклопластика при продольном сжатии $R_1^c = 107.0$ МПа .

Напряжения в стойке:

$$\sigma_{сж1} = \frac{N}{A} = \frac{-297640}{9772} = -30{,}5 \text{ МПа} \quad ;$$

$$\sigma_{сж2} = \frac{M_z}{W_z} = \frac{17387200}{364300} = -47{,}7 \text{ МПа} \quad ;$$

$$\sigma_{сж} = \sigma_{сж1} + \sigma_{сж2} = -78{,}2 \text{ МПа} < R_1^c = 107.0 \text{ МПа}.$$

Прочность опорной стойки обеспечена.

Г.2 Пример расчета опорной стойки фермы по устойчивости

По результатам загружений расчетной конечно–элементной модели пролетного строения максимальное усилие сжатия в крайней опорной стойке $N = -297640$ Н, $M = M_{zmax} = 17387200$ Н·мм. Расчетная длина опорной стойки 2800 мм.

Расчет стойки при плоской форме потери устойчивости выполняют по формуле (10.4)

$$\frac{N}{A} \leq \varphi \cdot R_1^c = 0{,}31 \cdot 107 = 33{,}2 \text{ МПа},$$

где $R_1^c = 107$ МПа – расчетное напряжение при продольном сжатии для стеклопластика;

A=9772 мм^2 – площадь сечения стойки;

$\varphi(\lambda = 56{,}98; e_{ef} = 1{,}87) = 0{,}31$ – коэффициент продольного изгиба, вычисленный с линейной интерполяцией, [14, таблица Ф.3];

$\lambda = \frac{l_{efx}}{i} = \frac{2800}{49{,}14} = 56{,}98$ – гибкость стойки;

l_{efx} – расчетная длина;

$i = \sqrt{\frac{J}{A}} = \sqrt{\frac{2{,}36 \cdot 10^7}{9772}} = 49{,}14$ мм – радиус инерции;

J – момент инерции сечения;

$e_{ef} = \eta e_{rel} = 1{,}19 \cdot 1{,}57 = 1{,}87$ – приведенный относительный эксцентриситет.

Коэффициент формы сечения, [16, таблица Д.2]:

$$\eta(\bar{\lambda} = 2{,}35; e_{rel} = 1{,}57) = (1{,}35 - 0{,}05 \cdot e_{rel}) - 0{,}01(5 - e_{rel}) \cdot \bar{\lambda} = 1{,}19$$

$\bar{\lambda} = \lambda \alpha_R = 56{,}98 \cdot 0{,}0412 = 3{,}25$ – условная гибкость;

$\alpha_R = 0{,}0412$ – коэффициент по таблице Ф.4 СП 35.13330.2011.

$e_{rel} = \frac{e}{\rho} = \frac{58{,}41 \text{ мм}}{37{,}28 \text{ мм}} = 1{,}57$ – относительный эксцентриситет;

$e = \frac{M}{N} = \frac{17387200 \text{ Н·м}}{297640N} = 58{,}41$ мм – эксцентриситет приложения нагрузки;

$\rho = \frac{W}{A} = \frac{364300 \text{ мм}^3}{9772 \text{ мм}^2} = 37{,}28$ мм – ядровое расстояние;

W – момент сопротивления сечения. $\frac{297640\ N}{9772\ мм^2} = 30{,}4\ МПа <$ $33{,}2\ МПа$ – устойчивость опорной стойки в перпендикулярно плоскости фермы обеспечена.

Г.3 Пример расчета соединений

Рассмотрим стык стеклопластикового швеллера размерами 240·72·12 и стеклопластиковой пластины толщиной 12 мм.

Общий вид исследуемого регулярного многоболтового соединения представлен на рисунке Г.1, где A = 60 мм – шаг болтов в продольном направлении, B = 60 мм – в поперечном, na = 3 – число поперечных рядов, nb = 3 – число продольных. Площади смятия полимерного композита под болтами одинаковы.

