

Сәулет, қала құрылысы және құрылыс
саласындағы мемлекеттік нормативтер
ҚР НОРМАТИВТІК–ТЕХНИКАЛЫҚ ҚҰРАЛЫ

Государственные нормативы в области
архитектуры, градостроительства и строительства
НОРМАТИВНО–ТЕХНИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ РК

АЛЮМИНИЙ КОНСТРУКЦИЯЛАРДЫ ЖОБАЛАУ. 1-БӨЛІМ. ЖАЛПЫ ЕРЕЖЕЛЕР

ПРОЕКТИРОВАНИЕ АЛЮМИНИЕВЫХ КОНСТРУКЦИЙ. ЧАСТЬ 1. ОБЩИЕ ПРАВИЛА

ҚР НТҚ 09-01-1.1-2011
НТП РК 09-01-1.1-2011

Ресми басылым
Издание официальное

Қазақстан Республикасы Ұлттық экономика министрлігінің Құрылыс,
тұрғын үй–коммуналдық шаруашылық істері және жер ресурстарын басқару
комитеті

Комитет по делам строительства, жилищно–коммунального хозяйства и
управления земельными ресурсами Министерства национальной экономики
Республики Казахстан

Астана 2015

АЛҒЫ СӨЗ

1. **ӘЗІРЛЕГЕН:** «ҚазҚСҒЗИ» АҚ
2. **ҰСЫНҒАН:** Қазақстан Республикасы Ұлттық экономика министрлігінің Құрылыс, тұрғын үй-коммуналдық шаруашылық істері және жер ресурстарын басқару комитетінің Техникалық реттеу және нормалау басқармасы
3. **БЕКІТІЛІП, ҚОЛДАНЫСҚА ЕНГІЗІЛГЕН:** Қазақстан Республикасы Ұлттық экономика министрлігі Құрылыс, тұрғын үй-коммуналдық шаруашылық істері және жер ресурстарын басқару комитетінің 2014 жылғы 29-желтоқсандағы № 156-НҚ бұйрығымен 2015 жылғы 1-шілдеден бастап

ПРЕДИСЛОВИЕ

1. **РАЗРАБОТАН:** АО «КазНИИСА»
2. **ПРЕДСТАВЛЕН:** Управлением технического регулирования и нормирования Комитета по делам строительства, жилищно-коммунального хозяйства и управления земельными ресурсами Министерства национальной экономики Республики Казахстан
3. **УТВЕРЖДЕН И ВВЕДЕН В ДЕЙСТВИЕ:** Приказом Комитета по делам строительства, жилищно-коммунального хозяйства и управления земельными ресурсами Министерства национальной экономики Республики Казахстан от «29» декабря 2014 года № 156-НҚ с 1 июля 2015 года

Осы мемлекеттік нормативті Қазақстан Республикасының сәулет, қала құрылысы және құрылыс істері жөніндегі уәкілетті мемлекеттік органның рұқсатысыз ресми басылым ретінде толық немесе ішінара қайта басуға, көбейтуге және таратуға болмайды

Настоящий государственный норматив не может быть полностью или частично воспроизведен, тиражирован и распространен в качестве официального издания без разрешения уполномоченного государственного органа по делам архитектуры, градостроительства и строительства Республики Казахстан

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	V
ПРЕДИСЛОВИЕ	1
1. Общие положения	1
2. Материалы для конструкций и соединений	2
3. Расчетные характеристики материалов и соединений	6
4. Расчет элементов алюминиевых конструкций	15
4.1 Расчетные предпосылки	15
5. Критические предельные состояния для элементов	23
5.1. Расчетные предпосылки	23
5.2. Несущая способность поперечных сечений	35
5.3. Растяжение	36
5.4. Сжатие	39
5.5. Изгибающий момент	41
5.6. Сдвиг (срез)	45
5.7. Кручение	46
5.8. Изгиб и сдвиг (срез)	49
5.9. Изгиб и продольная нагрузка	50
5.10. Изгиб, сдвиг (срез) и продольная нагрузка	53
5.11. Сопротивление элементов при продольном изгибе	55
5.12. Соединительные однородные элементы	71
6. Листовые алюминиевые конструкции	79
7. Составные алюминиевые балки	95
8. Предельные состояния по эксплуатационной пригодности	117
9. Расчет и конструирование соединений элементов из алюминиевых сплавов...	122
9.1. Болтовые и заклепочные соединения	122
9.2. Соединения на штифтах	138
9.3. Сварные соединения	140
10. Коррозия и защита алюминиевых конструкций	152
10.1. Коррозия алюминия под воздействием различных атмосферных условий	152
10.2. Классы долговечности алюминиевых сплавов...	153
10.3. Антикоррозийная защита	153
10.4. Общая антикоррозийная защита конструкционного алюминия	154
10.5. Алюминий в контакте с алюминием и другими металлами	156
10.6. Алюминиевые поверхности, находящиеся в контакте с неметаллическими материалами	156
11. Проектирование алюминиевых конструкций	162
11.1 Общие положения	162
Приложение А (обязательное) Материалы, определенные на национальном уровне.....	164
Приложение Б (информационное) Сварка алюминиевых сплавов	165

ҚР НТҚ 09-01-1.1-2011
НТП РК 09-01-1.1-2011

Приложение В (<i>информационное</i>) Статический расчет рамы каркасного здания .	172
Приложение Г (<i>обязательное</i>) Основные буквенные обозначения величин.....	201
БИБЛИОГРАФИЯ	212

ВВЕДЕНИЕ

Стратегической целью реформы системы технического регулирования, изложенной в Концепции реформирования системы технического регулирования строительной отрасли Республики Казахстан на 2010-2014 годы, является создание благоприятных условий для формирования в Республике Казахстан устойчивой высокой культуры строительства, которая является характерной чертой и показателем развитого общества.

Основным требованием к реформе является приведение строительного законодательства и нормативных технических документов в области технического регулирования в соответствие с зарубежными аналогами, применяющимися в экономически развитых странах.

Государственные нормативы в области архитектуры градостроительства и строительства Республики Казахстан должны быть усовершенствованы в соответствии с основами правового регулирования архитектурной, градостроительной и строительной деятельности, законодательством и структурой управления на базе действующих в переходный период в Казахстане, а также международных нормативных правовых актов, нормативно-технических документов и иных обязательных и рекомендуемых требований, условий и ограничений.

Главная направленность государственных нормативов – обеспечение охраняемых законом потребностей граждан и общества в создании благоприятной и экологически безопасной среды обитания и жизнедеятельности при осуществлении архитектурной, градостроительной и строительной деятельности, защита прав потребителей проектной и строительной продукции, обеспечение надежности и безопасности строительства, устойчивого функционирования построенных объектов при эксплуатации.

ҚР НТҚ 09-01-1.1-2011
НТП РК 09-01-1.1-2011

ДЛЯ ЗАМЕТОК

**ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫНЫҢ НОРМАТИВТІК-ТЕХНИКАЛЫҚ ҚҰРАЛЫ
НОРМАТИВНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН**

**АЛЮМИНИЙ КОНСТРУКЦИЯЛАРДЫ ЖОБАЛАУ. 1-БӨЛІМ.
ЖАЛПЫ ЕРЕЖЕЛЕР**

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ АЛЮМИНИЕВЫХ КОНСТРУКЦИЙ. ЧАСТЬ 1.
ОБЩИЕ ПРАВИЛА**

Дата введения 2015-07-01

ПРЕДИСЛОВИЕ

Настоящий нормативно-технический документ распространяется на проектирование алюминиевых строительных конструкций зданий и сооружений. Он соответствует принципам и требованиям к безопасности и эксплуатационной надежности конструкций, основам их проектирования и проверки, определенным в СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011 «Проектирование алюминиевых конструкций. Часть 1-1. Общие правила» с национальным приложением.

Данное Пособие не распространяется на проектирование алюминиевых конструкций мостов и конструкций зданий и сооружений, подвергающихся многократному воздействию нагрузок (усталостная прочность), а также непосредственному воздействию динамических нагрузок.

При проектировании алюминиевых конструкций, находящихся в особых условиях эксплуатации, конструкций уникальных зданий и сооружений, а также специальных видов конструкций необходимо соблюдать дополнительные требования, отражающие особенности работы этих конструкций, и требования соответствующих частей Европейских стандартов на алюминиевые конструкции.

В Пособии номера пунктов, рисунков и таблиц СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/ 2011, положения которых изложены с сохранением его текста, приведены в квадратных скобках. Ссылки на пункты СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011 приведены в обычных скобках по тексту.

Пособием следует пользоваться одновременно с СН РК EN 1999-1-1:2007+ A1:2009/2011 «Проектирование алюминиевых конструкций. Часть 1-1. Общие правила» с национальным приложением.

1 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1 Алюминиевые конструкции следует применять при строительстве и реконструкции зданий и сооружений для ограждающих и несущих конструкций при надлежащем технико-экономическом обосновании в следующих случаях:

— при необходимости значительного снижения массы ограждающих и несущих конструкций зданий или сооружений;

Издание официальное

— с целью обеспечения повышенных архитектурных требований к конструкциям зданий или сооружений;

— при необходимости для обеспечения повышенной коррозионной стойкости, сохранения прочностных характеристик при низких температурах, отсутствия искрообразования и магнитных свойств.

1.2 При проектировании алюминиевых конструкций следует:

— выбирать оптимальные в технико-экономическом отношении схемы конструкций, сечения элементов и марки деформируемых алюминиевых сплавов, технического алюминия и ограничено отливок;

— применять экономичные профили;

— применять прогрессивные конструкции (типовые или стандартные); конструкции, совмещающие ограждающие и несущие функции, тонколистовые и комбинированные; пространственные системы из стандартных элементов и др.;

— предусматривать высокую технологичность изготовления и монтажа;

— применять конструкции, обеспечивающие наименьшую трудоемкость их изготовления, транспортирования и монтажа;

— применять, как правило, поточное их изготовление;

— предусматривать применение заводских и монтажных соединений прогрессивных типов (автоматической и полуавтоматической сварки, фланцевых, на болтах, в том числе высокопрочных, на вкладышах).

1.3 При проектировании зданий и сооружений необходимо принимать конструктивные схемы, обеспечивающие прочность, устойчивость и пространственную неизменяемость зданий и сооружений в целом, а также их отдельных элементов при транспортировании, монтаже и эксплуатации.

2 МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ КОНСТРУКЦИЙ И СОЕДИНЕНИЙ

2.1 Выбор марки подходящего материала из алюминия или алюминиевого сплава и его состояния (вида обработки) для конструкций определяется комбинацией факторов:

— характера и интенсивности нагрузки, напряженного состояния элементов конструкций, расчетных температур и требуемых механических свойств алюминия;

— свариваемости и способности к формоизменению;

— химического состава алюминия и стойкости его к коррозии;

— технологичности изготовления полуфабрикатов;

— наличия необходимого сплава и конкретной формы;

— технологии изготовления и монтажа конструкций;

— архитектурных требований.

2.2 Согласно п. 3.2.1 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011 для алюминиевых конструкций следует применять деформируемые алюминиевые сплавы и литые сплавы марок, указанных соответственно в табл. 1, А.1 и 2.

2.3 Виды алюминиевых полуфабрикатов (форма изделий) для изготовления строительных конструкций следует принимать по таб. 1 и А.1.

2.4 В соответствии с Примечанием 1 к п. 3.2.3.1 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011 правила проектирования литых изделий, приведенные в настоящем Пособии, применимы только к полуфабрикатам, полученным методом свободной заливки форм. При этом необходимо учитывать дополнительные и специальные нормы при соблюдении положений, регламентирующих качество продукции, приведенные в Приложении С (раздел С.3.4) СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011.

2.5 Согласно п. 3.3.1 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011 соединительные устройства, применимые к алюминиевым конструкциям, включают в себя: сварные соединения, болты, сплошные заклепки, штифты, фрикционные зажимы, специальные соединительные детали и клеи.

2.6 В соответствии с п. 3.3.4 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011 основные требования при выборе присадочного материала для ряда различных свариваемых между собой основных материалов приведены в таблицах 3 и 4.

Руководящие сведения по проектированию сварных соединений, приведенные в настоящем Пособии, относятся к технологическим процессам сварки MIG (дуговая сварка металлическим электродом в среде инертного газа) и TIG (дуговая сварка вольфрамовым электродом в среде инертного газа).

2.7 Согласно п. 3.3.2.1 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011 применяемые болты, гайки, шайбы, винты и заклепки должны отвечать требованиям стандартов EN, prEN и ISO.

2.8 Согласно п. 3.2.5 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011 физические характеристики для расчета алюминиевых элементов:

- | | |
|--|--------------------------------|
| — модуль упругости (модуль Юнга) | $E = 70\,000 \text{ Н/мм}^2$; |
| — модуль сдвига | $G = 27\,000 \text{ Н/мм}^2$; |
| — коэффициент Пуассона в упругом состоянии | $\nu = 0,3$; |

Таблица 1[3.1a]

Деформируемые алюминиевые сплавы			
Обозначение сплава		Форма изделия	Класс долговечности ³⁾
Численное обозначение	Химическое обозначение		
EN AW-3004	EN AW — AlMn1Mg1	SH, ST, PL	A
EN AW-3005	EN AW — AlMn1Mg0,5	SH, ST, PL	A
EN AW-3103	EN AW — AlMn1	SH, ST, PL, ET, EP, ER/B	A
EN AW-5005/5005A	EN AW — AlMg1(B)/(C)	SH, ST, PL	A
EN AW-5049	EN AW — AlMg2Mn0,8	SH, ST, PL	A
EN AW-5052	EN AW — AlMg2,5	SH, ST, PL, ET ²⁾ , EP ²⁾ , ER/B, DT	A
EN AW-5083	EN AW — AlMg4,5Mn0,7	SH, ST, PL, ET ²⁾ , EP ²⁾ , ER/B, DT, FO	A ¹⁾
EN AW-5454	EN AW — AlMg3Mn	SH, ST, PL, ET ²⁾ , EP ²⁾ , ER/B	A
EN AW-5754	EN AW — AlMg3	SH, ST, PL, ET ²⁾ , EP ²⁾ , ER/B, DT, FO	A
EN AW-6060	EN AW — AlMgSi	ET, EP, ER/B, DT	B
EN AW-6061	EN AW — AlMg1SiCu	SH, ST, PL, ET, EP, ER/B, DT	B
EN AW-6063	EN AW — AlMg0,7Si	ET, EP, ER/B, DT	B
EN AW-6005A	EN AW — AlSiMg(A)	ET, EP, ER/B	B
EN AW-6082	EN AW — AlSi1MgMn	SH, ST, PL, ET, EP, ER/B, DT, FO	B
EN AW-6106	EN AW — AlMgSiMn	EP	B
EN AW-7020	EN AW — AlZn4,5Mg1	SH, ST, PL, ET, EP, ER/B, DT	C
EN AW-8011A	EN AW — AlFeSi	SH, ST, P	B
Обозначения: SH — лист (стандарт EN 485). ST — полоса (стандарт EN 485). PL — пластина (стандарт EN 485). ET — прессованная труба (стандарт EN 755). EP — прессованные профили (стандарт EN 755). ER/B — прессованные прутки и бруски (стандарт EN 755).		DT — бесшовные трубы (стандарт EN 754). FO — поковки (стандарт EN 586). ¹⁾ См. Приложение C: C2.2.2(2) CH PK EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011. ²⁾ Только простые, твердые (открытые) секции или толстостенные трубы, экструдированные через оправку (бесшовные). ³⁾ См. 4, Приложение C и Приложение D CH PK EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011.	

Таблица 2[3.1b]

Литые алюминиевые сплавы		
Обозначение сплава		Класс долговечности ¹⁾
Численное обозначение	Химическое обозначение	
EN AC-42100	EN AC-AlSi7Mg0,3	B
EN AC-42200	EN AC-AlSi7Mg0,6	B
EN AC-43000	EN AC-AlSi10Mg(a)	B
EN AC-43300	EN AC-AlSi9Mg	B
EN AC-44200	EN AC-AlSi12(a)	B
EN AC-51300	EN AC-AlMg5	A
¹⁾ См. 4, Приложение C и Приложение D CH PK EN 1999-1-1:2007/2011+A1:2009/2011.		

- коэффициент линейного термического расширения $\alpha = 23 \times 10^{-6}$ на $^{\circ}\text{C}$;
— единичная масса $\rho = 2700 \text{ кг/м}^3$.

Свойства материалов в конструкциях подверженных повышенным температурам, связанных с огнем и/или пожаром, см. в стандарте СН РК EN 1999-1-2:2007/2011.

Таблица 3[3.5]

Обозначения групп сплавов, используемых в таблице 4	
Группа присадочных материалов	Сплавы
Тип 3	3103
Тип 4	4043A, 4047A ¹⁾
Тип 5	5056A, 5356/5356A, 5556A/5556B, 5183/5183A
¹⁾ Сплав 4047A специально используется, чтобы предотвратить растрескивание металла в местах соединения. В большинстве других случаев предпочтительнее всего использовать 4043A.	

3 РАСЧЕТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАТЕРИАЛОВ И СОЕДИНЕНИЙ

3.1 В соответствии с п. 3.2.2 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011 в таблицах 5–7 приведены характеристические значения 0,2% условного предела текучести f_0 и предела прочности при растяжении (сопротивления разрыву) f_u для деформируемых алюминиевых сплавов различных составов и толщин в зависимости от вида изделий: в таблице 5 - для изделий в виде листов, полос и пластин; в таблице 6 — для прессованных прутков/брусков, труб, профилей, а также труб, экструдированных через оправку; в таблице 7 — для поковок. Значения, приведенные в таблицах 5-9, предназначены для использования только при температурах до 80 °С.

Характеристические значения условного предела текучести f_0 , предела прочности на растяжение f_u , удлинения δ листов и лент для закалов с $f_0 > 165 \text{ Н/мм}^2$ и толщиной от 0,5 до 6 мм, определенных в качестве неустановленных параметров для Национального Приложения к СН РК EN 1999-1-4:2007/2011 см. Приложение А.

[3.2.2] При эксплуатационных температурах в диапазоне от 80 °С до 100 °С необходимо принимать во внимание снижение прочности. Все характеристические значения прочности алюминиевых элементов (f_0 , f_u , $f_{0,haz}$ и $f_{u,haz}$) могут быть уменьшены в соответствии с формулой:

$$X_{kT} = [1 - k_{100}(T - 80)/20] X_k, \quad (1)$$

где X_k — характеристическое значение свойства прочности материала;

X_{kT} — характеристическое значение параметра прочности при температуре T в диапазоне от 80 °С до 100 °С;

T — максимальная температура, при которой эксплуатируется конструкция;

$k_{100} = 0,1$ для сплавов с деформационным упрочнением (сплавы типа 3xxx, 5xxx и EN AW 8011A);

$k_{100} = 0,2$ для дисперсионно-твердеющих сплавов (сплавы типа 6xxx и EN AW 7020).

При температуре 100 °С для алюминиевых сплавов, как правило, рекомендуется применение класса изгиба В. В диапазоне температур от 80 °С до 100 °С необходимо выполнить интерполяцию между классами А и В.

В диапазоне температур от 80 °С до 100 °С материал восстанавливает свою прочность по мере снижения температуры. При температурах свыше 100 °С учитывается уменьшение значения модуля упругости, а также невосстанавливаемое снижение прочности, зависящее от времени.

В таблицах 5-7 приведены характеристические значения для зон термического влияния HAZ (0,2 % условный предел текучести $f_{0,haz}$ и предел прочности при растяжении (сопротивление разрыву) $f_{u,haz}$). Там же приведены коэффициенты уменьшения, класс изгиба и показатель степени в выражении Рамберга-Осгуда для пластичного сопротивления.

3.2 Согласно п.п. 3.2.3.2 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011 в таблице 8 приведены значения 0,2 % условного предела текучести f_0 и предела прочности при растяжении (сопротивления разрыву) f_u для алюминиевых изделий, изготовленных литьем в песчаные формы и в постоянные формы.

Данные значения представляют собой 70% от величин, приведенных в стандарте

EN 1706, которые действительны только для отдельно отливаемых испытательных образцов (см. раздел 6.3.3 (2) стандарта EN 1706).

Значения A_{50} в таблице 8 представляют собой 50% от минимального показателя растяжения, приведенных в стандарте EN 1706, которые действительны только для отдельно отливаемых испытательных образцов (см. раздел 6.3.3 (2) стандарта EN 1706).

3.3 В соответствии п.п. 3.3.2.1 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011 в таблице 9 приведены минимальные характеристические значения 0,2% условного предела текучести f_0 и предела прочности при растяжении (сопротивления разрыву) f_u , используемые при расчетах соединений на болтах и сплошных заклепках,.

3.4 Согласно п. 6.1.3 и п. 8.1.1 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011 при расчете элементов и соединений алюминиевых конструкций следует учитывать частные коэффициенты γ_M , применяемые к различным характеристическим значениям сопротивления в данном сечении и значения которых приведены в таблице 10 и таблице 11.

3.5 В соответствии с п. 1.1.2 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011 предельная толщина для материалов, если иная не оговаривается в настоящем Пособии:

- элементы с толщиной материала не менее 0.6 мм;
- сварные элементы с толщиной материала не менее 1.5 мм;
- соединения:
 - на стальных болтах и шпильках диаметром не менее 5 мм;
 - на алюминиевых болтах и шпильках диаметром не менее 8 мм;
 - на заклепках и самонарезающих винтах диаметром не менее 4.2 мм.

Таблица 4[3.6]

Выбор присадочных металлов (см. группы сплавов в таблице 3)							
Сочетания основных металлов							
1-й основной металл	2-й основной металл						
	литье Al-Si	литье Al-Mg	сплавы серии 3xxx	сплавы серии 5xxx, за исключением 5083	5083	сплавы серии 6xxx	7020
7020	NR ²⁾	Тип 5 Тип 5 Тип 5	Тип 5 Тип 5 Тип 4	Тип 5 Тип 5 Тип 5	5556A Тип 5 5556A	Тип 5 Тип 5 Тип 4	5556A Тип 5 Тип 4 ⁴⁾
сплавы серии 6xxx	Тип 4 Тип 4 Тип 4	Тип 5 Тип 5 Тип 5	Тип 4 Тип 4 Тип 4	Тип 5 Тип 5 Тип 5	Тип 5 Тип 5 Тип 5	Тип 5 Тип 4 Тип 4	
5083	NR ²⁾	Тип 5 Тип 5 Тип 5	Тип 5 Тип 5 Тип 5	Тип 5 Тип 5 Тип 5	5556A Тип 5 Тип 5		
сплавы серии 5xxx за исключением 5083	NR ²⁾	Тип 5 Тип 5 Тип 5	Тип 5 Тип 5 Тип 5	Тип 5 ³⁾ Тип 5			
сплавы серии 3xxx	Тип 4 Тип 4 Тип 4	Тип 5 Тип 5 Тип 5	Тип 5 Тип 5 Тип 5				
литье Al-Mg	NR ²⁾	Тип 5 Тип 5 Тип 5					
	литье Al-Si	литье Al-Mg	сплавы серии 3xxx	Сплавы серии 5xxx за исключением 5083	5083	сплавы серии 6xxx	7020
литье Al-Si	Тип 4 Тип 4 Тип 4						

¹⁾ В каждой ячейке таблицы в верхней строчке приведен присадочный металл, обеспечивающий максимальную прочность сварного соединения; в случае сплавов серии 6xxx и En-AW 7020 эта прочность будет ниже, чем прочность полностью термообработанного основного металла. В средней строчке приведен присадочный металл, обеспечивающий максимальную коррозионную стойкость сварного соединения. В нижней строчке приведен присадочный металл, обеспечивающий долговременное отсутствие растрескивания сварного соединения.

²⁾ NR = «Не рекомендуется». Сварка сплавов содержащих приблизительно 2 или более процента Mg с металлом содержащим Al-Si не рекомендуется, поскольку на границах плавления образуется довольно большое количество осадка Mg₂Si, что делает сварное соединение хрупким. Если избежать такой комбинации свариваемых материалов не возможно, см. стандарт prEN 1011-4.

³⁾ Коррозионное поведение сварного соединения имеет тенденцию улучшаться, если состав присадочного металла достаточно близок к основному металлу. Поэтому при сварке элементов, предназначенных для эксплуатации в потенциально коррозионной окружающей среде, рекомендуется сваривать EN-AW 5454 посредством присадочного материала 5454. Однако в некоторых случаях это может достигаться только ценой ухудшения прочности сварного соединения, так что необходим компромисс.

⁴⁾ Только в особых случаях вследствие низкой прочности сварного соединения и растяжения соединения.

Таблица 5[3.2a]

Характеристические значения 0,2 % условного предела текучести f_0 и предела прочности при растяжении (сопротивления разрыву) f_u (как для несварных элементов, так и для зон термического влияния HAZ), минимального показателя растяжения A , понижающих коэффициентов $\rho_{0,HAZ}$ и $\rho_{u,HAZ}$ в зоне термического влияния HAZ, класса изгиба и показателя степени n_p для деформируемых алюминиевых сплавов – листы, полосы и пластины											
Сплав EN AW-	Марка сплава ¹⁾	Толщина, мм ¹⁾	f_0 ¹⁾	f_u	A_{50} ¹⁾⁶⁾ , %	$f_{0,HAZ}$ ²⁾	$f_{u,HAZ}$ ²⁾	Коэффициент HAZ ²⁾		BC ⁴⁾	n_p ¹⁾⁵⁾
			Н/мм ²			Н/мм ²		$\rho_{0,HAZ}$	$\rho_{u,HAZ}$		
3004	H14H24/H34	≤613	180 170	1130	113	75	155	0.42 0.44	0.70	B	23 18
	H16H26/H36	≤413	200 190	240	113			0.38 0.39	0.65	B	25 20
3005	H14H24	≤613	150 130	170	114	56	115	0.37 0.43	0.68	B	38 18
	H16H26	≤413	175 160	195	113			0.32 0.35	0.59	B	43 24
3103	H14H24	≤25 12,5	120 110	140	214	44	90	0.37 0.40	0.64	B	31 20
	H16H26	≤4	145 135	160	112			0,30 0,33	0.56	B	48 28
5005/ 5005A	O/H111	≤50	35	100	15	35	100	1	1	B	5
	H12H22/H32	≤12,5	95 80	125	214	44	100	0.46 0.55	0.80	B	18 11
	H14H24/H34	≤12,5	120 110	145	213			0.37 0.40	0.69	B	25 17
5052	H12H22/H32	≤40	160 130	210	415	80	170	0.50 0.62	0,81	B	17 10
	H14H24/H34	≤25	180 150	190	314			0.44 0.53	0.74	B	19 11
5049	O/H111	≤100	80	190	12	80	190	1	1	B	6
	H14H24/H34	≤25	190 160	240	316	100	190	0.53 0.63	0.79	B	20 12
5454	O/H111	≤80	85	215	12	85	215	1	1	B	5
	H14H24/H34	≤25	220 200	270	214	105	215	0.48 0.53	0.80	B	22 15
5754	O/H111	≤100	80	190	12	80	190	1	0.80	B	6
	H14H24/H34	≤25	190 160	240	316	100	190	0.53 0.63	0.79	B	20 12
5083	O/H111	≤50	125	275	11	125	275	1	1	B	6
		50 < t ≤ 80	115	270	14 ³⁾	115	270			B	
	H12H22/H32	≤40	250 215	305	315	155	275	0.62 0.72	0,90	B	22 14
	H14H24/H34	≤25	280 250	340	214			0.55 0.62	0,81	A	22 14
6061	T4/T451	≤12,5	110	205	12	95	150	0.86	0.73	B	8
	T6/T651	≤12,5	240	290	6	115	175	0.48	0.60	A	23
	T651	12,5 < t ≤ 80	240	290	6 ³⁾						
6082	T4/T451	≤12,5	110	205	12	100	160	0.91	0.78	B	8
	T61/T6151	≤12,5	205	280	10	125	185	0.61	0.66	A	15
	T651	12,5 < t ≤ 100	240	295	7 ³⁾			0.63	0.67	A	14
	T6151	12,5 < t ≤ 100	200	275	12 ³⁾			0.48	0.60	A	25
	T6/T651	≤6	260	310	6			0.49	0.62	A	27
		6 < t ≤ 12,5	255	300	9			0.52	0.63	A	21
7020		≤12,5	280	350	7			205	280	0.73	0.80
T651	≤40	9 ³⁾									
8011	H14H24	≤12,5	110 100	125	213	37	85	0.34 0.37	0.68	B	37 22
	H16H26	≤4	130 20	145	112			0.28 0.31	0.59		33 33

¹⁾ Если в одной строке приведены два (или три) сплава, то сплавы, разделенные символом «|» имеют разные технологические значения, в то время как сплавы, разделенные символом «/» имеют те же самые значения. (Различия сплавов заключаются в разных значениях f_0 , A и n_p).

²⁾ Значения параметров, относящихся к зоне термического влияния HAZ, действительны при использовании технологии MIG (дуговой сварки металлическим электродом в среде инертного газа) для элементов толщиной до 15 мм. При использовании технологии TIG (дуговой сварки вольфрамовым электродом в среде инертного газа) для сварки сплавов с деформационным упрочнением (сплавы типа 3xxx, 5xxx и в соответствии со стандартом EN-AW 8011A) толщиной до 6 мм действительны эти же значения. Однако при использовании технологии TIG для сварки дисперсионно-твердеющих сплавов (сплавы типа 6xxx и 7xxx) толщиной до 6 мм указанные в таблице значения параметров HAZ, а также коэффициенты ρ необходимо умножить на понижающий коэффициент 0,8. При сварке элементов с большей толщиной — если нет других данных — значения параметров HAZ, а также коэффициенты ρ необходимо дополнительно умножить на понижающий коэффициент 0,8 (для сплавов 6xxx и 7xxx) или на коэффициент 0,9 (для сплавов 3xxx, 5xxx и сплавов по стандарту 8011A). Все эти понижающие коэффициенты не относятся к маркам сплавов типа «O».

³⁾ Значение основано на параметре $A (= A_{5,65}\sqrt{A_0})$, а не на A_{50} .

⁴⁾ BC — класс изгиба, см. п.п. 5.1.5(6.1.4.4), 5.11(6.1.5) и 5.11.1-5.11.6(6.3.1) настоящего Пособия.

⁵⁾ n_p представляет собой показатель степени в выражении Рамберга-Осгуда для пластичного сопротивления. Его следует использовать только совместно с приведенными в таблице значениями f_0 .

⁶⁾ Приведенные значения минимальных показателей растяжения применим не ко всем толщинам, приведенным в таблице, а, главным образом, к наиболее тонким изделиям. Подробную информацию см. в стандарте EN 485-2.

Таблица 6[3.2b]

Характеристические значения 0,2 % условного предела текучести f_0 и предела прочности при растяжении (сопротивления разрыву) f_u (как для несварных элементов, так и для зон термического влияния HAZ), минимального показателя растяжения A , понижающих коэффициентов $\rho_{0,HAZ}$ и $\rho_{u,HAZ}$ в зоне термического влияния HAZ, класса изгиба и показателя степени n_p для деформируемых алюминиевых сплавов — прессованные прутки/брусочки, трубы, профили и трубы, экструдированные через оправку												
Сплав EN AW-	Форма изделия	Марка сплава ¹⁾	Толщина, мм ¹⁾	$f_0^{1)}$	$f_u^{1)}$	$A^{5)2)}$ %	$f_{0,HAZ}^{4)}$	$f_{u,HAZ}^{4)}$	Коэффициент HAZ ⁴⁾		BC ⁶⁾	$n_p^{7)}$
				Н/мм ²			Н/мм ²		$\rho_{0,HAZ}$	$\rho_{u,HAZ}$		
5083	EP, ET, ER/B	O/H111, F, H112	$t \leq 200$	110	270	12	110	270	1	1	B	5
	DT	H12/22/32	$t \leq 10$	200	280	6	135	270	0.68	0.96	B	14
		H14/24/34	$t \leq 5$	235	300	4			0.57	0.90	A	18
6060	ET, EP, ER/B	T5	$t \leq 5$	120	160	8	50	80	0.42	0.50	B	17
	EP		$5 < t \leq 25$	100	140	8			0.50	0.57	B	14
	EP, ET, ER/B	T6	$t \leq 15$	140	170	8	60	100	0.43	0.59	A	24
	DT		$t \leq 20$	160	215	12			0.38	0.47	A	16
	ET, EP, ER/B	T64	$t \leq 15$	120	180	12	60	100	0.50	0.56	A	12
	EP, ET, ER/B	T66	$t \leq 3$	160	215	8	65	110	0.41	0.51	A	16
	EP		$5 < t \leq 25$	150	195	8			0.43	0.56	A	18
6061	EP, ET, ER/B, DT	T4	$t \leq 25$	110	180	50	95	150	0.86	0.83	B	8
6063	EP, ET, ER/B, DT	T6	$t \leq 20$	240	260	8	115	175	0.48	0.67	A	55
	EP, ET, ER/B	T5	$t \leq 3$	130	175	8	60	100	0.46	0.57	B	16
	EP		$3 < t \leq 25$	110	160	7			0.55	0.63	B	13
	EP, ET, ER/B	T6	$t \leq 25$	160	195	8	65	100	0.41	0.56	A	24
	DT		$t \leq 20$	190	220	10			0.34	0.50	A	31
	EP, ET, ER/B	T66	$t \leq 10$	200	245	8	75	130	0.38	0.53	A	22
	DT		$10 < t \leq 25$	180	225	8			0.42	0.58	A	21
	EP		$t \leq 20$	195	230	10			0.38	0.57	A	28
	EP		$t \leq 20$	195	230	10			0.38	0.57	A	28
6065A	EP/O, ER/B	T6	$t \leq 5$	225	270	8	115	165	0.51	0.61	A	25
			$5 < t \leq 10$	215	260	8			0.53	0.63	A	24
			$10 < t \leq 25$	200	250	8			0.58	0.66	A	20
	EP/H, ET	T6	$t \leq 5$	215	255	8			0.53	0.65	A	26
			$5 < t \leq 10$	200	250	8			0.58	0.66	A	20
			$t \leq 10$	200	250	8			0.48	0.64	A	20
6106	EP	T6	$t \leq 10$	200	250	8	95	160	0.48	0.64	A	20
6082	EP, ET, ER/B	T4	$t \leq 25$	110	205	14	100	160	0.91	0.78	B	8
	EP/O, EP/H	T5	$t \leq 5$	230	270	8	125	185	0.54	0.69	B	28
	EP/O, EP/H, ET	T6	$t \leq 5$	250	290	8	125	185	0.50	0.64	A	32
			$5 < t \leq 15$	260	310	10			0.48	0.60	A	25
	ER/B	T6	$t \leq 20$	250	295	8			0.50	0.63	A	27
			$20 < t \leq 150$	260	310	8			0.48	0.60	A	25
	DT	T6	$t \leq 5$	255	310	8			0.49	0.60	A	22
			$5 < t \leq 20$	240	310	10			0.52	0.60	A	17
7020	EP, ET, ER/B	T6	≤ 15	290	350	10	205	280	0.71	0.80	A	23
	EP, ET, ER/B	T6	$15 < t \leq 40$	275	350	10			0.75	0.80	A	19
	DT	T6	$t \leq 20$	280	350	10			0.73	0.80	A	18

Продолжение таблицы 6[3.2b]

Обозначения:									
ЕР — прессованный профиль; ЕР/Н — прессованный полый профиль; ЕР/В — прессованные прутки и бруски; ЕР/О — прессованный открытый профиль; ЕТ — прессованная труба; ДТ — труба, экструдированная через оправку.									
¹⁾ Если величины выделены жирным шрифтом, то для некоторых форм изделий могут допускаться увеличенные толшины и/или повышенная механическая прочность, см. стандарты EN и prEN в разделе 1.2.1.3 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011. В этих случаях в качестве $R_{p0,2}$ и R_m можно взять значения f_0 и f_u . При использовании таких более высоких величин необходимо рассчитать соответствующие коэффициенты в зоне термического влияния (HAZ) ρ в соответствии с выражениями (28) и (29) настоящего Пособия для тех же самых величин $f_{0,HAZ}$ и $f_{u,HAZ}$.									
²⁾ Если минимальные показатели растяжения приведены жирным шрифтом, то для некоторых форм изделий или толщин эти показатели могут быть увеличены.									
³⁾ В соответствии со стандартом EN 755-2 применяется следующее правило: «Если поперечное сечение профиля состоит из элементов различных толщин, которые попадают более чем в одну категорию приведенных в таблице значений механических свойств материала, то для всего сечения профиля целиком следует использовать наименьшее из приведенных значений». При этом допускаются исключения, когда можно использовать и более высокое из приведенных значений при условии, что производитель изделия может подтвердить это значение соответствующим сертификатом качества.									
⁴⁾ Значения параметров, относящихся к зоне термического влияния HAZ, действительны при использовании технологии MIG (дуговой сварки металлическим электродом в среде инертного газа) для элементов толщиной до 15 мм. При использовании технологии TIG (дуговой сварки вольфрамовым электродом в среде инертного газа) для сварки сплавов с деформационным упрочнением (сплавы типа 3xxx, 5xxx и в соответствии со стандартом EN AW-8011A) толщиной до 6 мм действительны эти же значения. Однако при использовании технологии TIG для сварки дисперсионно-твердеющих сплавов (сплавы типа 6xxx и 7xxx) толщиной до 6 мм указанные в таблице значения параметров HAZ, а также коэффициенты ρ необходимо умножить на понижающий коэффициент 0,8. При сварке элементов с большей толщиной — если нет других данных — значения параметров HAZ, а также коэффициенты ρ необходимо дополнительно умножить на понижающий коэффициент 0,8 (для сплавов 6xxx и 7xxx) или на коэффициент 0,9 (для сплавов 3xxx, 5xxx и сплавов по стандарту 8011A). Все эти понижающие коэффициенты не относятся к маркам сплавов типа «О».									
⁵⁾ $A = A_{-5,65} \sqrt{A_0}$.									
⁶⁾ BC — класс изгиба, см. п.п. 5.1.5(6.1.4.4), 5.11(6.1.5) и 5.11.1-5.11.6(6.3.1) настоящего Пособия.									
⁷⁾ n_p представляет собой показатель степени в выражении Рамберга-Осгуда для пластичного сопротивления. Его следует использовать только совместно с приведенными в таблице значениями f_0 (равное минимальному стандартизованному значению).									
⁸⁾ Если планируется использовать прессованные или прессованные и экструдированные через оправку изделия-полуфабрикаты сплавов EN AW-5454 или EN AW-5754 марок O/H111 и F/H112 или H14/H24/H34 в соответствии со стандартами EN 755-2 или EN 754-2, то при расчетах можно применять соответствующие значения, приведенные в таблице 7, со следующими изменениями:									
— для EN AW-5454, марка O/H111 (включая F/H112) необходимо заменить приведенные значения $f_{0,HAZ}$ и $f_{u,HAZ}$ на 200 Н/мм ² ;									
— для EN AW-5754, марка O/H111 (включая F/H112) необходимо заменить приведенные значения $f_{0,HAZ}$ и $f_{u,HAZ}$ на 180 Н/мм ² (толщина брусков < 150 мм);									
— для EN AW-5454, марка H14/H24/H34 необходимо заменить приведенные значения f_0 на 180 Н/мм ² , а значения $\rho_{0,HAZ}$ — на 0,56.									

Таблица 7[3.2с]

Характеристические значения 0,2 % условного предела текучести f_0 и предела прочности при растяжении (сопротивления разрыву) f_u (как для несварных элементов, так и для зон термического влияния HAZ), минимального показателя растяжения A , и класса изгиба для деформируемых алюминиевых сплавов — поковок									
Сплав EN AW-	Марка сплава	Толщина, мм	Направление	f_0	f_u	$f_{0,haz}^{1)}$	$f_{u,haz}^{1)}$	A , % ³⁾	Класс долговечности
				Н/мм ²					
5754	H112	150	Продольное (L)	80	180	80	180	15	B
5083	H112	150	Продольное (L)	120	270	120	270	12	B
6082	T6	100	Поперечное (T)	110	260	110	260	10	B
			Продольное (L)	260	310	125 ²⁾	185 ²⁾	6	A
			Поперечное (T)	250	290			5	A

¹⁾ Значения $\rho_{0,haz}$ и $\rho_{u,haz}$ необходимо вычислять по формулам (28) и (29) настоящего Пособия.

²⁾ При использовании технологии MIG (дуговой сварки металлическим электродом в среде инертного газа) для элементов толщиной более 15 мм или технологии TIG (дуговой сварки вольфрамовым электродом в среде инертного газа) для элементов толщиной сверх 6 мм см. Примечание⁴⁾ в таблице 6.

³⁾ $A = A_{-5,65} \sqrt{A_0}$.

Таблица 8[3.3]

Характеристические значения 0,2 % условного предела текучести f_0 и предела прочности при растяжении (сопротивления разрыву) f_u для литых алюминиевых изделий — литье методом свободной заливки форм					
Сплав	Технологический процесс литья	Марка сплава	f_0 (f_{0c})	f_u (f_{uc})	A, % ¹⁾
EN AC-42100	Литье в постоянную форму	T6	147	203	2,0
	Литье в постоянную форму	T64	126	175	4
EN AC-42200	Литье в постоянную форму	T6	168	224	1,5
	Литье в постоянную форму	T64	147	203	3
EN AC-43000	Литье в постоянную форму	F	63	126	1,25
EN AC-43300	Литье в постоянную форму	T6	147	203	2,0
	Литье в песчаную форму	T6	133	161	1,0
	Литье в постоянную форму	T64	126	175	3
EN AC-44200	Литье в постоянную форму	F	56	119	3
	Литье в постоянную форму	F	49	105	2,5
EN AC-51300	Литье в постоянную форму	F	70	126	2,0
	Литье в песчаную форму	F	63	112	1,5
¹⁾ Требования относительно растяжения при проектировании литых элементов см. С.3.4.2(1) СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011.					

Таблица 9[3.4]

Минимальные значения 0,2 % условного предела текучести f_0 и предела прочности при растяжении (сопротивления разрыву) f_u для болтов и заклепок							
Материал	Тип соединительного элемента	Численное обозначение сплава: EN AW-	Химическое обозначение сплава EN AW-	Состав или класс	Диаметр	f_0 ⁷⁾ Н/мм ²	f_u ⁷⁾ Н/мм ²
Алюминевый сплав	Сплошные заклепки ¹⁾	5019	AlMg5	H111	≤20	110	250
				H14, H34	≤18	210	300
		6082	AlSiMgMn	T4	≤20	110	205
				T6	≤20	240	300
	Болты ²⁾	5754	AlMg3	4)	≤10	230	270
		(AL1) ³⁾			10 < d ≤25	180	250
		5019	AlMg5	4)	≤14	205	300
		(AL2) ³⁾			14 < d ≤36	200	280
		6082	AlSiMgMn	4)	≤6	250	320
		(AL3) ³⁾	14 < d ≤36		260	310	
Сталь	Болты ⁵⁾			4.6	≤39	240	400
				5.6	≤39	300	500
				6.8	≤39	480	600
				8.8	≤39	640	800
				10.9	≤39	900	1000
Нержавеющая сталь	Болты ⁶⁾	A2, A4		50	≤39	210	500
		A2, A4		70	≤39	450	700
		A2, A4		80	≤39	600	800
¹⁾ См. п.3.3.2.1(3), 3.3.2.1(5) СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011. ²⁾ См. п.3.3.2.1(3) 3.3.2.1(4)СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011. ³⁾ Обозначение материала в соответствии со стандартом EN 28839. ⁴⁾ Обозначение класса в соответствии со стандартом EN 28839 отсутствует. ⁵⁾ Обозначение класса в соответствии со стандартом EN ISO 898-1. ⁶⁾ Обозначение и класс в соответствии со стандартом EN ISO 3506-1. ⁷⁾ Приведенные значения для сплошных заклепок меньше, чем значения, приведенные в EN 754 (холоднотянутые прутки) или в EN 1301 (проволока), из которых сплошные заклепки изготавливаются посредством холодной формовки. Для 0,2 % условного предела текучести стандарт EN 1301 определяет, конечно, только типичные значения, однако приведенные выше значения могут рассматриваться как взятые «для большей верности». Во всяком случае, при проектировании соединений категории А (допустимая нагрузка) значения предельной прочности являются основой для расчета допустимой нагрузки болта или заклепки.							

Таблица 10

Частные коэффициенты для критических предельных состояний	
сопротивление поперечных сечений независимо от класса	$\gamma_{M1} = 1.1$
сопротивление элементов неустойчивости, оцениваемой с помощью проверок элемента	
сопротивление сжатых поперечных сечений разрыву	$\gamma_{M2} = 1.25$
сопротивление соединений	см. таблицу 11

Таблица 11[8.1]

Частные коэффициенты γ_M для соединений	
Сопротивление элементов и поперечных сечений	Коэффициенты γ_{M1} и γ_{M2}
Сопротивление болтовых соединений	$\gamma_{M2} = 1,25$
Сопротивление клепаных соединений	
Сопротивление пластин в опорах	
Сопротивление штифтовых соединений	$\gamma_{Mp} = 1,25$
Сопротивление сварных соединений	$\gamma_{Mw} = 1,25$
Сопротивление проскальзыванию: — для гибридных соединений или соединений под усталостной нагрузкой; — для соединений других конструкций; — для критических предельных состояний	$\gamma_{M3} = 1,1$ $\gamma_{M3} = 1,1$ $\gamma_{M3} = 1,25$
Сопротивление адгезионных соединений	$\gamma_{Ma} \geq 3,0$
Сопротивление смятию пустотелых болтов для закачивания застывающего фиксирующего материала (инъекционных болтов)	$\gamma_{M4} = 1,0$
Сопротивление соединений в полых секциях решетчатых балок, ферм	$\gamma_{M5} = 1,0$
Сопротивление штифтов в предельном состоянии эксплуатационной пригодности	$\gamma_{M6,ser} = 1,0$
Предварительная нагрузка высокопрочных болтов	$\gamma_{M7} = 1,0$

4 РАСЧЕТ ЭЛЕМЕНТОВ АЛЮМИНИЕВЫХ КОНСТРУКЦИЙ

4.1 Расчетные предпосылки

4.1.1[2.4.3] Расчетное значение прочности поперечного сечения или элемента алюминиевых конструкций определяется по формуле:

$$R_d = \frac{1}{\gamma_M} R_k (\eta_1 X_{k1}; \eta_i X_{ki}; a_d) \quad (2)$$

где R_k — характеристическое значение сопротивления поперечного сечения или элемента, определенное в соответствии с характеристическими или номинальными значениями показателей строительных материалов, а также размеров поперечных сечений;

γ_M — общий частный коэффициент надежности (таблица 10);

η_i — коэффициент пересчета для показателей образца и определяющих показателей элемента конструкции, который в среднем учитывает влияние:

- изменения объема и масштаба;
- изменения влажности и температуры;
- других основных параметров;

X_{ki} — характеристическое значение показателя строительного материала или изделия;

a_d — расчетное значение геометрической величины.

4.1.2 Согласно п. 5.1 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011 анализ должен основываться на расчетных моделях (расчетных схемах) конструкции, которые соответствуют рассматриваемому предельному состоянию. Допускается применять приближенные методы расчета и более простые расчетные схемы, основанные на разделении сложных пространственных систем на плоские конструкции и отдельные элементы. При этом необходимо учитывать особенности взаимодействия элементов конструкции между собой и с основанием, а также поведение поперечных сечений, соединений и опор.

4.1.3 Расчет алюминиевых конструкций следует выполнять по методу предельных состояний. Цель расчета — не допустить с определенной обеспеченностью наступления критических предельных состояний или перехода за предельные состояния эксплуатационной пригодности в течение всего срока эксплуатации здания или сооружения.

При расчете несущей способности сечения или элемента конструкции наибольшее возможное за время эксплуатации (или возведения) усилие в элементе от расчетных предельных нагрузок и воздействий не должно превышать соответствующей наименьшей предельной несущей способности сечения или элемента с учетом начальных дефектов (несовершенств), как то совокупность геометрических отклонений формы и размеров, факторов, влияющих на свойства материала, и отступлений от принятой расчетной схемы, возникающих при изготовлении, транспортировании и монтаже конструкции.

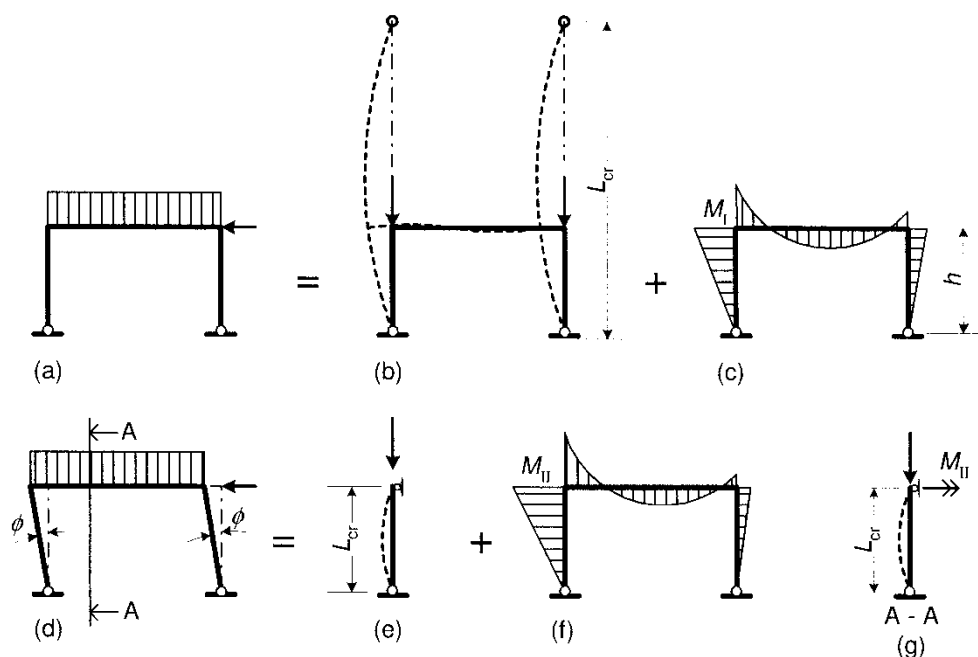
При расчете конструкций по предельным состояниям эксплуатационной пригодности перемещения (деформации), соответствующие расчетным значениям предельных

нагрузок и воздействий, не должны превышать предельных значений перемещений (деформаций), устанавливаемых нормативной документацией по условиям необходимости прекращения эксплуатации в связи с качественным нарушением геометрической формы. Условия расчета допускается представлять в форме проверки усилий или напряжений, определяемых с учетом неупругих деформаций.

При расчете конструкций по предельным состояниям эксплуатационной пригодности перемещения, параметры колебаний и изменения положения от расчетных эксплуатационных нагрузок (характеристических нагрузок) не должны превышать предельно допустимых параметров, установленных в нормативной документации.

4.1.4 В соответствии с п. 5.3.2 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011 анализ упругой устойчивости конструкции в рассматриваемой плоскости изгиба позволяет получить предполагаемую схему общих и местных дефектов (несовершенств).

При этом учитывается изгиб как в плоскости, так вне ее, включая крутящий изгиб с симметричным и несимметричным прогибом, в самом неблагоприятном направлении и самой неблагоприятной формы.



Метод эквивалентной колонны (рис. (a), (b) и (c)), где (a) — схема и нагрузка, (b) — длина эквивалентной колонны, (c) — момент первого порядка.

Метод эквивалентного колебания (рис. (d), (e), (f) и (g)), где (d) — схема, нагрузка и смещение, (e) — первоначальный местный прогиб и предельная длина продольного изгиба, (f) — момент 2-го порядка, включающий момент от дефекта колебаний, (g) — длина эквивалентной колонны, первоначальный местный прогиб и предельная длина продольного изгиба

**Рисунок 1[5.1]. Эквивалентная длина продольного изгиба
и эквивалентные дефекты колебаний**

[5.3.2] В случае потери устойчивости в режиме колебания, влияние дефектов каркасов можно определить посредством эквивалентного дефекта, включающего:

а) общие первоначальные дефекты колебаний (рисунок 1(d)):

$$\varphi = \varphi_0 \alpha_h \alpha_m, \quad (3)$$

где:

φ_0 — базовое значение: $\varphi_0 = 1/200$;

α_h — понижающий коэффициент для высоты h , применительно к колоннам;

$$\alpha_h = \frac{2}{\sqrt{h}}, \text{ но } \frac{2}{3} \leq \alpha_h \leq 1,0,$$

h — высота конструкции в метрах;

α_m — понижающий коэффициент для количества колонн в ряду:

$$\alpha_m = \sqrt{0,5 \left(1 + \frac{1}{m} \right)}$$

m — количество колонн в ряду, включая только те, которые несут вертикальную нагрузку N_{ed} , составляющую не менее 50% от средней на колонну в рассматриваемой вертикальной плоскости.

б) дефекты относительного первоначального изгиба элементов (таблица 12):

$$e_0 / L, \quad (4)$$

где L — длина элемента.

Таблица 12[5.1]

Расчетные значения дефекта первоначального изгиба e_0 / L		
Класс изгиба	Анализ упругости	Пластический анализ
	e_0 / L	e_0 / L
A	1/300	1/250
B	1/200	1/150

Дефекты колебаний для строительных каркасов можно не учитывать, если

$$H_{Ed} \geq 0,15 V_{Ed}, \quad (5)$$

где H_{Ed} — расчетное значение горизонтальной силы;

V_{Ed} — расчетное значение вертикальной силы.

4.1.5 Согласно п. 5.3.2 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011 при воздействии горизонтальных сил на диафрагму перекрытия необходимо учитывать конфигурацию дефектов в соответствии с рисунком 2, где φ — дефект колебаний, полученный из выражения (3) для одноэтажного сооружения с высотой h , см.

Для каркасов, чувствительных к эффектам 2-го порядка, в структурном анализе каркаса необходимо дополнительно к общим дефектам колебаний учитывать местные дефекты прогиба для каждого сжатого элемента, если имеется, хотя бы одно место сопряжения, находящееся под нагрузкой, на одном конечном элементе:

$$\bar{\lambda} > 0,5 \sqrt{\frac{A f_0}{N_{Ed}}} \quad (6)$$

где N_{Ed} — расчетное значение силы сжатия;

$\bar{\lambda}$ — расчетное значение коэффициента относительной гибкости в одной плоскости для элемента, который считается закрепленным шарнирно на концах.

4.1.6 Согласно п. 5.3.2 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011 влияние первоначальных дефектов при колебаниях и дефектов прогиба можно заменить системой эквивалентных горизонтальных сил, введенных для каждой колонны, см. рисунок 2 и рисунок 3. Эти первоначальные дефекты колебаний могут прикладываться по всем горизонтальным направлениям, но рассматриваются только по одному в каждом направлении.

Для многоэтажных каркасов (типа «балки с колоннами») при использовании метода эквивалентных сил, их необходимо прикладывать к каждому этажу и к покрытию.

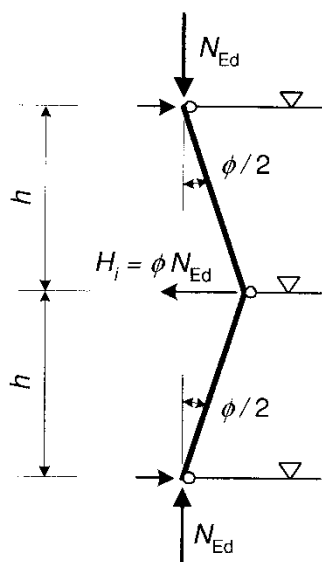
4.1.7 В соответствии с п. 5.3.2 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011 в случае асимметричных колебаний в двух противоположных направлениях учитывается возможное крутящее воздействие на конструкцию (рисунок 4).

4.1.8[5.3.2] Для определения единственного общего дефекта для всей конструкции и частных дефектов для отдельных проверяемых элементов может применяться коэффициент предельного режима упругой устойчивости η_{cr} . Эквивалентный геометрический дефект может быть выражен в следующем виде:

$$\eta_{init}(x) = e_{0,d} \frac{N_{cr,m}}{EI_m |\eta''_{cr}|_{max}} \eta_{cr}(x) \quad (7)$$

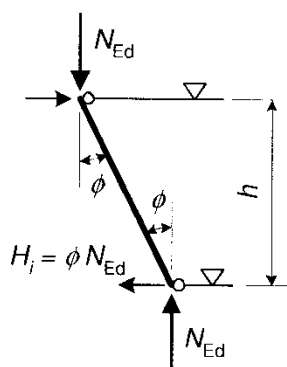
где

a)



a) два этажа или более;

b)



b) один этаж

Рисунок 2[5.2]. Схема дефектов колебаний ϕ_0 для горизонтальных сил, действующих на диафрагмы перекрытий.

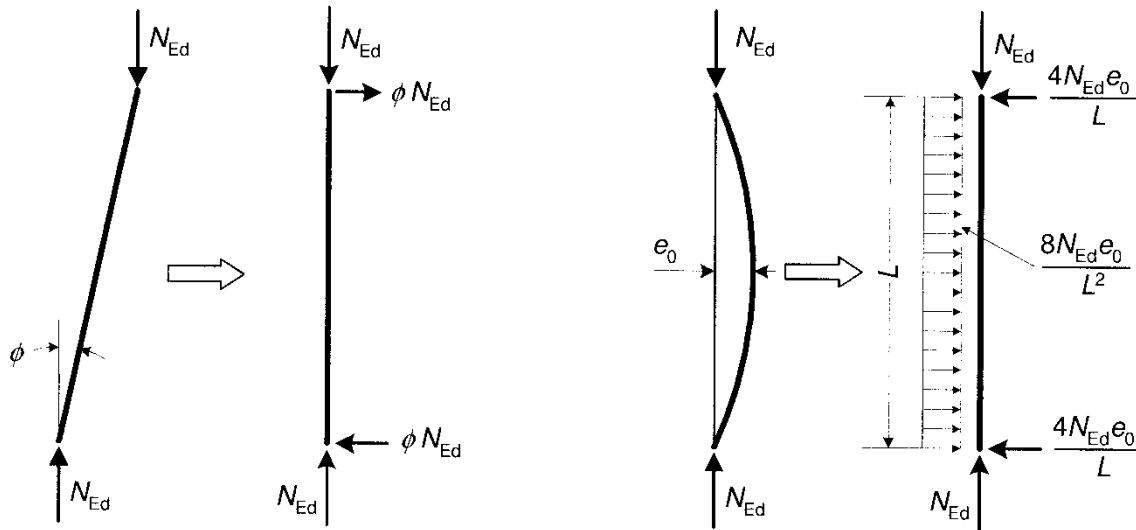
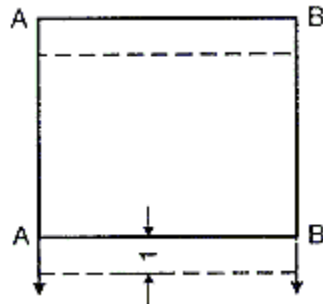


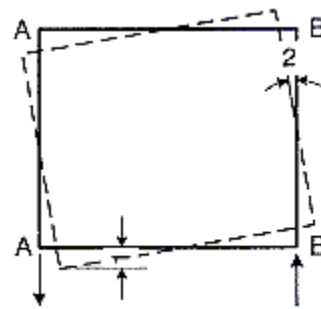
Рисунок 3[5.3]. Замена первоначальных дефектов эквивалентными горизонтальными силами

а)



а) колебания в плоскостях А–А и В–В
в одном направлении;
1— поступательные колебания;

б)



б) колебания в плоскостях А–А и В–В
в противоположных направлениях;
2— крутящие колебания.

Рисунок 4[5.4]. Поступательные и крутящие эффекты (вид сверху):

$$e_{0,d} = \alpha(\bar{\lambda}_m - \bar{\lambda}_0) \frac{M_{Rk,m}}{N_{Rk,m}} \frac{1 - \chi \bar{\lambda}_m^2}{1 - \chi \bar{\lambda}_m^2} \text{ для } \bar{\lambda}_m > \bar{\lambda}_0 \quad (8)$$

и m — обозначает поперечное сечение, где $|\eta''_{cr}|$ достигает максимума;

α — коэффициент заполнения для соответствующей кривой изгиба (таблица 17);

$\lambda_m = \sqrt{\frac{N_{Rk,m}}{N_{cr,m}}}$ — коэффициент относительной гибкости;

$\bar{\lambda}_0$ — предельное значение, приведенное в таблице 17;

χ — понижающий коэффициент для соответствующей кривой прогиба (п. 5.11.3(6.3.1.2));

$N_{cr,m} = \alpha_{cr} N_{Ed}$ — значение осевой силы в поперечном сечении m , где достигнут критический предел упругой устойчивости;

α_{cr} — минимальный коэффициент, на который необходимо умножить осевую силу N_{Ed} для достижения критического предела упругой устойчивости;

$M_{Rk,m}$ — характеристическое сопротивление поперечного сечения изгибающему моменту в соответствии с выражением (41);

$N_{Rk,m}$ — характеристическое сопротивление поперечного сечения нормальной силе в соответствии с выражением (38);

$EI_m |\eta''_{cr}|_{\max}$ — изгибающий момент в поперечном сечении m при отклонении η''_{cr} ;

η''_{cr} — вторая производная от $\eta_{cr}(x)$.

При определении повышающего коэффициента α_{cr} принимается, что элементы конструкции нагружены осевыми силами N_{Ed} , полученными из упругого расчета 1-го порядка при действии расчетных нагрузок.

Соотношение $\frac{1}{EI_m |\eta''_{cr}|_{\max}}$ может быть заменено на $\frac{|\eta''|_{\max}}{|M_{\eta_{cr,m}}^{\text{II}}| |\eta_{cr}|_{\max}}$, где

$|\eta_{cr}|_{\max}$ — максимальное отклонение при потере устойчивости конструкции (можно принять произвольное значение);

$|\eta''|_{\max}$ — максимальное отклонение конструкции, рассчитанное при использовании анализа 2-го порядка при учете дефекта в форме критической потери упругой устойчивости η_{cr} при максимальной амплитуде $|\eta_{cr}|_{\max}$;

$M_{\eta_{cr,m}}^{\text{II}}$ — изгибающий момент в поперечном сечении m , рассчитанный при заданном отклонении $|\eta|_{\max}$.

При этом изгибающие моменты в конструкции при отклонении η_{init} с поправкой на эффекты 2-го порядка можно рассчитать из соотношения:

$$M_{\eta_{\text{init}}}^{\text{II}}(x) = \frac{e_{0,d} N_{cr,m} |\eta_{\text{II}}|_{\max}}{M_{\eta_{cr,m}}^{\text{II}} |\eta_{cr}|_{\max}} M_{\eta_{cr}}^{\text{II}}(x) \quad (9)$$

Выражение (7) основано на предположении, что дефект η_{init} , имеющий форму критической потери упругой устойчивости η_{cr} , имеет ту же самую максимальную кривизну, что и эквивалентный унифицированный элемент.

4.1.9[5.3.3] При назначении системы связей для придания конструкции поперечной устойчивости в пределах длин балок или сжатых элементов, влияние дефектов учитывается при помощи эквивалентных геометрических дефектов закрепленных элементов при помощи выражения для первоначального дефекта прогиба:

$$e_0 = \alpha_m L / 500, \quad (10)$$

где L — пролет элемента и

$$\alpha_m = \sqrt{0,5 \left(1 + \frac{1}{m}\right)} \quad (11)$$

в которой, m — количество элементов, подлежащих ограничению.

Первоначальные дефекты прогиба, которые ограничиваются системой связей, можно заменить эквивалентной стабилизирующей силой, как показано на рисунке 5:

$$q_0 = \sum N_{Ed} 8 \frac{e_0 + \delta_q}{L^2} \quad (12)$$

где

δ_q — отклонение системы связей в плоскости вследствие воздействия q_0 и любых внешних нагрузок, вычисляемых при анализе первого порядка.

Величину δ_q можно принять равным 0 при применении теории второго порядка. Так как δ_q в (12) зависит от q_0 , то необходимо применять метод итераций.

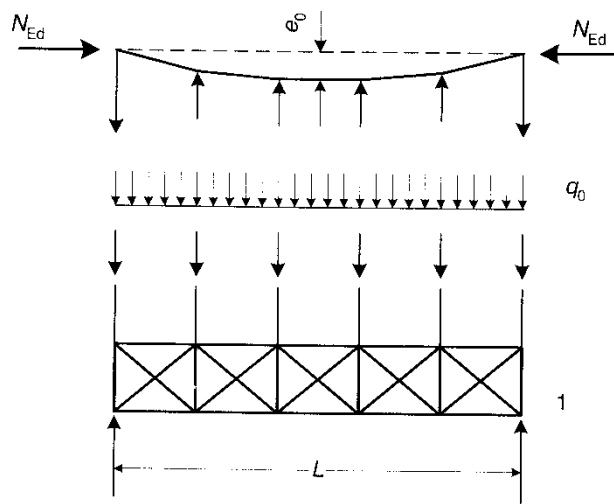
В случае применения системы подкосов для обеспечения устойчивости сжатого пояса балки постоянной высоты силу N_{Ed} на рисунке 5 можно получить из:

$$N_{Ed} = M_{Ed}/h, \quad (13)$$

где M_{Ed} — максимальный момент в балке;

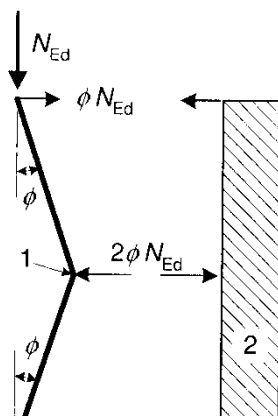
h - общая высота балки.

4.1.10 Согласно п. 5.3.3 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011 в случае соединения балок или сжатых элементов внахлестку, необходимо произвести проверку сопротивления системы связей действию локальной силы, равной $\alpha_m N_{Ed}/100$, и приложенной к ней от балки или сжатого элемента в зоне стыка, и возможность ее передачи близлежащим точкам, в которых данный элемент ограничен (рисунок 6).



e_0 - дефект; q_0 — эквивалентная сила на единицу длины; 1 — система связей;
 N_{Ed} — равномерно распределенная сила в пределах пролета L системы связей.

Рисунок 5[5.5]. Эквивалентная стабилизирующая сила



$$\varphi = \alpha_m \varphi_0, \text{ где } \varphi_0 = 1/200$$

$$2\varphi N_{Ed} = \alpha_m N_{Ed}/100$$

1 — соединение внахлестку; 2 — система связей

Рисунок 6[5.6]. Связывающие силы в сжатых элементах при соединениях внахлестку

4.1.11 Согласно п. 5.4.1 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011 для определения внутренних сил и моментов применимы следующие методы расчета:

- общий упругий расчет;
- общий расчет с учетом пластических деформаций.

4.1.12 В соответствии с п. 5.4.2 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011 общий упругий расчет применим для всех случаев напряженно-деформированного состояния элементов конструкций и основан на предположении, что деформативность материала является линейной, при любых уровнях напряжения. Внутренние силы и моменты можно вычислить в соответствии с общим упругим расчетом, даже если сопротивление поперечного сечения определено с учетом его пластического сопротивления. Общий упругий расчет также можно применять для определения сопротивления поперечных сечений при местном изгибе.

4.1.13 Согласно п. 5.4.1 и п. 5.4.3 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011 общий расчет с учетом пластических деформаций применим только в том случае, если конструкция имеет достаточный предельный угол поворота сечения в точке фактического расположения пластического шарнира, образующемся в элементах или в соединениях. Если пластический шарнир возникает в элементе, то его поперечные сечения должны иметь двойную симметрию или моносимметрию в той же плоскости, что и плоскость вращения пластического шарнира. В случае образования пластического шарнира в соединении, то оно либо должно иметь достаточную прочность для сохранения шарнира в элементе, либо должно выдерживать сопротивление пластической деформации при достаточном вращении. Информация по предельному углу поворота сечения приведена в приложении G СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011. Только определенные сплавы имеют необходимую вязкость для обеспечения достаточного угла поворота сечения.

Общий расчет с учетом пластических деформаций не применим к балкам с попе-

речными швами в растянутой зоне элемента в местах расположения пластического шарнира. Рекомендации для пластического общего анализа балок приведены в приложении Н СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011.

Общий расчет с учетом пластических деформаций применим только для стабильных элементов.

5 КРИТИЧЕСКИЕ ПРЕДЕЛЬНЫЕ СОСТОЯНИЯ ДЛЯ ЭЛЕМЕНТОВ

5.1 Расчетные предпосылки

5.1.1 Согласно п. 6.1.2 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011 при определении сопротивления элементов используют характеристическое значение прочности в зависимости от используемых материалов:

f_0 — характеристическое значение прочности при изгибе и общей деформации при растяжении и сжатии;

f_u — характеристическое значение прочности для определения локальной несущей способности рабочего сечения при растяжении или сжатии. Характеристическое значение 0,2% условного предела текучести f_0 и предела прочности при растяжении f_u деформируемых алюминиевых сплавов установлено в п. 3.1(3.2.2).

К различным характеристическим значениям сопротивления применяют частные коэффициенты γ_M (п. 3.4(6.1.3)).

5.1.2 В соответствии с п. 6.1.4 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011 классификация поперечных сечений заключается в определении степени, до которой ограничены их прочность и предельный угол поворота при сопротивлении местному продольному изгибу.

5.1.3 Согласно п. 6.1.4 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011 различают четыре класса поперечных сечений:

— к классу 1 (пластичные профили) относятся те сечения, которые могут образовывать шарнир пластичности с предельным углом поворота сечения, необходимым для расчета с учетом пластических деформаций, без уменьшения сопротивления;

— к классу 2 (сжатые профили) относятся те сечения, которые могут образовать свой изгибающий момент в шарнире пластичности, но имеют ограниченный предельный угол поворота сечения вследствие местного продольного изгиба;

— к классу 3 (полусжатые профили) относятся сечения, в которых расчетное напряжение в крайнем сжатом волокне алюминиевого элемента может достигать своего предела прочности, а локальный продольный изгиб может компенсировать полный момент сопротивления при пластической деформации;

— к классу 4 (тонкостенные профили) относятся сечения, в одном или более участках, которых действует местный продольный изгиб вплоть до момента достижения ими условного предела текучести.

Классификация поперечного сечения зависит от отношения ширины к толщине сжатых участков.

Сжатые участки включают все элементы поперечного сечения, которые находятся под

действием комбинации рассматриваемой сложной нагрузки либо полностью, либо частично.

Различные участки, подверженные сжатию в поперечном сечении (например, ребро или торец) могут относиться к разным классам. Поперечное сечение классифицируется в соответствие с наивысшим классом (наименее благоприятным) его сжатых элементов.

При установлении класса идентифицируются следующие основные типы тонкостенных элементов:

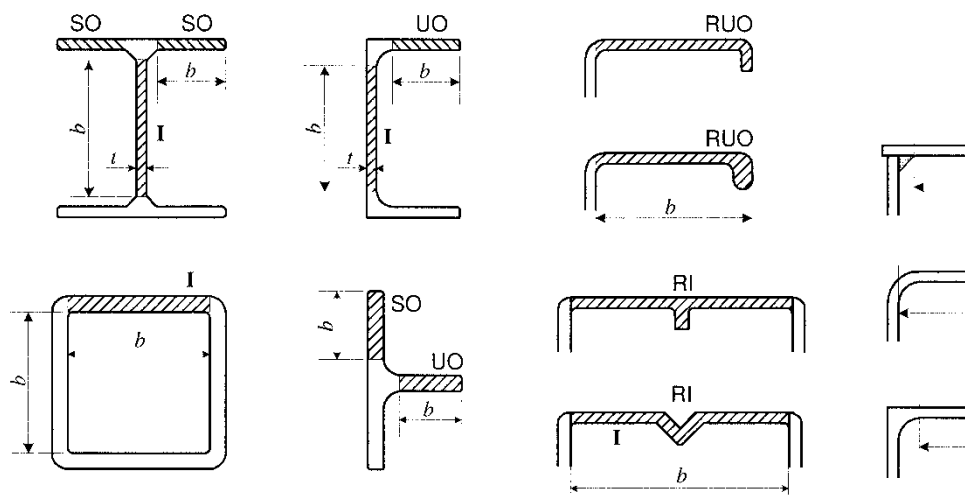
- а) плоские наружные элементы;
- б) плоские внутренние элементы;
- с) изогнутые внутренние элементы.

Эти элементы могут быть усилены с помощью продольных ребер жесткости, либо с помощью изогнутых кромок или утолщений (рисунок 7).

5.1.4[6.1.4.4] Классификация элементов поперечных сечений зависит от значений параметра β , характеризующего гибкость, следующим образом:

Элементы балок		Элементы телескопических опор	
$\beta \leq \beta_1$,	: класс 1	$\beta \leq \beta_2$: класс 1 или 2
$\beta_1 < \beta \leq \beta_2$: класс 2	$\beta_2 < \beta \leq \beta_3$: класс 3
$\beta_2 < \beta \leq \beta_3$: класс 3	$\beta_3 < \beta$: класс 4
$\beta_3 < \beta$: класс 4		

Значения параметров β_1 , β_2 и β_3 представлены в таблице 13.



(a) Не усиленный

(b) Усиленный

(c) Варианты угловых элементов

Обозначения:

SO — внешние симметричные элементы;

UO — внешние не симметричные элементы;

I — внутреннее поперечное сечение;

RI — внутреннее усиление;

RUO — усиленный асимметричный
внешний элемент

Рисунок 7[6.1]. Различные типы поперечных сечений элементов

5.1.5[6.1.4.4] В таблице 13 элементарное поперечное сечение рассматривается со сварными швами, если оно содержит сварку по краю сечения или в какой-нибудь точке в пределах ее ширины. Однако элементарное поперечное сечение можно рассматривать без

сварных швов, если они пересекают ось элемента и расположены в месте приложения поперечной сжимающей нагрузки.

Классификация элементарного поперечного сечения со сварными швами не зависит от степени HAZ.

При классификации изгибаемых участков элемента, если имеются менее нагруженные участки, чем наиболее нагруженные элементы сечения, применяется следующее выражение: $\varepsilon = \sqrt{(250/f_0)(z_1/z_2)}$, где

z_1 — расстояние от нейтральной оси изгиба эффективного сечения до наиболее нагруженных элементов; z_2 — расстояние от нейтральной оси изгиба эффективного сечения до рассматриваемого элемента; z_1 и z_2 должны определяться исходя из эффективного сечения с помощью итерации (минимум два шага).

Таблица 13[6.2]

Параметры, определяющие изгиб, β_1/ε , β_2/ε и β_3/ε						
Классификация материала согласно таблицам 5-7 главы 3	Внутренняя часть			Внешняя часть		
	β_1/ε	β_2/ε	β_3/ε	β_1/ε	β_2/ε	β_3/ε
Класс А, без сварных швов	11	16	22	3	4.5	6
Класс А, со сварными швами	9	13	18	2.5	4	5
Класс В, без сварных швов	13	16.5	18	3.5	4.5	5
Класс В, со сварными швами	10	13.5	15	3	3.5	4
$\varepsilon = \sqrt{\frac{250}{f_0}}$, где f_0 в Н/мм ²						

5.1.6[6.1.4.3] Параметр β характеризует восприимчивость неусиленного плоского элемента к локальному изгибу и может иметь следующие значения:

а) плоские внутренние элементы, не подверженные растяжению или плоские наружные элементы, подверженные растяжению или пиковому сжатию в опоре:

$$\beta = b/t; \quad (14)$$

б) внутренние элементы, подверженные растягивающим усилиям, действующим вдоль центральной нейтральной оси:

$$\beta = 0.40b/t; \quad (15)$$

с) внутренние элементы, подверженные растяжению и внешние элементы, подверженные пиковым нагрузкам в основании:

$$\beta = \eta b/t, \quad (16)$$

где b — ширина поперечного сечения элемента;

t — толщина поперечного сечения;

η — градиент напряжения, заданный с помощью выражений:

$$\eta = 0,70 + 0,3\psi \quad (l \geq \psi \geq -l) \quad (17)$$

$$\eta = 0,80/(1 - \psi) \quad ((\psi < -1), \text{ см. рисунок 8,} \quad (18)$$

где ψ — представляет собой отношение напряжения, приложенного к краям рассматриваемого плоского элемента, к максимальному напряжению при сжатии.

Как правило, нейтральная ось должна быть упругой, но при проверке того, какому классу принадлежит сечение, классу 1 или классу 2, допустимо использовать пластичную нейтральную ось.

При расчете параметров β , все элементы поперечного сечения считаются свободно опертыми, даже если они являются упругозащемленными или жестко зафиксированными.

5.1.7[6.1.4.3] При рассмотрении восприимчивости усиленного плоского элемента к локальному изгибу, необходимо рассматривать три возможных варианта изгиба, показанных на рисунке 9. Для каждого варианта должны быть найдены отдельные значения β . Варианты могут быть следующими:

а) вариант 1: усиленный элемент изгибается как блок, так что усилитель деформируется так же, как и сам элемент, подверженный изгибу (поперечный изгиб).

б) вариант 2: отдельные участки элемента и усилитель изгибаются как отдельный блок с жесткими связями внутри него.

с) вариант 3: представляет собой комбинацию вариантов 1 и 2, в которой общий изгиб всего элемента состоит из элементарных изгибов отдельных участков.

Это показано на рисунке 9(с).

5.1.8. Согласно п.п. 6.1.4.3 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011 параметр β определяется следующим образом:

а) вариант 1, равномерное сжатие, стандартное усиление.

Усилитель представляет собой одностороннее ребро или утолщение, равное толщине элемента:

$$\beta = \eta b/t, \quad (19)$$

где η задается с помощью выражений (7), (8) или (9), или может быть определено из графиков, представленных на рисунках 9(а), 9(б) или 9(с). Глубина ребра s или утолщение кромки измеряется от внутренней поверхности пластины:

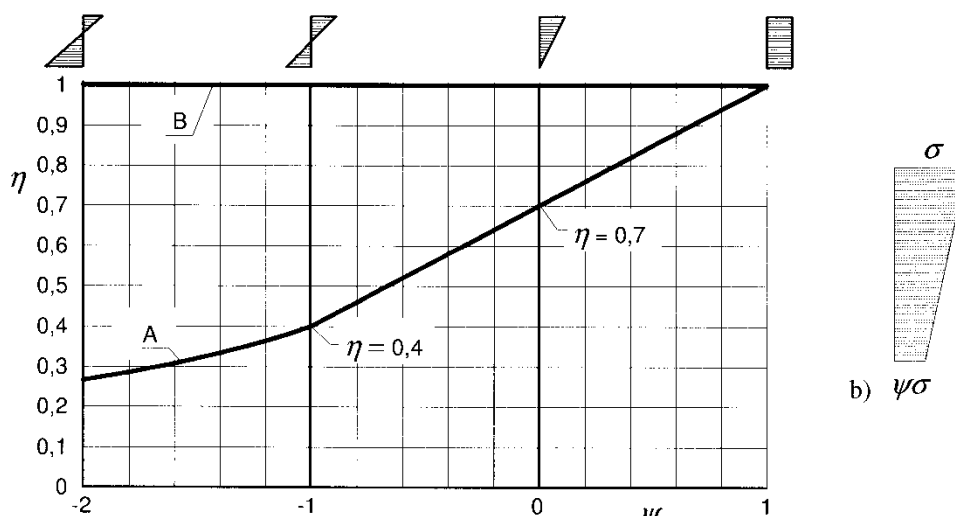


Рисунок 8[6.2]. Значения η для плоских внутренних элементов, подверженных

ψ

действию градиента напряжений. Для внутренних или внешних элементов (пиковое сжатие в основании), используется кривая А. Для внешних элементов (пиковое сжатие в вершине) используется прямая В

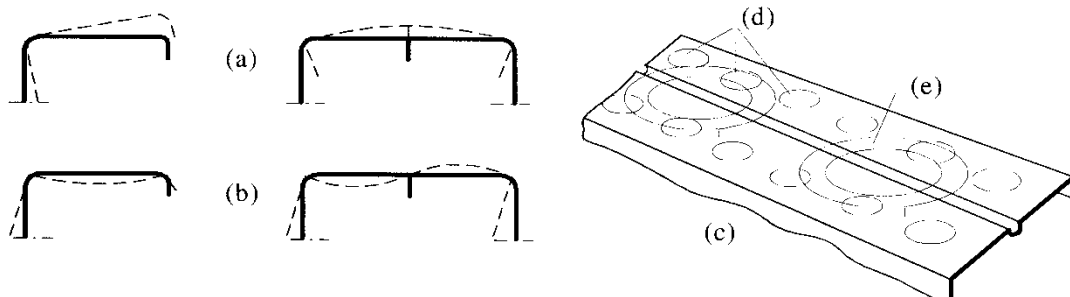


Рисунок 9[6.3]. Варианты деформации плоского усиленного элемента:
(a) — вариант 1; (b) — вариант 2; (c) — вариант 3; (d) — элементарные изгибы;
(e) — полная деформация усиленного элемента

$$\eta = \frac{1}{\sqrt{1+0,1\left(\frac{c}{t}-1\right)^2}} \quad (\text{рисунок 9a}) \quad (20)$$

$$\eta = \frac{1}{\sqrt{1+2,5\frac{\left(\frac{c}{t}-1\right)^2}{\frac{b}{t}}}} \geq 0,5 \quad (\text{рисунок 9b}) \quad (21)$$

$$\eta = \frac{1}{\sqrt{1+2,5\frac{\left(\frac{c}{t}-1\right)^2}{\frac{b}{t}}}} \geq 0,33 \quad (\text{рисунок 9c}) \quad (22)$$

б) вариант 1, равномерное сжатие, нестандартное усиление.

Нестандартной формы усилитель может быть заменен эквивалентной кромкой или утолщением, равным по толщине самому элементу (t). Величина c для эквивалентной кромки или утолщения выбирается таким образом, чтобы осевой момент инерции сечения усилителя относительно средней плоскости плоского элемента был равен моменту инерции нестандартного усилителя относительно той же самой плоскости. Альтернативный метод представлен в разделе 6.

в) вариант 1, равномерное сжатие, сложный усилитель.

При других нестандартных формах усилителя, не соответствующих указанным выше:

$$\beta = \frac{b}{t} \left(\frac{\sigma_{cr,0}}{\sigma_{cr}} \right)^{0,4} \quad (23)$$

где σ_{cr} — критическое напряжение упругости для усиленной части, имеющей простые кромки;

σ_{cr0} — критическое напряжение упругости для не усиленной части, имеющей

простые кромки.

г) вариант 1, при действии распределенной нагрузки.

Величина β определяется из выражения (23), где σ_{cr} и σ_{cr0} относятся к нагрузке, приложенной в наиболее сжатой части элемента.

д) вариант 2.

Величина β определяется отдельно для каждого элемента, в соответствии с выражением (14).

5.1.9[6.1.4.3] Способность к локальному продольному изгибу равномерно сжатой-изогнутой, не усиленной внутренней части определяется с помощью параметра β :

$$\beta = \frac{b}{t} \frac{1}{\sqrt{1 + 0,006 \frac{b^4}{R^2 t^2}}} \quad (24)$$

где R — радиус кривизны в точке, соответствующей средней толщине материала;

b — ширина элемента в точке, соответствующей средней толщине материала;

t — толщина.

Вышеуказанное выражение истинно, если $R/b > 0,1b/t$. Сильно искривленные участки требуют специального изучения или проверки.

5.1.10[6.1.4.3]. Способность к локальному продольному изгибу тонкостенной круглой трубы определяется, либо при однородном сжатии, либо при изгибе, с помощью параметра β :

$$\beta = 3 \sqrt{\frac{D}{t}} \quad (25)$$

где D — диаметр трубы в точке, соответствующей средней толщине материала.

5.1.11[6.1.5] Локальный продольный изгиб в элементах класса 4, как правило, учитывается путем замены фактического сечения на эффективное. Эффективное сечение получается с помощью коэффициента локального изгиба ρ_c , используемого по мере уменьшения толщины. ρ_c применяется к любому элементу класса 4, имеющему однородную толщину, который полностью или частично подвержен сжатию. Участки, которые не однородны по толщине, требуют специального изучения.

Коэффициент ρ_c определяется с помощью выражений (26) или (27), отдельно для различных участков сечения, в единицах отношения β/ε , где ε определяется из таблицы 13 и константы C_1 и C_2 из таблицы 14. Взаимосвязь между ρ_c и β/ε представлена на рисунке 11.

$$\rho_c = 1,0 \text{ если } \beta \leq \beta_3; \quad (26)$$

$$\rho_c = \frac{C_1}{\left(\frac{\beta}{\varepsilon}\right)} - \frac{C_2}{\left(\frac{\beta}{\varepsilon}\right)^2}, \text{ если } \beta > \beta_3 \quad (27)$$

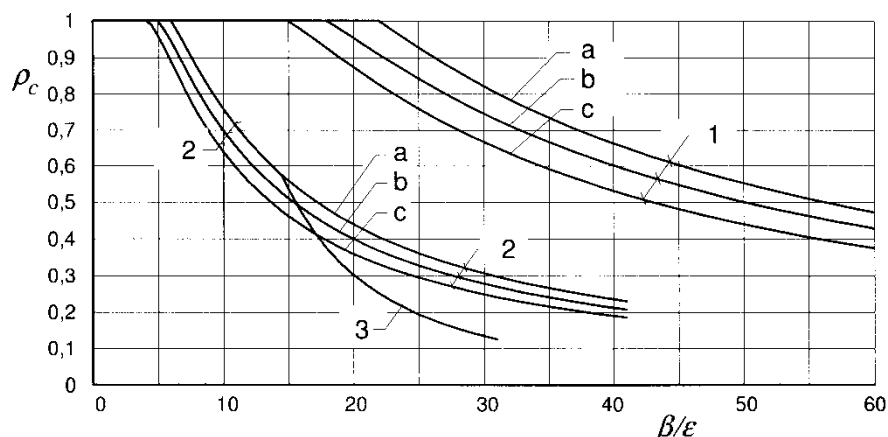
Для плоских внешних элементов в асимметричных поперечных сечениях (рисунок 7), ρ_c задается с помощью вышеуказанных выражений для плоских внешних элементов в симметричных сечениях, но не более $120/(\beta/\varepsilon)^2$.

Для усиленных элементов поперечного сечения необходимо рассматривать все возможные варианты изгиба, и использовать наиболее низкое значение ρ_c . В случае прогиба

по варианту 1, коэффициент ρ_c применяется к области усиления, а так же в зоне основного материала. См. также главу 5. Для элементов с внешним усилением необходимо использовать кривую для внешнего усилителя, в противном случае, кривую для внутреннего элемента поперечного сечения.

Таблица 14[6.2]

Константы C_x и C_2 в выражениях для ρ_c				
Классификация материала согласно таблицам 6-8	Внутренняя часть		Внешняя часть	
	C_1	C_2	C_1	C_2
Класс А, без сварных швов	32	220	10	24
Класс А, со сварными швами	29	198	9	20
Класс В, без сварных швов	29	198	9	20
Класс В, со сварными швами	25	150	8	16



1—внутренние элементы и круглые трубы; 2—симметричные внешние усилители; 3—симметричные внешние усилители; а—класс А, без сварных швов; б—класс А, со сварными швами или класс В, без сварных швов; с—класс В, со сварными швами.

Рисунок 10[6.5]. Зависимость между ρ_c и β/ϵ для внешних элементов усиления, внутренних элементов и круглых труб

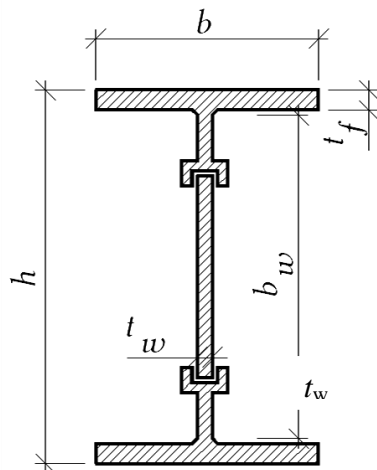
ПРИМЕР 1 Дано: Сварная балка двутаврового сечения длиной $L = 7.2$ м. Высота балки $h = 400$ мм; ширина полки $b_f = 110$ мм; толщина полки $t_f = 9$ мм; толщина стенки $t_w = 6$ мм; ширина стенки $b_w = h - 2 t_f = 400 - 2 \times 9 = 382$ мм. Материал балки – алюминиевый сплав EN AW-6082 T6 EP/O; $t > 5$ мм; $f_0 = 250$ Н/мм² (таблица 6).

Требуется определить класс поперечного сечения балки (п.5.1.4(6.1.4.4)).

а) сварная стенка: $\eta = 0.4$ (рисунок 8); $\epsilon = \sqrt{\frac{250}{f_0}} = 0.981$; $\beta_w = \eta(b_w/t_w) = 25.5$ (по формуле 19); $\beta_{3w} = 18\epsilon = 17.65$; при $\beta_w > \beta_{3w}$ класс стенки принимаем 4.

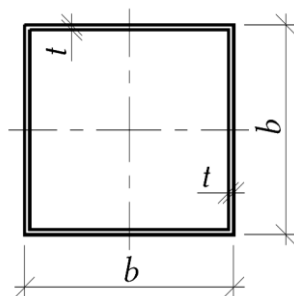
б) полки: $\eta = 1$ при $\psi = 1$; $\beta_f = \eta(b - t_w)/2t_f = 5.78$; $\beta_{3f} = 6\varepsilon = 5.883$; при $\beta_f < \beta_{3f}$ класс полки принимаем 3.

Окончательно для полного поперечного сечения балки принимаем класс 4.