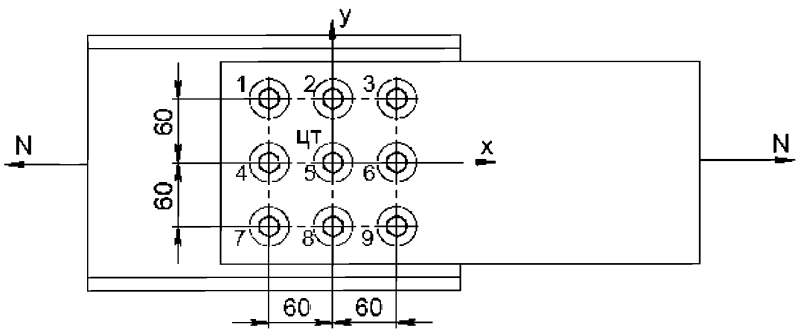


Рисунок Г.1 **– Многоболтовое соединение с постоянным шагом болтов**

Характеристики стеклопластика:

E_x = 28000 МПа – модуль упругости стеклопластика в направлении x;

E_y = 8500 МПа – модуль упругости стеклопластика в направлении y;

$R_1^c = 107$ МПа – расчетное напряжение смятия в направлении x;

$R_2^c = 37{,}2$ МПа – расчетное напряжение смятия в направлении y;

N_x = 90000 Н – сила, действующая в соединении по направлению x.

В связи с тем, расстояния между болтами удовлетворяют требованиям, предъявляемым к минимальным расстояниям, приведенным в таблице 11.1, расчет на смятие выполняется по формуле (12.1).

Расчетные усилия для одного болта составят:

$$N_{1x} = m_b m_{b1} dt R_1^c = 0{,}9 \cdot 0{,}9 \cdot 12 \cdot 12 \cdot 107 = 12480 \text{ Н};$$

$$N_{1y} = m_b m_{b1} dt R_2^c = 0{,}9 \cdot 0{,}9 \cdot 12 \cdot 12 \cdot 37{,}2 = 4339 \text{ Н};$$

Усилие от продольной нагрузки действующее на один болт составляет:

$$P_{6x} = \frac{N_x}{9} = 10000 \text{ Н};$$

Коэффициент запаса для болтового соединения составляет:

$$\eta = \frac{N_{1x}}{N_x} = \frac{12480}{10000} = 1{,}25 \geq 1.$$

Прочность болтового соединения обеспечена.

Приложение Д

Пример расчета полносборной U–балки пролетного строения из полимерного композитного материала

Проведем расчет прочности U–балки пролетного строения, изготовленной из стеклокомпозита, общий вид которой и сечения показаны на рисунке 8.5.

Расчетная длина балки L = 25,4 м.

Материалом, из которого выполнены несущие слои ламината балки, является стеклокомпозит со следующим соотношением долей волокон в разных направлениях:

0 – 62 %; 90° – 13 %; +45° – 12,5 %; –45° – 12,5 %.

Временные сопротивления и деформативные свойства данного ПКМ ламината приведены в таблице 5.6, графа 3.

В несущих слоях ламината U–балки полимерный композитный материал уложен так, что направление X материала ПКМ совпадает с продольной осью пролетного строения.

В соответствии с рисунками 8.5, 10.1 принимаем следующие характеристики поперечного сечения U–балки:

W=3,424 м; H=1,6 м; h=0,204 м; t=0,0108 м; $h_{\text{п}}$=0,311 м.

Рассчитываем приведенную площадь несущих конструктивных элементов U–балки из слоев ламината и ультралам–бруса по формуле (10.24)

$F_{\text{п}}$ = 0,020 м^2.

При расчете приведенной площади приняты следующие значения модулей упругости стеклокомпозита и ультралам–бруса: $E_{\text{хд}}$ = 7000 МПа (таблица А.4); $E_{\text{хс}}$ = 30000 МПа (таблица 5.6, графа 2); $E_{\text{х}}$= 26500 МПа (таблица 5.6, графа 3).

Положение центра тяжести сечения по высоте рассчитываем по формуле (10.23):

$Z_{\text{цт}}$ = 0,71 м.

По формуле (10.21) определяем момент инерции сечения, предварительно определив приведенный момент инрции силового пояса по формуле (10.22)

$$J = 0{,}0185 + 0{,}0084 + 0{,}00027 + 0{,}0011 + 0{,}0248 + 0{,}0074 + 0{,}0050 + 0{,}0021 = 0{,}0676 \text{ м}^4.$$

Примем суммарную нагрузку на балку в соответствии с [22] равной 46752 кгс, тогда погонная нагрузка на балку равна $q = 18075$ Н/м.

Максимальный изгибающий момент, действующий в среднем сечении пролета, равен $M = 1458$ кНм.