ПРИМЕР 2 Дано: Стойка коробчатого полого профиля длиной $L = 1.0$ м; ширина сечения $b = 80$ мм; толщина $t = 2.0$ мм. Материал стойки – алюминиевый сплав EN AW-6082 EP/H T5; $t < 5$ мм; $f_0 = 230$ Н/мм² (таб. 6); $\gamma_{M1} = 1.1$ (таб. 10).

Требуется определить класс поперечного сечения стойки (п.5.1.4(6.1.4.4)).

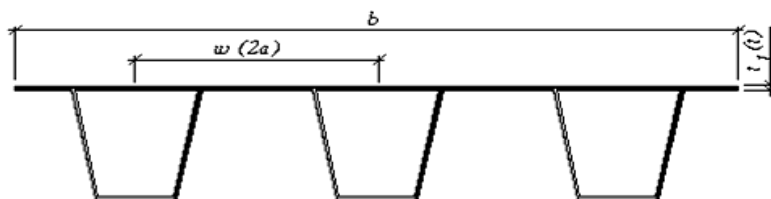


$$b_f = b - 2t = 80 - 2 \times 2.0 = 76.0 \text{ мм}; \beta = b_f/t = 76.0/2.0 = 38; \varepsilon = \sqrt{\frac{250}{f_0}} = 1.043.$$

$$\beta_1 = 11\varepsilon = 11.47; \beta_2 = 16\varepsilon = 16.69; \beta_3 = 22\varepsilon = 22.95; \text{т.к. } \beta > \beta_1, \beta > \beta_2, \beta > \beta_3.$$

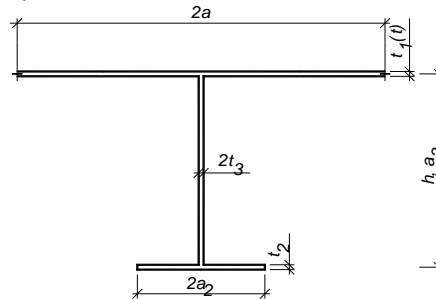
Класс элемента принимаем 4.

ПРИМЕР 3 Дано: Ортотропная пластина длиной $L = 2200$ мм, шириной $b = 1500$ мм и толщиной $t = t_1 = 16.5$ мм; шаг элементов жесткости $w = 300$ мм; Материал пластины – алюминиевый сплав EN AW-6063 T6 EP; $t \leq 20$ мм; $f_0 = 240$ Н/мм².



Требуется определить класс поперечного сечения для открытого и закрытого типов элементов жесткости (п.5.1.4(6.1.4.4)).

а) открытый тип элемента жесткости: $a = 150$ мм; $a_2 = 50$ мм; $t_2 = 10$ мм; $h = 160$ мм; $t_3 = 4.4$ мм; $a_3 = h = 160$ мм.



$$\varepsilon = \sqrt{\frac{250}{f_0}} = 1.02;$$

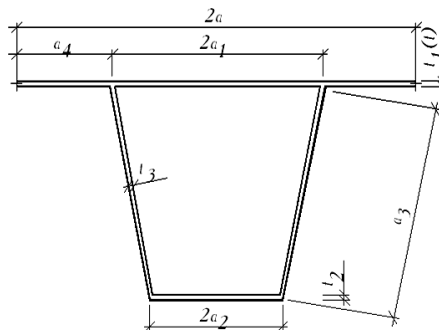
- для внутренних элементов: $\beta_1 = 2a/t_1 = 18.18$; $\beta_2 = a_3/2t_3 = 18.18$; $\beta = 18.18$;

$\beta_1 = 9\varepsilon = 9.186$; $\beta_2 = 11\varepsilon = 11.227$; $\beta_3 = 18\varepsilon = 18.371$; т.к. $\beta > \beta_1$, $\beta > \beta_2$, $\beta < \beta_3$, класс элемента 3.

- для выступающих элементов: $\beta = a_2/t_2 = 5$; $\beta_1 = 2.5\varepsilon = 2.552$; $\beta_2 = 4\varepsilon = 4.082$; $\beta_3 = 5\varepsilon = 5.103$; т.к. $\beta > \beta_1$, $\beta > \beta_2$, $\beta < \beta_3$, класс элемента 3.

Окончательно для открытого типа элемента жесткости принимаем класс 3.

а) закрытый тип элемента жесткости: $a = 150$ мм; $t_1 = 16.5$ мм; $a_2 = 50$ мм; $t_2 = 10$ мм; $h = 160$ мм; $t_3 = 9.0$ мм; $a_1 = 80$ мм; $a_3 = \sqrt{(a_1 - a_2)^2 + h^2} = 162.8$ мм; $a_4 = a - a_1 = 70$ мм.



$$\varepsilon = \sqrt{\frac{250}{f_0}} = 1.118;$$

- для внутренних элементов: $\beta_1 = 2a_1/t_1 = 9.697$; $\beta_2 = 2a_2/t_2 = 10$; $\beta_3 = a_3/t_3 = 18.088$; $\beta_4 = 2a_4/t_1 = 8.485$; $\beta = 18.088$;

$\beta_1 = 9\varepsilon = 9.186$; $\beta_2 = 13\varepsilon = 13.268$; $\beta_3 = 18\varepsilon = 18.371$; т.к. $\beta > \beta_1$, $\beta > \beta_2$, $\beta < \beta_3$, класс элемента 3.

Окончательно для закрытого типа элемента жесткости принимаем класс 3.

5.1.12[6.1.6.1] При проектировании сварных конструкций, в которых используется деформационное упрочнение, или искусственное старение дисперсионно-твердеющих сплавов, необходимо учитывать уменьшение прочностных характеристик в зоне сварных швов. Исключение к этому правилу, в случае, когда отсутствует ослабленный участок в зоне сварных швов, составляет для сплавов, находящихся в О-условиях; или, если матери-

ал находится в F-условиях, а проектная нагрузка основана на свойствах О-условий.

При проектировании необходимо учитывать, что во всех зонах, подверженных действию температуры (HAZ) прочностные характеристики снижаются.

Уменьшение влияет на 0,2 % технический предел прочности материала более сильно, чем на предел прочности на разрыв. Поврежденная область немедленно распространяется в зоне сварного шва, за пределами которой прочностные характеристики быстро восстанавливаются до своих значений при отсутствии сварки.

Даже применение малых участков сварки, используемых для закрепления небольших элементов на основном блоке, может значительно понизить несущую способность блока, вследствие образования зон HAZ. При проектировании перемычек рекомендуется располагать сварные швы и навесные элементы на малонагруженных участках, то есть около нейтральной оси или вдали от областей, подверженных действию большого изгибающего момента.

Для некоторых сплавов, подвергаемых термообработке, можно уменьшить ослабляющее влияние HAZ, с помощью искусственного старения (выдержки), применяемого после сварки.

5.1.13[6.1.6.2] Характеристическое значение 0,2 % от технического предела прочности $f_{0,haz}$ и предел прочности $f_{u,haz}$ в зоне теплового расширения приведены в таблицах 5-7. Там же также представлены коэффициенты усадки:

$$\rho_{0,haz} = \frac{f_{0,haz}}{f_0} \quad (28)$$

Характеристическая прочность сдвига в зоне HAZ определяется как $f_{v,haz} = f_{u,haz} / \sqrt{3}$.

Значения $f_{0,haz}$ и $f_{a,haz}$ применимы в течение следующих периодов времени, прошедших после окончания сварки, при учете, что материал выдерживается при температуре не менее 10°C:

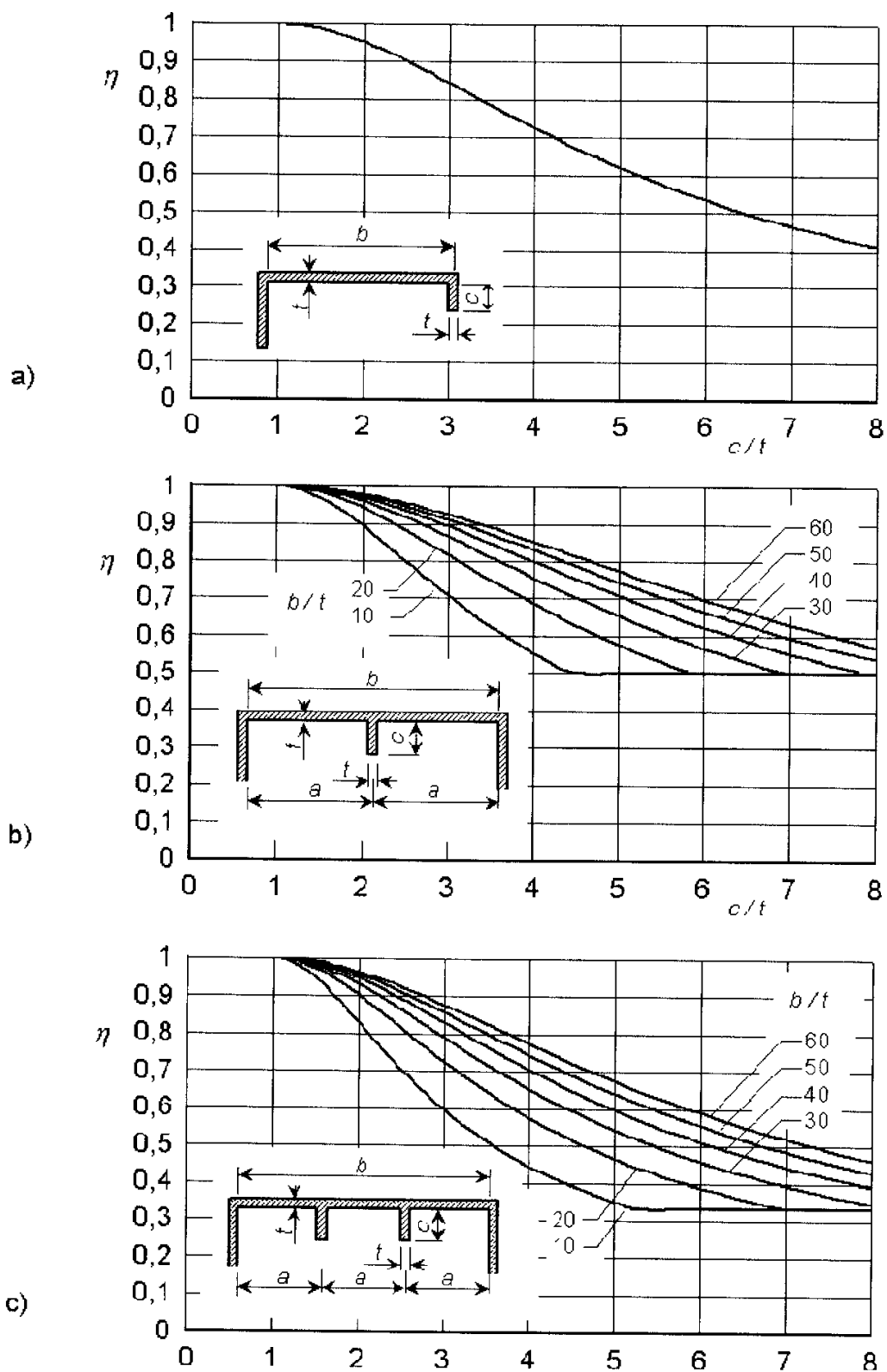
- сплавы серии 6xxx — 3 дня;
- сплавы серии 7xxx — 30 дней.

5.1.14(6.1.6.3) Предполагается, что зона HAZ распространяется на расстояние b_{haz} по всем направлениям от сварного шва, причем это расстояние измеряется следующим образом (рисунок 12):

- а) в поперечном направлении от центральной оси стыкового сварного шва;
- б) в поперечном направлении от точки пересечения свариваемых поверхностей при угловых сварных швах;
- в) в поперечном направлении от точки пересечения свариваемых поверхностей при стыковых сварных швах, используемых в угловых, тройных или крестообразных соединениях;
- г) в любом радиальном направлении от края сварного шва.

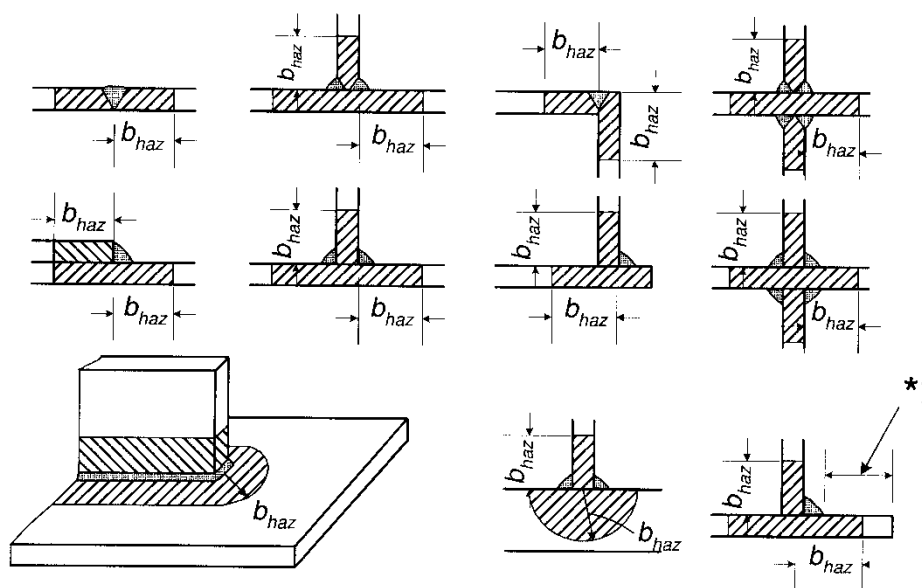
Как правило, границы зоны HAZ должны приниматься как прямые линии, нормальные к поверхности металла, особенно если выполнялась сварка тонких материалов. Однако если поверхностная сварка используется на толстом материале, допустимо использовать кривую границу, с радиусом b_{haz} , как показано на рисунке 12.

$$\rho_{u,haz} = \frac{f_{u,haz}}{f_0} \quad (29)$$



а Элементы жесткости распределены равномерно

Рисунок 11[6.4]. Значения η для усиленных частей поперечного сечения



*) Если это расстояние меньше $3b_{haz}$, предполагается, что HAZ простирается на всю ширину внешнего элемента

Рисунок 12[6.6]. Расширение зоны термического влияния (HAZ)

5.1.15[6.1.6.3] При сварке с использованием MIG аппаратов (дуговая сварка металлическим электродом в среде инертного газа) проводимой на не нагретом материале, с промежуточным охлаждением до $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ или менее, когда выполняются многопроходные сварные швы, значения b_{haz} принимаются следующими:

при $0 < t < 6\text{ мм}$:	$b_{haz} = 20\text{ мм}$;
$6 < t < 12\text{ мм}$:	$b_{haz} = 30\text{ мм}$;
$12 < t < 25\text{ мм}$:	$b_{haz} = 35\text{ мм}$;
$t > 25\text{ мм}$:	$b_{haz} = 40\text{ мм}$.

При толщинах $t > 12\text{ мм}$ необходимо учитывать влияние температуры, так как промежуточное охлаждение материала между проходами может превысить предел $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, если отсутствует строгий контроль температуры, что увеличивает ширину зоны опасного нагрева.

Вышеуказанные значения относятся к стыковым сварным швам (два пути теплопередачи) или к угловым сварным швам при Т-образных соединениях (три пути распространения теплоты) в сплавах серий 6xxx или 7xxx, или сплавах серии 5xxx при закалке в процессе работы.

5.1.16[6.1.6.3] При использовании TIG сварки (дуговая сварка вольфрамовым электродом в среде инертного газа), зона HAZ будет больше, так как теплопередачи будет больше, чем для сварного шва с использованием MIG сварки. При стыковой или угловой сварке с использованием TIG оборудования, для сплавов серии 6xxx, 7xxx или для закаливаемых в процессе работы сплавов серии 5xxx, значения b_{haz} задаются следующим образом:

при $0 < t < 6\text{ мм}$: $b_{haz} = 30\text{ мм}$.

5.1.17[6.1.6.3] При близком расположении друг к другу двух или более сварных швов их зоны HAZ перекрываются. Для всей группы сварных швов появляется единая зона HAZ. Если сварной шов расположен слишком близко к свободному краю внешнего элемента, рассеяние тепла будет менее эффективным. Это применимо, если расстояние от края сварного шва до свободного края меньше, чем $3 b_{\text{haz}}$. В этих условиях предполагается использование коэффициента $\rho_{0,\text{haz}}$ по всей ширине внешнего элемента.

5.1.18[6.1.6.3] При многопроходной сварке может произойти повышение температуры между проходами, что обусловлено расширением зоны HAZ. Если температура между проходами — $T_1(^{\circ}\text{C})$, находится в районе 60°C - 120°C , то для сплавов серии 6xxx, 7xxx или закаливаемых в процессе работы сплавах серии 5xxx b_{haz} умножается на коэффициент a_2 , следующим образом:

- сплавы серии 6xxx и закаливаемые в процессе работы сплавы серии 5xxx:
 $a_2 = 1 + (T_1 - 60)/120$;
- сплавы серии 7xxx: $a_2 = 1 + 1.5(T_1 - 60)/120$.

При использовании других значений a_2 , требуется провести проверку твердости на испытательных образцах, которые покажут истинную картину распространения зоны HAZ. При сварке алюминиевых сплавов максимально рекомендуемой температурой является температура 120°C .

5.1.19 Согласно п.п. 6.1.6.3 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011, если свариваемые элементы имеют разные толщины, то величина t является средней толщиной всех элементов. Это допущение правомерно до тех пор, пока средняя толщина не превысит в 1,5 раза самое малое значение из представленных толщин. При более высоких различиях по толщине, распространение зоны HAZ должно определяться на основании тестов на твердость, проводимых на образцах.

Если соединения между элементами выполняются с помощью углового шва при наличии числа путей теплопередачи (n), отличного от трех, значение b_{haz} необходимо умножить на величину $3/n$.

5.2 Несущая способность поперечных сечений

5.2.1 [6.2.1] Для определения несущей способности в критической точке поперечного сечения можно использовать следующее выражение, если не применяются другие формулы взаимодействия:

$$\left(\frac{\sigma_{x,\text{Ed}}}{f_0/\gamma_{\text{M1}}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{z,\text{Ed}}}{f_0/\gamma_{\text{M1}}}\right)^2 - \left(\frac{\sigma_{x,\text{Ed}}}{f_0/\gamma_{\text{M1}}}\right)\left(\frac{\sigma_{z,\text{Ed}}}{f_0/\gamma_{\text{M1}}}\right) + 3\left(\frac{\tau_{\text{Ed}}}{f_0/\gamma_{\text{M1}}}\right)^2 \leq C \quad (30)$$

$$\frac{\sigma_{x,\text{Ed}}}{f_0/\gamma_{\text{M1}}} \leq 1, \frac{\sigma_{z,\text{Ed}}}{f_0/\gamma_{\text{M1}}} \leq 1 \text{ и } \frac{\sqrt{3}\tau_{\text{Ed}}}{f_0/\gamma_{\text{M1}}} \leq 1, \quad (31a, b, c)$$

где $\sigma_{x,\text{Ed}}$ — расчетное значение локального продольного напряжения в рассматриваемой точке;

$\sigma_{z,\text{Ed}}$ — расчетное значение локального напряжения при поперечном изгибе в рассматриваемой точке;

τ_{Ed} — расчетное значение локального касательного напряжения в рассматриваемой

точке;

$C = 1.2$ — константа.

5.2.2 Согласно п. 6.2.2 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011 свойства полного поперечного сечения (A_g) зависят от его номинальных размеров. Отверстия для крепежей не должны вычитаться, но необходимо учитывать большие отверстия. Материалы, применяемые для соединений и накладок, в расчете не учитываются.

5.2.3 В соответствии с п.п. 6.2.2.2 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011 рабочая площадь поперечного сечения (A_{net}) представляет собой общую площадь, за вычетом соответствующих площадей отверстий, других пустот, а также зон, подверженных воздействию температуры (HAZ).

При определении рабочего сечения необходимо вычитать общую площадь поперечного сечения отверстия для крепежа в плоскости его оси. Для утопленных отверстий вводится соответствующая поправка на утопленную часть.

В случае расположения отверстий для крепежа не в шахматном порядке вычитаемая площадь ослаблений соответствует максимальной сумме площадей поперечного сечения отверстий для крепежа в любом сечении, перпендикулярном к оси элемента (см. плоскость разрушения 1 на рисунке 13). Причем максимальная сумма характеризует положение критической линии разрушения.

В случае, когда отверстия крепежа расположены в шахматном порядке, размер полной области, которая будет вычитаться в качестве отверстий для крепежа, должен быть больше (рисунок 13):

- а) площади вычитания для отверстий, не расположенных в шахматном порядке, представлено выше;
- б) в качестве площади вычитания используется $\Sigma td - \Sigma tb_s$, где b_s — наименьшее значение из:

$$s^2/(4\rho) \text{ или } 0,65s, \quad (32)$$

где d — диаметр отверстия;

s — шаг распределения, межцентровое расстояние двух соседних отверстий, в направлении, параллельно оси элемента;

ρ — межцентровое расстояние двух соседних отверстий, измеренное в направлении, перпендикулярном оси элемента;

t — толщина (или эффективная толщина элемента, содержащего материал HAZ).

В уголке или другом элементе с отверстиями в больше чем одной плоскости, промежуток ρ должен измеряться в уровне центра толщины материала (рисунок 14).

5.2.4 Согласно п. 6.2.2.3 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/ 2011 необходимо учитывать влияние сдвигового запаздывания при изгибе и несущую способность при разрыве полок. Рекомендации по влиянию сдвигового запаздывания представлены в Приложении К СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/ 2011.

5.3 Растяжение

5.3.1[6.2.3] Расчетное значение усилия растяжения N_{Ed} должно удовлетворять усло-

вию:

$$N_{Ed}/N_{t,Rd} \leq 1.0. \quad (33)$$

Расчетное сопротивление растягивающей нагрузке для поперечного сечения $N_{t,Rd}$ должно приниматься как наименьшее значение из $N_{0,Rd}$ и $N_{u,Rd}$, где:

а) общая упругость элемента:

$$N_{0,Rd} = A_g f_0 / \gamma_{M1}; \quad (34)$$

б) локальное разрушение в критическом сечении:

$$N_{u,Rd} = 0.9 A_{net} f_u / \gamma_{M2}, \quad (35)$$

где A_g — либо общее сечение, либо поперечное сечение после вычета, учитывающего ослабление свойств зон HAZ после сварки. В последнем случае A_g определяется путем выбора области, полученной после вычета, равной $\rho_{0,haz}$ умноженной на область;

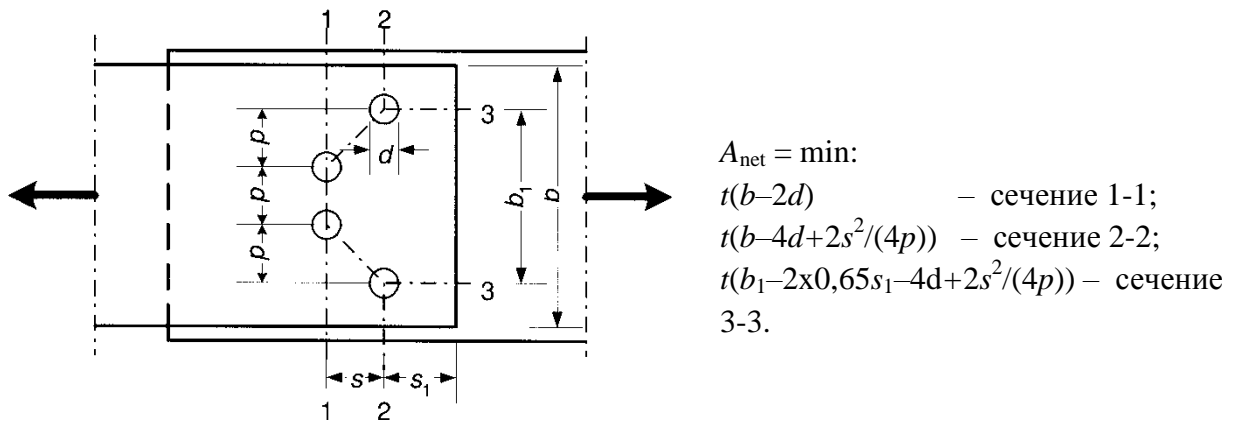


Рисунок 13[6.7]. Отверстия, расположенные в шахматном порядке, и критические линии разрушения 1, 2 и 3

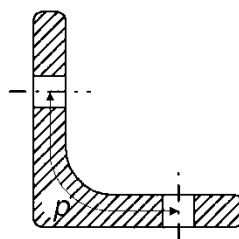


Рисунок 14[6.8]. Уголок с отверстиями в обеих сторонах

A_{net} — рабочая область сечения, после вычитания отверстий и, если это необходимо, вычитания областей, подверженных влиянию HAZ на рабочую зону через отверстия (п. 5.2.3(6.2.2.2)). Последнее вычитание основано на уменьшении толщины $\rho_{u,haz}t$.

Для уголков, связанных по одной из сторон см. п. 5.11.6(6.3.1.5). Для других типов сечений, связанных с помощью внешних элементов, например, Т-образные сечения и швеллеры, также необходимо проводить подобный расчет.

Для отверстий, расположенных в шахматном порядке см. п. 5.2.3(6.2.2.2).

ПРИМЕР 4 Дано: Сварная балка двутаврового сечения, нагруженная сосредоточенной растягивающей силой $N_{Ed} = 140$ кН. Высота балки $h = 200$ мм, ширина полки $b_f = 140$ мм, толщина полки $t_f = 6$ мм, толщина стенки $t_w = 12$ мм, ширина стенки $b_w = h - 2 t_f = 200 - 2 \times 6 = 188$ мм. Материал балки – алюминиевый сплав EN AW-6082 T6 EP/O; $t > 5$ мм; $f_0 = 260$ Н/мм²; $f_u = 310$ Н/мм²; $\rho_{0,haz} = 0.48$; $\rho_{u,haz} = 0.60$; (таб. 6); $\gamma_{M1} = 1.1$; $\gamma_{M2} = 1.25$ (таб.10).

Требуется проверить несущую способность поперечного сечения балки на растяжение.

Классификация элементов (п.5.1.4(6.1.4.4)).

а) стенка балки: $\beta_w = 0.4b_w/t_w = 6.267$; $\varepsilon = \sqrt{\frac{250}{f_0}} = 0.981$; $\beta_{1w} = 9\varepsilon = 8.829$; $\beta_{2w} = 13\varepsilon = 12.753$; $\beta_{3w} = 18\varepsilon = 17.658$; т.к. $\beta_w < \beta_{1w}$, $\beta_w < \beta_{2w}$, $\beta_w < \beta_{3w}$, класс стенки принимаем 1.

Определяем коэффициент локального продольного изгиба ρ_c по выражению (27), принимая $C_1 = 29$ и $C_2 = 198$ (таб. 14):

$$\rho_{cw} = C_1/(\beta_w/\varepsilon) - C_2/(\beta_w/\varepsilon)^2 = -0.312, \text{ принимаем } \rho_{cw} = 1.0, \text{ т.к. } \beta_w < \beta_{3w}.$$

Эффективная толщина стенки: $t_{eff} = \rho_c t = 12.0$ мм.

б) полки балки: $\beta_f = (b_f - t_w) t_f = 21.333$; $\varepsilon = \sqrt{\frac{250}{f_0}} = 0.981$; $\beta_{1f} = 2.5\varepsilon = 2.45$; $\beta_{2f} = 4\varepsilon = 3.92$; $\beta_{3f} = 4\varepsilon = 4.91$; т.к. $\beta_f > \beta_{1f}$, $\beta_f > \beta_{2f}$, $\beta_f > \beta_{3f}$, класс стенки принимаем 4.

Определяем коэффициент локального продольного изгиба ρ_c по выражению (27), принимая $C_1 = 29$ и $C_2 = 198$ (таб. 14):

$$\rho_{cf} = C_1/(\beta_f/\varepsilon) - C_2/(\beta_f/\varepsilon)^2 = 0.915.$$

Эффективная толщина стенки: $t_{f,ef} = \rho_{cf} t_f = 0.915 \times 6 = 5.49$ мм.

Для полного поперечного сечения принимаем класс 4.

Учет зоны HAZ (упругий расчет).

Эффективная толщина полки: $t_{f,haz} = \rho_{0,haz} t_f = 0.48 \times 6 = 2.88$ мм;

$$t_{f,ef} = t_{f,haz} = 2.88 \text{ мм.}$$

Эффективная толщина стенки: $t_{w,haz} = \rho_{0,haz} t_f = 0.48 \times 12 = 5.76$ мм;

$$t_{w,ef} = t_{w,haz} = t_{f,ef} = 2.88 \text{ мм.}$$

Т.к. $6 < t_1 < 12$ мм, принимаем ширину зоны HAZ $b_{haz} = 30$ мм (п.5.1.15(6.1.6.3)).

Учет зоны HAZ (локальное разрушение в критическом сечении).

Эффективная толщина полки: $t_{f,haz} = \rho_{u,haz} t_f = 0.6 \times 6 = 3.6$ мм;

$$t_{f,ef} = t_{f,haz} = 3.6 \text{ мм.}$$

Эффективная толщина стенки: $t_{w,haz} = \rho_{u,haz} t_f = 0.6 \times 12 = 7.2$ мм;

$$t_{w,ef} = t_{w,haz} = t_{f,ef} = 3.6 \text{ мм.}$$

Определяем площадь поперечного сечения балки:

$$A_g = 2bt_f + (h - 2t_f)t_w = 3.936 \times 10^3 \text{ мм}^2.$$

Площадь поперечного сечения с учетом зоны HAZ: $A_{net} = A_g - b(t_f - t_{f,ef}) - b_{haz}(t_w - t_{w,ef}) = 3.225 \times 10^3 \text{ мм}^2.$

Проверка несущей способности поперечного сечения.

$$N_{0,Rd} = \frac{f_0 A_g}{\gamma_{M1}} = 930.33 \text{ кН}; N_{0,Rd} = \frac{f_0 A_{net}}{\gamma_{M1}} = 469.1 \text{ кН}; N_{u,Rd} = \frac{f_u A_{net}}{\gamma_{M2}} = 799.8 \text{ кН.}$$

Принимаем $N_{0,Rd} = 469.1 \text{ кН} > N_{Ed} = 140 \text{ кН}.$

Таким образом, несущая способность поперечного сечения балки обеспечена.

5.4 Сжатие

5.4.1[6.2.4] Расчетное значение осевой нагрузки на сжатие N_{Ed} должно удовлетворять условию:

$$N_{\text{Ed}}/N_{\text{c,Rd}} \leq 1.0. \quad (36)$$

Для расчетного значения сопротивления равномерному сжатию N_{cRd} необходимо использовать наименьшее из значений N_{uRd} и N_{cRd} , где:

а) в сечениях с незаполненными отверстиями:

$$N_{\text{u.Rd}} = A_{\text{net}} f_{\text{u}} / \gamma_{\text{M2}}; \quad (37)$$

б) в других сечениях:

$$N_{\text{c,Rd}} = A_{\text{eff}} f_0 / \gamma_{\text{M1}}, \quad (38)$$

где: A_{net} — рабочая область сечения, после вычитания незаполненных отверстий и HAZ, в случае необходимости (п. 5.2.3(6.2.2.2)). Для отверстий, расположенных на участках уменьшенной толщины, вычитание может проводиться с учетом этого заниженного значения, а не полной толщины;

A_{eff} — область эффективного сечения, учитывающая уменьшенную толщину, с учетом локального изгиба и зоны HAZ, но без учета незаполненных отверстий.

ПРИМЕР 5 Дано: Элемент коробчатого полого штампованного профиля длиной $L = 1200$ мм; $\frac{1}{2}$ ширины сечения $b = 50$ мм; выступ $c = 10$ мм; $\frac{1}{2}$ ширины плоских поверхностей $a = 18$ мм; толщина $s = 1.2$ мм. Стойка загружена осевой сжимающей силой $N_{\text{Ed}} = 105$ кН; $f_0 = 300$ Н/мм²; $\gamma_{\text{M1}} = 1.1$ (таб. 10).

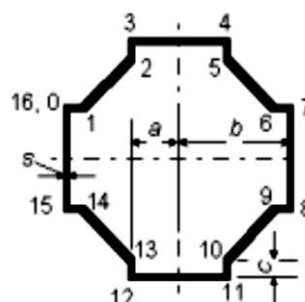
Требуется проверить несущую способность поперечного сечения стойки.

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{250}{f_0}} = 0.913; \beta_i = \frac{\sqrt{(y_i - y_{i-1})^2 + (z_i - z_{i-1})^2}}{t_i};$$

Определяем коэффициент локального продольного изгиба ρ_c по выражению (27), принимая $C_1 = 32$ и $C_2 = 220$ (таб. 14):

$$\rho_{\text{ci}} = C_1/(\beta_i/\varepsilon) - C_2/(\beta_i/\varepsilon)^2.$$

Эффективная толщина: $t_{\text{effi}} = \rho_{\text{ci}} t$.



$$\text{Эффективная площадь составной части элемента: } dA_i = \sqrt{(y_i - y_{i-1})^2 + (z_i - z_{i-1})^2}.$$

Эффективная площадь поперечного сечения: $A_{\text{eff}} = \sum_{i=2}^n dA_i = 356.6 \text{ мм}^2$.

Статический момент: $S_y = \sum_{i=2}^n (z_i + z_{i-1}) \frac{dA_i}{2}$; положение центра тяжести: $z_{\text{gc}} = S_y / A_{\text{eff}}$
= 0.

N_0/N_0	y	z	t
0	$-b$	a	s
1	$-b + c$	a	s
2	$-a$	$b - c$	s
3	$-a$	b	s
4	a	b	s
5	a	$b - c$	s
6	$b - c$	a	s
7	b	a	s
8	b	$-a$	s
9	$b - c$	$-a$	s
10	a	$-b + c$	s
11	a	$-b$	s
12	$-a$	$-b$	s
13	$-a$	$-b + c$	s
14	$-b + c$	$-a$	s
15	$-b$	$-a$	s
16	$-b$	a	s

N_0/N_0	β_i	β_i/ε	ρ_{ci}	t_{effi}
1	8.333	9.129	1	1.2
2	25.927	28.402	0.854	1.025
3	8.333	9.129	1	1.2
4	30	32.863	0.77	0.924
5	8.333	9.129	1	1.2
6	25.927	28.402	0.854	1.025
7	8.333	9.129	1	1.2
8	30	32.863	0.77	0.924
9	8.333	9.129	1	1.2
10	25.927	28.402	0.854	1.025
11	8.333	9.129	1	1.2
12	30	32.863	0.77	0.924
13	8.333	9.129	1	1.2
14	25.927	28.402	0.854	1.025
15	8.333	9.129	1	1.2
16	30	32.863	0.77	0.924

Проверка несущей способности поперечного сечения.

$$N_{c,Rd} = \frac{f_0 A_{eff}}{\gamma_{M1}} = 107 \text{ кН} > N_{Ed} = 105 \text{ кН}.$$

Таким образом, несущая способность поперечного сечения элемента при действии осевой сжимающей силы обеспечена.

5.5 Изгибающий момент

5.5.1[6.2.5] Расчетное значение изгибающего момента M_{Ed} в поперечном сечении должно удовлетворять условию:

$$M_{cd} / M_{Rd} \leq 1.0. \quad (39)$$

Расчетное сопротивление при изгибе вдоль одной из главных осей поперечного сечения M_{Rd} определяется как наименьшее значение из $M_{u,Rd}$ и $M_{c,Rd}$, где:

$$M_{u,Rd} = W_{net} f_u / \gamma_{M2} \text{ (в рабочем сечении);} \quad (40)$$

$$M_{c,Rd} = \alpha W_{el} f_0 / \gamma_{M1} \text{ (в каждом поперечном сечении);} \quad (41)$$

где α — формфактор (таблица 15);

W_{el} — упругий момент сопротивления общего сечения (п. 5.5.2);

W_{net} — упругий момент сопротивления рабочего сечения, с учетом отверстий и зоны HAZ, если проводились сварочные работы (п. 5.5.2). Последнее вычитание учитывает уменьшение толщины $\rho_{u,haz} t$.

Таблица 15[6.4]

Значения формфактора α		
Класс поперечного сечения	Без сварки	При наличии продольного сварного шва
1	W_{pl} / W_{el}^*	$W_{pl,haz} / W_{el}^*$
2	W_{pl} / W_{el}	$W_{pl,haz} / W_{el}$
3	$\alpha_{3,u}$	$\alpha_{3,w}$
4	W_{eff} / W_{el}	$W_{eff,haz} / W_{el}$
*) — эти формулы представляют традиционный подход. Для получения более новых значений представлены рекомендации в Приложении F СН РК EN 1999-1-1:2007/2011.		

В таблице 15 модули для различных сечений, W и $\alpha_{3,u}$, $\alpha_{3,w}$ определяются как:

W_{pl} — пластический момент сопротивления полного сечения;

W_{eff} — эффективный упругий момент сопротивления сечения, полученный с помощью пониженной толщины t_{eff} для элементов класса 4 (п. 5.5.1(6.2.5));

$W_{el,haz}$ — эффективный упругий момент сопротивления полного сечения, получен-

ный при помощи пониженной толщины $\rho_{0,haz}t$ для материала HAZ (п. 5.5.1(6.2.5));

$W_{pl,haz}$ — эффективный пластический момент сопротивления полного сечения, полученный при использовании пониженной толщины $\rho_{0,haz}t$ для материала HAZ (п. 5.5.1(6.2.5));

$W_{eff,haz}$ — эффективный упругий момент сопротивления сечения, полученный при помощи пониженной толщины ρ_{ct} для элементов класса 4 или при использовании пониженной толщины $\rho_{0,haz}t$ для HAZ материала, наименьший из них (п. 5.5.1(6.2.5));

$\alpha_{3,u} = 1$ или может рассчитываться с помощью следующего выражения:

$$\alpha = \left[1 + \left(\frac{\beta_3 - \beta}{\beta_3 - \beta_2} \right) \left(\frac{W_{pl}}{W_{el}} - 1 \right) \right] \quad (42)$$

$\alpha_{3,w} = W_{el,haz} / W_{el}$, или может рассчитываться с помощью следующего выражения:

$$\alpha_{3,w} = \left[\frac{W_{el,haz}}{W_{el}} + \left(\frac{\beta_3 - \beta}{\beta_3 - \beta_2} \right) \left(\frac{W_{pl,haz} - W_{el,haz}}{W_{el}} \right) \right] \quad (43)$$

где β - параметр, характеризующий гибкость в самой критической части сечения (п. 5.1.6-5.1.10(6.1.4.3));

β_2 и β_3 — предельные значения для этого же элемента в соответствии с таблицей 13.

Критический участок определяется с помощью наименьшего значения β_2/β_3 .

Кроме того, также необходимо выполнять проверочный расчет несущей способности элемента к потере боковой устойчивости при кручении (п.п.5.11.7-5.11.10(6.3.2)).

5.5.2[6.2.5.2] При расчете изгибаемых элементов вводятся понятия расчетного поперечного сечения:

а) рабочее сечение учитывает вычет отверстий и включает поправку на пониженную несущую способность материала, определяемую в районе сварных швов, учитывающую зоны HAZ, если использовалась сварка.

б) эффективное сечение включает поправку на снижение несущей способности в зонах HAZ и локальный изгиб без вычитания площади отверстий (рисунок 14).

В пунктах а) и б), представленных выше, поправка на снижение прочности материала для различных участков сечения, как правило, определяется следующим образом:

— элементы класса 4, в которых отсутствуют эффекты HAZ. Величина $t_{eff} = \rho_{ct}$ определяется для участка поперечного сечения, подверженного сжатию, где ρ_{ct} определяется, как в п. 5.1.11(6.1.5). Применение эффективного сечения может привести к итерационной процедуре (раздел 7(6.7));

— элементы классов 1, 2 или 3, в которых присутствуют эффекты HAZ. Величина $\rho_{0,haz}t$ определяется для участков поперечного сечения с пониженной несущей способностью, где $\rho_{0,haz}$ и степень уменьшения несущей способности соответствуют п. 5.1.13(6.1.6.2) и п.5.1.14(6.1.6.3);

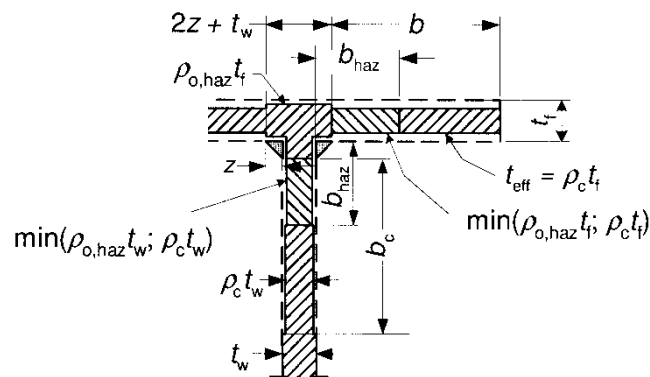
— элементы класса 4, в которых присутствуют эффекты HAZ. Поправка берется как наименьшая, из соответствующих значений пониженной толщины t_{eff} и пониженной толщины на участках с уменьшенной прочностью, $\rho_{0,haz}t$ и как t_{eff} в оставшемся сжатом участке поперечного сечения (рисунок 15);

— в случае усиленных участков поперечного сечения (п. 5.1.8(6.1.4.3)), ρ_{ct} должен

применяться к области усиления, а так же к основной толщине пластины.

Для свариваемых участков класса 3 или 4 оптимальная расчетная толщина может быть получена следующим образом:

- уменьшение несущей способности вследствие зон HAZ игнорируется в любом материале на расстоянии менее $\rho_{0,haz} z_1$ от нейтральной оси упругости полного сечения, где z_1 — расстояние от рассматриваемого сечения до наиболее удаленных участков;
- для материала, имеющего зоны HAZ, на расстоянии z ($> \rho_{0,haz} z_1$) от нейтральной оси, $\rho_{0,haz}$ может быть заменено параметром ρ_{zy} , определяемым как $\rho_{zy} = \rho_{0,haz} + 1 - z/z_1$.



**Рисунок 15[6.9]. Эффективная толщина поперечного сечения
класса 4 со сварными швами**

ПРИМЕР 6 Дано: В сечении двутавровой сварной балки длиной $L = 4.0$ м действует изгибающий момент $M_{cd} = 32$ кНм. Высота балки $h = 200$ мм, ширина полки $b_f = 140$ мм, толщина полки $t_f = 6$ мм, толщина стенки $t_w = 12$ мм, ширина стенки $b_w = h - 2 t_f = 200 - 2 \times 6 = 188$ мм. Материал балки – алюминиевый сплав EN AW-6082 T6 EP/O; $t > 5$ мм; $f_0 = 260$ Н/мм²; $f_u = 310$ Н/мм²; $\rho_{0,haz} = 0.48$; $\rho_{u,haz} = 0.6$ (таб. 6); $\gamma_{M1} = 1.1$; $\gamma_{M2} = 1.25$ (таб.10).

Требуется проверить несущую способность поперечного сечения балки при изгибе.

Классификация элементов (п.5.1.4(6.1.4.4)).

а) стенка балки: $\beta_w = 0.4b_w/t_w = 6.267$; $\varepsilon = \sqrt{\frac{250}{f_0}} = 0.981$; $\beta_{1w} = 9\varepsilon = 8.829$; $\beta_{2w} = 13\varepsilon = 12.753$; $\beta_{3w} = 18\varepsilon = 17.658$; т.к. $\beta_w < \beta_{1w}$, $\beta_w < \beta_{2w}$, $\beta_w < \beta_{3w}$, класс стенки принимаем 1.

Определяем коэффициент локального продольного изгиба ρ_c по выражению (27), принимая $C_1 = 29$ и $C_2 = 198$ (таб. 14):

$$\rho_{cw} = C_1/(\beta_w/\varepsilon) - C_2/(\beta_w/\varepsilon)^2 = -0.312, \text{ принимаем } \rho_{cw} = 1.0, \text{ т.к. } \beta_w < \beta_{3w}.$$

Эффективная толщина стенки: $t_{eff} = \rho_c t = 12.0$ мм.

б) полки балки: $\beta_f = (b_f - t_w) t_f = 21.333$; $\varepsilon = \sqrt{\frac{250}{f_0}} = 0.981$; $\beta_{1f} = 2.5\varepsilon = 2.45$; $\beta_{2f} = 4\varepsilon = 3.92$; $\beta_{3f} = 4\varepsilon = 4.91$; т.к. $\beta_f > \beta_{1f}$, $\beta_f > \beta_{2f}$, $\beta_f > \beta_{3f}$, класс стенки принимаем 4.

Определяем коэффициент локального продольного изгиба ρ_c по выражению (27), принимая $C_1 = 29$ и $C_2 = 198$ (таб. 14):

$$\rho_{cf} = C_1/(\beta_f/\varepsilon) - C_2/(\beta_f/\varepsilon)^2 = 0.915.$$

Эффективная толщина стенки: $t_{f,ef} = \rho_{cf} t_f = 0.915 \times 6 = 5.49$ мм.

Для полного поперечного сечения принимаем класс 4.

Учет зоны HAZ (упругий расчет).

Эффективная толщина полки: $t_{f,haz} = \rho_{0,haz} t_f = 0.48 \times 6 = 2.88$ мм;

$t_{f,ef} = t_{f,haz} = 2.88$ мм.

Эффективная толщина стенки: $t_{w,haz} = \rho_{0,haz} t_f = 0.48 \times 12 = 5.76$ мм;

$t_{w,ef} = t_{w,haz} = t_{f,ef} = 2.88$ мм.

Учет зоны HAZ (локальное разрушение в критическом сечении).

Эффективная толщина полки: $t_{f,haz} = \rho_{u,haz} t_f = 0.6 \times 6 = 3.6$ мм;

$t_{f,ef} = t_{f,haz} = 3.6$ мм.

Эффективная толщина стенки: $t_{w,haz} = \rho_{u,haz} t_f = 0.6 \times 12 = 7.2$ мм;

$t_{w,ef} = t_{w,haz} = t_{f,ef} = 3.6$ мм.

Т.к. $6 < t_1 < 12$ мм, принимаем ширину зоны HAZ $b_{haz} = 30$ мм (п.5.1.15(6.1.6.3)).

Определяем упругий момент сопротивления полного поперечного сечения балки: $A_g = 2bt_f + (h - 2t_f)t_w = 3.936 \times 10^3$ мм²; $I_g = \frac{1}{12}[bh^3 - (b - t_w)(h - 2t_f)^3] = 2.246 \times 10^7$ мм⁴; $W_{el} = \frac{2I_g}{h} = 2.246 \times 10^5$ мм³.

Для упругого расчета.

Площадь поперечного сечения с учетом зоны HAZ: $A_{eff,haz} = A_g - b(t_f - t_{f,ef}) - b_{haz}(t_w - t_{w,ef}) = 3.226 \times 10^3$ мм².

Смещение центра тяжести сечения: $e_{ef} = \left[b(t_f - t_{f,ef}) \left(\frac{h}{2} - \frac{t_f}{2} \right) + b_{haz}(t_w - t_{w,ef}) \left(\frac{h}{2} - t_f - \frac{b_{haz}}{2} \right) \right] \frac{1}{A_{eff,haz}} = 19.83$ мм.

Моменты инерции и сопротивления относительно центра эффективного сечения:

$I_{eff,haz} = I_g - b(t_f - t_{f,ef}) \left(\frac{h}{2} - \frac{t_f}{2} \right)^2 - \frac{b_{haz}^3}{12}(t_w - t_{w,ef}) - b_{haz}(t_w - t_{w,ef}) = 1.814 \times 10^7$ мм⁴;

$W_{eff,haz} = \frac{I_{eff,haz}}{\frac{h}{2} + e_{ef}} = 1.514 \times 10^5$ мм³.

Для локального разрушения в критическом сечении.

Площадь поперечного сечения с учетом зоны HAZ: $A_{net} = A_g - b(t_f - t_{f,ef}) - b_{haz}(t_w - t_{w,ef}) = 3.348 \times 10^3$ мм².

Смещение центра тяжести сечения: $e_{ef} = \left[b(t_f - t_{f,ef}) \left(\frac{h}{2} - \frac{t_f}{2} \right) + b_{haz}(t_w - t_{w,ef}) \left(\frac{h}{2} - t_f - \frac{b_{haz}}{2} \right) \right] \frac{1}{A_{net}} = 15.68$ мм.

Моменты инерции и сопротивления рабочего сечения с учетом зоны HAZ: $I_{net} =$

$I_g - b(t_f - t_{f,ef}) \left(\frac{h}{2} - \frac{t_f}{2} \right)^2 - \frac{b_{haz}^3}{12}(t_w - t_{w,ef}) - b_{haz}(t_w - t_{w,ef}) = 1.909 \times 10^7$ мм⁴; $W_{net} =$

$\frac{I_{net}}{\frac{h}{2} + e_{ef}} = 1.649 \times 10^5$ мм³.

Значение формфактора определяем по таб. 15: $\alpha = W_{eff,haz}/W_{el} = 1.514 \times 10^5 / 2.246 \times 10^5 = 0.674$.

Проверка несущей способности поперечного сечения.

$M_{c,Rd} = \alpha \frac{f_0 W_{el}}{\gamma_{M1}} = 35.78$ кНм (41); $M_{u,Rd} = \frac{f_u W_{net}}{\gamma_{M2}} = 40.9$ кНм (40).

Принимаем $M_{Rd} = M_{c,Rd} = 35.78$ кНм; $M_{cd} / M_{Rd} = 32/35.78 = 0.89 < 1.0$ (39).
Таким образом, несущая способность поперечного сечения балки обеспечена.

5.6 Сдвиг (срез)

5.6.1[6.2.6] Расчетное значение сдвигающей силы V_{Ed} в поперечном сечении должен удовлетворять следующему выражению:

$$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd}} \leq 1.0 \quad (44)$$

где V_{Rd} — расчетное сопротивление сдвигу (срезу) для поперечного сечения.

Для нетонкостенных профилей, $h_w / t_w \leq 39\varepsilon$, см. п.6.7(6.5.5)

$$V_{Rd} = A_v \frac{f_0}{\sqrt{3}\gamma_{M1}}, \quad (45)$$

где A_v — область сдвига (среза), определяемая как:

а) для сечений, содержащих ребро:

$$A_v = \sum_{i=1}^n [(h_w - \sum d)(t_w)_i - (1 - \rho_{0,haz})b_{haz}(t_w)_i t] \quad (46)$$

где h_w — высота ребра между полками;

b_{haz} — полная глубина материала HAZ, находящегося в районе ребра между полками. Для сечений, в которых отсутствует сварка, $\rho_{0,haz} = 1$. Если зона HAZ распространяется на всю глубину панели ребра $b_{haz} = h_w - \sum d$;

t_w — толщина ребра;

d — диаметр отверстий вдоль плоскости сдвига (среза);

n — число ребер;

б) для сплошного стержня и круглой трубы:

$$A_v = \eta_v A_c, \quad (47)$$

где $\eta_v = 0,8$ для сплошного стержня;

$\eta_v = 0,6$ для круглой трубы;

A_c — полная площадь сечения, в котором отсутствуют сварные элементы, и эффективная площадь сечения, полученная с использованием заниженной толщины $\rho_{0,haz} t$ для материала HAZ сваренного элемента.

Для тонких и жестких ребер, см. п.п.7.8-7.12(6.7.4), 7.13—7.17(6.7.5), 7.18-7.19(6.7.6).

В случаях, когда нагрузка состоит из поперечной силы и крутящего момента, сопротивление сдвигу (срезу) V_{Rd} должно быть уменьшено, согласно п.5.7.3(6.2.7).

ПРИМЕР 7 Дано: Двутавровая балка, в сечении которой действует сдвигающая нагрузка $V_{Ed} = 205$ кН. Высота балки $h = 200$ мм, ширина полки $b_f = 140$ мм, толщина полки $t_f = 6$ мм, толщина стенки $t_w = 12$ мм, ширина стенки $b_w = h_w = h - 2 t_f = 200 - 2 \times 6 = 188$ мм. Материал балки — алюминиевый сплав EN AW-6082 T6 EP/O; $t > 5$ мм; $f_0 = 260$ Н/мм²; $\gamma_{M1} = 1.1$ (таб.10).

Требуется проверить несущую способность поперечного сечения балки на сдвиг.

Классификация элементов (п.5.1.4(6.1.4.4)).

а) стенка балки: $\beta_w = 0.4b_w/t_w = 6.267$; $\varepsilon = \sqrt{\frac{250}{f_0}} = 0.981$; $\beta_{1w} = 9\varepsilon = 8.829$; $\beta_{2w} = 13\varepsilon = 12.753$; $\beta_{3w} = 18\varepsilon = 17.658$; т.к. $\beta_w < \beta_{1w}$, $\beta_w < \beta_{2w}$, $\beta_w < \beta_{3w}$, класс стенки принимаем 1.

$h_w/t_w = 188/12 = 15.67 < 39\varepsilon = 38.26$.

Область сдвига $A_v = h_w \times t_w = 2256 \text{ мм}^2$.

Расчетное сопротивление поперечного сечения на сдвиг (45):

$$V_{Rd} = A_v \frac{f_0}{\sqrt{3}\gamma_{M1}} = 307.87 \text{ кН.}$$

Проверка несущей способности (44): $V_{Ed}/V_{Rd} = 205/307.87 = 0.66 < 1.0$.

Таким образом, несущая способность поперечного сечения балки на сдвиг обеспечена.

5.7 Кручение

5.7.1[6.2.7.1] Для элементов подверженных кручению без учета поперечных деформации и деформаций скручивания расчетное значение крутящего момента T_{Ed} в любом поперечном сечении:

$$T_{Ed}/T_{Rd} \leq 1,0, \quad (48)$$

где $T_{Rd} = W_{T,pl}f_0/(\sqrt{3}\gamma_{M1})$ представляет собой расчетное значение сопротивления крутящему моменту (классическая теория St.Venant) для поперечного сечения, в которой $W_{T,pl}$ — момент сопротивления при кручении.

Если равнодействующая сила действует через центр сдвига, то крутящий момент не возникает.

Формулы для центра сдвига в некоторых часто используемых поперечных сечениях, а также константы для поперечных сечений представлены в Приложении J СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011.

При определении сопротивления T_{Rd} полых профилей с гибкими элементами сечения, в соответствии с п.п. 7.8-7.12(6.7.4) или 7.13—7.17(6.7.5), необходимо учитывать расчетное значение предела прочности при сдвиге для отдельных участков поперечного сечения.

5.7.2[6.2.7.2]. При действии крутящего момента в элементах, для которых поперечные деформации не учитываются, но необходимо учесть скручивающие деформации, полный крутящий момент в любом поперечном сечении рассматривается как сумма двух моментов:

$$T_{Ed} = T_{T,Ed} + T_{w,Ed}, \quad (49)$$

где $T_{T,Ed}$ — внутренний скручивающий момент согласно теории St.Venants;

$T_{w,Ed}$ — деформирующий скручивающий момент.

Значения $T_{T,Ed}$ и $T_{w,Ed}$ в любом поперечном сечении могут быть определены исходя из T_{Ed} , с помощью упругого расчета с учетом свойств сечения элемента, условия сжатия в основании и распределение нагрузки по элементу. Причем выражение для несущей способности T_{Rd} не учитывается.

Необходимо учитывать следующие напряжения, обусловленные кручением:

— напряжения, возникающие при сдвиге, $\tau_{t,Ed}$, обусловленные классическим скручивающим моментом St.Venant, $T_{T,Ed}$;

— нормальные напряжения, $\sigma_{w,Ed}$, обусловленные бимоментом B_{Ed} , и касательные напряжения $\tau_{w,Ed}$, обусловленные деформирующим крутящим моментом, $T_{w,Ed}$.

При определении несущей способности при упругой деформации можно использовать положения п. 5.2.1(6.2.1).

Для определения несущей способности поперечного сечения при действии изгибающего момента, воздействие скручивающих моментов B_{Ed} исключается при упругом расчете.

Для элементов с открытым поперечным сечением, например, I или H влиянием скручивающего момента, согласно теории St. Venant, можно пренебречь.

5.7.3[6.2.7.3] При действии на элемент нагрузки, представляющей комбинацию поперечной силы и крутящего момента, значение сопротивления сечения при действии поперечной силы с учетом деформаций кручения должно быть уменьшено с V_{Rd} до $V_{T,Rd}$ и должно выполняться следующее условие:

$$V_{Ed}/V_{T,Rd} \leq 1,0, \quad (50)$$

где $V_{T,Rd}$ определяется следующим образом:

— для сечений типа I или H

$$V_{T,Rd} = \sqrt{1 - \frac{\tau_{t,Ed}\sqrt{3}}{1,25f_0/\gamma_{M1}}} V_{Rd}, \quad (51)$$

— для швеллера

$$V_{T,Rd} = \left[\sqrt{1 - \frac{\tau_{t,Ed}\sqrt{3}}{1,25f_0/\gamma_{M1}}} - \frac{\tau_{w,Ed}\sqrt{3}}{f_0/\gamma_{M1}} \right] V_{Rd} \quad (52)$$

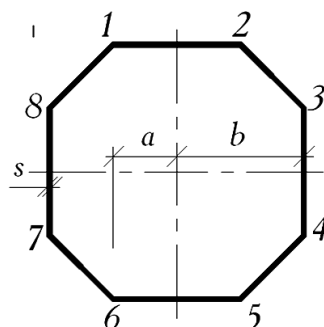
— для полого профиля

$$V_{T,Rd} = \left[1 - \frac{\tau_{t,Ed}\sqrt{3}}{f_0/\gamma_{M1}} \right] V_{Rd} \quad (53)$$

где параметр V_{Rd} определяется в п.5.6.1(6.2.6).

ПРИМЕР 8 Дано: Элемент коробчатого полого профиля; $\frac{1}{2}$ ширины сечения $b = 50$ мм; $\frac{1}{2}$ ширины плоских частей $a = b/(1+\sqrt{2}) = 20.71$ мм; толщина $s = 6$ мм.

Требуется определить геометрические характеристики поперечного сечения при кручении.



№/№	y	z	t
0	-b	a	s
1	-a	b	s
2	a	b	s
3	b	a	s
4	b	-a	s
5	a	-b	s
6	-a	-b	s
7	-b	-a	s
8	-b	a	s

Площадь поперечного сечения части элемента: $dA_i = t \sqrt{(y_i - y_{i-1})^2 + (z_i - z_{i-1})^2}$.

Площадь поперечного сечения элемента: $A = \sum_{i=2}^n dA_i$.

Статический момент сечения: $S_y = \sum_{i=2}^n (z_i + z_{i-1}) \frac{dA_i}{2}$; положение центра тяжести: $z_{gc} = S_y / A_{eff} = -1.7 \times 10^{-15}$ мм.

Момент инерции сечения: $I_y = \sum_{i=2}^n [(z_i)^2 + (z_{i-1})^2 + z_i z_{i-1}] \frac{dA_i}{3} - A z_{gc}^2 = 2.627 \times 10^6$ мм⁴.

Площадь поперечного сечения относительно нейтральной оси: $A_t = \sum_{i=2}^n 0.5 (y_i - y_{i-1})(z_i + z_{i-1}) = 8.284 \times 10^3$ мм².

Момент инерции сечения при кручении: $I_t = 4A_t / S_t = 4.971 \times 10^6$ мм⁴, где $S_t = \sum_{i=2}^n \frac{\sqrt{(y_i - y_{i-1})^2 + (z_i + z_{i-1})^2}}{t_i} = 55.228$.

Момент сопротивления при кручении: $W_{T,pl} = 2A_t t = 9.941 \times 10^4$ мм³.

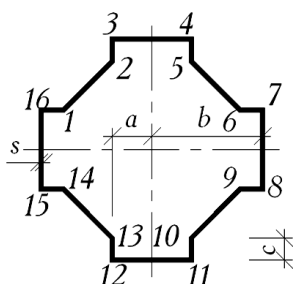
ПРИМЕР 9 Дано: Элемент коробчатого полого штампованного профиля; ½ ширины сечения $b = 50$ мм; выступ $c = 10$ мм; ½ ширины плоских поверхностей $a = 20$ мм; толщина $s = 6$ мм.

Требуется определить геометрические характеристики поперечного сечения при кручении.

Площадь поперечного сечения относительно нейтральной оси: $A_t = \sum_{i=2}^n 0.5 (y_i - y_{i-1})(z_i + z_{i-1}) = 7.2 \times 10^3$ мм².

Момент инерции сечения при кручении: $I_t = 4A_t / S_t = 3.523 \times 10^6$ мм⁴, где $S_t = \sum_{i=2}^n \frac{\sqrt{(y_i - y_{i-1})^2 + (z_i + z_{i-1})^2}}{t_i} = 58.856$.

Момент сопротивления при кручении: $W_{T,pl} = 2A_t t = 8.64 \times 10^4$ мм³.



№/№	y	z	t
0	-b	a	s
1	-b+ c	a	s
2	-a	b- c	s
3	-a	b	s
4	a	b	s
5	a	b- c	s
6	b- c	a	s
7	b	a	s
8	b	-a	s
9	b- c	-a	s
10	a	-b+ c	s
11	a	-b	s
12	-a	- b	s
13	-a	-b+ c	s
14	-b+ c	-a	s
15	-b	-a	s
16	- b	a	s

5.8 Изгиб и сдвиг (срез)

5.8.1[6.2.8] В случае действия на изгибаемый элемент поперечной силы необходимо учитывать ее влияние на несущую способность при изгибе.

Если величина поперечной силы, V_{Ed} меньше половины прочности при сдвиге (срезе), V_{Rd} , ее влияние на несущую способность при изгибе можно не учитывать, за исключением случая, когда потеря устойчивости при сдвиге (срезе) уменьшает прочность сечения (п.п.7.18-7.19(6.7.6)).

В противном случае необходимо учесть снижение значения расчетного сопротивления поперечного сечения из выражения:

$$f_{0,v} = f_0[1 - (2 V_{Ed}/V_{Rd} - 1)^2] \quad (54)$$

где V_{Rd} определяется согласно п.5.6.1(6.2.6).

При действии изгибающего момента на профили типа двутавра, принадлежащие классу 1 или 2, окончательное значение уменьшенной несущей способности $M_{v,Rd}$ при изгибе определяется из выражения:

$$M_{v,Rd} = t_f b_f (h - t_f) \frac{f_0}{\gamma_{M1}} + \frac{t_w h_w^2}{4} \frac{f_{0,v}}{\gamma_{M1}} \quad (55)$$

где h — полная высота сечения, а h_w — высота стенки между планками.

В случае действия изгибающей нагрузки на профили типа двутавра, принадлежащие классу 3, суммарное значение $M_{v,Rd}$ определяется из выражения (55), но с заменой знаменателя второго члена, равного 4, на 6.

Для расчетов при действии изгибающей нагрузки на сечения, принадлежащие классу

4, или имеющие зоны HAZ, см. п.п.7.18-7.19(6.7.6).

При наличии крутящего момента, V_{Rd} в выражении (54) заменяется на $V_{t,Rd}$ (п.5.31(6.2.7.3)), но $f_{0,v} = f_0$ при $V_{Rd} \leq 0,5V_{t,Rd}$.

При расчетах сложных изгибов под действием комбинации поперечных сил и изгибающих нагрузок см. п.п.7.21-7.25(6.7.8).

ПРИМЕР 10 Дано: Двутавровая балка, в сечении которой действует изгибающий момент $M_{cd} = 50$ кНм и сдвигающая нагрузка $V_{Ed} = 205$ кН. Высота балки $h = 200$ мм, ширина полки $b_f = 140$ мм, толщина полки $t_f = 6$ мм, толщина стенки $t_w = 12$ мм, ширина стенки $b_w = h_w = h - 2t_f = 200 - 2 \times 6 = 188$ мм. Материал балки – алюминиевый сплав EN AW-6082 T6 EP/O; $t > 5$ мм; $f_0 = 260$ Н/мм²; $f_u = 310$ Н/мм²; $\gamma_{M1} = 1.1$; $\gamma_{M2} = 1.25$ (таб.10).

Требуется проверить несущую способность поперечного сечения балки на изгиб и сдвиг.

Классификация элементов (п.5.1.4(6.1.4.4)).

а) стенка балки: $\beta_w = 0.4b_w/t_w = 6.267$; $\varepsilon = \sqrt{\frac{250}{f_0}} = 0.981$; $\beta_{1w} = 9\varepsilon = 8.829$; $\beta_{2w} = 13\varepsilon = 12.753$; $\beta_{3w} = 18\varepsilon = 17.658$; т.к. $\beta_w < \beta_{1w}$, $\beta_w < \beta_{2w}$, $\beta_w < \beta_{3w}$, класс стенки принимаем 1.

$h_w/t_w = 188/12 = 15.67 < 39\varepsilon = 38.26$.

Область сдвига $A_v = h_w \times t_w = 2256$ мм².

Расчетное сопротивление поперечного сечения на сдвиг (45):

$$V_{Rd} = A_v \frac{f_0}{\sqrt{3}\gamma_{M1}} = 307.87 \text{ кН.}$$

Проверка несущей способности на сдвиг (44): $V_{Ed}/V_{Rd} = 205/307.87 = 0.66 < 1.0$.

Согласно (54) $f_{0,v} = f_0[1 - (2 V_{Ed}/V_{Rd} - 1)^2] = 233.5$ Н/мм².

Уменьшенное значение сопротивления сечения при изгибе с учетом сдвига (55):

$$M_{v,Rd} = t_f b_f (h - t_f) f_{0,v} / \gamma_{M1} + 1/4 t_w h_w^2 f_{0,v} / \gamma_{M1} = 61.03 \text{ кНм} > M_{cd} = 50 \text{ кНм.}$$

Таким образом, несущая способность поперечного сечения балки на изгиб и сдвиг обеспечена.

5.9 Изгиб и продольная нагрузка

5.9.1[6.2.9.1] В случае действия комбинации изгибающего момента и продольной силы для поперечных сечений, симметричных по двум осям, (кроме сплошных сечений, см. п.5.9.2(6.2.9.2)), должны удовлетворяться следующие два условия:

$$\left(\frac{N_{Ed}}{\omega_0 N_{Rd}} \right)^{\xi_0} + \frac{M_{y,Ed}}{\omega_0 M_{y,Rd}} \leq 1 \quad (56)$$

$$\left(\frac{N_{Ed}}{\omega_0 N_{Rd}} \right)^{\eta_0} + \left(\frac{M_{y,Ed}}{\omega_0 M_{y,Rd}} \right)^{\gamma_0} + \left(\frac{M_{z,Ed}}{\omega_0 M_{z,Rd}} \right)^{\xi_0} \leq 1 \quad (57)$$

где $\eta_0 = 1,0$ или может быть определен как $\alpha_y^2 \alpha_z^2$, но $1 \leq \eta_0 \leq 2$; (58a)

$\gamma_0 = 1,0$ или может быть определен как α_z^2 , но $1 \leq \gamma_0 \leq 1,56$; (58b)

$$\xi_0 = 1,0 \text{ или может быть определен как } \alpha_y, \text{ но } 1 \leq \xi_0 \leq 1,56; \quad (58c)$$

N_{ed} представляет собой расчетные значения осевого сжатия или растяжения;

$M_{y,Ed}$ и $M_{z,Ed}$ — изгибающие моменты вокруг осей y - y и z - z (п.5.5.1(6.2.5));

$$N_{Rd} = A_{eff} f_0 / \gamma_{M1} \text{ (п.5.4.1(6.2.4));}$$

$$M_{y,Rd} = \alpha_y W_{y,cl} f_0 / \gamma_{M1};$$

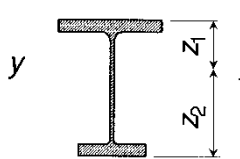
$$M_{z,Rd} = \alpha_z W_{z,sl} f_0 / \gamma_{M1};$$

α_y, α_z — формфакторы для изгиба по осям y и z , с поправкой на локальный изгиб и влияние зон HAZ, образованных при продольной сварке п.5.5.1(6.2.5));

$\omega_0 = 1$ — для сечений, в которых отсутствуют локализованные сварные швы или отверстия. В противном случае см. п.5.9.3(6.2.9.3).

Для определения класса поперечного сечения, см. п.5.1.4(6.1.4.4).

Выражение (57) также может использоваться для моносимметричных поперечных сечений с $\eta_0 = \alpha_y^2$ (но $1,0 \leq \eta_0 \leq 2,0$) и $\gamma_0 = \xi_0 = 1$, где $\alpha_y = \max(\alpha_{y1}, \alpha_{y2})$ (рисунок 16), если продольная нагрузка и изгибающий момент вызывают напряжения с таким же знаком в более широкой полке; $\alpha_y = \min(\alpha_{y1}, \alpha_{y2})$, если продольная нагрузка и изгибающий момент вызывают напряжения с таким же знаком в меньшей по размеру полке.



$$\alpha_{y1} = \frac{W_{pl,y} z_1}{l_y}$$

$$\alpha_{y2} = \frac{W_{pl,y} z_2}{l_y}$$

Рисунок 16[6.10]. Формфактор для моносимметричных сечений класса 1 или 2

5.9.2[6.2.9.2] При использовании полых профилей и элементов сплошного сечения должно выполняться следующее условие:

$$\left(\frac{N_{Ed}}{\omega_0 N_{Rd}} \right)^\psi + \left[\left(\frac{M_{y,Ed}}{\omega_0 M_{y,Rd}} \right)^{1,7} + \left(\frac{M_{z,Ed}}{\omega_0 M_{z,Rd}} \right)^{1,7} \right]^{0,6} \leq 1 \quad (59)$$

где $\psi = 1,3$ — для полых профилей и $\psi = 2$ — для сплошных сечений. Кроме того, ψ принимается как $\alpha_y \alpha_z$, но $1 \leq \psi \leq 1,3$ — для полых профилей и $1 \leq \psi \leq 2$ — для сплошных сечений.

5.9.3[6.2.9.3]. Если в сечении имеются зоны HAZ с заданной локализацией по длине и эта зона не распространяется вдоль профиля на расстояние большее, чем наименьшая ширина элемента, то предельное напряжение определяется как расчетный предел прочности $\rho_u h_{haz} f_u / \gamma_{M2}$ для материала с уменьшенной несущей способностью.

$$\omega_0 = \left(\frac{\rho_u h_{haz} f_u}{\gamma_{M2}} \right) / \left(\frac{f_0}{\gamma_{M1}} \right) \quad (60)$$

Здесь учитывается влияние зоны HAZ, возникшей при сварке временных монтажных конструкций.

В случае, если снижение несущей способности вследствие возникновения зон HAZ

распространяется вдоль по профилю на расстояние, больше чем наименьшая ширина элемента, предельное напряжение должно определяться как $\rho_{0,haz} f_0$ с учетом полной текучести материала с уменьшенной несущей способностью, следующим образом:

$$\omega_0 = \rho_{0,haz}, \quad (61)$$

ПРИМЕР 11 Дано: Стойка прямоугольного коробчатого профиля длиной $l_c = 3.8$ м; высота сечения $h_y = 120$ мм; ширина сечения $b_y = 120$ мм; толщина $t_w = t_f = 6$ мм. Стойка загружена сжимающей осевой силой $N_{Ed} = 110$ кН, поперечной силой $F_{Ed} = 8$ кН; изгибающий момент $M_{y,Ed} = 1/4 F_{Ed} l_c = 7.6$ кНм; $M_{z,Ed} = 0$ кНм. Материал стойки – алюминиевый сплав EN AW-6060 T6 EP; $t < 15$ мм; $f_0 = 140$ Н/мм²; $f_u = 170$ Н/мм²; $\rho_{0,haz} = 0.43$; $\rho_{u,haz} = 0.59$ (таб. 6); $E = 70000$ Н/мм²; $\gamma_{M1} = 1.1$; $\gamma_{M2} = 1.25$ (таб. 10).

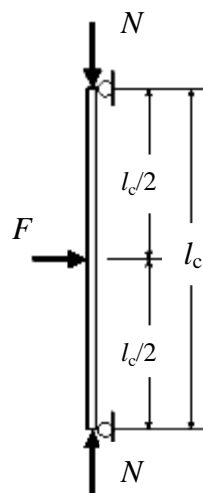
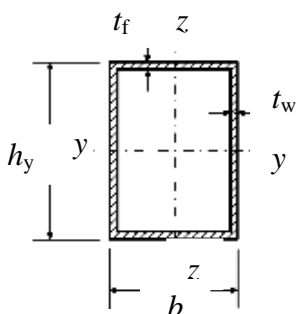
Требуется проверить несущую способность поперечного сечения стойки.

$$h_i = h_y - 2t_f = 168 \text{ мм}; b_i = b_y - 2t_w = 108 \text{ мм}; \varepsilon = \sqrt{\frac{250}{f_0}} = 1.336.$$

Классификация поперечного сечения элемента при осевом сжатии (п.5.1.4(6.1.4.4)).

Стенка.

$$\beta_w = (h_y - 2t_f)/t_w = 28;$$



$\beta_{1w} = 11\varepsilon = 14.7$; $\beta_{2w} = 16\varepsilon = 21.4$; $\beta_{3w} = 22\varepsilon = 29.4$; т.к. $\beta > \beta_1$, $\beta > \beta_2$, $\beta < \beta_3$, класс элемента принимаем 3.

Классификация поперечного сечения элемента при изгибе по оси x - x (п.5.1.4(6.1.4.4)).

Стенка.

$$\beta_w = 0.4(h_y - 2t_f)/t_w = 11.2;$$

$\beta_{1w} = 11\varepsilon = 14.7$; $\beta_{2w} = 16\varepsilon = 21.4$; $\beta_{3w} = 22\varepsilon = 29.4$; т.к. $\beta < \beta_1$, $\beta < \beta_2$, $\beta < \beta_3$, класс элемента принимаем 1.

Полка.

$$\beta_f = (b_y - 2t_w)/t_f = 18;$$

$\beta_{1f} = 11\varepsilon = 14.7$; $\beta_{2f} = 16\varepsilon = 21.4$; $\beta_{3f} = 22\varepsilon = 29.4$; т.к. $\beta > \beta_1$, $\beta < \beta_2$, $\beta < \beta_3$, класс элемента принимаем 2.

Окончательно для поперечного сечения при изгибе по оси $x - x$ принимаем класс 2.

Классификация поперечного сечения элемента при изгибе по оси $y - y$ (п.5.1.4 (6.1.4.4)).

Стенка.

$$\beta_w = 0.4(b_y - 2t_w)/t_f = 7.2;$$

$\beta_{1w} = 11\varepsilon = 14.7$; $\beta_{2w} = 16\varepsilon = 21.4$; $\beta_{3w} = 22\varepsilon = 29.4$; т.к. $\beta < \beta_1$, $\beta < \beta_2$, $\beta < \beta_3$, класс элемента принимаем 1.

Полка.

$$\beta_f = (h_y - 2t_f)/t_w = 28;$$

$\beta_{1f} = 11\varepsilon = 14.7$; $\beta_{2f} = 16\varepsilon = 21.4$; $\beta_{3f} = 22\varepsilon = 29.4$; т.к. $\beta > \beta_1$, $\beta > \beta_2$, $\beta < \beta_3$, класс элемента принимаем 3.

Окончательно для поперечного сечения при изгибе по оси $y - y$ принимаем класс 3.

Геометрические характеристики поперечного сечения элемента.

$$A = A_{\text{eff}} = b_y h_y - b_i h_i = 3.456 \times 10^3 \text{ мм}^2; I_y = b_y h_y^3/12 - b_i h_i^3/12 = 1.565 \times 10^7 \text{ мм}^4; I_z = b_y^3/12 - h_i^3/12 = 8.28 \times 10^6 \text{ мм}^4; W_{el,y} = I_y^2/h_y = 1.738 \times 10^5 \text{ мм}^3; W_{el,z} = I_z^2/b_y = 1.4 \times 10^5 \text{ мм}^3; W_{pl,y} = b_y h_y^2/4 - b_i h_i^2/4 = 2.1 \times 10^5 \text{ мм}^3.$$

При классе 2 $\alpha_y = W_{pl,y}/W_{el,y} = 1.208$ (таб. 15); при классе 3 $\alpha_z = 1.0$.

Несущая способность сечения при действии продольной силы (п.5.9.1(6.2.9.1)):

$$N_{Rd} = Af_0/\gamma_{M1} = 439.9 \text{ кН}.$$

По п. 5.9.2(6.2.9.2) $\psi = \alpha_y \alpha_z = 1.2 < 1.3$.

С учетом влияния зоны HAZ: $\omega_0 = \rho_{u,haz} f_u \gamma_{M1}/f_0 \gamma_{M2} = 0.59 \times 170 \times 1.1/140 \times 1.25 = 0.63$.

Сопротивление сечения при изгибе:

$$M_{y,Rd} = \alpha_y \frac{f_0 W_{el,y}}{\gamma_{M1}} = 26.721 \text{ кНм}; M_{z,Rd} = \alpha_z \frac{f_0 W_{el,z}}{\gamma_{M1}} = 17.572 \text{ кНм}.$$

Проверка несущей способности сечения по выражению (59):

$$\left(\frac{N_{Ed}}{\omega_0 N_{Rd}} \right)^{1.2} + \left[\left(\frac{M_{y,Ed}}{\omega_0 M_{y,Rd}} \right)^{1.7} + \left(\frac{M_{z,Ed}}{\omega_0 M_{z,Rd}} \right)^{1.7} \right]^{0.6} = 0.77 < 1.0.$$

Несущая способность поперечного сечения обеспечена.

5.10 Изгиб, сдвиг (срез) и продольная нагрузка

5.10.1[6.2.10] В случае действия на элемент комбинации изгибающей, сдвигающей и продольной нагрузок, необходимо учесть влияние на несущую способность при изгибе, как от действия поперечной силы, так и продольной нагрузки.

В случае, когда расчетное значение поперечной нагрузки, V_{Ed} , не превышает 50 % несущей способности V_{Rd} , нет необходимости корректировать величину несущей способности, определенную по п.п.5.9.1(6.2.9.1), 5.9.2(6.2.9.2) и 5.9.3(6.2.9.3) для изгиба и продольного усилия. Исключение составляют случаи, когда потеря устойчивости при сдвиге (срезе) уменьшает прочность сечения (п.п.7.18-7.19(6.7.6)).

При превышении значения V_{Ed} более 50 % от значения V_{Rd} , расчетная несущая способность поперечного сечения при действии комбинации момента и продольного усилия должна быть уменьшена на основании пониженного значения предела текучести:

$$(1 - \rho)f_0; \quad (62)$$

для области сдвига (среза), где:

$$\rho = (2V_{Ed}/V_{Rd} - 1)^2, \quad (63)$$

V_{Rd} определяется согласно п.5.28(6.2.6).

Взамен использования заниженного значения предела текучести, расчет также может быть выполнен с учетом эффективной толщины.

ПРИМЕР 12 *Дано:* Сварная балка двутаврового сечения длиной $L = 4.0$ м, нагруженная сосредоточенной нагрузкой $N_{Ed} = 140$ кН с эксцентриситетом $exc = 114.286$ мм; изгибающий момент $M_{y,Ed} = N_{Ed} exc = 16$ кНм; в сечении действует сдвигающая сила $V_{Ed} = 205$ кН. Высота балки $h = 200$ мм, ширина полки $b_f = 140$ мм, толщина полки $t_f = 6$ мм, толщина стенки $t_w = 12$ мм; ширина стенки $b_w = h_w = h - 2 t_f = 200 - 2 \times 6 = 188$ мм. Материал балки – алюминиевый сплав EN AW-6082 T6 EP/O; $t > 5$ мм; $f_0 = 260$ Н/мм²; $f_u = 310$ Н/мм²; $\rho_{0,haz} = 0.48$; $\rho_{u,haz} = 0.60$ (таб. 6); $E = 70000$ Н/мм²; $\gamma_{M1} = 1.1$; $\gamma_{M2} = 1.25$ (таб.10).

Требуется проверить несущую способность поперечного сечения балки.

Классификация элементов (п.5.1.4(6.1.4.4)).

а) стенка балки: $\beta_w = 0.4b_w/t_w = 6.267$; $\varepsilon = \sqrt{\frac{250}{f_0}} = 0.981$; $\beta_{1w} = 9\varepsilon = 8.829$; $\beta_{2w} = 13\varepsilon = 12.753$; $\beta_{3w} = 18\varepsilon = 17.658$; т.к. $\beta_w < \beta_{1w}$, $\beta_w < \beta_{2w}$, $\beta_w < \beta_{3w}$, класс стенки принимаем 1.

Определяем коэффициент локального продольного изгиба ρ_c по выражению (27), принимая $C_1 = 29$ и $C_2 = 198$ (таб. 14):

$$\rho_{cw} = C_1/(\beta_w/\varepsilon) - C_2/(\beta_w/\varepsilon)^2 = -0.312, \text{ принимаем } \rho_{cw} = 1.0, \text{ т.к. } \beta_w < \beta_{3w}.$$

Эффективная толщина стенки: $t_{eff} = \rho_c t = 12.0$ мм.

б) полки балки: $\beta_f = (b_f - t_w) t_f = 21.333$; $\varepsilon = \sqrt{\frac{250}{f_0}} = 0.981$; $\beta_{1f} = 2.5\varepsilon = 2.45$; $\beta_{2f} = 4\varepsilon = 3.92$; $\beta_{3f} = 4\varepsilon = 4.91$; т.к. $\beta_f > \beta_{1f}$, $\beta_f > \beta_{2f}$, $\beta_f > \beta_{3f}$, класс стенки принимаем 4.

Определяем коэффициент локального продольного изгиба ρ_c по выражению (27), принимая $C_1 = 29$ и $C_2 = 198$ (таб. 14):

$$\rho_{cf} = C_1/(\beta_f/\varepsilon) - C_2/(\beta_f/\varepsilon)^2 = 0.915.$$

Эффективная толщина стенки: $t_{f,ef} = \rho_{cf} t_f = 0.915 \times 6 = 5.49$ мм.

Для полного поперечного сечения принимаем класс 4.

Учет зоны HAZ (упругий расчет).

Эффективная толщина полки: $t_{f,haz} = \rho_{0,haz} t_f = 0.48 \times 6 = 2.88$ мм;

$$t_{f,ef} = t_{f,haz} = 2.88 \text{ мм.}$$

Эффективная толщина стенки: $t_{w,haz} = \rho_{0,haz} t_f = 0.48 \times 12 = 5.76$ мм;

$$t_{w,ef} = t_{w,haz} = t_{f,ef} = 2.88 \text{ мм.}$$

Т.к. $6 < t_1 < 12$ мм, принимаем ширину зоны HAZ $b_{haz} = 30$ мм (п.5.15(6.1.6.3)).

Учет зоны HAZ (локальное разрушение в критическом сечении).

Эффективная толщина полки: $t_{f,haz} = \rho_{u,haz} t_f = 0.6 \times 6 = 3.6$ мм;

$$t_{f,ef} = t_{f,haz} = 3.6 \text{ мм.}$$

Эффективная толщина стенки: $t_{w,haz} = \rho_{u,haz} t_f = 0.6 \times 12 = 7.2$ мм;

$$t_{w,ef} = t_{w,haz} = t_{f,ef} = 3.6 \text{ мм.}$$

Определяем площадь поперечного сечения балки:

$$A_g = 2bt_f + (h - 2t_f)t_w = 3.936 \times 10^3 \text{ мм}^2.$$

Площадь поперечного сечения с учетом зоны HAZ: $A_{\text{net}} = A_g - b(t_f - t_{f,\text{ef}}) - b_{\text{haz}}(t_w - t_{w,\text{ef}}) = 3.225 \times 10^3 \text{ мм}^2$.

Геометрические характеристики сечения при изгибе.

Определяем упругий момент сопротивления полного поперечного сечения балки: $A_g = 2bt_f + (h - 2t_f)t_w = 3.936 \times 10^3 \text{ мм}^2$; $I_g = \frac{1}{12}[bh^3 - (b - t_w)(h - 2t_f)^3] = 2.246 \times 10^7 \text{ мм}^4$; $W_{\text{el}} = \frac{2I_g}{h} = 2.246 \times 10^5 \text{ мм}^3$.

Пластический момент сопротивления: $W_{\text{ple}} = \frac{1}{4}[bh^2 - (b - t_w)(h - 2t_f)^2] = 2.69 \times 10^5 \text{ мм}^3$.

Площадь поперечного сечения с учетом локального продольного изгиба и зоны HAZ: $A_{\text{eff,haz}} = A_g - b(t_f - t_{f,\text{ef}}) - b_{\text{haz}}(t_w - t_{w,\text{ef}}) = 3.399 \times 10^3 \text{ мм}^2$.

Смещение центра тяжести сечения: $e_{\text{ef}} = \left[b(t_f - t_{f,\text{ef}}) \left(\frac{h}{2} - \frac{t_f}{2} \right) + b_{\text{haz}}(t_w - t_{w,\text{ef}}) \left(\frac{h}{2} - t_f - \frac{b_{\text{haz}}}{2} \right) \right] \frac{1}{A_{\text{eff,haz}}} = 14.038 \text{ мм}$.

Моменты инерции и сопротивления второго порядка относительно центра эффективного сечения: $I_{\text{eff,haz}} = I_g - b(t_f - t_{f,\text{ef}}) \left(\frac{h}{2} - \frac{t_f}{2} \right)^2 - \frac{b_{\text{haz}}^3}{12}(t_w - t_{w,\text{ef}}) - b_{\text{haz}}(t_w - t_{w,\text{ef}}) \left(\frac{h}{2} - t_f - \frac{b_{\text{haz}}}{2} \right)^2 = 1.816 \times 10^7 \text{ мм}^4$; $W_{\text{eff,haz}} = \frac{I_{\text{eff,haz}}}{\frac{h}{2} + e_{\text{ef}}} = 1.533 \times 10^5 \text{ мм}^3$.

Значение формфактора определяем по таб. 15: $\alpha = W_{\text{eff,haz}}/W_{\text{el}} = 0.683$.

Расчет на сдвиг.

$$h_w/t_w = 188/12 = 15.67 < 39\varepsilon = 38.26.$$

$$\text{Область сдвига } A_v = h_w \times t_w = 2256 \text{ мм}^2.$$

Расчетное сопротивление поперечного сечения на сдвиг (45):

$$V_{\text{Rd}} = A_v \frac{f_0}{\sqrt{3}\gamma_{\text{M1}}} = 307.87 \text{ кН}.$$

Проверка несущей способности на сдвиг (44): $V_{\text{Ed}}/V_{\text{Rd}} = 205/307.87 = 0.66 < 1.0$.

$$\text{Согласно (62) и (63) } f_{0,v} = f_0[1 - (2 V_{\text{Ed}}/V_{\text{Rd}} - 1)^2] = 233.5 \text{ Н/мм}^2.$$

Расчетные значения изгибающего момента, нормальной силы с учетом сдвига и проверка несущей способности поперечного сечения.

$$M_{y,\text{Rd}} = \frac{f_{0,v}\alpha W_{\text{el}}}{\gamma_{\text{M1}}} = 32.56 \text{ кНм}; N_{\text{Rd}} = \frac{f_{0,v}A_{\text{eff,haz}}}{\gamma_{\text{M1}}} = 721.52 \text{ кН}.$$

Согласно п.5.33(6.2.9.1) при $\eta_0 = 1$; $\gamma_0 = 1$; $\xi_0 = 1$

$$\left(\frac{N_{\text{Ed}}}{N_{\text{Rd}}} \right)^{\eta_0} + \left(\frac{M_{y,\text{Ed}}}{M_{y,\text{Rd}}} \right)^{\xi_0} = 0.194 + 0.491 = 0.685 < 1.0, \text{ т.е. несущая способность сечения}$$

класса 4 обеспечена.

5.11 Сопротивление элементов при продольном изгибе

5.11.1 Согласно п. 6.3.1 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011 разрушение элементов, подвергаемых осевому сжатию, может происходить по одному из трех вариантов:

- при изгибе (проверка должна выполняться всегда);
- от кручения или под действием изгибающего крутящего момента (проверка выполняется в некоторых случаях);

в) от локального раздавливания (проверка необходима только для подкосов, имеющих низкую степень гибкости, которые значительно ослаблены локально из-за наличия отверстий или проведения сварочных работ).

5.11.2 В соответствии с п.п. 6.3.1.1 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011 элемент, воспринимающий сжимающие усилия, необходимо проверять как на изгиб, так и на кручение или кручение с изгибом, согласно выражению:

$$N_{Ed} / N_{b,Rd} \leq 1.0, \quad (64)$$

где: N_{Rd} — расчетное значение силы сжатия;

$N_{b,Rd}$ — расчетное сопротивление продольному изгибу для элемента, работающего на сжатие.

Расчетное значение несущей способности при продольном изгибе для сжатого элемента $N_{b,Rd}$ определяется как:

$$N_{b,Rd} = k \chi A_{eff} f_0 / \gamma_{M1}, \quad (65)$$

где χ — уменьшающий коэффициент для соответствующего варианта изгиба, как представлено в п. 5.11.3(6.3.1.2);

k — коэффициент, учитывающий ослабляющее влияние сварки. Для продольно сваренного элемента значения k для изгиба представлены в таблице 16; $k = 1$ - для крутящего и изгибающего крутящего момента. В случае поперечно свариваемых элементов $k = \omega_x$ (согласно п.5.11.14(6.3.3.3));

A_{eff} — представляет собой эффективную площадь сечения, с учетом локального продольного изгиба для поперечного сечения класса 4. При расчете на кручение и на изгиб с кручением см. таблицу 17;

$A_{eff} = A$ для классов поперечных сечений 1, 2 или 3.