Максимальные нормальные сжимающие и растягивающие напряжения, в многослойных стенках U–балки из ПКМ, действующие в середине пролета рассчитываем по формулам (10.17) и (10.18)

$$\sigma_x^+ = 19{,}2 \text{ МПа};$$

$$\sigma_x^- = -15{,}3 \text{ МПа}.$$

Допустимые расчетные напряжения для материала ПКМ рассчитываются с использованием коэффициентов надежности на основании формулы (5.1). Примем значения коэффициентов γ_m и γ_c в соответствии с формулами (5.1) – (5.2) и таблицами 5.1 и 5.2 равными:

$\gamma_m = 2{,}181$; $\gamma_c = 3{,}582$.

Суммарный расчётный коэффициент надежности по материалу равен:

$K_\text{р} = \gamma_m \times \gamma_c = 7{,}814$.

В соответствии с неравенством (9.1) для рассчитанных напряжений, действующих в конструктивном элементе, необходимо выполнение условия:

$$\sigma_x^+ \le [\sigma_x^+].$$

В таблице Д.1 приведены значения экспериментальных напряжений в U–балке, полученных в результате испытаний натурного фрагмента балки на временную пешеходную нагрузку и значения напряжений, полученных в результате расчетов.

Таблица Д.1 – **Значения экспериментально полученных напряжений от пешеходной нагрузки и расчетных максимальных напряжений в конструктивных элементах U–балки**

Экспериментальное напряжение σ_x, МПа	Расчетное напряжение, МПа	Запас
19,2	28,4	1,45
– 15,3	– 49,6	3,24
Примечание – В настоящей таблице с минусом указаны растягивающие напряжения.		

Данные таблицы Д.1 свидетельствуют о том, что в расчитанной конструкции U–балки пролетного строения есть запас прочности не менее чем в 1,5 раза.

В таблице Д.2 проводится сравнение напряжений в сечении U–балки, определенных по аналитическим формулам раздела 10, определенных экспериментально и с использованием метода конечных элементов и приведенных в [22].

Таблица Д.2 – **Значения расчетных и экспериментальных напряжений**

Максимальные напряжения σ_x в сечении:	Напряжения, рассчитанные по формулам пункта 10.2, МПа	Напряжения, расчитанные методом конечных элементов, МПа	Напряжения определенные экспериментально, МПа
нормальное сжимающее σ_x^+	19,2	14,1	13,3
нормальное растягивающее σ_x^-	– 15,3	– 13,8	– 12,3

Приведенные в таблице Д.2 значения свидетельствуют, что аналитические формулы позволяют рассчитать прочность сечения с некоторым запасом.

Соотношение между уровнем сжимающих и растягивающих напряжений, приведённое в таблице Д.2, показывает, что значения сжимающих напряжений, полученных в результате расчетов по формулам пункта 10.2 превышают экспериментальные и полученные с применением метода конечных элементов значения примерно на 35 %. Такое соотношение связано с использованием упрощенной расчетной схемы поперечного сечения балки, учитывающий ультралам–брусья как «равномерно распределенную» по ширине сечения балки жесткость.

Для рассматриваемого нагружения U–балки проведем расчет прогибов в середине пролета от расчетной нагрузки по формуле (13.4)

$\Delta = 0{,}0544 + 0{,}004 = 0{,}0584$ м.

Второе слагаемое определяет влияние сдвиговых деформаций на общий прогиб балки, которое не превышает 7 % общих деформаций.

В таблице Д.3 проводится сравнение прогибов определенных экспериментально, рассчитанных методом конечных элементов и рассчитанных по аналитической формуле (13.4) и приведенных в [22].

Таблица Д.3 – **Расчетные и экспериментальные прогибы, мм.**

Метод определения прогибов	Место в поперечном сечении балки		
	Левая сторона сечения	Середина сечения	Правая сторона
Экспериментальный	55,3	57,1	55,6
Рассчитанные методом конечных элементов	55,5	58,5	55,5
Рассчитанные по формуле (13.4)	58,4	58,4	58,4

Представленные в таблицы Д.2 данные свидетельствуют, что формула (13.4) дает увеличенные примерно до 6 % значения прогиба по отношению к значениям, полученным экспериментально и по сравнению с численным расчетом, за исключением середины сечения, где происходит локальная деформация от поперечного изгиба, которую аналитическая формула не учитывает.