5.11.3[6.3.1.2] При осевом сжатии элемента величина χ для соответствующего значения $\bar{\lambda}$ должна определяться исходя из соответствующей кривой изгиба, согласно выражению:

Таблица 16[6.5]

Значения коэффициента k для элемента с продольными сварными швами	
Класс материала А, в соответствии с таблицами 5-7	Класс материала В, в соответствии с таблицами 5-7
$k = 1 - \left(1 - \frac{A_1}{A}\right) 10^{-\bar{\lambda}} \left(0,05 + 0,1 \frac{A_1}{A}\right) \bar{\lambda}^{-1,3(1-\bar{\lambda})}$ <p>где $A_1 = A - A_{haz}$ ($1 - \rho_{0,haz}$), где A_{haz} = площадь зоны HAZ</p>	$k = 1, \text{ если } \bar{\lambda} \leq 0,2;$ $k = 1 + 0,04(4\bar{\lambda})^{(0,5-\bar{\lambda})} - 0,22\bar{\lambda}^{1,4(1-\bar{\lambda})}$ <p>если $\bar{\lambda} > 0,2$</p>

$$\chi = \frac{1}{\varphi + \sqrt{\varphi^2 - \bar{\lambda}^2}}, \quad \text{но } \chi < 1,0 \quad (66)$$

где $\varphi = 0,5(1 + \alpha(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2)$;

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{\text{eff}} f_0}{N_{\text{cr}}}} \quad (67)$$

Таблица 17[6.6]

Значения α и $\bar{\lambda}_0$ для учета изгибной потери устойчивости		
Класс материала, подвергаемого продольному изгибу, в соответствии с таблицами 5-7	α	$\bar{\lambda}_0$
Класс А	0,20	0,10
Класс В	0,32	0,00

α — коэффициент наполнения;

$\bar{\lambda}_0$ — граница горизонтальной плоскости;

N_{cr} — критическое усилие в упругой области для соответствующего варианта изгиба, основанное на свойствах полных поперечных сечений.

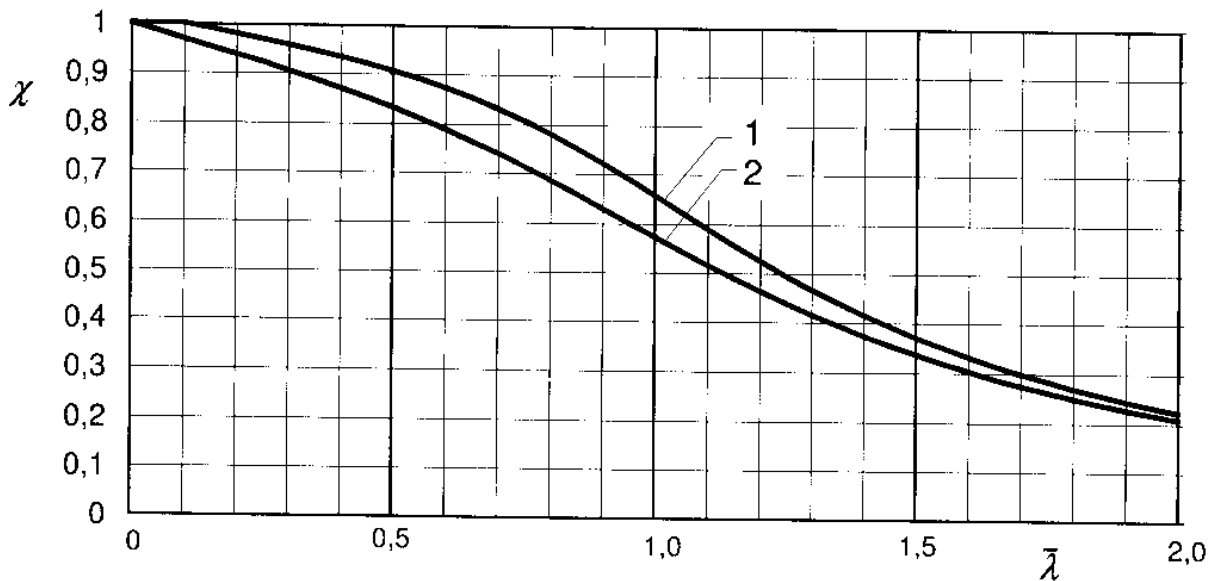
Коэффициент наполнения α и граница горизонтальной плоскости $\bar{\lambda}_0$, соответствующие кривой изгиба, должны определяться из таблицы 17 для изгиба и таблицы 18 для кручения или изгиба с кручением.

Значения коэффициента уменьшения χ для соответствующего коэффициента относительной гибкости $\bar{\lambda}$, могут быть получены из рисунка 17 для изгиба и из рисунка 18 для кручения или изгиба с кручением.

При $\bar{\lambda} < \bar{\lambda}_0$ или при $N_{\text{Ed}} \leq N_{\text{cr}}$ влияние продольного изгиба можно не учитывать и проводить проверку только поперечного сечения.

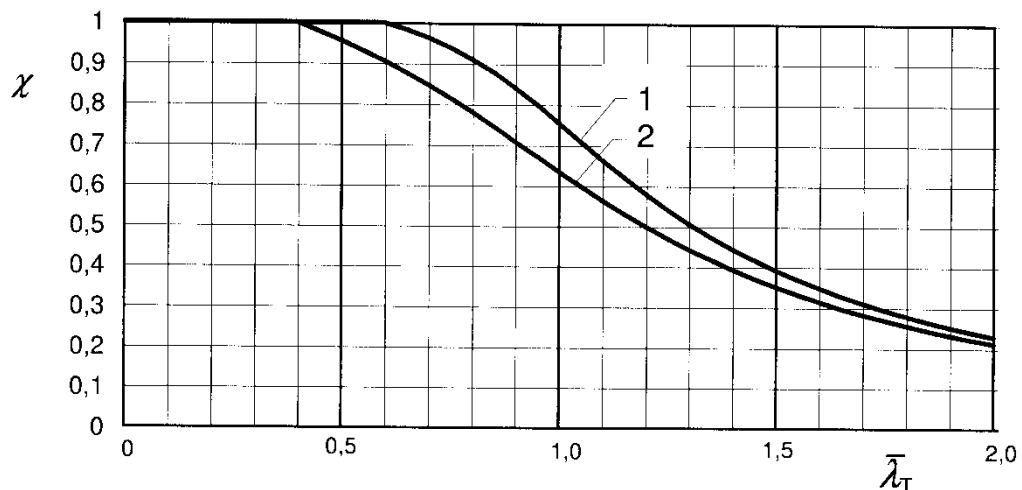
Таблица 18[6.7]

Значения α , $\bar{\lambda}_0$ и A_{eff} для крутильной или изгибно-крутильной потери устойчивости			
Поперечное сечение	α	$\bar{\lambda}_0$	A_{eff}
Основные значения ¹⁾	0,35	0,4	$A_{\text{eff}}^{1)}$
Полностью состоит из радиальных внешних элементов	0,20	0,6	$A^{2)}$
¹⁾ Для сечений, содержащих неусиленные внешние элементы, так что вариант 1 будет критичен в смысле локального продольного изгиба (см. п.5.1.6(6.1.4.3)), элемент должен рассматриваться как «основной», а A_{eff} определяться с учетом локального продольного изгиба или зоны HAZ, либо и того и другого. ²⁾ Для сечений, например уголки, тройники и крестообразные профили, полностью состоящие из радиальных внешних элементов, локальный изгиб и изгиб с кручением взаимосвязаны. При определении A_{eff} , там где это необходимо, нужно вводить поправку, на наличие зоны HAZ, но для локального продольного изгиба снижение не выполняется, т. е. $\rho_c = 1$.			



1 — материал класса А;
2 — материал класса В

Рисунок 17[6.11]. Коэффициент уменьшения χ при учете изгиба



1 — поперечное сечение, содержащее радиальные внешние элементы,
2 — основное поперечное сечение

Рисунок 18[6.12]. Коэффициент уменьшения χ для момента кручения или изгибающего крутящего момента

5.11.4[6.3.1.3] Относительная гибкость λ определяется из следующего выражения:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{\text{eff}} f_0}{N_{\text{cr}}}} = \frac{L_{\text{cr}}}{i} \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{A_{\text{eff}} f_0}{A E}} \quad (68)$$

где L_{cr} — длина зоны изгиба в рассматриваемой плоскости изгиба;

i — радиус инерции по соответствующей оси, определенный с использованием свойств основного поперечного сечения.

Длина линии изгиба L_{cr} должна определяться как kL , где L — длина между точками бокового крепления; для консольного подкоса L — длина подкоса. Значение параметра k , коэффициента длины линии изгиба для подкосов, должна определяться на основании конечных условий (таблица 19).

Коэффициент длины линии изгиба k имеет большую величину по сравнению с теоретическим значением при зафиксированных концах, учитывая различные деформации в соединении между несущими элементами.

5.11.5[6.3.1.4] Для элементов с открытым поперечным сечением необходимо учитывать возможность того, что несущая способность элемента при действии крутящего момента или изгибающего крутящего момента может быть меньше чем его сопротивление продольному изгибу.

Действием крутящего момента или изгибающего крутящего момента можно пренебречь в случае применения:

- а) полых профилей;
- б) симметричных по двум осям двутавровых профилей;
- в) сечений, состоящие полностью из радиально направленных элементов, например, уголков, тройников, крестообразных профилей, которые принадлежат классам 1 и 2, в соответствии с п. 5.12.6.

Таблица 19[6.8]

Коэффициенты длины зоны продольного изгиба k для подкосов	
Конечные условия	k
1. Удерживается в положении и ограничен в направлении обоих концов	0,7
2. Закреплен по обоим концам и ограничен в направлении одного конца	0,85
3. Закреплен за оба конца, но не ограниченный в направлении	1,0
4. Закреплен за один конец, и ограничен в направлении обоих концов	1,25
5. Закреплен и ограничен в направлении одного конца, и частично закреплен по направлению, но не закреплен на другом конце	1,5
6. Закреплен и ограничен в направлении одного конца, но не закреплен и не ограничен на другом конце	2,0

Относительная податливость $\bar{\lambda} = \bar{\lambda}_T$ крутильной и крутильно-изгибной потери устойчивости определяется следующим образом:

$$\bar{\lambda}_T = \sqrt{\frac{A_{\text{eff}} f_0}{N_{\text{cr}}}} \quad (69)$$

где A_{eff} — область поперечного сечения соответствующая таблице 18;

N_{cr} — критическая упругая нагрузка при изгибающем крутящем моменте, с учетом

влияния, в случае необходимости, пластичного изгиба.

Значения N_{cr} и $\bar{\lambda}_T$ представлены в Приложении I СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/ 2011.

5.11.6 Согласно п.п. 6.3.1.5 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011 рекомендуется использование упрощенной методики расчета эксцентрично связанного подкоса (альтернативный вариант к общему методу расчета при сочетании изгиба и сжатия по п. п.5.11.11-5.11.16(6.3.3)), если крепление его конца предотвращает вращение в плоскости участка закрепления и отсутствует изгиб. При этом возможны следующие варианты:

- а) связанный только по одной стороне одиночный уголок;
- б) уголки, связанные одной из полок, закрепленные с одной стороны косынкой;
- в) одиночный швеллер, связанный только по стенке;
- г) одиночный тройник, связанный только по полке.

В случае проверки, согласно п.5.11.2(6.3.1.1), из плоскости закрепленного участка (ов), эксцентриситет приложения нагрузки можно не учитывать, а значение $N_{b,Rd}$ необходимо принимать как 40 % от его значения при центрально приложенной нагрузке.

Значение для пункта а) должна совпадать со значением, при котором оси параллельны связанному элементу (ам). При действии изгибающего крутящего момента поправки в методику расчета, изложенную в п. п. 5.11.2(6.3.1.1) и 5.11.5(6.3.1.4), не вводятся.

5.11.7 В соответствии с п.6.3.2 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011 для изгибаемых элементов необходимо производить проверку на:

- а) изгиб (п.5.5.1(6.2.5)), включающий, при необходимости, поправку на одновременный сдвиг (п.5.8.1(6.2.8));
- б) сдвиг (п.5.6.1(6.2.6) и п.5.8.1(6.2.8));
- в) несущую способность стенки (п.п.7.13-7.17(6.7.5));
- г) боковой изгибающий крутящий момент (п.5.11.8(6.3.2.1)).

Для различных классов поперечного сечения (п.5.1.2(6.1.4)), необходимо учитывать наличие зон температурного воздействия (п.5.1.11(6.1.5)) и вводить поправки на наличие отверстий (п.5.5.1(6.2.5)).

Определение прочности элементов, нагруженных изгибающей нагрузкой в комбинации с осевой нагрузкой выполняется по п.п.5.11.11-5.11.16(6.3.3).

Прочность элементов, подверженных изгибу в двух плоскостях совместно с осевой нагрузкой, проверяется по п.п.5.9.1(6.2.9) и п.п.5.11.11-5.11.16(6.3.3).

5.11.8 Согласно п. 6.3.2.1 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011 изгибаемый по главной оси элемент, не закрепленный в поперечном направлении, должен проверяться на действие бокового крутящего момента согласно выражению:

$$M_{Ed} / M_{b,Rd} \leq 1,0 \quad (70)$$

где M_{Ed} — расчетное значение изгибающего момента;

$M_{b,Rd}$ — расчетное значение момента сопротивления продольному изгибу.

Расчетное значение момента сопротивления продольному изгибу для элемента, не закрепленного в поперечном направлении, определяется из следующего выражения:

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \alpha W_{el,y} f_o / \gamma_{M1}, \quad (71)$$

где $W_{el,y}$ — упругий момент сопротивления основного сечения, без учета зоны HAZ, локального продольного изгиба или отверстий;

α — см. таблицу 15; необходимо соблюдать ограничение $\alpha \leq W_{pl,y}/W_{el,y}$;

χ_{LT} — коэффициент уменьшения при боковом изгибе от крутящего момента (п. 5.11.9).

5.11.9[6.3.2.2] Коэффициент уменьшения в случае поперечной потери устойчивости при продольном изгибе χ_{LT} при соответствующей относительной гибкости/податливости $\bar{\lambda}_{LT}$, должен определяться из выражения:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\varphi_{LT} + \sqrt{\varphi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}}, \text{ но } \chi_{LT} \leq 1.0 \quad (72)$$

$$\varphi_{LT} = 0,5(1 + \alpha_{LT}(\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{0,LT})) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \quad (73)$$

где α_{LT} — коэффициент наполнения;

$\bar{\lambda}_{LT}$ — относительная гибкость

$\bar{\lambda}_{0,LT}$ — граница горизонтального участка;

M_{cr} — критический момент упругости для бокового изгибающего момента при кручении.

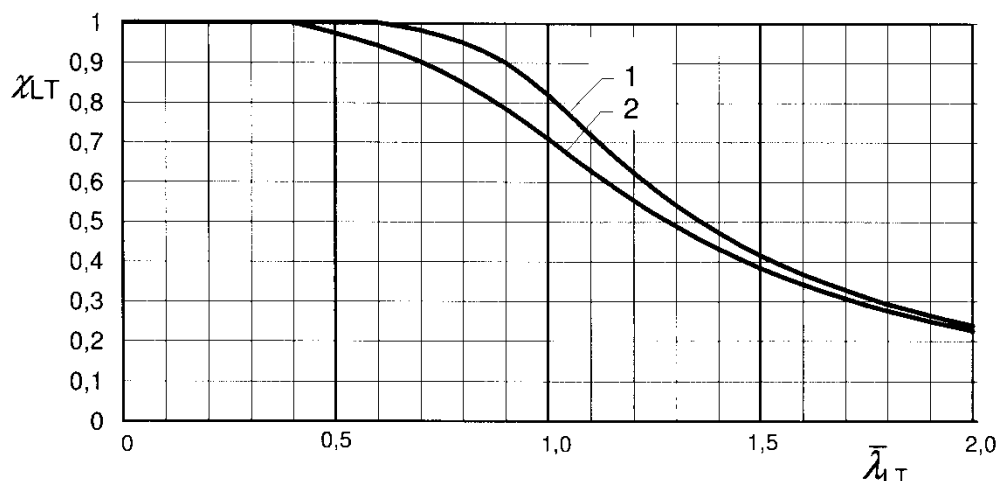
Значения α_{LT} и $\bar{\lambda}_{0,LT}$ определяются следующим образом:

$\alpha_{LT}=0.10$ и $\bar{\lambda}_{0,LT}=0.6$ для поперечных сечений класса 1 и 2;

$\alpha_{LT}=0.20$ и $\bar{\lambda}_{0,LT}=0.4$ для поперечных сечений класса 3 и 4.

Значения коэффициента уменьшения χ_{LT} для соответствующей относительной гибкости $\bar{\lambda}_{LT}$ может быть получено по графику на рисунке 19.

При коэффициенте гибкости $\bar{\lambda}_{LT} \leq \bar{\lambda}_{0,LT}$, или при $M_{Ed} \leq M_{cr}$ влиянием продольного изгиба элемент можно пренебречь и выполнить только проверку поперечного сечения.



1 — поперечные сечения класса 1 и 2; 2 — поперечные сечения класса 3 и 4

Рисунок 19 — Коэффициент уменьшения χ_{LT} для поперечной потери устойчивости при продольном изгибе

5.11.10[6.3.2.3] Коэффициент относительной гибкости $\bar{\lambda}_{LT}$ определяется из выражения:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{\alpha W_{el,y} f_0}{M_{cr}}} \quad (74)$$

где α — принимается из таблицы 15 и должен удовлетворять неравенству $\alpha \leq W_{pl,y} / W_{el,y}$;

M_{cr} — критический момент упругости для поперечной потери устойчивости при продольном изгибе.

M_{cr} зависит от свойств полного поперечного сечения и учитывает условия приложения нагрузки, реальное распределение изгибающих моментов и боковое сжатие.

Выражения, определяющие M_{cr} для конкретных сечений и граничных условий, представлены в Приложении I.1 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011, а приблизительные значения $\bar{\lambda}_{LT}$ для конкретных двутавровых профилей и швеллеров даны в Приложении I.2 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011.

5.11.11[6.3.3] Проверка устойчивости однородных элементов в случае, если не проводится анализ второго порядка в соответствии с п.п.4.4-4.8(5.3.2), выполняется для следующих случаев:

— элементы, которые не восприимчивы к деформациям, возникающим при кручении, например, круглые полые профили или сечения, ограниченные от кручения (только изгибающий крутящий момент);

— элементы, восприимчивые к деформациям, возникающим при кручении, например, элементы с открытыми поперечными сечениями, не ограниченными для кручения (боковой изгибающий крутящий момент или пластичный изгиб).

Согласно п. 6.3.3 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011 для элементов, которые восприимчивы к деформациям, возникающим при кручении, вообще говоря, необходимо проводить две проверки:

- на пластичный изгиб;
- на боковой изгибающий крутящий момент.

При определении значений несущей способности N_{Rd} , $M_{y,Rd}$ и $M_{z,Rd}$ необходимо учитывать наличие зоны HAZ, возникающей при сварке продольных швов (п.п.5.4.1(6.2.4) и 5.5.1(6.2.5)). Кроме того, учитывается наличие локализованной зоны HAZ, возникающей при сварке поперечных швов, а также, наличие отверстий, согласно п.п.5.11.14(6.3.3.3) и 5.11.15(6.3.3.4), соответственно.

Значения необходимых для проведения проверочных расчетов величин должны быть положительными.

Для каждого из нагруженных узлов необходимо отдельно произвести классификацию поперечных сечений элементов, подверженных сложным комбинациям изгибающих и продольных нагрузок, согласно п.п.5.1.2-5.1.10(6.1.4). Причем классификация при сложном напряженном состоянии не выполняется.

Поперечные сечения, подверженные действию комбинации продольной нагрузки, изгиба вдоль главной оси и изгибу вдоль второстепенной оси, могут принадлежать к различным классам. Сложное напряженное состояние учитывается расчетными формулами. Причем, эти выражения могут использоваться для всех классов поперечных сечений. Вли-

яние локального изгиба и текучести на несущую способность при комбинациях нагрузок учитывается путем изменения значений знаменателя и показателей степени, которые зависят от гибкости поперечного сечения.

При использовании методик расчета, описанных в п.п.5.11.12(6.3.3.1) и 5.11.16(6.3.3.5), проверка сечения производится на продольный изгиб и действие бокового изгибающего крутящего момента.

5.11.12[6.3.3.1] Расчет элементов с открытым поперечным сечением, симметричным по двум осям (сплошные профили), производится по одному из следующих выражений:

— для главной оси изгиба (ось Y):

$$\left(\frac{N_{Ed}}{\chi_y \omega_x N_{Rd}} \right)^{\xi_{yc}} + \frac{M_{y,Ed}}{\omega_0 M_{y,Rd}} \leq 1 \quad (75)$$

— для второстепенной оси изгиба (ось Z):

$$\left(\frac{N_{Ed}}{\chi_z \omega_x N_{Rd}} \right)^{\eta_c} + \left(\frac{M_{z,Ed}}{\omega_0 M_{z,Rd}} \right)^{\xi_{zc}} \leq 1 \quad (76)$$

где $\eta_c = 0.8$ или может быть рассчитан как:

$$\eta_c = \eta_0 \chi_z, \text{ но } \eta_0 \geq 0.8; \quad (77a)$$

$\xi_{yc} = 0.8$ или может быть определен с помощью выражения:

$$\xi_{yc} = \xi_0 \chi_y, \text{ но } \xi_{yc} \geq 0.8; \quad (77б)$$

$\xi_{zc} = 0.8$ или может быть определен с помощью выражения:

$$\xi_{zc} = \xi_0 \chi_z, \text{ но } \xi_{zc} \geq 0.8; \quad (77в)$$

η_0 и ξ_0 определяются в соответствии с п.5.9.1(6.2.9.1);

$\omega_x = \omega_0 = 1$ для стержневых колонн без локализованных сварных швов (кроме того, см. п.5.11.14(6.3.3.3)) и с равными моментами на концах колонны (кроме того, см. и 5.11.15(6.3.3.4)).

Для сплошных профилей можно использовать выражение (76) с показателем степени, равным 0,8 или:

$$\eta_c = 2\chi, \text{ но } \eta_c \geq 0.8; \quad (77г)$$

$$\xi_c = 1.56\chi, \text{ но } \xi_c \geq 0.8 \quad (77д)$$

Проверка прочности полых профилей и труб должна выполняться согласно следующему выражению:

$$\left(\frac{N_{Ed}}{\chi_{\min} \omega_0 N_{Rd}} \right)^{\psi_c} + \frac{1}{\omega_0} \left[\left(\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} \right)^{1,7} + \left(\frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} \right)^{1,7} \right]^{0,6} \leq 1 \quad (78)$$

где $\psi_c = 0.8$ или может быть определен с помощью выражения $1.3\chi_y$, или $1.3\chi_z$, в зависимости от направления изгиба, а $\psi_c \geq 0.8$ при $\chi_{\min} = \min(\chi_y, \chi_z)$.

Для других открытых моносимметрических поперечных сечений, подверженных изгибу по любой из осей, выражение (75) может использоваться с ξ_{yc} , $M_{y,Ed}$, $M_{y,Rd}$ и χ_y заме-

ненным на ξ_{zc} , $M_{z,Ed}$, $M_{zy,Rd}$ и χ_z .

Параметры, приведенные в критериях (75)–(78), имеют следующие значения:

N_{Ed} — расчетное значение осевой сжимающей нагрузки;

$M_{y,Ed}$, $M_{z,Ed}$ — расчетные значения изгибающего момента по осям y и z . Моменты рассчитываются согласно теории первого порядка;

$N_{Rd} = Af_0/\gamma_{M1}$ или $A_{eff}f_0/\gamma_{M1}$ — для поперечных сечений класса 4. Для элементов с продольными сварными швами, но без локальной сварки $N_{Rd} = kAf_0/\gamma_{M1}$ или $kA_{eff}f_0/\gamma_{M1}$ (п.п.5.11.2-5.11.6(6.3.1));

χ_y и χ_z — коэффициенты уменьшения для изгиба в плоскостях $z-x$ и $y-x$, соответственно;

$M_{y,Rd} = \alpha_y W_{yf_0}/\gamma_{M1}$ — изгибающий момент нагрузки вдоль оси y ;

$M_{z,Rd} = \alpha_z W_{zf_0}/\gamma_{M1}$ — изгибающий момент нагрузки вдоль оси z ;

α_y, α_z — форм-факторы; значения α_y и α_z должны быть больше 1.25 (п.п.5.5.1-5.5.2(6.2.5) и п.5.9.1(6.2.9.1)).

5.11.13[6.3.3.2] Расчет элементов с открытым поперечным сечением, симметричных по главной оси, центрально-симметричных или симметричных по двум осям производится согласно выражению:

$$\left(\frac{N_{Ed}}{\chi_z \omega_x N_{Rd}} \right)^{\eta_c} + \left(\frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \omega_{xLT} M_{y,Rd}} \right)^{\gamma_c} + \left(\frac{M_{z,Ed}}{\omega_0 M_{z,Rd}} \right)^{\xi_{zc}} \leq 1, \quad (79)$$

где N_{Ed} — расчетное значение осевой сжимающей нагрузки;

$M_{y,Ed}$ — изгибающий момент, действующий по оси y .

Для стержневых колонн с шарнирно закрепленными концами и при наличии элементов в жесткой конструкции, предотвращающей наклон, $M_{y,Ed}$ представляет собой момент первого порядка. Для элементов, расположенных в конструкции, имеющей степени свободы, $M_{y,Ed}$ представляет собой изгибающий момент, соответствующий теории второго порядка;

$M_{z,Ed}$ — изгибающий момент, действующий по оси z ; $M_{z,Rd}$ изгибающий момент согласно теории первого порядка;

$N_{Rd} = Af_0/\gamma_{M1}$ или $A_{eff}f_0/\gamma_{M1}$ — для поперечных сечений класса 4. Для элементов, имеющих продольные сварные швы, но при отсутствии локальной сварки $N_{Rd} = kAf_0/\gamma_{M1}$ или $kA_{eff}f_0/\gamma_{M1}$ (п.п. 5.11.2-5.11.6(6.3.1));

χ_z — коэффициент уменьшения при изгибе, если одна или обе полки отклоняются в поперечном направлении (изгиб в плоскости $x-y$ или боковой изгибающий крутящий момент) на основании выражения (84а), при наличии локальной сварки.

$M_{y,Rd} = \alpha_y W_{y,elf_0}/\gamma_{M1}$ — изгибающий момент вдоль оси y ;

$M_{z,Rd} = \alpha_z W_{z,elf_0}/\gamma_{M1}$ — изгибающий момент нагрузки вдоль оси z ;

α_y, α_z представляют собой формфакторы, где α_y и α_z не должны принимать значения, больше чем 1.25 (п.п.5.5.1-5.5.2(6.2.5) и п.5.9.1(6.2.9.1));

χ_{LT} — коэффициент уменьшения для бокового изгибающего крутящего момента;

$\eta_c = 0.8$, или может определяться как $\eta_0 \chi_z$, но $\eta_c \geq 0.8$;

$\gamma_c = \gamma_0$;

$\xi_{zc} = 0.8$, или может определяться как $\xi_0 \chi_z$, но $\xi_{zc} \geq 0.8$,

где η_0 , ξ_0 и γ_0 определяются согласно выражению по п. 5.9.1(6.2.9.1);

ω_x , ω_0 и ω_{xLT} равны коэффициентам ослабления, учитывающим наличие зоны HAZ (п.5.11.14(6.3.3.3)), или коэффициентам для расчетных сечений (п.5.11.16(6.3.3.5)).

Кроме того, необходима проверка для пластичного изгиба (п.5.11.12(6.3.3.1)).

5.11.14[6.3.3.3] Значения ω_x , ω_0 и ω_{xLT} для элемента, подверженного влиянию зоны HAZ, как правило, определяются с учетом предела прочности материала, ослабленного наличием зоны HAZ. Это может относиться к самому неблагоприятному сечению в рассматриваемой балке. Если такое ослабление существует только в отдельных местах по длине балки, то ω_x , ω_0 и ω_{xLT} в выражении, представленном в п.п.5.11.12(6.3.3.1) и 5.11.13(6.3.3.2) определяются из следующего выражения:

$$\omega_0 = \omega_x = \omega_{xLT} = \left(\frac{\rho_{u,haz} f_u}{\gamma_{M2}} \right) / \left(\frac{f_0}{\gamma_{M1}} \right), \text{но} \leq 1 \quad (80)$$

где $\rho_{u,haz}$ - коэффициент уменьшения для материала, подверженного действию температуры, согласно описанию в п.5.1.13(6.1.6.2).

В случае расположения зоны HAZ близко к концам балки, или близко к точкам изгиба, при расчетах на изгиб и на действие бокового изгибающего крутящего момента, значения ω_x и ω_{xLT} могут быть увеличены, при условии, что эта зона не распространяется вдоль элемента, на расстояние больше чем наименьшая ширина сечения (например, ширина полки):

$$\omega_x = \frac{\omega_0}{\chi + (1 - \chi) \sin \frac{\pi \chi s}{l_c}} \quad (81)$$

$$\omega_{xLT} = \frac{\omega_0}{\chi_{LT} + (1 - \chi_{LT}) \sin \frac{\pi \chi s}{l_c}} \quad (82)$$

$$\omega_0 = \left(\frac{\rho_{u,haz} f_u}{\gamma_{M2}} \right) / \left(\frac{f_0}{\gamma_{M1}} \right), \text{но} \omega_0 \leq 1.0, \quad (83)$$

где $\chi = \chi_y$ или χ_z , в зависимости от направления изгиба;

χ_{LT} — коэффициент уменьшения для бокового изгибающего крутящего момента стержневой колонны, подверженной только изгибу;

s — расстояние от локального сварного шва или точки изгиба на кривой упругого прогиба, только при действии продольной нагрузки (рисунок 13);

l_c — длина изгиба.

Определение χ (χ_y и χ_z) и χ_{LT} в сечении с локализованным сварным швом определяется с учетом предела прочности материала, подверженного действию температуры; тогда параметры относительной гибкости вычисляются по выражениям:

$$\bar{\lambda}_{haz} = \bar{\lambda} \sqrt{\omega_0} \quad (84a)$$

$$\bar{\lambda}_{\text{haz,LT}} = \bar{\lambda}_{\text{LT}} \sqrt{\omega_0} \quad (846)$$

Если длина зоны ослабления больше наименьшей ширины сечения (например, ширины полки), то коэффициент $p_{\text{u,haz}}$ (при локальном разрушении), в выражениях для ω_x , ω_{xLT} , $\bar{\lambda}_{\text{haz}}$, $\bar{\lambda}_{\text{haz,LT}}$ должен быть заменен на коэффициент $\rho_{0,\text{haz}}$ (для полной текучести).

Если локализованная область ослабления охватывает часть поперечного сечения (например, одну полку), то предполагается, что ослабление происходит во всем поперечном сечении.

5.11.15 Согласно п.п. 6.3.3.4 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011, если в элементах имеются локализованные зоны ослабления в поперечном сечении, например, отверстия для болтов или торцевые фланцы, то они должны проверяться в соответствии с описанием в п.5.11.14(6.3.3.3), путем замены $p_{\text{u,haz}}$ в ω_x и ω_{xLT} на A_{net}/A_g , где A_{net} — площадь рабочего сечения, с учетом отверстий; A_g — площадь полного сечения.

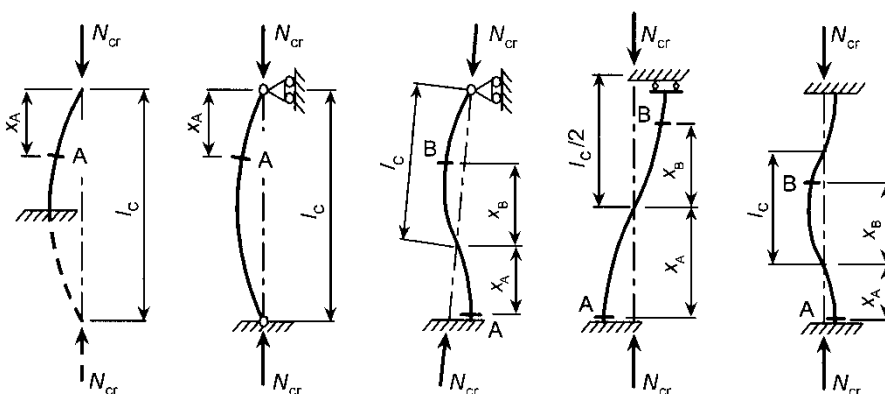
5.11.16[6.3.3.5] Для элементов, подверженных комбинации сложной продольной нагрузки и неравных концевых моментов и/или изгибающих нагрузок, необходимо проверять несколько сечений вдоль стержневой колонны. Значения действующего изгибающего момента в рассматриваемом сечении используются в расчетных формулах. ω_x и ω_{xLT} должны определяться как:

$$\omega_x = \frac{\omega_0}{\chi + (1 - \chi) \sin \frac{\pi x_s}{l_c}} \quad (85)$$

$$\omega_{\text{xLT}} = \frac{\omega_0}{\chi_{\text{LT}} + (1 - \chi_{\text{LT}}) \sin \frac{\pi x_s}{l_c}} \quad (86)$$

где x_s — расстояние от рассматриваемого сечения до простой опоры или точки изгиба на кривой упругого прогиба под действием только продольной нагрузки (рисунок 20). При условии, что моменты, действующие на концах колонны, удовлетворяют условию $M_{\text{Ed},1} > M_{\text{Ed},2}$, расстояние x_s может быть определено из выражения:

$$\cos \frac{x_s \pi}{l_c} = \frac{(M_{\text{Ed},1} - M_{\text{Ed},2}) N_{\text{Rd}}}{M_{\text{Rd}} N_{\text{Ed}}} \frac{1}{1/\chi} \quad (87)$$



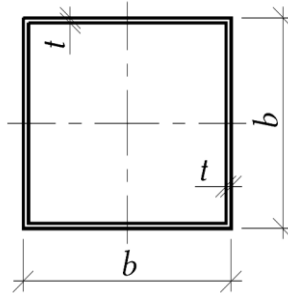
А и В — представляют собой примеры рассматриваемых сечений, отмеченных поперечными линиями.

См. таблицу 19 для определения значений длины прогиба $l_c = KL$.

Рисунок 20[6.14]. Расчетная длина l_c и определение x_s ($=x_A$ или x_B)

ПРИМЕР 13 Дано: Стойка коробчатого профиля длиной $L = 1.0$ м; ширина сечения $b = 70$ мм; толщина $t = 1.9$ мм. Стойка загружена сжимающей осевой силой $N_{Ed} = 70$ кН. Материал стойки – алюминиевый сплав EN AW-6082 T5 EP/H; $t < 5$ мм; $f_0 = 230$ Н/мм² (таб. 6); $E = 70000$ Н/мм²; $\gamma_{M1} = 1.1$ (таб. 10).

Требуется проверить несущую способность стойки.



$$b_f = b - 2t = 70 - 2 \times 1.9 = 66.2 \text{ мм}; \beta = b_f/t = 66.2/1.9 = 34.8; \varepsilon = \sqrt{\frac{250}{f_0}} = 1.043.$$

Классификация элемента (п.5.1.4(6.1.4.4)).

$\beta_1 = 11\varepsilon = 11.47$; $\beta_2 = 16\varepsilon = 16.69$; $\beta_3 = 22\varepsilon = 22.95$; т.к. $\beta > \beta_1$, $\beta > \beta_2$, $\beta > \beta_3$, класс элемента принимаем 4.

Учет локального продольного изгиба (п.5.1.11(6.1.5)).

Определяем коэффициент локального продольного изгиба ρ_c по выражению (27), принимая $C_1 = 32$ и $C_2 = 220$ (таб. 14):

$$\rho_{cw} = C_1/(\beta_w/\varepsilon) - C_2/(\beta_w/\varepsilon)^2 = 0.773.$$

Эффективная толщина стенки: $t_{eff} = \rho_c t = 0.773 \times 1.9 = 1.47$ мм.

$$A_{eff} = 4(b-t)t_{eff} = 400.43 \text{ мм}^2; I = \frac{b^4}{12} - \frac{(b-2t)^4}{12} = 4.004 \times 10^5 \text{ мм}^4; r = \sqrt{\frac{I}{A_{eff}}} =$$

31.62 мм;

Учет продольного изгиба (п.п.5.11.1-5.11.6(6.3.1)).

$k = 1.0$ - коэффициент, учитывающий ослабляющее влияние сварки (п.5.11.2 (6.3.1.1));

$$\alpha = 0.2 - \text{коэффициент наполнения}; \bar{\lambda}_0 = 0.1 \text{ (таб. 17)}; \bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff} f_0}{N_{cr}}}; N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{l^2}; \frac{l}{r} \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{f_0}{E}} = 0.538; \varphi = 0.5[1 + \alpha(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2] = 0.689; \chi = \frac{1}{\varphi + \sqrt{\varphi^2 - \bar{\lambda}^2}} = 0.893.$$

Несущая способность стойки:

$$N_{b,Rd} = \chi k A_{eff} f_0 / \gamma_{M1} = 0.893 \times 1.0 \times 400.43 \times 230 / 1.1 = 74.77 \text{ кН}.$$

$N_{Ed}/N_{b,Rd} = 70/74.77 = 0.936 < 1.0$, т.е. несущая способность стойки обеспечена.

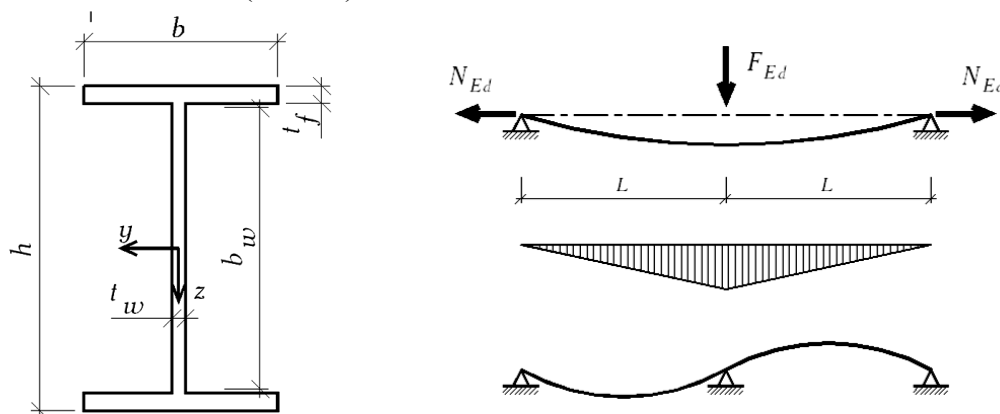
ПРИМЕР 14 Дано: Сварная балка двутаврового сечения длиной $L = 4.0$ м, нагруженная сосредоточенной нагрузкой $N_{Ed} = 140$ кН с эксцентриситетом $exc = 114.286$ мм; изгибающий момент $M_{y,Ed} = N_{Ed} exc = 16$ кНм. Высота балки $h = 200$ мм, ширина полки $b_f = 140$ мм, толщина полки $t_f = 6$ мм, толщина стенки $t_w = 12$ мм; ширина стенки $b_w = h - 2 t_f = 200 - 2 \times 6 = 188$ мм. Материал балки – алюминиевый сплав EN AW-6082 T6 EP/O; $t > 5$ мм; $f_0 = 260$ Н/мм²; $f_u = 310$ Н/мм²; $\rho_{0,haz} = 0.48$; $\rho_{u,haz} = 0.60$ (таб. 6); $E = 70000$ Н/мм²; $\gamma_{M1} = 1.1$; $\gamma_{M2} = 1.25$ (таб.10).

Требуется проверить несущую способность поперечного сечения балки.

Классификация элементов (п.5.1.4(6.1.4.4)).

а) стенка балки: $\beta_w = 0.4b_w/t_w = 6.267$; $\varepsilon = \sqrt{\frac{250}{f_0}} = 0.981$; $\beta_{1w} = 9\varepsilon = 8.829$; $\beta_{2w} = 13\varepsilon = 12.753$; $\beta_{3w} = 18\varepsilon = 17.658$; т.к. $\beta_w < \beta_{1w}$, $\beta_w < \beta_{2w}$, $\beta_w < \beta_{3w}$, класс стенки принимаем 1.

Определяем коэффициент локального продольного изгиба ρ_c по выражению (27), принимая $C_1 = 29$ и $C_2 = 198$ (таб. 14):



$\rho_{cw} = C_1/(\beta_w/\varepsilon) - C_2/(\beta_w/\varepsilon)^2 = -0.312$, принимаем $\rho_{cw} = 1.0$, т.к. $\beta_w < \beta_{3w}$.

Эффективная толщина стенки: $t_{eff} = \rho_c t = 12.0$ мм.

б) полки балки: $\beta_f = (b_f - t_w) t_f = 21.333$; $\varepsilon = \sqrt{\frac{250}{f_0}} = 0.981$; $\beta_{1f} = 2.5\varepsilon = 2.45$; $\beta_{2f} = 4\varepsilon = 3.92$; $\beta_{3f} = 4\varepsilon = 4.91$; т.к. $\beta_f > \beta_{1f}$, $\beta_f > \beta_{2f}$, $\beta_f > \beta_{3f}$, класс стенки принимаем 4.

Определяем коэффициент локального продольного изгиба ρ_c по выражению (27), принимая $C_1 = 29$ и $C_2 = 198$ (таб. 14):

$$\rho_{cf} = C_1/(\beta_f/\varepsilon) - C_2/(\beta_f/\varepsilon)^2 = 0.915.$$

Эффективная толщина полки: $t_{f,ef} = \rho_{cf} t_f = 0.915 \times 6 = 5.49$ мм.

Для полного поперечного сечения принимаем класс 4.

Учет зоны HAZ (упругий расчет).

Эффективная толщина полки: $t_{f,haz} = \rho_{0,haz} t_f = 0.48 \times 6 = 2.88$ мм;

$t_{f,ef} = t_{f,haz} = 2.88$ мм.

Эффективная толщина стенки: $t_{w,haz} = \rho_{0,haz} t_f = 0.48 \times 12 = 5.76$ мм;

$t_{w,ef} = t_{w,haz} = t_{f,ef} = 2.88$ мм.

Т.к. $6 < t_1 < 12$ мм, принимаем ширину зоны HAZ $b_{haz} = 30$ мм (п.5.1.15(6.1.6.3)).

Учет зоны HAZ (локальное разрушение в критическом сечении).

Эффективная толщина полки: $t_{f,haz} = \rho_{u,haz} t_f = 0.6 \times 6 = 3.6$ мм;

$t_{f,ef} = t_{f,haz} = 3.6$ мм.

Эффективная толщина стенки: $t_{w,haz} = \rho_{u,haz} t_f = 0.6 \times 12 = 7.2$ мм;

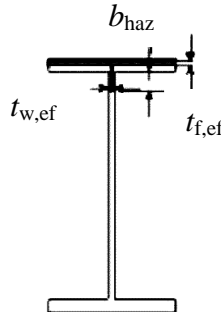
$t_{w,ef} = t_{w,haz} = t_{f,ef} = 3.6$ мм.

Определяем площадь поперечного сечения балки:

$$A_g = 2bt_f + (h - 2t_f)t_w = 3.936 \times 10^3 \text{ мм}^2.$$

Площадь поперечного сечения с учетом зоны HAZ: $A_{\text{net}} = A_g - b(t_f - t_{f,\text{ef}}) - b_{\text{haz}}(t_w - t_{w,\text{ef}}) = 3.225 \times 10^3 \text{ мм}^2$.

Геометрические характеристики сечения при изгибе.



Определяем упругий момент сопротивления полного поперечного сечения балки: $A_g = 2bt_f + (h - 2t_f)t_w = 3.936 \times 10^3 \text{ мм}^2$; $I_g = \frac{1}{12}[bh^3 - (b - t_w)(h - 2t_f)^3] = 2.246 \times 10^7 \text{ мм}^4$; $W_{\text{el}} = \frac{2I_g}{h} = 2.246 \times 10^5 \text{ мм}^3$.

Пластический момент сопротивления: $W_{\text{ple}} = \frac{1}{4}[bh^2 - (b - t_w)(h - 2t_f)^2] = 2.69 \times 10^5 \text{ мм}^3$.

Площадь поперечного сечения с учетом локального продольного изгиба и зоны HAZ: $A_{\text{eff,haz}} = A_g - b(t_f - t_{f,\text{ef}}) - b_{\text{haz}}(t_w - t_{w,\text{ef}}) = 3.399 \times 10^3 \text{ мм}^2$.

Смещение центра тяжести сечения:

$$e_{\text{ef}} = \left[b(t_f - t_{f,\text{ef}}) \left(\frac{h}{2} - \frac{t_f}{2} \right) + b_{\text{haz}}(t_w - t_{w,\text{ef}}) \left(\frac{h}{2} - t_f - \frac{b_{\text{haz}}}{2} \right) \right] \frac{1}{A_{\text{eff,haz}}} = 14.038 \text{ мм}.$$

Моменты инерции и сопротивления относительно центра эффективного сечения:

$$I_{\text{eff,haz}} = I_g - b(t_f - t_{f,\text{ef}}) \left(\frac{h}{2} - \frac{t_f}{2} \right)^2 - \frac{b_{\text{haz}}^3}{12}(t_w - t_{w,\text{ef}}) - b_{\text{haz}}(t_w - t_{w,\text{ef}}) \left(\frac{h}{2} - t_f - \frac{b_{\text{haz}}}{2} \right)^2 = 1.816 \times 10^7 \text{ мм}^4; W_{\text{eff,haz}} = \frac{I_{\text{eff,haz}}}{\frac{h}{2} + e_{\text{ef}}} = 1.533 \times 10^5 \text{ мм}^3.$$

Значение формфактора определяем по таб. 15: $\alpha = W_{\text{eff,haz}}/W_{\text{el}} = 0.683$.

Расчетные значения изгибающего момента, нормальной силы и проверка несущей способности поперечного сечения.

$$M_{y,\text{Rd}} = \frac{f_0 \alpha W_{\text{el}}}{\gamma_{\text{M1}}} = 36.2 \text{ кНм}; N_{\text{Rd}} = \frac{f_0 A_{\text{eff,haz}}}{\gamma_{\text{M1}}} = 803.4 \text{ кН}.$$

Согласно п.5.9.1(6.2.9.1) при $\eta_0 = 1$; $\gamma_0 = 1$; $\xi_0 = 1$

$$\left(\frac{N_{\text{Ed}}}{N_{\text{Rd}}} \right)^{\eta_0} + \left(\frac{M_{y,\text{Ed}}}{M_{y,\text{Rd}}} \right)^{\xi_0} = 0.616 < 1.0, \text{ т.е. несущая способность сечения класса 4 обеспечена.}$$

Проверка поперечного сечения на действие бокового крутящего момента.

$$I_z = \frac{2b^3 t_f}{12} + \frac{ht_w^3}{12} = 2.773 \times 10^6 \text{ мм}^4; I_w = \frac{(h - t_f)^2 I_z}{4} = 2.609 \times 10^{10} \text{ мм}^6; I_t = \frac{2bt_f^3 + ht_w^3}{3} = 1.354 \times 10^5 \text{ мм}^4; M_{\text{cr}} = \frac{\pi^2 E I_z}{L^2} \sqrt{\frac{I_w}{I_z} + \frac{L^2 G I_t}{\pi^2 E I_z}} = 62.517 \text{ кНм (согласно I.1[1])}; \alpha_{\text{LT}} = 0.2; \bar{\lambda}_{0\text{LT}} = 0.4$$

(п.5.45(6.3.2.2)) для класса 4; $\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{\alpha W_{el} y f_0}{M_{cr}}} = 0.799$; $\varphi_{LT} = 0.5[1 + \alpha_{LT}(\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{0LT}) + \bar{\lambda}_{LT}^2] = 0.859$ (п. 5.11.10(6.3.2.3)); $\chi_{LT} = \frac{1}{\varphi_{LT} + \sqrt{\varphi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} = 0.851$.

Расчетные значения изгибающего момента, нормальной силы и проверка несущей способности поперечного сечения.

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \frac{\alpha f_0 W_{el}}{\gamma_{M1}} = 30.84 \text{ кНм (71);}$$

$$M_{y,Ed} / M_{b,Rd} = 16 / 30.84 = 0.52 < 1.0, \text{ т.е. несущая способность сечения обеспечена.}$$

ПРИМЕР 15 Дано: Стойка прямоугольного коробчатого профиля длиной $l_c = 3.8$ м; высота сечения $h_y = 120$ мм; ширина сечения $b_y = 120$ мм; толщина $t_w = t_f = 6$ мм (см. рисунок к примеру 11). Стойка загружена сжимающей осевой силой $N_{Ed} = 120$ кН, поперечной силой $F_{Ed} = 10$ кН; изгибающий момент $M_{y,Ed} = 1/4 F_{Ed} l_c = 9.5$ кНм; $M_{z,Ed} = 0$ кНм. Материал стойки – алюминиевый сплав EN AW-6060 T6 EP; $t < 15$ мм; $f_0 = 140$ Н/мм²; $f_u = 170$ Н/мм²; $\rho_{0,haz} = 0.43$; $\rho_{u,haz} = 0.59$ (таб. 6); $E = 70000$ Н/мм²; $\gamma_{M1} = 1.1$; $\gamma_{M2} = 1.25$ (таб. 10).

Требуется проверить несущую способность поперечного сечения стойки.

$$h_i = h_y - 2t_f = 168 \text{ мм; } b_i = b_y - 2t_w = 108 \text{ мм; } \varepsilon = \sqrt{\frac{250}{f_0}} = 1.336.$$

Классификация поперечного сечения элемента при осевом сжатии (п.5.1.4(6.1.4.4)).

Стенка.

$$\beta_w = (h_y - 2t_f) / t_w = 28;$$

$\beta_{1w} = 11\varepsilon = 14.7$; $\beta_{2w} = 16\varepsilon = 21.4$; $\beta_{3w} = 22\varepsilon = 29.4$; т.к. $\beta > \beta_1$, $\beta > \beta_2$, $\beta < \beta_3$, класс элемента принимаем 3.

Классификация поперечного сечения элемента при изгибе по оси $x - x$ (п. 5.1.4(6.1.4.4)).

Стенка.

$$\beta_w = 0.4(h_y - 2t_f) / t_w = 11.2;$$

$\beta_{1w} = 11\varepsilon = 14.7$; $\beta_{2w} = 16\varepsilon = 21.4$; $\beta_{3w} = 22\varepsilon = 29.4$; т.к. $\beta < \beta_1$, $\beta < \beta_2$, $\beta < \beta_3$, класс элемента принимаем 1.

Полка.

$$\beta_f = (b_y - 2t_w) / t_f = 18;$$

$\beta_{1f} = 11\varepsilon = 14.7$; $\beta_{2f} = 16\varepsilon = 21.4$; $\beta_{3f} = 22\varepsilon = 29.4$; т.к. $\beta > \beta_1$, $\beta < \beta_2$, $\beta < \beta_3$, класс элемента принимаем 2.

Окончательно для поперечного сечения при изгибе по оси $x - x$ принимаем класс 2.

Классификация поперечного сечения элемента при изгибе по оси $y - y$ (п. 5.1.4(6.1.4.4)).

Стенка.

$$\beta_w = 0.4(b_y - 2t_w) / t_f = 7.2;$$

$\beta_{1w} = 11\varepsilon = 14.7$; $\beta_{2w} = 16\varepsilon = 21.4$; $\beta_{3w} = 22\varepsilon = 29.4$; т.к. $\beta < \beta_1$, $\beta < \beta_2$, $\beta < \beta_3$, класс элемента принимаем 1.

Полка.

$$\beta_f = (h_y - 2t_f) / t_w = 28;$$

$\beta_{1f} = 11\varepsilon = 14.7$; $\beta_{2f} = 16\varepsilon = 21.4$; $\beta_{3f} = 22\varepsilon = 29.4$; т.к. $\beta > \beta_1$, $\beta > \beta_2$, $\beta < \beta_3$, класс элемента принимаем 3.

Окончательно для поперечного сечения при изгибе по оси $y - y$ принимаем класс 3.

Геометрические характеристики поперечного сечения элемента.

$A = A_{\text{eff}} = b_y h_y - b_i h_i = 3.456 \times 10^3 \text{ мм}^2$; $I_y = b_y h_y^3/12 - b_i h_i^3/12 = 1.565 \times 10^7 \text{ мм}^4$; $I_z = b_y^3/12 - h_i b_i^3/12 = 8.28 \times 10^6 \text{ мм}^4$; $W_{el,y} = I_y^2/h_y = 1.738 \times 10^5 \text{ мм}^3$; $W_{el,z} = I_z^2/b_y = 1.4 \times 10^5 \text{ мм}^3$; $W_{pl,y} = b_y h_y^2/4 - b_i h_i^2/4 = 2.1 \times 10^5 \text{ мм}^3$.

При классе 2 $\alpha_y = W_{pl,y}/W_{el,y} = 1.208$ (таб. 15); при классе 3 $\alpha_z = 1.0$.

Радиусы инерции: $i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}} = 67.3 \text{ мм}$; $i_z = \sqrt{\frac{I_z}{A}} = 49 \text{ мм}$.

Учет продольного изгиба:

- гибкость (68): $\bar{\lambda}_y = \frac{l_c}{\pi i_y} \sqrt{\frac{A_{\text{eff}} f_0}{AE}} = 0.804$; $\bar{\lambda}_z = \frac{l_c}{\pi i_z} \sqrt{\frac{A_{\text{eff}} f_0}{AE}} = 1.105$;

- из выражения (66): $\varphi_y = 0.5(1 + 0.2(\bar{\lambda}_y - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}_y^2)$; $\varphi_z = 0.5(1 + 0.2(\bar{\lambda}_z - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}_z^2)$;

$\chi_y = \frac{1}{\varphi_y + \sqrt{\varphi_y^2 - \bar{\lambda}_y^2}} = 0.779$; $\chi_z = \frac{1}{\varphi_z + \sqrt{\varphi_z^2 - \bar{\lambda}_z^2}} = 0.586$;

С учетом ослабляющего влияния сварки $k = 1.0$ несущая способность сечения при действии продольной силы (п.5.11.2(6.3.1.1)): $N_{Rd} = k A f_0 / \gamma_{M1} = 439.9 \text{ кН}$.

По п. 5.9.2(6.2.9.2) $\psi_c = 1.3 \chi_y = 1.013$.

С учетом влияния зоны HAZ (80): $\omega_0 = \omega_x = \rho_{u, \text{haz}} f_u \gamma_{M1} / f_0 \gamma_{M2} = 0.59 \times 170 \times 1.1 / 140 \times 1.25 = 0.63$.

Сопротивление сечения при изгибе:

$M_{y,Rd} = \alpha_y \frac{f_0 W_{el,y}}{\gamma_{M1}} = 26.721 \text{ кНм}$; $M_{z,Rd} = \alpha_z \frac{f_0 W_{el,z}}{\gamma_{M1}} = 17.572 \text{ кНм}$.

Проверка несущей способности сечения по выражению (78):

$$\left(\frac{N_{Ed}}{\chi \omega_x N_{Rd}} \right)^{1.013} + \frac{1}{\omega_0} \left[\left(\frac{M_{y,Ed}}{M_{y,Rd}} \right)^{1.7} + \left(\frac{M_{z,Ed}}{M_{z,Rd}} \right)^{1.7} \right]^{0.6} = 0.99 < 1.0.$$

5.12 Соединительные однородные элементы

5.12.1 Согласно п. 6.4.1 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011 однородные сжатые соединительные элементы (планки, раскосы и т.п.) с шарнирным креплением по концам, обеспечивающие ограничение перемещений в поперечном направлении, должны рассчитываться по модели, приведенной на рисунке 20.

1. Элемент рассматривается как стойка с прогибом $e_0 = L/500$.

2. Упругая деформация соединительных элементов или решетки (рисунок 21) может рассматриваться при условии непрерывной (сплошной) жесткости при сдвиге S_v колонны.

Модель сжатого соединительного однородного элемента применяется если:

- связи или решетка состоят из равных модулей с параллельными планками;
- минимальное число модулей, содержащихся в элементе, равно трем.

Предлагаемая методика расчета применима к соединительным элементам со связями по двум направлениям (рисунок 22).

Проверка для элементов соединительной решетки должна выполняться, используя расчетную нагрузку на перемычки $N_{ch,Ed}$, обусловленную действием сил сжатия N_{Ed} и момента M_{Ed} , приложенного в середине пролета соединительного элемента.

Для элемента с двумя идентичными элементами решетки расчетная нагрузка определяется из выражения:

$$N_{ch,Ed} = 0,5N_{Ed} + \frac{M_{Ed}h_0A_{ch}}{2I_{eff}} \quad (88)$$

где

$$M_{Ed} = \frac{N_{Ed}e_0 + M_{Ed}^1}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr}} - \frac{N_{Ed}}{S_v}} \quad (89)$$

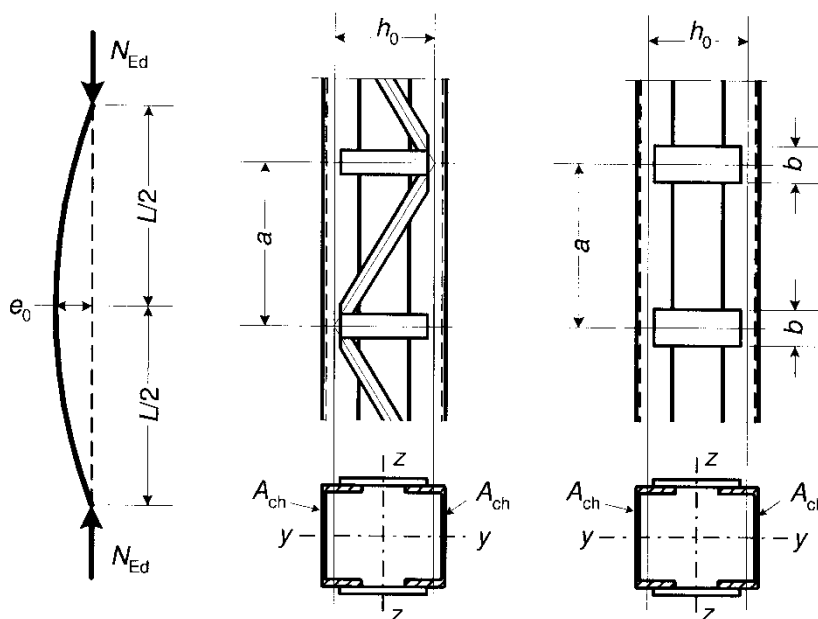


Рисунок 21[6.15]. Сквозные колонны с раскосами и планками

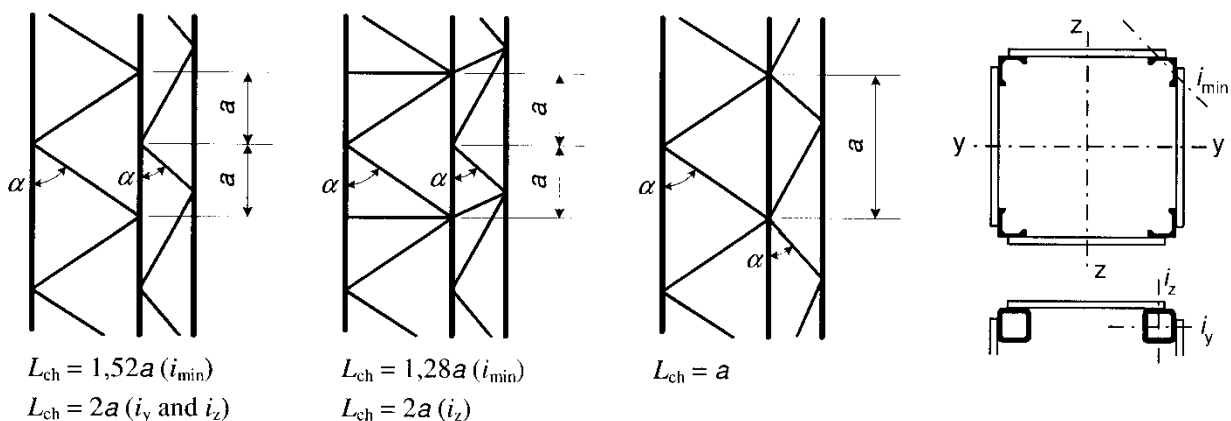


Рисунок 22[6.16]. Соединительная решетка по четырем сторонам и расчетная длина L_{ch} для раскосов

$N_{cr} = \pi^2 EI_{eff}/L^2$ представляет собой критическую нагрузку для эффективного составного элемента;

N_{ed} — расчетное значение сжимающей силы, действующей на составной элемент;

M_{Ed} — расчетное значение максимального момента, действующего на среднюю часть составного элемента, при учете эффектов второго порядка (с учетом деформирования конструкции);

M'_{Ed} — расчетное значение наибольшего момента, действующего на среднюю часть составного элемента, без учета эффектов второго порядка;

h_0 — расстояние между центрами тяжести элементов решетки;

A_{ch} — площадь поперечного сечения одного элемента решетки;

I_{eff} — эффективный момент инерции составного элемента (п.п. 5.12.2-5.12.3(6.4.2) и п.п. 5.12.4-5.12.5(6.4.3));

S_v — жесткость при сдвиге для связанной панели или панели, укрепленной с помощью элементов решетки (п.п. 5.12.2-5.12.3(6.4.2) и п.п. 5.12.4-5.12.5(6.4.3)).

Проверка крепления связевых составных элементов при действии изгибающих моментов, действующих на каркас, и поперечных нагрузок, действующих на элементы решетки, должна выполняться для концевой панели, с учетом поперечной нагрузки, приложенной к составному элементу:

$$V_{Ed} = \pi \frac{M_{Ed}}{L} \quad (90)$$

5.12.2 В соответствии с п.п. 6.4.2.1 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011 для элементов решетки проверка на изгиб должна выполняться следующим образом:

$$\frac{N_{ch,Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1, \quad (91)$$

где $N_{ch,Ed}$ — расчетная сжимающая нагрузка в элементе решетки, действующая в средней части длины составного элемента, определяемая согласно п.п. 5.12.1(6.4.1);

$N_{b,Rd}$ — расчетное значение несущей способности при продольном изгибе элемента решетки при расчетной длине L_{ch} , определяемой из рисунка 22.

Жесткость связи при сдвиге S_y определяется из таблицы 20.

Эффективный момент инерции второго порядка для усиленных составных элементов определяется по формуле (93), при $\mu = 0$.

Тогда

$$l_{eff} = 0,5h_0^2 A_{ch} \quad (92)$$

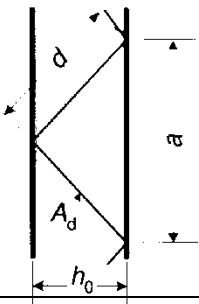
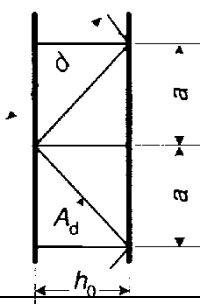
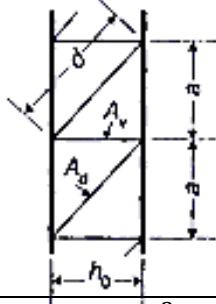
5.12.3 Согласно п.п. 6.4.2.2 система одиночных связей на противоположных сторонах составного элемента с двумя параллельными плоскостями должна соответствовать конструкции, показанной на рисунке 23(а), размещенной таким образом, чтобы каждая сторона являлась зеркальным отражением другой.

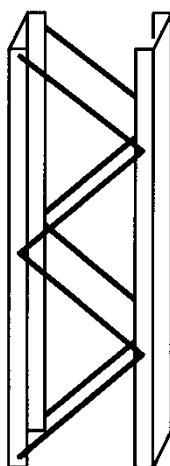
Если системы одиночных связей, расположенных на противоположных сторонах со-

ставного элемента с двумя параллельными плоскостями взаимно противоположны друг другу по направлению, как показано на рисунке 23 (b), то необходимо учитывать результирующие нагрузки кручения, возникающие в элементе.

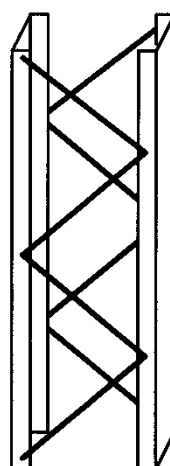
По концам таких ферм должны быть выполнены торцевые панели, устанавливаемые в точках, где заканчиваются раскосы и в местах соединения с другими элементами.

Таблица 20[рис. 6.17]

Жесткость при сдвиге перемычек обвязки составных элементов			
Система			
S_v	$\frac{nEA_dah_0^2}{2d^3}$	$\frac{nEA_dah_0^2}{d^3}$	$\frac{nEA_dah_0^2}{d^3 \left(1 + \frac{A_d h_0^3}{A_v d^3}\right)}$
Где n — число плоскостей соединительной решетки; A_d и A_v определяют площади поперечного сечения элементов решетки, расположенных в одной плоскости			



а) Система раскосов с совпадающим направлением (рекомендуемая система)



б) Взаимно противоположная система перемычек (не рекомендуемая)

Рисунок 23[6.18]. Система раскосов, расположенных на противоположных сторонах составного элемента с двумя параллельными плоскостями

5.12.4 В соответствии с п.п. 6.4.3.1 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011 боковые панели и элементы решетки, а также места их соединений с панелями, должны проверяться на действие фактических моментов и нагрузок по концам панелей и в средней части пролета, как указано на рисунке 24. Для упрощения расчетов максимальная нагрузка, действующая на элемент решетки, $N_{ch,Ed}$, может быть объединена с максимальной поперечной нагрузкой V_{Ed} .

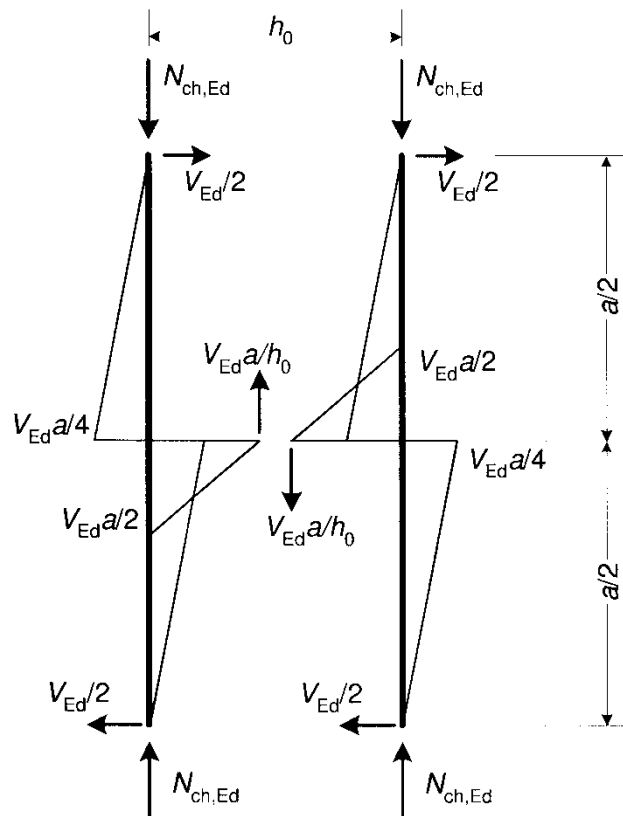


Рисунок 24[6.19]. Моменты и нагрузки, действующие на концах панелей усиленного составного элемента

Жесткость при сдвиге S_v должна определяться следующим образом:

$$S_v = \frac{24EI_{ch}}{a^2 \left(1 + \frac{2I_{ch}h_0}{nI_b a} \right)} \leq \frac{2\pi^2 EI_{ch}}{a^2} \quad (93)$$

Эффективный момент инерции усиленного составного элемента может определяться как:

$$I_{eff} = 0,5h_0^2 A_{ch} + 2\mu I_{ch} \quad (94)$$

где I_{ch} — момент инерции сечения в плоскости для одного элемента решетки;
 I_b — момент инерции сечения в плоскости для одного элемента решетки;

μ — коэффициент эффективности, определяемый по таблице 21.

5.12.5 Согласно п.п. 6.4.3.2 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011 элементы решетки должны быть установлены в каждом конце элемента.

В местах расположения параллельных плоскостей, элементы решетки, расположенные в каждой из плоскостей, должны быть размещены в направлении, противоположном друг другу.

Таблица 21[6.9]

Коэффициент эффективности μ	
Критерий	Коэффициент эффективности μ
$\lambda \geq 150$	0
$75 < \lambda < 150$	$\mu = 2 - \lambda/75$
$\lambda \leq 150$	1,0
где $\lambda = \frac{L}{i_0}$; $i_0 = \sqrt{\frac{I_1}{2A_{ch}}}$; $I_1 = 0,5h_0^2A_{ch} + 2I_{ch}$	

Элементы решетки также должны быть установлены в промежуточных точках, в местах приложения нагрузок, или бокового сжатия.

5.12.6. В соответствии с п. 6.4.4 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011 составные элементы, работающие на сжатие, со стойками, находящимися в контакте, или близко расположенные и связанные с помощью накладок (рисунок 25), либо элементы, составленные в форме звезды, связанные планками, расположенными в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, (рисунок 25), должны проверяться на изгиб как одиночные составные элементы, игнорируя влияние жесткости при сдвиге ($S_v = \infty$), если соблюдаются условия, представленные в таблице 22.

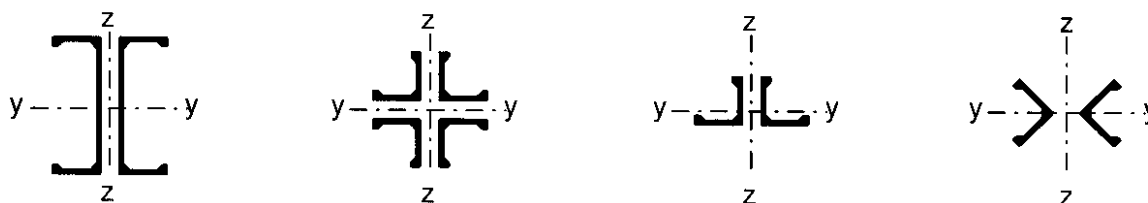


Рисунок 25[6.20]. Близко расположенные составные элементы

Поперечные нагрузки, передаваемые элементами решетки, должны определяться по п.5.56(6.4.3.1).

В случае неравенства углов установки оснований элементов решетки (рисунок 26)

изгиб по оси у-у может быть проверен с помощью: $i_y = 0.87i_0$ где i_0 — радиус инерции составного элемента по оси 0-0.

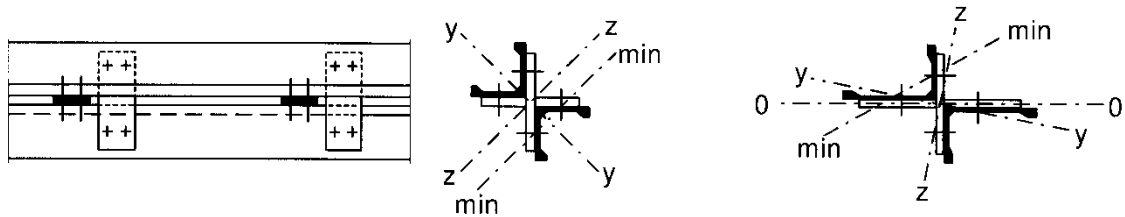


Рисунок 26[6.21]. Угловые элементы, связанные звездой

Таблица 22[6.10]

Максимальное расстояние, рекомендуемое для взаимного расположения близко расположенных составных или звездообразных элементов, усиленных планками	
Тип составного элемента	Максимальное расстояние в соединении*
Элементы, соответствующие рисунку 4, плотно соединенные или соединенные через прокладки с помощью болтов или сварки	$15i_{\min}$
Элементы, соответствующие рисунку 5, соединенные с помощью парных перемычек или болтов и сварки	$70i_{\min}$
* Межцентровое расстояние в соединении i_{\min} представляют собой минимальный радиус инерции одного стержня или одного уголка.	

ПРИМЕР 16 Дано: Составная стойка из 4-х элементов коробчатого полого профиля эффективной длиной $l_c = 5.0$ м, $l_c/a = 10$, ширина сечения стойки $b = 400$ мм. Продольные элементы ветвей: $d_0 = 30$ мм, $d_i = 30$ мм. Соединительные планки: $b_d = 40$ мм, $t_d = 10$ мм, $a = 500$ мм, $d = \sqrt{a^2 + b^2} = 640.3$ мм. Материал стойки – алюминиевый сплав EN AW-6065 Т6 ЕР/Н; $5 < t < 10$ мм; $f_0 = 200$ Н/мм² (таб. 6); $E = 70000$ Н/мм²; $\gamma_{M1} = 1.1$ (таб. 10). Осевая сжимающая сила $N_{Ed} = 260$ кН.

Требуется проверить несущую способность стойки при действии осевой силы.

Геометрические характеристики:

- ветвь стойки: $A_l = \pi \frac{d_0^2 - d_i^2}{4} = 392.699$ мм²; $I_l = \pi \frac{d_0^4 - d_i^4}{64} = 3.191 \times 10^4$ мм⁴; $i_l = \sqrt{\frac{I_l}{A_l}} = 9.014$ мм; $\bar{\lambda}_l = \frac{2a}{i_l} \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{f_0}{E}} = 1.888$ при эффективной длине $2a$;

- полное сечение стойки: $A = 4A_l = 1.571 \times 10^3$ мм²; $I = 4I_l + 4A_l \left(\frac{b}{2}\right)^2 = 6.296 \times 10^7$ мм⁴; $i = \sqrt{\frac{I}{A}} = 200.2$ мм; $\bar{\lambda}_0 = \frac{l_c}{i} \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{f_0}{E}} = 0.425$ при эффективной длине l_c ;

- соединительные планки: $A_{ch} = A_d = b_d t_d = 400$ мм²; $I_{ch} = I_d = \frac{b_d t_d^3}{12} = 3.333 \times 10^3$ мм⁴; $i = \sqrt{\frac{I_d}{A_d}} = 2.9$ мм; $\bar{\lambda}_{ch} = \frac{d}{i_d} \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{f_0}{E}} = 3.774$ при эффективной длине d ;

- общая гибкость: $\bar{\lambda}_c = \sqrt{\bar{\lambda}_0^2 + \frac{f_0 A d^3}{E A_d a b^2}} = 0.466$.

Учет продольного изгиба для закрепленной стойки (п.п.5.37-5.42(6.3.1)).

$k = 1.0$ - коэффициент, учитывающий ослабляющее влияние сварки (п.5.38(6.3.1.1));

$\alpha = 0.2$ - коэффициент наполнения; $\bar{\lambda}_0 = 0.1$ (таблица 17); $\bar{\lambda} = \bar{\lambda}_c = 0.466$; $\varphi = 0.5[1 + \alpha(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2] = 0.645$; $\chi = \frac{1}{\varphi + \sqrt{\varphi^2 - \bar{\lambda}^2}} = 0.916$.

Проверка несущей способности стойки (65):

$$N_{b.Rd} = \chi k A f_0 / \gamma_{M1} = 0.916 \times 1.0 \times 1571 \times 200 / 1.1 = 261.64 \text{ кН} > N_{Ed} = 260 \text{ кН}.$$

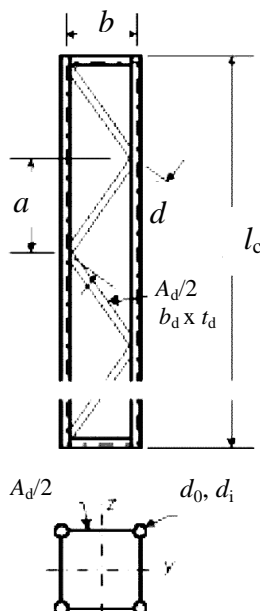
Учет продольного изгиба для ветви стойки (п.п.5.37-5.42(6.3.1)).

$k = 1.0$ - коэффициент, учитывающий ослабляющее влияние сварки (п.5.38(6.3.1.1));

$\alpha = 0.2$ - коэффициент наполнения; $\bar{\lambda}_0 = 0.1$ (таблица 17); $\bar{\lambda} = \bar{\lambda}_d = 3.774$; $\varphi = 0.5[1 + \alpha(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2] = 2.46$; $\chi = \frac{1}{\varphi + \sqrt{\varphi^2 - \bar{\lambda}^2}} = 0.248$.

Несущая способность ветви стойки:

$$N_{l.Rd} = \chi k A_l f_0 / \gamma_{M1} = 0.248 \times 1.0 \times 392.699 \times 200 / 1.1 = 17.71 \text{ кН}.$$



Учет продольного изгиба для планок (п.п.5.11.1-5.11.6(6.3.1)).

Фиктивная поперечная нагрузка на планку: $q_\chi = \frac{0.015 N_{Ed}}{l_c \left(1 - \frac{N_{Ed} \bar{\lambda}_c^2}{0.9 A f_0} \right)} = 1.022 \text{ кН/м}$; $V_\chi = q_\chi l_c / 2 =$

2.555 кН ; $N_l = V_\chi d / b = 4.09 \text{ кН}$; $0.02 N_{b.Rd} = 5.757 \text{ кН}$; $\bar{\lambda} = \bar{\lambda}_d = 3.774$; $\varphi = 0.5[1 + \alpha(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2] = 7.989$; $\chi = \frac{1}{\varphi + \sqrt{\varphi^2 - \bar{\lambda}^2}} = 0.067$.

Проверка несущей способности планки:

$$N_{l.Rd} = \chi k A_d f_0 / \gamma_{M1} = 0.067 \times 1.0 \times 400 \times 200 / 1.1 = 4.87 \text{ кН} > N_l = 4.09 \text{ кН}.$$

6 ЛИСТОВЫЕ АЛЮМИНИЕВЫЕ КОНСТРУКЦИИ

6.1 В данном разделе рассматриваются прямоугольные нежесткие и жесткие листы, подверженные действию нагрузок, приложенных в одной плоскости.

В определенных типах конструкций нежесткие листы могут рассматриваться как отдельные элементы, находящиеся под действием нормальных напряжений, касательных напряжений, или комбинации обоих. Соединения листов с несущей конструкцией выполняется с помощью сварки, болтовых соединений, на заклепках или перевязке. Причем форма соединения может влиять на граничные условия. Тонколистовые конструкции должны проверяться на предельные условия при боковой нагрузке, на изгиб под нагрузкой, приложенной по краям в плоскости пластины, и для комбинации изгиба и продольного изгиба.

6.2[6.5.2] Прямоугольный плоский лист, подверженный действию равномерного сжатия по торцам, показан на рисунке 27. Длина листа в направлении сжимающей нагрузки обозначена a ; ширина листа — b . Предполагается, что толщина листа однородна и равна t . Лист может быть закреплен по всем четырем концам шарнирно, упруго защемлен или неподвижно закреплен, либо он может иметь степень свободы вдоль одной продольной стороны.

6.3[6.5.2] Восприимчивость нежесткого листа к продольному изгибу определяется с помощью параметра β , где $\beta = b/t$. Классификация поперечного сечения выполняется способом, описанным в п.п.5.1.3-5.1.10(6.1.4), где приведены плоские элементы, соответствующие «внутренним частям», с продольными краями, просто поддерживаемые, упруго защемленные или полностью зафиксированные, и пластины с одним продольным свободным краем, соответствующие внешним элементам. Таким образом:

$\beta \leq \beta_2$ класс 1 или 2;

$\beta_2 \leq \beta \leq \beta_3$ класс 3;

$\beta_3 < \beta$ класс 4,

где значения β_2 и β_3 представлены в таблице 13.

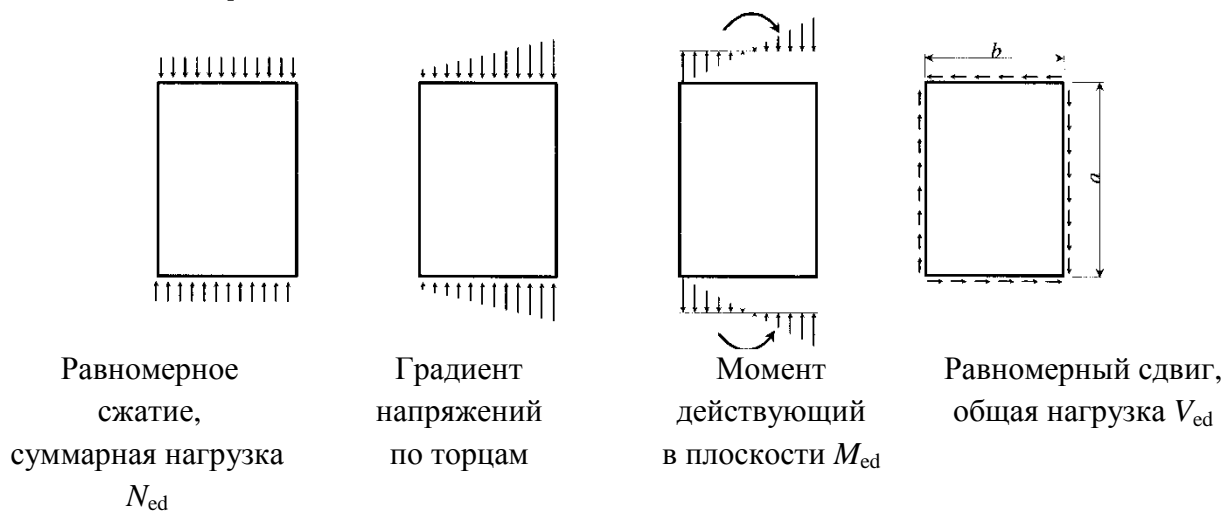


Рисунок 27[6.22]. Схемы загрузки нежестких листов

6.4[6.5.2] Расчетное значение сжимающей нагрузки N_{Ed} должно удовлетворять условию:

$$N_{Ed}/N_{Rd} \leq 1,0, \quad (95)$$

где N_{Rd} — является наименьшим значением из:

$$N_{o,Rd} = A_{eff}f_0/\gamma_{M1} \text{ (полная текучесть и локальный продольный изгиб) и} \quad (96)$$

$$N_{u,Rd} = A_{net}f_u/\gamma_{M2} \text{ (локальное разрушение),} \quad (97)$$

где A_{eff} — эффективная площадь сечения, с учетом локального продольного изгиба для поперечных сечений класса 4 и зоны HAZ, возникающей от продольных швов;

A_{net} — площадь наиболее опасного поперечного сечения, с учетом незаполненных отверстий и зоны HAZ, возникшей вследствие поперечных или продольных швов.

Значение A_{eff} для поперечного сечения класса 4 определяется с помощью пониженной толщины для внесения поправки на прогиб, а так же на ослабление свойств, вследствие образования зоны HAZ, но пренебрегая наличием отверстий. A_{eff} , как правило, рассчитывается для наиболее опасного поперечного сечения, используя толщину, равную наименьшему значению из $\rho_{ct}t$ и $\rho_{0, haz}t$ в зоне HAZ, и $\rho_{ct}t$ — вне зоны HAZ. При такой проверке можно не учитывать наличие зоны HAZ, образовавшейся вследствие сварки на нагруженных краях.

Коэффициент ρ_c выбирается, исходя из наиболее благоприятного, из следующих утверждений:

а) вычислить ρ_c на основании выражений (26) и (27) или определить его значение из рисунка 10, используя выражения для внутренних участков листов, которые установлены без крепления, закреплены упруго или зафиксированы по продольным сторонам, и выражения для внешних участков для листов с одним продольным свободным концом.

б) принять $\rho_c = \chi$, где χ — коэффициент уменьшения для прогнутой стойки, согласно выражению (66). При определении χ значение коэффициента гибкости $\bar{\lambda}$ принимается равным $3.5a/t$, что соответствует незакрепленному состоянию нагруженных концов. Для зафиксированных нагруженных концов можно использовать более низкое значение по усмотрению проектировщика.

6.5[6.5.3] В случае приложения к концам (ширина — b) прямоугольной нежесткой пластины действующего в одной плоскости изгибающего момента (рисунок 27), устойчивость к продольному изгибу определяется с помощью параметра β , где $\beta = 0,40 b/t$. Классификация поперечного сечения проводится согласно п.6.3(6.5.2).

Расчетное значение изгибающего момента M_{Ed} , должно удовлетворять неравенству

$$M_{Ed}/M_{Rd} \leq 1,0, \quad (98)$$

где — расчетное сопротивление изгибающему моменту M_{Rd} , принимает наименьшее из значений, $M_{o,Rd}$ и $M_{a,Rd}$, согласно выражениям (99), (100), (101) и (102).

Расчетное сопротивление изгибающему моменту $M_{o,Rd}$ при полной текучести и локальном продольном изгибе определяется следующим образом:

Поперечные сечения класса 1 и 2:

$$M_{o,Rd} = W_{pl}f_0/\gamma_{M1}; \quad (99)$$

Поперечные сечения класса 3:

$$M_{0,Rd} = \left[W_{el} + \frac{\beta_3 - \beta}{\beta_3 - \beta_2} (W_{pl} - W_{el}) \right] f_0 / \gamma_{M1} \quad (100)$$

Поперечные сечения класса 4:

$$M_{0,Rd} = W_{eff} f_0 / \gamma_{M1}, \quad (101)$$

где W_{pl} и W_{el} — соответственно пластичный и упругий моменты сопротивления для полного поперечного сечения или уменьшенного поперечного сечения с учетом поправки на зону HAZ, обусловленную сваркой продольных швов, но без учета отверстий;

W_{eff} — упругий момент сопротивления для эффективного поперечного сечения, полученного исходя из уменьшенной толщины, учитывающей поправку на продольный изгиб, а так же, при необходимости, на наличие зоны HAZ, появившейся после выполнения сварки продольных швов, но без учета отверстий (п.5.5.2(6.2.5.2));

β — коэффициент гибкости на самом критическом участке сечения;

β_2 и β_3 — предельные значения β для участков класса 2 и класса 3;

f_0 — характеристическое значение сопротивления материала при полной текучести.

Расчетное сопротивление изгибающему моменту $M_{u,Rd}$ при локальном разрушении в сечении, содержащем отверстия или поперечные сварные швы, определяется из выражения:

$$M_{u,Rd} = W_{net} f_u / \gamma_{M2}, \quad (102)$$

где W_{net} — момент сопротивления сечения, с учетом поправки на отверстия, и при использовании заниженного значения толщины $\rho_{u,haz} t$ для областей, подверженных влиянию зоны HAZ (п.5.5.2(6.2.5.2)).

6.6 Согласно п. 6.5.4 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011 в случае возникновения поперечных напряжений в результате приложения нагрузки к концам прямоугольного плоского листа устойчивость к прогибу определяется как $\beta = \eta t$, где η вычисляется по п. 5.1.6(6.1.4.3). Расчет β проводится по п. 6.3(6.5.2).

В случае, если приложенное сжимающее усилие или изгибающий момент, действующий в одной плоскости, изменяются равномерно по длине пластины (то есть в направлении a), то расчетное сопротивление изгибающему моменту для поперечных сечений класса 1, 2 или 3, на любом участке, не должно быть меньше значения, определенного на этом участке при нагрузке, разложенной на составляющие. Для поперечных сечений класса 4 проверка на текучесть может проводиться для каждого сечения. При проверке на продольный изгиб допустимо сравнивать расчетную сжимающую нагрузку или значение сопротивления изгибу с усилием, возникающим на некотором расстоянии от наиболее нагруженного конца листа, равном 0,4 половины длины прогиба упругой пластины.

6.7 На рисунке 27 показан прямоугольный плоский лист, находящийся под действием однородных поперечных сил в предположении, что толщина его однородна, и закрепление основания по всем четырем концам либо свободное, упругое, либо жесткое.

Устойчивость к прогибу при сдвиге (срезе) определяется с помощью параметра β , где $\beta = b/t$ и b соответствует наименьшей из размеров боковых сторон. Все краевые условия для листа, подверженного сдвигу (срезу), классифицируются как гибкие или негибкие, согласно следующему критерию:

$\beta \leq 39\epsilon$ — негибкая пластина;

$\beta > 39\varepsilon$ — гибкая пластина,

где

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{250}{f_0}} \quad (103)$$

Расчетное значение поперечной силы V_{Ed} в каждом поперечном сечении должно удовлетворять неравенству:

$$V_{Ed} \leq V_{Rd}, \quad (104)$$

где V_{Rd} — расчетное сопротивление сдвигу в поперечном сечении, определенное в наименее благоприятном поперечном сечении, согласно следующему выражению:

а) для негибких пластин ($\beta \leq 39\varepsilon$):

$$V_{Rd} = A_{net} f_0 / (\sqrt{3} \gamma_{M1}), \quad (105)$$

где A_{net} — эффективная рабочая площадь сечения, с учетом отверстий и заниженной толщины $\rho_{u,haz} t$ в областях, подверженных влиянию зоны HAZ. Если зона HAZ распространяется по всему периметру плоского листа, то предполагается, что заниженная толщина принимается для всего поперечного сечения. При введении поправки на отверстия, можно учитывать наличие небольших отверстий, если их полная площадь поперечных сечений составляет менее 20% от полной площади поперечного сечения bt ;

б) для гибких пластин ($\beta > 39\varepsilon$):

Производится проверка значения V_{Rd} как для текучести, так и для продольного изгиба. Для проверки на текучесть применяется выражение (105), как для негибких пластин. При проверке на продольный изгиб:

$$V_1 = v_1 b t f_0 / (\sqrt{3} \gamma_{M1}) \quad (106)$$

где $v_1 = 17 t \varepsilon \sqrt{k_\tau} / b$, но не более $v_1 = k_\tau \frac{430 t^2 \varepsilon^2}{b^2}$

$k_\tau = 5.34 + 4.00(b/a)^2$, если $a/b \geq 1$;

$k_\tau = 4.00 + 5.34(b/a)^2$ если $a/b < 1$.