Библиография

[1] ТУ на проектирование и технологию изготовления элементов пешеходных мостов из композиционных материалов. НИИ мостов МПС России г. С.–Петербург. 2001 г.

[2] ТУ 5772–001–013888383–2005 Конструкции пешеходных мостов из композиционных материалов

[3] ТУ 5772–001–011567537–2007 Конструкции пешеходных мостов из композиционных материалов

[4] СТО 11567537.01–2008 Конструкции пешеходных мостов из композиционных материалов, изготавливаемых методом пропитки под давлением. Технические требования, методы испытаний и контроля

[5] СТО 00204961–004–2011 Пешеходные мосты и путепроводы из полимерных композитов, 2011 г.

[6] СТО НОСТРОЙ 2.29.112–2013, ч. 2 Сооружение мостов из полимерных композитных материалов

[7] ОДМ 218.2.058–2015 Рекомендации по применению композиционных материалов в конструкциях мостовых сооружений и пешеходных мостов

[8] ОДМ 218.2.059–2015 Рекомендации по применению на мостах, путепроводах и тоннелях пешеходных настилов (тротуаров) из композиционных материалов

[9] Рекомендации 96 (CUR 96) Применение пластмасс, армированных волокном в несущих конструкциях зданий и сооружений (Aanbeveling 96. Vezelversterkte kunststoffen in civiele draagconstructies)

[10] Отчёт CUR96 2003–6 Vezelversterkte kunststoffen in civiele draagconstructies

[11] Ушаков А.Е., Кленин Ю.Г., Панков и др. Современные конструкции мостов из стеклопластиковых материалов. Научн. труды ОАО ЦНИИС, вып. № 240, стр. 136–156. М. 2007 г.

[12] Влияние влагонасыщения на сопротивление разрушению пултрузионных профилей. Сб. трудов НПП АпАТэК. Внедрение опыта

прикладных перспективных технологий авиастроения в промышленности и на транспорте, под ред. А.Е. Ушакова. Вып. 3, стр. 94–07, М. 2004 г.

[13] Отчет о научных исследованиях и разработках, использованных при создании изменений № 2 к СП 35.13330.2011 «СНиП 2.05.03–84* Мосты и трубы» раздел 12 «Конструкции из полимерных композитов» и «Методических рекомендаций по расчёту мостовых пролётных строений с применением композитных материалов. ООО «НИИ «МИГС». М.2018.

[14] Карпов Я.С. Проектирование деталей из композитов: учебник / Я.С. Карпов. – Харьков.: Нац. аэрокосмический университет «Харьковский авиационный институт», 2010. с. 33–127.

[15] Васильев В.В. Механика конструкций из композиционных материалов. – М.: Машиностроение, 1988. – 272 стр.

[16] ТУ 5366–052–6915009120–2008 Брус клееный из шпона.

[17] ТУ 5512–053-6915009120 Плита клеёная из шпона.

[18] Панин В.Ф., Гладков Ю.А. Конструкции с заполнителем: Справочник. – М.: Машиностроение, 1991. – 272 с.

[19] Кобелев В.Н., Коварский Л.М., Тимофеев С.И. Расчет трехслойных конструкций. М.: Машиностроение, 1984. с. 304.

[20] L. Ascione, J.-F. Caron, P. Godonou, K. van I. Jselmuijden, J. Knippers, T. Mottram, M. Oppe, M. Gantriis Sorensen, J. Taby, L. Tromp; Prospect for new guidance in the design of FRP; EUR 27666 EN. European Union (Italy) 2016. – 177 с.

[21] Honeycomb sandwich design technology. – Duxford: Hexel Composites, 2000. – 28 с.

[22] Технический отчет № 3699171027 по результатам проведения приемочных испытаний конструкции балки №0010 разрезного пролетного строения полной длиной 26 м из композиционного материала на основе стекловолокна и полимерной смолы от 27 октября 2017 г. – М.: ООО «НИИ диагностики», 2017. – 36 с.

[23] СТО 36554501-021-2010 Деревянные конструкции. Многослойный клееный из шпона материал Ultralam (Ультралам)

Ключевые слова: полимерный композиционный материал, сборные пролётные строения, монолитные пролётные строения, конструктивные элементы, коэффициент надёжности по материалу, коэффициент сохранения свойств, нормативное сопротивление, ортотропный материал, метод конечных элементов

gost.e-ecolog.ru