В случае, если крепление концов пластины способствует возникновению зоны растяжения, то расчет производить по п.п.7.5-7.7(6.7.3).

6.8 Согласно п. 6.5.6 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011 в случае действия на плоский лист сложной комбинации осевой нагрузки и расчетного изгибающего момента, приложенных в одной плоскости, он должен быть классифицирован по каждому воздействию раздельно в соответствии с п. 6.3(6.5.2). Определение величины β основана на модели краевых напряжений, возникающих, если сила (N_{Ed}) и момент (M_{Ed}), действуют раздельно.

Для листов класса 4 каждое отдельное значение $N_{c,Rd}$ и $M_{c,Rd}$ рассматривается для конкретного типа рассматриваемого воздействия.

В случае приложения комбинации продольной силы и изгибающего момента в одной плоскости должно быть выполнено следующее условие:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} + \frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1 \quad (107)$$

В случае включения в комбинацию продольной силы и изгибающего момента поперечной силы, совпадающей по направлению, V_{Ed} , то ее значение можно не учитывать, если

оно не превышает $0,5V_{Rd}$ (п.5.32(6.2.8)).

Если $V_{Ed} > 0,5 V_{Rd}$, то значения $N_{c,Rd}$ и $M_{c,Rd}$ могут быть снижены (п.5.10.1(6.2.10)).

6.9 В соответствии с п. 6.6.1 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011 к жестким листам относятся плоские элементы, закрепленные по всем четырем концам и усиленные с помощью одного или двух, центральных или эксцентричных продольных элементов жесткости, или трех или более, расположенных на равном расстоянии, продольных элементов жесткости или гофрирования (рисунок 28), ортотропные пластины, (рисунок 28(с), (d) и (е)).

Элементы жесткости могут быть не закреплены на всей длине или, с другой стороны, могут быть расположены над промежуточными поперечными элементами жесткости. Размер L соответствует интервалу между точками крепления.

При таком усилении в случае продольного нагружения, действующего в плоскости усиления, несущая способность определяется по п.п. 6.10(6.6.2)-6.12(6.6.4), а прочность при сдвиге — по п. 6.13(6.6.5). Влияние различных эффектов может быть учтено таким же образом, как и в случае нежестких пластин (п.п. 7.18-7.19(6.7.6)). Утверждения действительны также и в случае, когда поперечное сечение содержит участки, которые классифицируются как гибкие.

Если в конструкции имеются плоские элементы с установленными элементами жесткости, то несущая способность при поперечном и нормальном растяжении может быть определена, как и в случае нежесткой пластины. При гофрированных конструкциях это можно не учитывать. Ортотропные пластины могут иметь повышенное сопротивление изгибающей нагрузке.

6.10 Согласно п. 6.6.2 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011 проверка на равномерное сжатие жестких и гибких листов должна выполняться на всех участках поперечного сечения.

Расчетное значение сжимающего усилия, N_{Ed} , должно удовлетворять условию:

$$N_{Ed}/N_{Rd} \leq 1.0, \quad (108)$$

где N_{Rd} — имеет значение, наименьшее из $N_{u,Rd}$ и $N_{c,Rd}$.

При проверке на текучесть все сечение должно быть проверено на локальное раздавливание, подобно подкосу (п. 5.11.6(6.3.1.5)). Расчетное значение несущей способности $N_{u,Rd}$ определяется с учетом площади рабочего сечения A_{net} для наименее благоприятного поперечного сечения, принимая во внимание локальный продольный изгиб и, при необходимости, зону HAZ, а также все свободные отверстия:

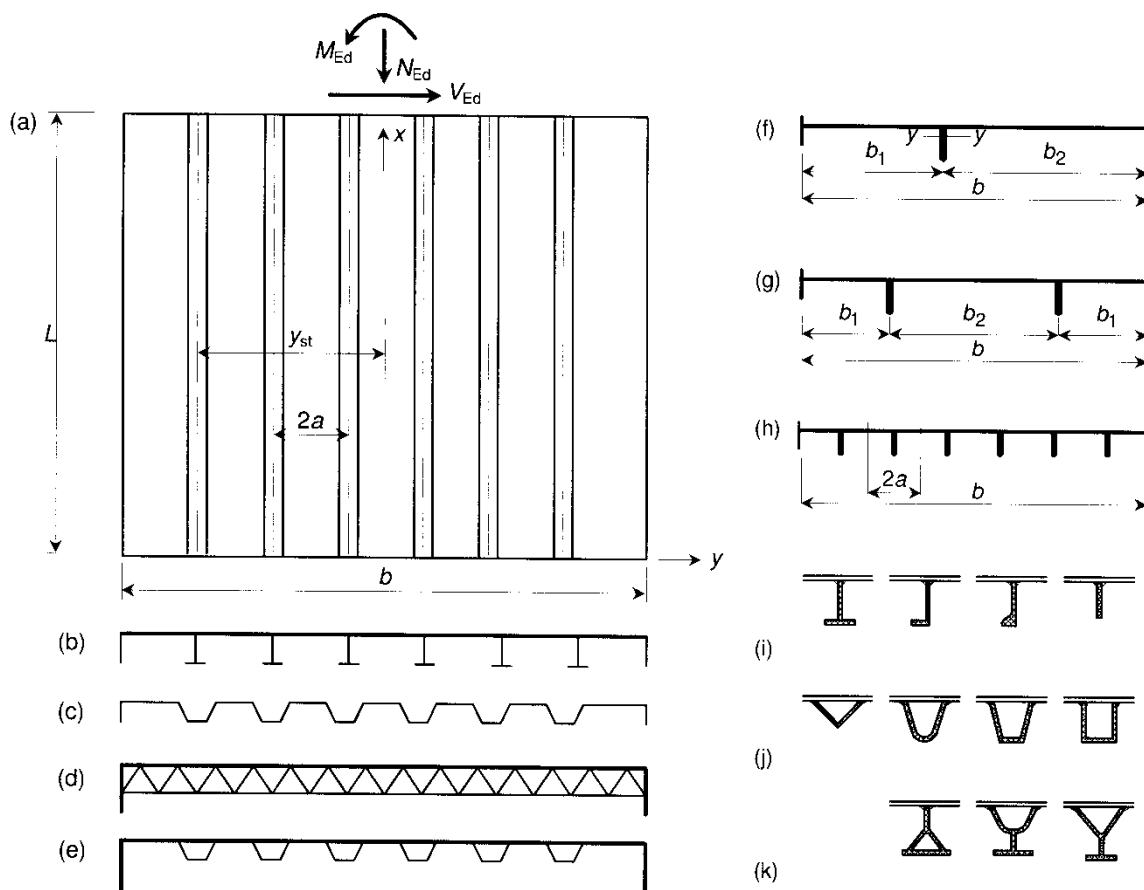
$$N_{u,Rd} = A_{net} f_u / \gamma_{M2}, \quad (109)$$

При определении расчетного значения сопротивления осевому сжатию $N_{c,Rd}$ конструкция рассматривается как структура, состоящая из одиночных подмодулей стойки, каждый из которых содержит один расположенный в центре элемент жесткости или гофрирование и имеет ширину, равную шагу $2a_w$:

$$N_{c,Rd} = A_{net} \chi f_0 / \gamma_{M1}, \quad (110)$$

где χ — коэффициент уменьшения для продольного изгиба;

A_{eff} — эффективная площадь поперечного сечения пластины, с учетом локального продольного изгиба и зоны HAZ, обусловленной наличием продольных сварных швов. Зона HAZ, образованная по нагруженным концам сварных швов или поперечных элементов жесткости, может игнорироваться при определении A_{eff} . Также можно пренебречь свободными отверстиями.



i - открытые элементы жесткости; j - закрытые элементы жесткости; k - комбинированные элементы жесткости

Рисунок 28[6.23]. Усиленные листы и типы элементов жесткости

Коэффициент уменьшения χ определяется по соответствующей кривой для стойки, принимая прогиб ее подмодуля как для простого подкоса.

[6.6.2]. При расчете χ коэффициент относительной гибкости $\bar{\lambda}$ равен:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff} f_0}{N_{cr}}} \quad (111)$$

где N_{cr} — упругая ортотропная изгибающая нагрузка, приложенная к полному поперечному сечению.

Для листа с открытыми элементами жесткости:

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 E I_y}{L^2} + \frac{L^2 C}{\pi^2}, \text{ если } L < \pi \sqrt{\frac{E I_y}{C}} \quad (112)$$

$$N_{cr} = 2\sqrt{cEI_y}, \text{ если } L \geq \pi\sqrt{\frac{EI_y}{c}} \quad (113)$$

где c — упругая опора листа согласно выражениям (114), (115) или (116);

I_y — момент инерции всех элементов жесткости в пределах пластины шириной b , относительно оси y (рисунок 28(f)).

Для участка поперечного сечения, имеющего один центральный или эксцентричный элемент жесткости (рисунок 28(f)):

$$c = \frac{0.27Et^3b}{b_1^2b_2^2} \quad (114)$$

где t — толщина пластины;

b — габаритная ширина пластины;

b_1 и b_2 — ширина участков пластины по обеим сторонам элемента жесткости.

Для участка поперечного сечения, имеющего два симметричных элемента жесткости, расположенных на расстоянии b_1 от продольных опор (рисунок 28(g)):

$$c = \frac{1.1Et^3}{b_1^2(3b-4b_1)} \quad (115)$$

Для пластины с множеством открытых элементов жесткости (рисунок 28(c), (b), (h) и (i)) с небольшой жесткостью на кручение:

$$c = 8.9Et^3/b^3, \quad (116)$$

Для пластины с множеством закрытых или частично закрытых элементов жесткости (рисунок 28(e) и (j)). N_{cr} представляет собой упругую ортотропную изгибающую нагрузку (п.6.14(6.6.6)).

Половина длины прогиба при упругом продольном изгибе, используемая в случае, когда приложенная нагрузка изменяется в направлении элемента жесткости или гофрировки, определяется как:

$$l_w = \pi\sqrt{\frac{EI_y}{c}} \quad (117)$$

6.11 Согласно п. 6.6.3 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011, в случае действия момента в плоскости жесткого листа необходимо проводить две проверки: на текучесть и как стойки.

При проведении любой проверки поперечное сечение должно классифицироваться как классы 2, 3 и 4 (п.5.4(6.1.4)). Для классификации отдельных частей, и также для определения эффективных толщин тонких участков, можно предполагать, что каждый участок находится под воздействием равномерного сжатия, используя $\eta = 1$ в п. 5.1.8(6.1.4.3). Однако, в случае проверки только на текучесть, допустимо определять η на модели действия напряжений на отдельных участках, включающих наиболее удаленную область структуры, и в дальнейшем использовать это значение для соответствующих участков. Это обосновано в случае, когда число элементов жесткости или гофрировок мало.

При проверке на текучесть все поперечное сечение листа должно рассматриваться как балка, подверженная изгибу в одной плоскости (см. п. 5.5.1(6.1.4.3)). Расчетное сопротивление изгибающему моменту M_{Rd} должно определяться в наиболее опасном попереч-

ном сечении, с учетом локального прогиба и, в случае необходимости, зоны HAZ, а также всех отверстий.

Плоский лист рассчитывается как сборная конструкция, состоящая из подмодулей (стоек), обычным способом, как при осевом сжатии. Расчетное значение момента сопротивления, $M_{c,Rd}$ определяется из выражения:

$$M_{c,Rd} = \frac{\chi_c I_{eff} f_0}{\gamma_{st} \gamma_{M1}} \quad (118)$$

где χ_c — коэффициент, учитывающий изгиб подмодуля;

I_{eff} — момент инерции эффективного поперечного сечения листа при изгибе в одной плоскости;

y_{st} — расстояние от центра листа до центра наиболее удаленного элемента жесткости.

Коэффициент χ_c должен определяться так же, как и при равномерном сжатии (п. 6.10(6.6.2)).

6.12 В соответствии с п. 6.6.4 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011 в случае, когда нагрузка M_{ed} или N_{ed} , приложенная к листу, имеющему несколько элементов жесткости, изменяется в направлении этих элементов или гофрировок, при проверке на текучесть расчетное сопротивление в любом поперечном сечении должно иметь значение не меньше, чем расчетное воздействие, возникающее в этом сечении.

При проверке стойки достаточно сравнить расчетное сопротивление с эффектом от расчетного воздействия, приложенного на расстоянии $0,4l_w$ от наиболее нагруженного конца панели, где l_w — половина длины прогиба при упругом продольном изгибе согласно п. 6.10(6.6.2).

6.13 Согласно п. 6.6.5 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011 в случае сдвига в листе, имеющем несколько элементов жесткости, необходимо проводить проверку на текучесть и на изгиб при условии, что элементы жесткости, или гофрировка, а так же базовый плоский лист выполнены следующим образом:

- а) эффективно связаны с поперечным каркасом в обоих концах;
- б) сплошные в любом поперечном элементе жесткости.

При проверке на текучесть расчетное сопротивление поперечной нагрузке V_{Rd} определяется так же, как и в случае плоской нежесткой пластины с такими же полными размерами ($L \times b$) и с такой же основной толщиной t .

При проверке на продольный изгиб расчетное сопротивление поперечной нагрузке определяется в соответствии с п. 7.27(6.8.2). Чтобы вычислить сопротивление, необходимо использовать следующие значения (необходимо учесть различие в системе координат, x и y на рисунке 28 соответствуют координатами z и x на рисунке 38):

$B = Et^3/10.9$ — для плоского листа с элементами жесткости; в других случаях см. п. 6.14(6.6.6);

$B_x = EI_y/b$ — где I_y момент инерции элемента жесткости и листа в пределах ширины b от центральной оси, параллельной плоскости листа; h_w — длина прогиба l , в качестве которой может использоваться свободная длина L (рисунок 28). Если L намного превышает b , более благоприятный результат может быть получен при использовании $V_{0,cr}$, равного упругому критическому ортотропному воздействию при продольном изгибе. При прове-

дении проверки на прогиб не нужно вводить поправки на зону HAZ.

6.14[6.6.6] Для ортотропных листов, подверженных равномерному сжатию см. п. 6.10(6.6.2). Упругая продольная критическая сила N_{cr} для свободно лежащей ортотропной пластины определяется из выражения:

$$N_{cr} = \frac{\pi^2}{b} \left[\frac{B_x}{(L/b)^2} + 2H + B_y(L/b)^2 \right], \text{ если } \frac{L}{B} < \sqrt[4]{\frac{B_x}{B_y}} \quad (119)$$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2}{b} \left[\sqrt{B_x B_y} + H \right], \text{ если } \frac{L}{B} \geq \sqrt[4]{\frac{B_x}{B_y}} \quad (120)$$

Выражения для B_x , B_y и H для различных поперечных сечений представлены в таблице 23, где выражения (116)–(129) даны ниже (индексы x и y указывают жесткость сечения $x = const$ и $y = const$, соответственно).

$$B_y = \frac{2Ba}{2a_4 + \frac{2a_1 a_3 t_1^3 (4a_2 t_3^3 + a_3 t_2^3)}{a_3 t_1^3 (4a_2 t_3^3 + a_3 t_2^3) + a_1 t_3^3 (12a_2 t_3^3 + 4a_3 t_2^3)}} \quad (121)$$

Таблица 23, п. 2:

$$H = 2B + \frac{\frac{Gt_1}{2a}}{1 + \frac{3.3Gt_1 a_4^2}{L_b^2 a B} \left[1 + \frac{1}{\frac{\pi^4 C_1}{L_b^4} + C_2} \right]} \quad (122)$$

где

$$L_b = 1, \text{ если } L_b \leq \frac{b}{3} \sqrt[4]{\frac{B_x}{B_y}} \quad (123)$$

$$C_1 = 4(1 - \nu^2)(a_2 + a_3)a_1^2 a_4^2 h^2 t_2 / (3at_1^3) \quad (124)$$

$$B = \frac{Et_1^3}{12(1 - \nu^2)} \quad (125)$$

$$C_2 = \frac{4(a_1 + a_2)^2 a_1 a_4 (1 + \frac{a_1}{a_2} + \frac{a_2}{a_1} + a^2 / (a_1 a_3))}{a_2^3 (3a_3 + 4a_2)} \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^3 \quad (126)$$

Таблица 23, п. 5:

$$B_y = \frac{1}{\frac{1}{B_v} + \frac{t_1 + t_2}{Et_1 t_2 h^2}} \quad (127)$$

где

$$B_v = \frac{Et_1^3}{12(1 - \nu^2)} \frac{10b^2}{32a^2} \frac{at_3^3 + \frac{at_2^3 t_3^3}{t_1^3} + 6ht_2^3}{at_3^3 + 2h(t_1^3 + t_2^3) + 3h^2 t_1^3 t_2^3 / (at_3^3)} \quad (128)$$

$$H = \frac{2E}{3 \left(1 - \frac{t}{2a} \right)^3} \left[\frac{t_1^3}{1 + \frac{6t_1}{2a - t_3}} + \frac{t_2^3}{1 + \frac{6t_2}{2a - t_3}} \right] \quad (129)$$

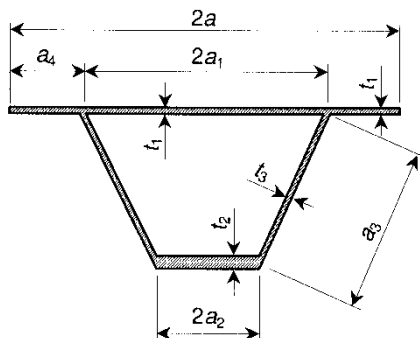


Рисунок 29[6.24]. Система обозначений для поперечного сечения закрытого элемента жесткости

Таблица 23[6.11]

Изгибная жесткость и жесткость при кручении для ортотропных пластин				
Вариант №	Поперечное сечение	B_x (соответствует EI)	B_y (соответствует E)	H
1		$\frac{EI_L}{2a}$	$\frac{Et^3}{12(1-\nu^2)}$	$\frac{Gt^3}{6}$
2		$\frac{EI_L}{2a}$	(121)	(122)
3		$\frac{EI_L}{2a}$	$\frac{2a}{s} \frac{Et^3}{12(1-\nu^2)}$	$\frac{2a}{s} \frac{Gt^3}{6}$
4		$\frac{EI_L}{2a}$	$\frac{Et_1 t_2 h^2}{t_1 + t_2}$	$\frac{GI_t}{2a}$
5		$\frac{EI_L}{2a}$	(127)	(129)
6		$\frac{EI_L}{2a}$	0	$\frac{GI_t}{2a}$

I_L — момент инерции одного элемента жесткости и связанной плиты в пределах $2a$.
 I_t — представляет собой постоянный скручивающий момент в том же сечении.

Сопротивление сдвиговой нагрузке для ортотропной плиты при большом прогибе при $\varphi \leq 1$ может быть рассчитано следующим образом:

$$\tau_{cr,g} = \frac{k_\tau \pi^2}{LA} \sqrt{B_y B_x^3} \quad (130)$$

$$k_{\tau} = 3,25 - 0,567\varphi + 1,92\varphi^2 + (1,95 + 0,1\varphi + 2,75\varphi^2)\eta_h \quad (131)$$

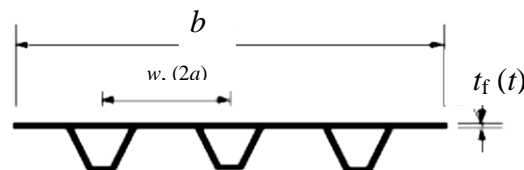
$$\varphi = \frac{L}{b} \sqrt{\frac{B_y}{B_x}} \quad (132)$$

$$\eta_h = \frac{H}{\sqrt{B_x B_y}}, \text{ действительно при } \eta_h < 1.5 \quad (133)$$

Значения B_x , B_y и H представлены в таблице 23, а A представляет собой площадь поперечного сечения в самом малом сечении при $y = \text{const}$ ($A = Lt$ для случаев 1, 2 и 3 в таблице 23 и $A = L(t_1 + t_2)$ для 4 и 5; не используется в случае 6).

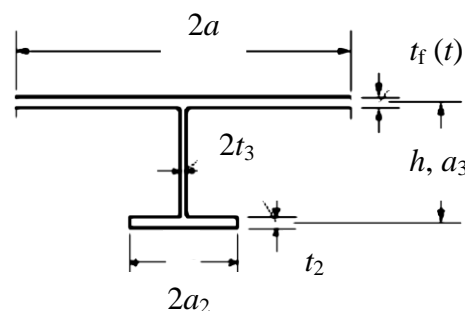
При $\varphi > 1$ меняются местами нижние индексы x и y и ширину h и L в выражениях (130) и (132), учитывая $A = b\Sigma t$.

ПРИМЕР 17 Дано: Ортотропная плита длиной $L = 2200$ мм, шириной $b = 1500$ мм и толщиной $t = t_1 = 16.5$ мм; шаг элементов жесткости $w = 300$ мм; Материал пластины – алюминиевый сплав EN AW-6063 T6 EP; $t \leq 20$ мм; $f_0 = 240$ Н/мм² (таб. 6); $E = 70000$ Н/мм²; $\gamma_{M1} = 1.1$ (таб. 10).



Требуется определить несущую способность ортотропной пластины с открытыми или закрытыми элементами жесткости на осевое сжатие.

а) открытый тип элемента жесткости: $a = 150$ мм; $a_2 = 50$ мм; $t_2 = 10$ мм; $h = 160$ мм; $t_3 = 4.4$ мм; $a_1 = 0$ мм; $a_3 = h = 160$ мм.



$$\varepsilon = \sqrt{\frac{250}{f_0}} = 1.021;$$

- для внутренних элементов: $\beta_{11} = 2a/t_1 = 18.182$; $\beta_{12} = a_3/2t_3 = 18.182$; $\beta = 18.182$;

$\beta_1 = 9\varepsilon = 9.186$; $\beta_2 = 11\varepsilon = 11.227$; $\beta_3 = 18\varepsilon = 18.371$; т.к. $\beta > \beta_1$, $\beta > \beta_2$, $\beta < \beta_3$, класс элемента 3.

- для выступающих элементов: $\beta = a_2/t_2 = 5$; $\beta_1 = 2.5\varepsilon = 2.552$; $\beta_2 = 4\varepsilon = 4.082$; $\beta_3 = 5\varepsilon = 5.103$; т.к. $\beta > \beta_1$, $\beta > \beta_2$, $\beta < \beta_3$, класс элемента 3.

Окончательно для открытого типа элемента жесткости принимаем класс 3. Проверку прочности сечения проводим без учета локального продольного изгиба.

Учет продольного изгиба при равномерном сжатии.

Площадь поперечного сечения: $A = 2t_1a + 2t_2a_2 + 2t_3a_3 - 2t_1a_1 = 7.358 \times 10^3 \text{ мм}^2$.

Смещение центра тяжести: $e = (2t_2a_2h + 2t_3a_3h/2)/A = 37.054 \text{ мм}$.

Момент инерции сечения: $I_L = 2t_2a_2h^2 + 2t_3a_3h^2/3 - Ae^2 = 2.751 \times 10^7 \text{ мм}^4$; $s = 2a = 300 \text{ мм}$.

Жесткости ортотропной пластины: при $\nu = 0.3$ $G = E/2(1 + \nu) = 27000 \text{ Н/мм}^2$.

Из таблицы 23: $B_x = EI_L/2a = 6.42 \times 10^9 \text{ Нмм}$; $B_y = 2aEt^3/12s(1 - \nu^2) = 2.88 \times 10^7 \text{ Нмм}$; $H = 2aGt^3/6s = 2.016 \times 10^7 \text{ Нмм}$.

Т.к. $L/b = 1.467 < \sqrt[4]{\frac{B_x}{B_y}} = 3.864$, то $N_{cr} = \frac{\pi^2}{b} \left[\frac{B_x}{(L/b)^2} + 2H + B_y(L/b)^2 \right] = 2.031 \times 10^4 \text{ кН}$ (119).

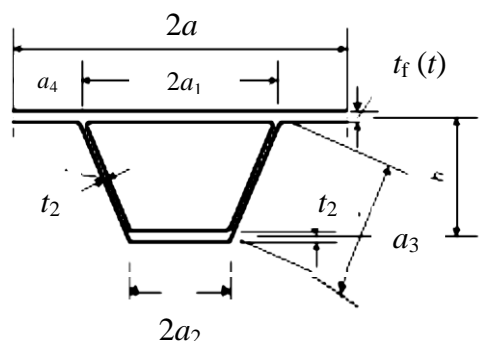
$A_{eff} = A = 7.358 \times 10^3 \text{ мм}^2$; $\alpha = 0.2$ – коэффициент наполнения; $\bar{\lambda}_0 = 0.1$ (таб. 17);

$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff}f_0}{N_{cr}}} = 0.295$ (111); $\varphi = 0.5(1 + \alpha(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2) = 0.563$; $\chi = \frac{1}{\varphi + \sqrt{\varphi^2 - \bar{\lambda}^2}} = 0.959$.

Несущая способность одного элемента жесткости:

$N_{b,Rd} = \chi A_{eff} f_0 / \gamma_{M1} = 0.959 \times 7.358 \times 10^3 \times 240 / 1.1 = 1.54 \times 10^3 \text{ кН}$.

б) закрытый тип элемента жесткости: $a = 150 \text{ мм}$; $t_1 = 16.5 \text{ мм}$; $a_2 = 50 \text{ мм}$; $t_2 = 10 \text{ мм}$; $h = 160 \text{ мм}$; $t_3 = 9.0 \text{ мм}$; $a_1 = 80 \text{ мм}$; $a_3 = \sqrt{(a_1 - a_2)^2 + h^2} = 162.8 \text{ мм}$; $a_4 = a - a_1 = 70 \text{ мм}$. $\varepsilon = \sqrt{\frac{250}{f_0}} = 1.021$



- для внутренних элементов: $\beta_{11} = 2a_1/t_1 = 9.697$; $\beta_{12} = 2a_2/t_2 = 10$; $\beta_{13} = a_3/t_3 = 18.088$; $\beta_{14} = 2a_4/t_1 = 8.485$; $\beta = 18.088$;

$\beta_1 = 9\varepsilon = 9.186$; $\beta_2 = 13\varepsilon = 13.268$; $\beta_3 = 18\varepsilon = 18.371$; т.к. $\beta > \beta_1$, $\beta > \beta_2$, $\beta < \beta_3$, класс элемента 3.

Окончательно для закрытого типа элемента жесткости принимаем класс 3. Проверку прочности сечения проводим без учета локального продольного изгиба.

Площадь поперечного сечения: $A = 2t_1a + 2t_2a_2 + 2t_3a_3 = 8.88 \times 10^3 \text{ мм}^2$;

Смещение центра тяжести: $e = (2t_2a_2h + 2t_3a_3h/2)/A = 44.415 \text{ мм}$;

Момент инерции сечения: $I_L = 2t_2a_2h^2 + 2t_3a_3h^2/3 - Ae^2 = 3.309 \times 10^7 \text{ мм}^4$.

Постоянная кручения: $I_T = \frac{4[h(a_1 + a_2)]^2}{\frac{2a_1}{t_1} + \frac{2a_2}{t_2} + \frac{2a_3}{t_3}} = 3.097 \times 10^7 \text{ мм}^4$.

$$C_1 = 4(1 - \nu^2)(a_2 + a_3)a_1^2 a_4^2 h^2 t_2 / 3at_1^3 = 3.076 \times 10^9 \text{ мм}^4 \quad (124);$$

$$B = Et^3 / 12(1 - \nu^2) = 2.88 \times 10^7 \text{ Нмм} \quad (125);$$

$$C_2 = \frac{4(a_1 + a_2)^2 a_1 a_4 (1 + \frac{a_1}{a_2} + \frac{a_2}{a_1} + a^2 / (a_1 a_3))}{a_2^3 (3a_3 + 4a_2)} \left(\frac{t_2}{t_1} \right)^3 = 4.851 \quad (126);$$

Жесткости ортотропной пластины: при $\nu = 0.3$ $G = E/2(1 + \nu) = 27000 \text{ Н/мм}^2$;
 $B_x = EI_L / 2a = 7.72 \times 10^9 \text{ Нмм}$ (таблица 23);

$$B_y = \frac{2Ba}{2a_4 + \frac{2a_1 a_3 t_1^3 (4a_2 t_3^3 + a_3 t_2^3)}{a_3 t_1^3 (4a_2 t_3^3 + a_3 t_2^3) + a_1 t_3^3 (12a_2 t_3^3 + 4a_3 t_2^3)}} = 3.929 \times 10^7 \text{ Нмм} \quad (121);$$

$$H = 2B + \frac{\frac{Gt_1}{2a}}{1 + \frac{3.3Gt_1 a_4^2}{L_b^2 a B} \left[1 + \frac{1}{\frac{\pi^4 C_1}{L_b^4} + C_2} \right]} = 7.305 \times 10^8 \text{ Нмм} \quad (122).$$

Т.к. $L/b = 1.467 < \sqrt[4]{\frac{B_x}{B_y}} = 3.744$, то $N_{cr} = \frac{\pi^2}{b} \left[\frac{B_x}{\left(\frac{L}{b}\right)^2} + 2H + B_y \left(\frac{L}{b}\right)^2 \right] = 3.378 \times 10^4 \text{ кН}.$

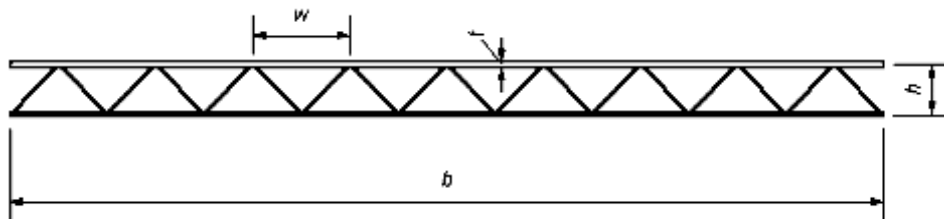
Прочность с учетом продольного изгиба.

$A_{eff} = A = 8.88 \times 10^3 \text{ мм}^2$; $\alpha = 0.2$ – коэффициент наполнения; $\bar{\lambda}_0 = 0.1$ (таб. 17); $\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff} f_0}{N_{cr}}} = 0.251$; $\varphi = 0.5[1 + \alpha(\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2] = 0.547$; $\chi = \frac{1}{\varphi + \sqrt{\varphi^2 - \bar{\lambda}^2}} = 0.969.$

Несущая способность одного элемента жесткости:

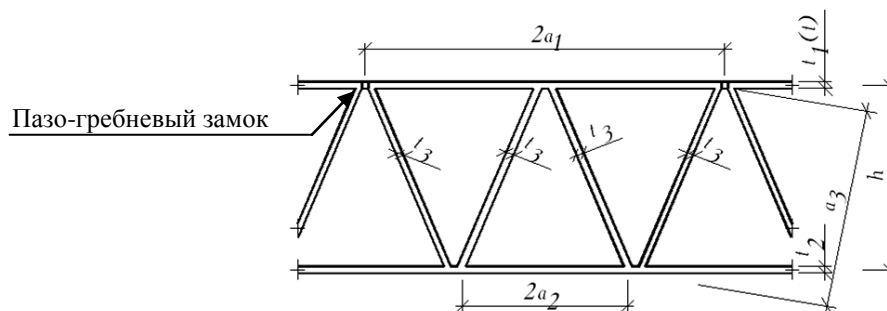
$$N_{b,Rd} = \chi A_{eff} f_0 / \gamma_{M1} = 0.969 \times 8.88 \times 10^3 \times 240 / 1.1 = 1.877 \times 10^3 \text{ кН}.$$

ПРИМЕР 18 Дано: Ортотропная плита длиной $L = 5000 \text{ мм}$, шириной $b = 300000 \text{ мм}$ и толщиной $t = t_1 = 5 \text{ мм}$; шаг элементов жесткости $w = 2a = 160 \text{ мм}$; Материал пластины – алюминиевый сплав EN AW-6063 Т6 ЕР; $t \leq 20 \text{ мм}$; $f_0 = 240 \text{ Н/мм}^2$; $f_u = 260 \text{ Н/мм}^2$ (таб. 6); $E = 70000 \text{ Н/мм}^2$; $\gamma_{M1} = 1.1$; $\gamma_{M2} = 1.25$ (таб. 10).



Требуется определить несущую способность ортотропной пластины с двухсторонней обшивкой на сдвиг.

а) профиль с пазо-гребневым замком: $a_2 = 40 \text{ мм}$; $t_2 = 5 \text{ мм}$; $h = 70 \text{ мм}$; $t_3 = 5 \text{ мм}$; $a_1 = 80 \text{ мм}$; количество ребер – 4; $a_3 = \sqrt{(a_1 - a_2)^2 + h^2} = 80.6 \text{ мм}.$



Местный продольный изгиб верхней полки.

$$a = L = 5 \times 10^3 \text{ мм}; b_w = a_1 = 80 \text{ мм}; a/b_w = 62.5 > 1.0;$$

$$k_\tau = 5.34 + 4.00(b_w/a)^2 = 5.341 \text{ (147);}$$

$$\lambda_w = \frac{0.81}{\sqrt{k_\tau}} \frac{b_w}{t_w} \sqrt{\frac{f_0}{E}} = 0.328 \text{ (151); по таблице 25: } 0.83/\lambda_w = 2.53 > \eta = 0.7 + 0.35(f_{uw}/f_{0w}) = 1.079 < 1.2; \rho_v = 1.079.$$

$$\text{По (145): } V_{w,Rd} = \rho_v b(t_1 + t_3) f_0 / \sqrt{3} \gamma_{M1} = 4.078 \times 10^5 \text{ кН.}$$

Учет продольного изгиба при сдвиге.

$$\text{Площадь поперечного сечения: } A = 2t_1 a + 2t_2 a_2 + 2t_3 a_3 n_w / 2 = 2.812 \times 10^3 \text{ мм}^2.$$

$$\text{Смещение центра тяжести: } e = [2t_2 a_2 h + 2t_3 a_3 (h/2)(n_w/2)] / A = 30.022 \text{ мм.}$$

$$\text{Момент инерции сечения: } I_L = 2t_2 a_2 h^2 + 2t_3 a_3 (h^2/3)(n_w/2) - A e^2 = 2.059 \times 10^6 \text{ мм}^4.$$

$$\text{Приближенная постоянная кручения: } I_T = \frac{4[h(a_1 + a_2)]^2}{\frac{2a_1}{t_1} + \frac{2a_2}{t_2} + \frac{2a_3}{t_3}} = 3.517 \times 10^6 \text{ мм}^4.$$

$$\text{Жесткости ортотропной пластины: при } \nu = 0.3 \quad G = E/2(1 + \nu) = 27000 \text{ Н/мм}^2.$$

$$\text{Из таблицы 23: } B_x = EI_L/2a = 9.007 \times 10^8 \text{ Нмм}; B_y = Et_1 t_2 h^2 / (t_1 + t_2) = 8.575 \times 10^8 \text{ Нмм}; H = GI/2a = 5.918 \times 10^8 \text{ Нмм.}$$

$$\varphi = L/b \sqrt[4]{\frac{B_y}{B_x}} = 0.0168 < 1.0 \text{ (132); } \eta_h = \frac{H}{\sqrt{B_x B_y}} = 0.6735 \text{ (133); } k_\tau = 3.25 - 0.567\varphi^2 + (1.95 + 0.1\varphi + 2.75\varphi^2)\eta_h = 4.5561 \text{ (131); } \tau_{cr,g} = \frac{k_\tau \pi^2}{bA} \sqrt[4]{B_y B_x^3} = 0.0474 \text{ кН/мм}^2 \text{ (130).}$$

$$\lambda_{c,g} = \sqrt{\frac{f_0}{\tau_{cr,g} \sqrt{3}}} = 1.71 \text{ (184); } \rho_{c,g} = \frac{1.5}{0.5 + \lambda_{c,g}^2} = 0.439 < 1.0 \text{ (183).}$$

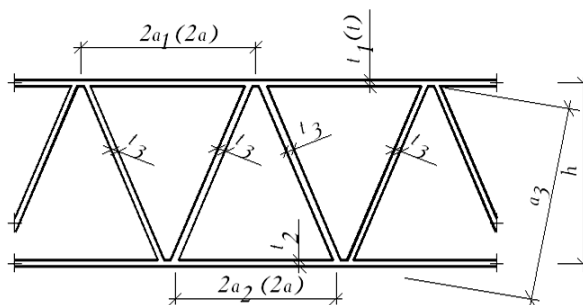
Несущая способность на сдвиг:

$$V_{Rd} = \rho_{c,g} t_w h_w f_0 / \sqrt{3} \gamma_{M1} = 0.0051 \times 5 \times 70 \times 240 / (1.732 \times 1.1) = 19.338 \text{ кН (180).}$$

$$\text{Т.к. } V_{Rd} = 19.338 \text{ кН} < V_{w,Rd} = 4.078 \times 10^5 \text{ кН, принимаем } V_{Rd} = 19.338 \text{ кН.}$$

б) поперечное сечение фермы: $a_2 = a_1 = a/2 = 40 \text{ мм}; t_2 = 5 \text{ мм}; h = 70 \text{ мм}; t_3 = 5 \text{ мм};$

$$a_3 = \sqrt{(a_1 - a_2)^2 + h^2} = 80.6 \text{ мм.}$$



Местный продольный изгиб верхней полки.

$$a = L = 5 \times 10^3 \text{ мм}; b_w = a_1 = 80 \text{ мм}; a/b_w = 62.5 > 1.0;$$

$$k_\tau = 5.34 + 4.00(b_w/a)^2 = 5.341 \quad (147);$$

$$\lambda_w = \frac{0.81}{\sqrt{k_\tau}} \frac{b_w}{t_w} \sqrt{\frac{f_0}{E}} = 0.328 \quad (151); \text{ по таблице 25: } 0.83/\lambda_w = 2.53 > \eta = 0.7 + 0.35(f_{uw}/f_{0w}) = 1.079 < 1.2; \rho_v = 1.079.$$

$$\text{По (145): } V_{w,Rd} = \rho_v b(t_1 + t_2 + t_3) f_0 / \sqrt{3} \gamma_{M1} = 6.117 \times 10^5 \text{ кН}.$$

Учет продольного изгиба при сдвиге.

$$\text{Площадь поперечного сечения: } A = 2t_1 a_1 + 2t_2 a_2 + 2t_3 a_3 = 1.606 \times 10^3 \text{ мм}^2.$$

$$\text{Смещение центра тяжести: } e = [2t_2 a_2 h + 2t_3 a_3 (h/2)] / A = 35 \text{ мм}.$$

$$\text{Момент инерции сечения: } I_L = 2t_2 a_2 h^2 + 2t_3 a_3 (h^2/3) - A e^2 = 1.309 \times 10^6 \text{ мм}^4.$$

$$\text{Постоянная кручения: } I_T = \frac{4[h(a_1 + a_2)]^2}{\frac{2a_1}{t_1} + \frac{2a_2}{t_2} + \frac{2a_3}{t_3}} = 1.952 \times 10^6 \text{ мм}^4.$$

Жесткости ортотропной пластины: при $\nu = 0.3$ $G = E/2(1 + \nu) = 27000 \text{ Н/мм}^2$.

$$\text{Из таблицы 23: } B_x = EI_L/2a = 5.728 \times 10^8 \text{ Нмм}; B_y = Et_1 t_2 h^2 / (t_1 + t_2) = 8.575 \times 10^8 \text{ Нмм}; H = GI/2a = 3.285 \times 10^8 \text{ Нмм}.$$

$$\varphi = L/b \sqrt[4]{\frac{B_y}{B_x}} = 0.018 < 1.0 \quad (132); \eta_h = \frac{H}{\sqrt{B_x B_y}} = 0.469 \quad (133); k_\tau = 3.25 - 0.567\varphi^2 + (1.95 + 0.1\varphi + 2.75\varphi^2)\eta_h = 4.156 \quad (131); \tau_{cr,g} = \frac{k_\tau \pi^2}{bA} \sqrt[4]{B_y B_x^3} = 0.0539 \text{ кН/мм}^2 \quad (130).$$

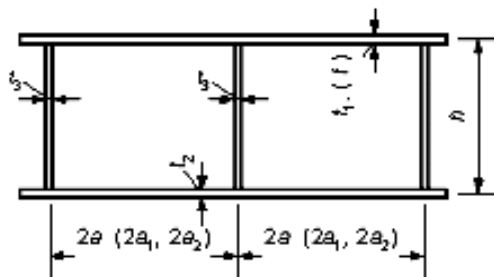
$$\lambda_{c,g} = \sqrt{\frac{f_0}{\tau_{cr,g} \sqrt{3}}} = 1.603 \quad (184); \rho_{c,g} = \frac{1.5}{0.5 + \lambda_{c,g}^2} = 0.489 < 1.0 \quad (183).$$

Несущая способность на сдвиг:

$$V_{Rd} = \rho_{c,g} t_w h_w f_0 / \sqrt{3} \gamma_{M1} = 0.83 \times 5 \times 70 \times 240 / (1.732 \times 1.1) = 21.54 \text{ кН} \quad (180).$$

Т.к. $V_{Rd} = 21.54 \text{ кН} < V_{w,Rd} = 6.117 \times 10^5 \text{ кН}$, принимаем $V_{Rd} = 21.54 \text{ кН}$.

в) поперечное сечение рамы: $a = a_1 = a_2 = 37.5 \text{ мм}; t_1 = t_2 = t_3 = 5 \text{ мм}; h = 70 \text{ мм}; a_3 = h = 70 \text{ мм}.$



Местный продольный изгиб верхней полки.

$$a = L = 5 \times 10^3 \text{ мм}; b_w = 2a_1 = 75 \text{ мм}; a/b_w = 66.667 > 1.0;$$

$$k_\tau = 5.34 + 4.00(b_w/a)^2 = 5.341 \quad (147);$$

$$\lambda_w = \frac{0.81}{\sqrt{k_\tau}} \frac{b_w}{t_w} \sqrt{\frac{f_0}{E}} = 0.308 \quad (151); \text{ по таблице 25: } 0.83/\lambda_w = 2.695 > \eta = 0.7 + 0.35(f_{uw}/f_{0w}) = 1.079 < 1.2; \rho_v = 1.079.$$

По (145): $V_{w,Rd} = \rho_v b(t_1 + t_2) f_0 / \sqrt{3} \gamma_{M1} = 4.078 \times 10^5 \text{ кН}$.

Учет продольного изгиба при сдвиге.

Площадь поперечного сечения: $A = 2t_1 a_1 + 2t_2 a_2 + t_3 a_3 = 1.1 \times 10^3 \text{ мм}^2$.

Смещение центра тяжести: $e = [2t_2 a_2 h + t_3 a_3 (h/2)] / A = 35 \text{ мм}$.

Момент инерции сечения: $I_L = 2t_2 a_2 h^2 + t_3 a_3 (h^2/3) - A e^2 = 1.062 \times 10^6 \text{ мм}^4$.

Постоянная кручения: $I_T = \frac{4[h(a_1 + a_2)]^2}{\frac{2a_1}{t_1} + \frac{2a_2}{t_2} + \frac{2a_3}{t_3}} = 1.901 \times 10^6 \text{ мм}^4$.

Жесткости ортотропной пластины: при $\nu = 0.3$ $G = E / (2(1 + \nu)) = 27000 \text{ Н/мм}^2$.

Из таблицы 23: $B_x = EI_L / 2a = 9.909 \times 10^8 \text{ Нмм}$;

$$B_v = \frac{Et_1^3}{12(1-\nu^2)} \frac{10b^2}{32a^2} \frac{at_3^3 + \frac{at_2^3 t_3^3}{t_1^3} + 6ht_2^3}{at_3^3 + 2h(t_1^3 + t_2^3) + 3h^2 t_1^3 t_2^3 / (at_3^3)} = 1.118 \times 10^7 \text{ Нмм} \quad (128);$$

$$H = \frac{2E}{3\left(1 - \frac{t}{2a}\right)^3} \left[\frac{t_1^3}{1 + \frac{6t_1}{2a - t_3}} + \frac{t_2^3}{1 + \frac{6t_2}{2a - t_3}} \right] = 8.75 \times 10^6 \text{ Нмм} \quad (129).$$

$$\varphi = L/b \sqrt[4]{\frac{B_y}{B_x}} = 5.432 \times 10^{-3} < 1.0 \quad (132); \quad \eta_h = \frac{H}{\sqrt{B_x B_y}} = 0.083 \quad (133); \quad k_\tau = 3.25 - 0.567\varphi^2 + (1.95$$

$$+ 0.1\varphi + 2.75\varphi^2)\eta_h = 3.409 \quad (131); \quad \tau_{cr,g} = \frac{k_\tau \pi^2}{LA} \sqrt[4]{B_y B_x^3} = 0.0329 \text{ кН} \quad (130).$$

$$\lambda_{c,g} = \sqrt{\frac{f_0}{\tau_{cr,g} \sqrt{3}}} = 2.052 \quad (184); \quad \rho_{c,g} = \frac{1.5}{0.5 + \lambda_{c,g}^2} = 0.318 < 1.0 \quad (183).$$

Несущая способность на сдвиг:

$$V_{Rd} = \rho_{c,g} t_w h_w f_0 / \sqrt{3} \gamma_{M1} = 0.83 \times 5 \times 70 \times 240 / (1.732 \times 1.1) = 14.04 \text{ кН} \quad (180).$$

Т.к. $V_{Rd} = 14.04 \text{ кН} < V_{w,Rd} = 6.117 \times 10^5 \text{ кН}$, принимаем $V_{Rd} = 14.04 \text{ кН}$.

7 СОСТАВНЫЕ АЛЮМИНИЕВЫЕ БАЛКИ

7.1 Согласно п. 6.7.1 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011 составная балка представляет собой конструктивный элемент, состоящий из стенки, растянутой и сжатой полок (поясных листов). Стенка, как правило, является гибкой и может быть усилена в поперечном направлении с помощью ребер и промежуточных элементов жесткости. Она также может быть усилена продольными ребрами жесткости. Стенки балок прогибаются при сдвиге под действием относительно низких нагрузок, значительная часть которых компенсируется в области растяжения.

Составные балки иногда изготавливаются с поперечными элементами усиления в виде гофрировок или близко расположенных поперечных элементов жесткости.

Правила для составных балок применимы также и для боковых сторон балок коробчатого сечения.

Варианты напряженно-деформированного состояния составных балок и ссылки на соответствующие выражения, определяющие их несущую способность, представлены в таблице 24.

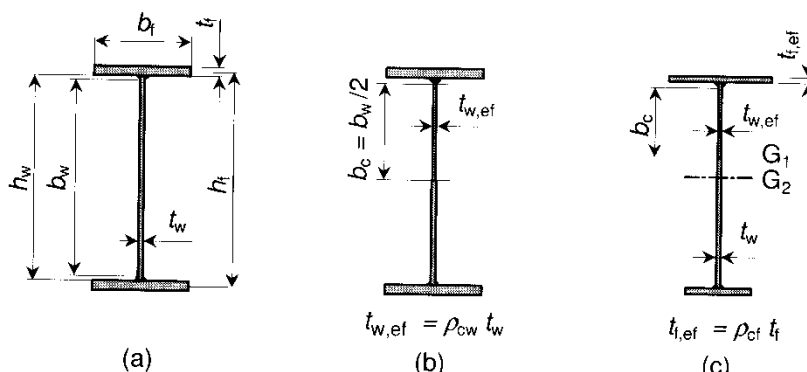
7.2 В соответствии с п. 6.7.2 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011 в случае действия изгиба в одной плоскости необходимо проводить проверку на текучесть и прогиб, а для стенок со сплошными продольными сварными швами необходимо проверять эффект HAZ. Влиянием эффекта HAZ, вызванного сваркой поперечных элементов жесткости, можно не учитывать, а малые отверстия в стенке могут не учитываться, при условии, что они не занимают более 20 % площади ее поперечного сечения. Высота стенки между полками определяется с помощью параметра h_w , а расстояние между сварными подпятниками полок — b_w (рисунок 30).

Таблица 24

Варианты прогиба и соответствующие выражения несущей способности	
Вариант прогиба	Выражение
Прогиб стенки под действием сжимающей нагрузки	п.п.7.2-7.4(6.7.2), 7.5-7.7(6.7.3)
Прогиб стенки при сдвиге (срезе)	п.п.7.8-7.12(6.7.4), 7.26-7.27(6.8)
Прогиб стенки из-за локальной нагрузки на полках	п.п.7.18-7.19(6.7.6)
Прогиб стенки при действии поперечной силы и изгибающего момента	п.п.7.13-7.17(6.7.5)
Прогиб стенки, вызванный нагрузкой на полку	п.7.20(6.7.7)
Изгибающее кручение на полке (локальный прогиб)	п.5.1.11(6.1.5)
Боковой крутящий момент	п.п.5.11.7-5.11.10(6.3.2)

7.3[6.7.2] При проверке на текучесть расчетное значение момента, M_{ed} в каждом поперечном сечении должно удовлетворять соотношению:

$$M_{ed} \leq M_{o,Rd}, \quad (134)$$



- (a) — системы обозначений поперечного сечения;
 (b) — эффективное поперечное сечение для симметричной составной балки с полками класса 1, 2 и 3;
 (c) — эффективное поперечное сечение для балки с менее напряженной нижней полкой и верхней полкой, подвергнутой сжатию, и, принадлежащим к классу 4.

Рисунок 30[6.25]. Составная балка в состоянии изгиба

где $M_{o,Rd}$ — для всех классов поперечного сечения, определяет расчетный момент сопротивления поперечного сечения, который применим для сечения класса 3.

Таким образом:

$$M_{o,Rd} = W_{net} f_0 / \gamma_{M1}, \quad (135)$$

где W_{net} — момент сопротивления сечения, с учетом отверстий и при использовании заниженной толщины $\rho_{0,haz} t$ в областях, прилегающим к полкам, которые могут быть подвержены влиянию зоны HAZ (п.5.1.13(6.1.6.2)).

7.4 Согласно п. 6.7.2 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011 при проведении проверки на прогиб, предполагается, что поперечные элементы жесткости удовлетворяют требованиям к эффективному сечению элемента, представленным в п.п. 7.21-7.25(6.7.8). Также предполагается, что расстояние между смежными поперечными ребрами жесткости больше половины высоты стенки между полками. В противном случае, см. п.п. 7.26-7.27(6.8), где описаны гофрированные стенки или близко расположенные ребра жесткости.

[6.7.2] Для каждой секции балки с расстоянием a между поперечными ребрами жесткости, момент, обусловленный расчетной нагрузкой на расстоянии $0,4a$ от наиболее напряженного конца не должен превышать расчетный момент сопротивления, $M_{c,Rd}$ для этой секции, где:

$$M_{c,Rd} = W_{eff} f_0 / \gamma_{M1}, \quad (136)$$

W_{eff} — эффективный упругий момент сопротивления сечения, полученный при использовании заниженной толщины, учитывающей продольный изгиб, а также зону HAZ, но не учитывающий отверстия. Заниженная толщина равна меньшему значению из $\rho_{0,haz} t$ и ρ_{ct} в зоне HAZ, и ρ_{ct} - в других сечениях (п.п. 5.5.1-5.5.2(6.2.5)).

Для всех участков, принадлежащих классу 4, которые полностью или частично подвержены сжатию, толщина должна быть уменьшена (b_c на рисунке 30). Коэффициент

напряжения ψ , используемый в п. 5.1.6(6.1.4.3), и соответствующая ширина b_c могут быть определены, используя эффективную площадь сечения сжатой полки и полную площадь стенки (рисунок 30(с), центр силы тяжести G_1).

Если участок стенки, подверженный сжатию, расположен ближе к нейтральной оси балки, чем к напряженной полке, (рисунок 30(с)), можно использовать метод, описанный в п. 5.1.6(6.1.4.3).

Эта процедура, как правило, требует итерационного расчета, при котором ψ повторно определяется на каждом шаге, исходя из напряжений, вычисленных для эффективного поперечного сечения, определенного в конце предыдущего шага.

7.5 В соответствии с п. 6.7.3 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011 в случае усиления стенки балки поперечными и продольными ребрами жесткости прогиб пластины, обусловленный продольной сжимающей нагрузкой, может учитываться при помощи эффективного поперечного сечения, применяемого к сечениям класса 4.

На первом этапе расчета определяются эффективные площади сечения сжатых панелей, расположенных между ребрами жесткости, используя эффективные толщины в соответствии с п. 5.1.11(6.1.5) (рисунок 31).

Полный прогиб стенки балки, включая прогиб элементов жесткости, рассматривается как при продольном изгибе стойки, содержащей ребра жесткости и половину смежной части стенки. Если напряжения изменяются от сжатия до растяжения внутри подпанели, то в сечение стойки включается одна треть сжатого участка (рисунок 31(с)).

На втором этапе расчета эффективная толщина различных участков сечения стойки уменьшается коэффициентом χ , определяемым исходя из соответствующей кривой прогиба стойки как простого подкоса, расположенного вне плоскости стенки.

7.6[6.7.3] Коэффициент относительный гибкости $\bar{\lambda}$ при расчете χ определяется как:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{st,eff} f_0}{N_{cr}}} \quad (137)$$

где $A_{st,eff}$ — эффективная площадь стойки, полученная на первом этапе расчета (рисунок 31(с));

N_{cr} — представляет собой упругую изгибающую нагрузку, заданную с помощью следующего выражения:

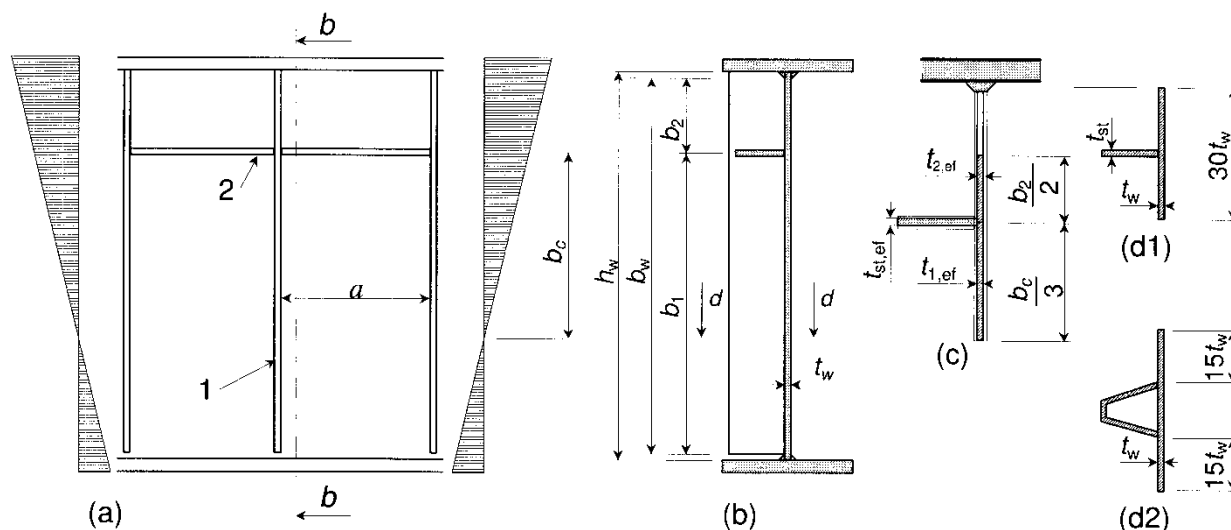
$$N_{cr} = 1,05E \frac{\sqrt{I_{st} t_w^3 b_w}}{b_1 b_2}, \text{ если } a > a_c \quad (138)$$

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 E I_{st}}{a^2} + \frac{E t_w^3 b_w a^2}{4\pi^2 (1 - \nu^2) b_1^2 b_2^2}, \text{ если } a \leq a_c \quad (139)$$

$$a_c = 4,33 \sqrt[4]{\frac{I_{st} b_1^2 b_2^2}{t_w^3 b_w}} \quad (140)$$

где I_{st} — момент инерции основного поперечного сечения ребра жесткости и смежного участка стенки (п. 7.7(6.7.3)) относительно оси, проходящей через центр тяжести и параллельно плоскости стенки;

b_1 и b_2 — расстояния от продольных концов до ребра жесткости ($b_1 + b_2 = b_w$);
 a_c — 1/2 длины упругого прогиба ребра жесткости.



- 1 — поперечный элемент жесткости, 2 — продольный элемент жесткости
 (a) — ребро жесткости; (c) — эффективная площадь элемента жесткости;
 (b) — поперечное сечение; (d1), (d2) — поперечное сечение стойки, используемое для расчета I_{st} ,

Рисунок 31[6.26]. Ребра жесткости составной балки при изгибе

7.7 Согласно п. 6.7.3 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011 при определении I_{st} ребро жесткости вместе с прилегающими участками стенки эффективной шириной, равной $15t_w$, расположенными по обеим сторонам ребра жесткости (рисунок 31(d1) и (d2)), рассматривается как стойка.

В случае установки двух сжатых продольных ребер жесткости они рассматриваются как объединенный элемент, с эффективной площадью и моментом инерции, равным сумме соответствующих значений для отдельных элементов жесткости. Местоположением объединенного элемента жесткости является позиция результирующего вектора осевой нагрузки, приложенной к ребрам жесткости. Если одно из ребер жесткости растянуто, то процедура будет традиционной.

7.8 В соответствии с п. 6.7.4 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011 проверка локального продольного изгиба составной балки при сдвиге проводится при соблюдении следующих критериев:

- а) участки стенки балки между ребрами жесткости имеют прямоугольную форму, а полки параллельны с погрешностью не более 10° ;
- б) ребра жесткости, если они имеются, установлены в продольном и/или в поперечном направлении;
- в) открытые отверстия или просечки малы и ограничены диаметрами d , которые удовлетворяют неравенству $d/h_w \leq 0,05$ где h_w — ширина пластины;
- г) элементы балки однородны.

Проверка составной балки на прогиб при сдвиге производится:

$$V_{Ed}/V_{Rd} \leq 1, \quad (141)$$

где V_{Ed} — расчетное значение поперечной силы;

V_{Rd} — расчетное сопротивление сдвигу (п. 7.9(6.7.4.1) или 7.10(6.7.4.2)).

7.9 Согласно п.п. 6.7.4.1 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011 расчет участков стенки балки, имеющей ребра жесткости только в зоне крепления основания, производится как изогнутой пластины при действии поперечной силы. При $h_w/t_w > (2.37/\eta) \sqrt{E/f_0}$ необходимо произвести проверку на сопротивление сдвигающей нагрузке. Для определения η см. таблицу 25; для h_w и t_w — рисунок 32.

Расчетное сопротивление V_{Rd} сдвигу:

$$V_{Rd} = \rho_v t_w h_w \frac{f_0}{\gamma_{M1} \sqrt{3}} \quad (142)$$

где ρ_v — коэффициент, определяющий локальный продольный изгиб при сдвиге, полученный из таблицы 25 или из рисунка 33.

$\eta = 0.7 + 0.35 f_{aw} / f_{0w}$ но не более, чем 1.2,

где f_{0w} — прочность материала при полной текучести;

f_{aw} — предел прочности материала стенки.

Коэффициент гибкости λ_w представленный в таблице 25 и на рисунке 33 равен

$$\lambda_w = 0,35 \frac{b_w}{t_w} \sqrt{\frac{f_0}{E}} \quad (143)$$

Таблица 25[6.13]

Коэффициент ρ_v , определяющий прогиб при сдвиге		
Диапазон изменения λ_w	Жесткое крепление	Нежесткое крепление
$\lambda_w \leq 0.83/\eta$	η	η
$0.83/\eta < \lambda_w < 0.937$	$0.83/\lambda_w$	$0.83/\lambda_w$
$0.937 \leq \lambda_w$	$2.3/(1.66 + \lambda_w)$	$0.83/\lambda_w$

На рисунке 32 показаны различные варианты опоры для балок:

- а) при отсутствии опорных стоек (п.п. 7.13-7.17(6.7.5), тип с);
- б) жесткие торцовые стойки, см. п. 7.21(6.7.8.1). Этот вариант также применим для панелей, расположенных не по концам, а на промежуточной опоре сплошной балки;
- в) нежесткие торцовые стойки, см. п. 7.22(6.7.8.2);
- г) при расчете сопротивления болтовое соединение должно классифицироваться как нежесткое, см. п. 7.22(6.7.8.2).

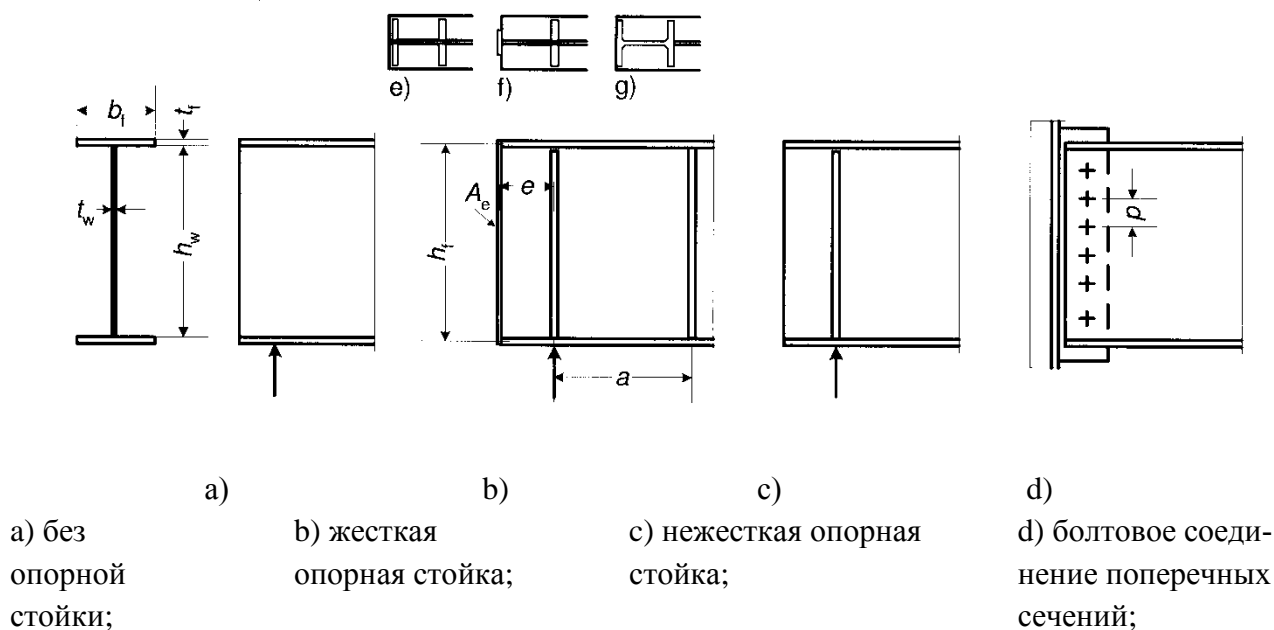


Рисунок 32[6.27]. Опорные элементы жесткости

7.10 Согласно п. 6.7.4.2 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011 расчет участков стенки балки, имеющей промежуточные продольные и/или поперечные ребра жесткости производится как пластины при действии поперечной силы.

Пластины с $h/t_w > (1,02/\eta) \sqrt{\frac{k_\tau E}{f_0}}$ проверяются на прочность при сдвиге и должны иметь поперечные ребра жесткости в опорной зоне.

Для определения η см. таблицу 25; h_w и t_w — см. рисунок 33; k_τ — см. ниже.

Для балок, имеющих поперечные и продольные элементы жесткости, расчетное сопротивление при сдвиге (срезе) V_{Rd} представляет собой сумму воздействий на стенку ($V_{w,Rd}$) и полки ($V_{f,Rd}$):

$$V_{Rd} = V_{w,Rd} + V_{f,Rd}, \quad (144)$$

где $V_{w,Rd}$ — включает частичное воздействие в напряженной области стенки;

$V_{f,Rd}$ — представляет собой увеличение напряженной области, вызванное локальным сопротивлением изгибу полок.

Учет стенки балки в расчетное сопротивление сдвигу (срезу) должно определяться как:

$$V_{w,Rd} = \rho_v t_w h_w \frac{f_0}{\gamma_{M1} \sqrt{3}} \quad (145)$$

где ρ_v — коэффициент для сдвига, полученный из таблицы 25, или из рисунка 34.

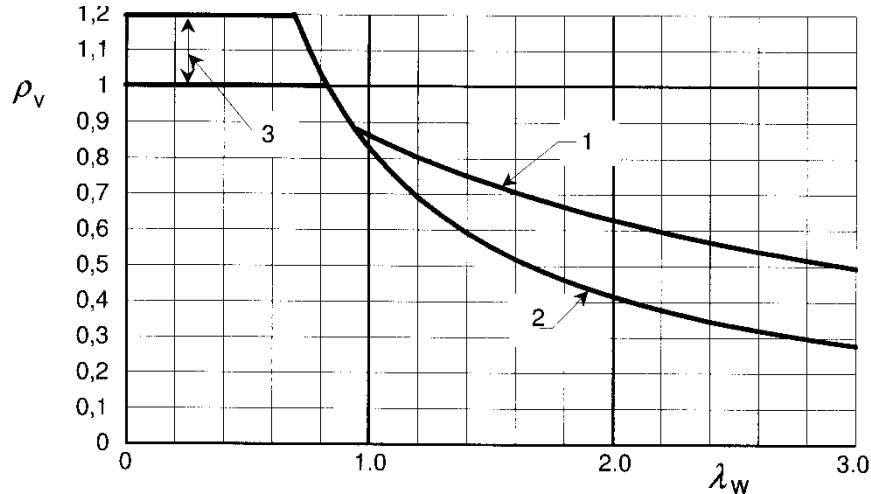
Параметр гибкости λ_w равен:

$$\lambda_w = \frac{0,81}{\sqrt{k_\tau}} \frac{b_w}{t_w} \sqrt{\frac{f_0}{E}} \quad (146)$$

где k_τ — минимальное значение коэффициента сдвига для панели стенки.

Границы могут рассматриваться как жесткие только в том случае, если жесткими являются полки и поперечные ребра (см. п. 7.23(6.7.8.3)). Тогда панель стенки определяется как расположенная между двумя смежными поперечными ребрами жесткости.

При расчете k_τ момент инерции продольных элементов жесткости должен быть уменьшен до 1/3 от его реального значения (п.7.11).



1 — жесткая торцевая стойка, 2 — нежесткая торцевая стойка, 3 — диапазон изменения η

Рисунок 33[6.28]. Коэффициент ρ_v при продольном изгибе со сдвигом

7.11 В соответствии с п. 6.7.4.2 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011 определение коэффициент сдвига k_τ в п. 7.10 для стенок с жесткими поперечными ребрами жесткости и без продольных элементов, или имеющие более двух продольных ребер жесткости производится по формулам:

$$k_\tau = 5,34 + 4,00 \left(\frac{b_w}{a} \right)^2 + k_{\tau si}, \text{ при } a/b_w \geq 1.0 \quad (147)$$

$$k_\tau = 4,34 + 5,00 \left(\frac{b_w}{a} \right)^2 + k_{\tau si}, \text{ при } a/b_w < 1.0 \quad (148)$$

где

$$k_{\tau si} = 9 \left(\frac{b_w}{a} \right)^2 \left(\frac{I_{st}}{t_w^3 b_w} \right)^{\frac{3}{4}}, \text{ но не менее, чем } \frac{2,1}{t_w} \left(\frac{I_{st}}{b_w} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (149)$$

где a — расстояние между поперечными элементами жесткости (рисунок 33);

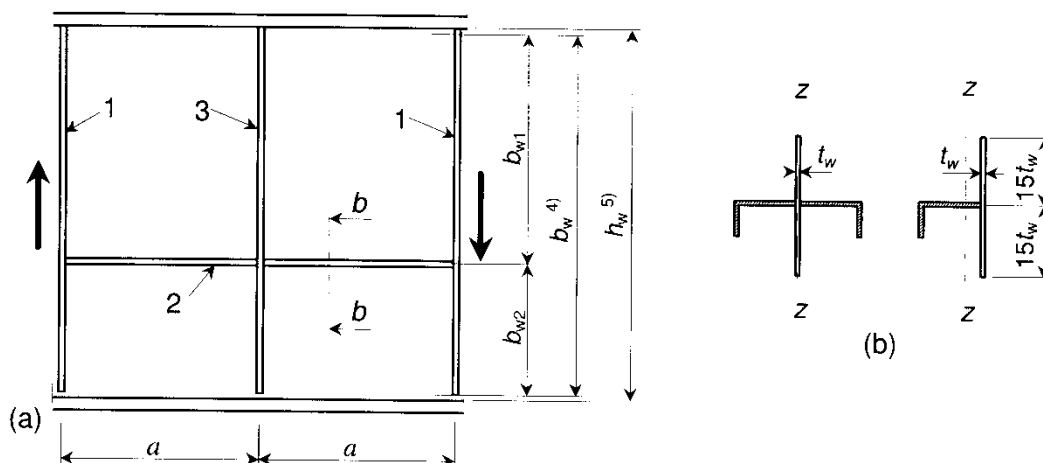
I_{st} — момент инерции продольного элемента жесткости относительно оси z (рисунок 34(b)). Для стенок, имеющих два или более одинаковых элементов жесткости, расположенных через неравные промежутки, I_{st} определяется как суммарный момент инерции отдельных элементов.

Выражение (149) также применимо к полкам, имеющим один или два продольных элемента жесткости, в случае, когда размер $a/b_w \geq 3$. Коэффициент сдвига (среза) для полок с одним или двумя продольными элементами жесткости и при $a/b_w < 3$ вычисляется по формуле:

$$k_{\tau} = 4,1 + \frac{6,3+0,18I_{st}/(t_w^3 b_w)}{a^2} + 2,2 \left(\frac{I_{st}}{t_w^3 b_w} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (150)$$

Для стенок, имеющих продольные элементы жесткости коэффициент относительной гибкости λ_w должен быть не менее:

$$\lambda_w = \frac{0,81}{\sqrt{k_{\tau 1}}} \frac{b_{w1}}{t_w} \sqrt{\frac{f_0}{E}} \quad (151)$$



1 — жесткий поперечный элемент; 2 — продольный элемент жесткости; 3 — нежесткий поперечный элемент; ⁴⁾ высота ребра жесткости; ⁵⁾ расстояние между полками

Рисунок 34[6.29]. Стенка с поперечными и продольными ребрами жесткости

где $k_{\tau 1}$ и b_w относятся к участку стенки балки, имеющей наибольший коэффициент гибкости λ_w из всех участков внутри рассматриваемой области. Для расчета коэффициента $k_{\tau 1}$ выражения (147) и (148) можно использовать при $k_{\tau st} = 0$.

7.12[6.7.4.2] Если несущая способность полки не используется полностью при действии изгибающего момента, т.е. $M_{ed} < M_{f,Rd}$, (кривая (1) на рисунке 36), то сопротивление сдвигу (срезу) $V_{f,Rd}$ полки балки может быть учтено следующим образом:

$$V_{f,Rd} = \frac{b_f t_f^2 f_{of}}{c \gamma_{M1}} \left[1 - \left(\frac{M_{Ed}}{M_{f,Rd}} \right)^2 \right] \quad (152)$$

где b_f и t_f определяются для полки, имеющей более низкую несущую способность;

b_f — имеет значение не более $15t_f$ на каждой стороне стенки;

Значение $M_{f,Rd}$ определяет расчетный момент сопротивления изгибу для рассматриваемого поперечного сечения только эффективных полки балки

$$c = a \left(0,08 + \frac{4,4 b_f t_f^2 f_{of}}{t_w b_w^2 f_{ow}} \right) \quad (153)$$

В случае приложения продольной нагрузки N_{Ed} величина $M_{f,Rd}$ должна быть уменьшена с помощью коэффициента:

$$\left[1 - \frac{N_{Ed}}{(A_{f1} + A_{f2}) f_{of} / \gamma_{M1}} \right] \quad (154)$$

где A_{f1} и A_{f2} определяют площади поперечного сечения верхней и нижней полки балки.

Если $M_{ed} \geq M_{f,Rd}$, то $V_{f,Rd} = 0$. Для определения дальнейшего взаимодействия, см. п. 7.18(6.7.6.1)-7.21(6.7.8.1).

7.13[6.7.5.1] Сопротивление стенки штампованных и сварных балок поперечным нагрузкам, приложенным к полке, определяется при условии, что поясные листы (полки) ограничены в боковом направлении либо их собственной жесткостью, либо дополнительным креплением.

Нагрузка может действовать следующим образом:

а) нагрузка, действующая на одну из полок, которой противодействуют поперечные силы в стенке (рисунок 35(a));

б) нагрузка, действующая на одну из полок, действие которой передается через ребро другой полке (рисунок 35(b));

в) нагрузка, действующая на одну из полок, близко к нежесткому концу (рисунок 35(c)).

Для балок коробчатого сечения с наклонными стенками, необходимо проверять сопротивление, как стенок, так и полок. Внутренние усилия, которые необходимо учитывать, представляют собой компоненты внешней нагрузки, действующей в плоскости стенки и полки, соответственно.

Несущая способность стенки при действии на полку поперечных сил проверяется по формуле:

$$F_{Ed}/F_{Rd} \leq 1, \quad (155)$$

где F_{Ed} — расчетная поперечная нагрузка;

F_{Rd} — расчетная несущая способность действию поперечных сил.

7.14 Согласно п. 6.7.5.2 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011 расчетная несущая способность гибких или жестких стенок локальному продольному изгибу при действии изгибающих нагрузок находится из выражения:

$$F_{rd} = L_{eff} t_w f_{ow} / \gamma_{Mb}, \quad (156)$$

где f_{ow} — характеристическое значение прочности материала стенки;

L_{eff} — эффективная длина зоны приложения изгибающих нагрузок, которая определяется как:

$$L_{eff} = \chi_F l_y, \quad (157)$$

где l_y — эффективная длина зоны приложения нагрузок, соответствующая длине жестких опор s_s ;

χ_F — коэффициент уменьшения, обусловленный локальным прогибом.

7.15 В соответствии с п.п. 6.7.5.3 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011 длина жесткой опоры на полке s_s соответствует расстоянию, на котором эффективно действует нагрузка, и определяется с учетом распределения усилий в твердом материале, в отношении 1:1 (см. рисунок 36). Однако s_s не должно иметь значение больше чем b_w .

В случае близкого расположения нескольких сосредоточенных нагрузок (s_s для отдельной нагрузки больше расстояния между точками приложения усилий), то несущая способность должна проверяться для каждой отдельной нагрузки, а так же для общего нагружения при использовании s_s как межцентрового расстояния между внешними усилиями.

7.16[6.7.5.4] Коэффициент уменьшения χ_F при определении несущей способности

определяется из выражения:

$$\chi_F = 0,5/\lambda_F \text{ — но не более } 1,0, \quad (158)$$

где:

$$\lambda_F = \sqrt{\frac{l_y t_w f_{0w}}{F_{cr}}} \quad (159)$$

$$F_{cr} = 0,9 k_F E t_w^3 / h_w \quad (160)$$

Для стенок, не имеющих продольных ребер жесткости, коэффициент k_F должен определяться с помощью рисунка 35.

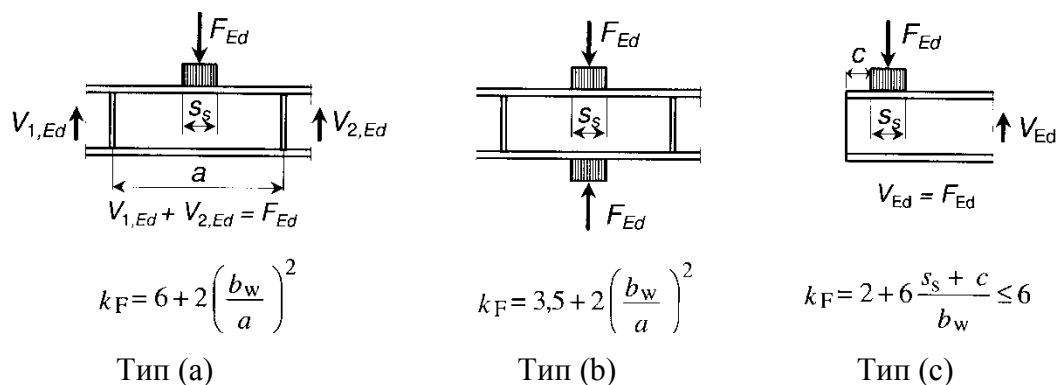


Рисунок 35[6.30]. Варианты (тип а, b, с) приложения нагрузки и коэффициенты прогиба

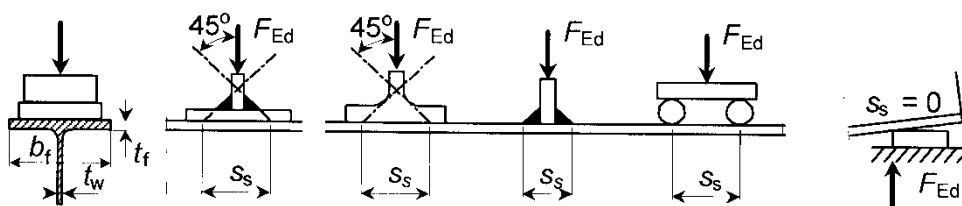


Рисунок 36[6.31]. Длина жесткой опоры

Для стенок, имеющих продольные ребра жесткости, k_F определяется как:

$$k_F = 6 + 2 \left(\frac{h_w}{a} \right)^2 + \left(\frac{5,44 b_1}{a} - 0,21 \right) \sqrt{\gamma_s} \quad (161)$$

где b_1 — высота нагруженной подпанели, определяемая, как расстояние между нагруженной полкой и продольным ребром жесткости;

$$\gamma_s = \frac{10,9 I_{sl}}{(h_w t_w^3)} \leq 13 \left(\frac{a}{h_w} \right)^3 + 210 \left(0,3 - \frac{b_1}{h_w} \right) \quad (162)$$

где I_{sl} - момент инерции (относительно оси z-z) ребра жесткости, наиболее близко

расположенного к нагруженной полке, включая прилегающие части стенки, согласно рисунку 34. Уравнение (162) применимо при $0,05 \leq b_f/h_w \leq 0,3$ и нагрузка приложена согласно варианту (а) на рисунке 35.

7.17[5.7.5.5] Эффективная длина приложения нагрузки l_y определяется с использованием двух безразмерных параметров m_1 и m_2 :

$$m_1 = \frac{f_{of} b_f}{f_{ow} t_w} \quad (163)$$

$$m_2 = 0,02 \left(\frac{h_w}{t_f} \right)^2, \text{ если } \lambda_F > 0,5, \text{ иначе } m_2 = 0 \quad (164)$$

где b_f — ширина полки (рисунок 36); для балок коробчатого сечения, значение b_f в выражении (163) ограничено $15t_f$ — на каждой стороне стенки.

Для случаев (а) и (б), представленных на рисунке 34, параметр l_y должен определяться, используя следующее выражение:

$$l_y = s_s + 2t_f(1 + \sqrt{m_1 + m_2}) \quad (165)$$

При этом l_y меньше расстояния между смежными поперечными стенками.

Для случая (с), представленного на рисунке 35, параметр l_y должен определяться как наименьший из значений, полученных из уравнений (165), (166) и (167). В случае, если конструкция, на которую действует нагрузка, не соответствует наклону балки, параметр s_s в выражении (165) принимает значение, равное нулю (рисунок 36):

$$l_y = l_e + t_f \sqrt{\frac{m_1}{2} + \left(\frac{l_e}{t_f} \right)^2 + m_2} \quad (166)$$

$$l_y = l_e + t_f \sqrt{m_1 + m_2} \quad (167)$$

$$l_e = \frac{k_F E t_w^2}{2 f_{ow} h_w} \leq s_s + c \quad (168)$$

7.18 Согласно п.п. 6.7.6.1 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011 для полок, воспринимающим расчетные значения изгибающего момента и продольной силы, действующих на элемент, несущая способность при сдвиге (срезе) для ребра жесткости при введении поправки для изгибающего момента и продольной нагрузки, принимается без снижения ее величины, кроме случаев, указанных в п. 7.10(6.7.4.2).

При $M_{ed} > M_{f,Rd}$ должны быть выполнены следующие два условия (соответствующие кривым (2) и (3) на рисунке 37):

$$\frac{M_{Ed} + M_{f,Rd}}{2M_{pl,Rd}} + \frac{V_{Ed}}{V_{w,Rd}} \left(1 - \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}} \right) \leq 1 \quad (169)$$

$$M_{Ed} \leq M_{c,Rd} \quad (170)$$

где $M_{c,Rd}$ — расчетное значение несущей способности для изгибающего момента, в

соответствии с выражением (136);

$M_{f,Rd}$ — расчетная несущая способность только для изгибающего момента в полках, в соответствии с выражением (136);

$M_{pl,Rd}$ — расчетная несущая способность для изгибающего момента при пластической деформации.

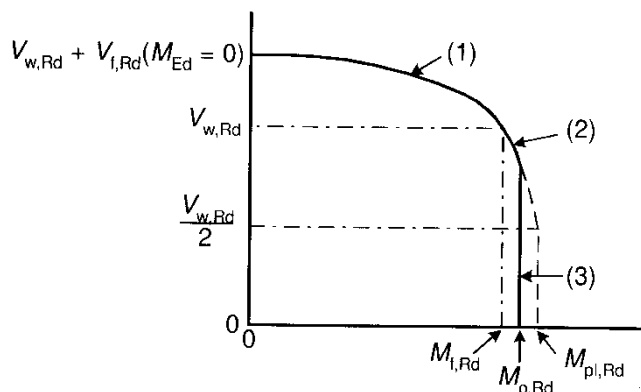


Рисунок 37[6.32]. Взаимовлияние несущей способности при действии поперечной силы и изгибающего момента

В случае приложения продольной нагрузки N_{Ed} значение изгибающего момента $M_{pl,Rd}$ должно быть заменено уменьшенным значением несущей способности для изгибающего момента при пластической деформации $M_{N,Rd}$, определяемым из выражения:

$$M_{N,Rd} = M_{pl,Rd} \left[1 - \left[\frac{N_{Ed}}{(A_{f1} + A_{f2})f_0/\gamma_{M1}} \right]^2 \right] \quad (171)$$

где A_{f1} и A_{f2} — площади поясных листов (полок).

7.19 В соответствии с п.п. 6.7.6.2 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011 при действии на балку сосредоточенной нагрузки, приложенной к сжатой полке, совместно с изгибающим моментом и продольным усилием, несущая способность должна проверяться, используя данные п.п. 5.9.1(6.2.9) и 7.13(6.7.5.1):

$$\frac{F_{Ed}}{F_{Rd}} + 0,8 \left(\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} + \frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} \right) \leq 1,4 \quad (172)$$

где $M_{c,Rd}$ — расчетная несущая способность при действии изгибающего момента, согласно выражению (136);

$N_{c,Rd}$ — расчетная несущая способность при действии продольной нагрузки (п. 5.11.2(6.3.1.1)).

Если сосредоточенная сила действует на растянутую полку, то необходимо проверить прочность сечения, рассчитанную согласно п.п. 7.13-7.17(6.7.5) с учетом п. 5.2.1(6.2.1).

7.20 Согласно п.п. 6.7.6.2 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011 для предотвращения возможности изгиба в плоскости стенки от сжатой полки, отношение b_w/t_w для ребра

должно удовлетворять следующему выражению

$$\frac{b_w}{t_w} \leq \frac{kE}{f_{of}} \sqrt{\frac{A_w}{A_{fc}}} \quad (173)$$

где A_w — площадь поперечного сечения стенки;

A_{fc} — площадь поперечного сечения сжатой полки.

[6.7.6.2] Величина коэффициента k должна определяться следующим образом:

- пластический поворот $k = 0,3$;
- пластический момент сопротивления $k = 0,4$;
- пластический момент сопротивления $k = 0,55$.

В случае искривления балка по высоте, со сжатой полкой на вогнутой передней плоскости, то отношение b_w/t_w для стенки должно удовлетворять следующему условию:

$$\frac{b_w}{t_w} \leq \frac{kE}{f_{of}} \sqrt{\frac{A_w}{A_{fc}}} \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{b_w E}{3 r f_{of}}}} \quad (174)$$

где r — радиус кривизны сжатой полки.

В случае усиления балки поперечными ребрами жесткости предельное значение b_w/f_w может быть увеличено при помощи коэффициента $1 + (b_w/a)^2$.

7.21 В соответствии с п.п. 6.7.8.1 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011 опорным элементом усиления, поглощающим реакцию опор балки, является жесткая торцевая стойка (рисунок 32), которая должна работать как и короткая балка, воспринимающая продольные мембранные напряжения, действующие в плоскости стенки.

Жесткая торцевая стойка состоит из элемента жесткости, установленного в торце балки, и из двустороннего поперечного элемента жесткости, которые вместе усиливают полки короткой балки, длиной h_f (рисунок 32(b)). Для усиления стенки короткой балки между элементами жесткости располагают перемычку. С противоположной стороны, торцевая стойка может иметь форму вставленной секции, связанной с торцом балки.

Причем двусторонний поперечный элемент жесткости представляет собой элемент жесткости опоры, поглощающий реакцию, возникающую в основании балки.

Ребро жесткости, установленное в торце балки должно иметь площадь поперечного сечения, по крайней мере, равную $4h_f t_w^2/e$, где e — межцентровое расстояние между элементами жесткости, и $e > 0,1h_f$ (рисунок 32(b)).

В случае, если торцевая стойка является единственным элементом усиления против кручения на конце балки, то момент инерции сечения торцевой стойки относительно центральной оси полки (I_{cp}) должен удовлетворять условию:

$$I_{cp} \geq b_w^3 t_f R_{Ed} / (250 W_{Ed}) \quad (175)$$

где t_f — максимальное значение толщины полки вдоль балки;

R_{Ed} — реакция в торце балки при расчетной нагрузке;

W_{Ed} — полная расчетная нагрузка в соседнем пролете.

7.22 Согласно п.п. 6.7.8.2 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011 усилителем опоры, воспринимающим реакции в опоре балки, может быть нежесткая торцевая стойка в виде двустороннего элемента жесткости, как показано на рисунке 32(c).

В случае болтового соединения сопротивление поперечной силе (рисунок 32(c)) бу-

дет подобным соответствующему значению для балки с нежесткой торцевой стойкой, при условии, что расстояние между болтами $p < 40t_w$.

7.23 В соответствии с п.п. 6.7.8.3 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011 при использовании промежуточных элементов жесткости, действующих как жесткие опоры для внутренних панелей стенки, они должны проверяться на действие нагрузки и на жесткость.

Жесткость других промежуточных поперечных элементов жесткости, рассматриваемых как гибкие, учитывается при определении k_τ в п.7.10(6.7.4.2).

Промежуточные поперечные элементы жесткости, работающие как жесткие опоры для панелей стенки, должны иметь минимальный момент инерции I_{st} :

$$\text{если } a/h_w < \sqrt{2} \text{ то } I_{st} \geq 1.5h^3 t_w^3 / a^2 \quad (176)$$

$$\text{если } a/h_w \leq \sqrt{2} \text{ то } I_{st} \geq 0.75h_w t_w^3 \quad (177)$$

Проверка несущей способности данных промежуточных элементов жесткости производится при действии продольной нагрузки, равной $V_{Ed} - p_v b_w t_w f_v / \gamma_{M1}$, где p_v вычисляется для панели стенки, расположенной между смежными поперечными элементами жесткости, предполагая, что рассматриваемый элемент жесткости удален. В случае переменных поперечных сил проверка выполняется для поперечной силы, действующей на расстоянии $0.5h_w$ от края панели с наибольшей поперечной силой.

7.24 Согласно п.п. 6.7.8.4 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011 независимо от того, что продольные элементы могут быть либо жесткими, либо гибкими необходимо учитывать их жесткость при определении относительной гибкости λ_w , согласно п. 7.10(6.7.4.2).

Элемент жесткости можно рассматривать как жесткий, если значение λ_w зависит от подпанели.

При определении несущей способности с учетом элементов жесткости необходимо произвести проверку на нормальные напряжения.

7.25 В соответствии с п.п. 6.7.8.5 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011 стенка с приваренной полкой может рассчитываться на номинальный сдвиг V_{Ed}/h_w , если значение V_{Ed} не превышает $\rho_v t_w h_w \frac{f_0}{\gamma_{M1} \sqrt{3}}$. При более высоких значениях сварные швы между полками и стенками должны рассчитываться на сдвиг $\eta t_w f_0 / \gamma_{M1} \sqrt{3}$ при если напряженное состояние не исследовано более подробно.

7.26[6.8.1] Соппротивление балок с трапецидальными гофрированными стенками (рис. 36) изгибающему моменту может определяться из выражения:

$$M_{Rd} = \min \left\{ \begin{array}{l} b_2 t_2 h_f f_{o,r} / \gamma_{M1} \\ b_1 t_1 h_f f_{o,r} / \gamma_{M1} \\ b_1 t_1 h_f \chi_{LT} f_{o,r} / \gamma_{M1} \end{array} \right\} \quad \begin{array}{l} \text{растянутая полка} \\ \text{сжатая полка;} \\ \text{сжатая полка.} \end{array} \quad (178)$$

где $f_{0,r} = \rho_z f_0$ имеет заниженное значение, обусловленное действием поперечных моментов на полках;

$$\rho_z = 1 - 0,4 \sqrt{\frac{\sigma_x(M_z)}{f_0/\gamma_{M1}}} \quad (179)$$

M_z — поперечный изгибающий момент, действующий на полке; может быть обусловлен введением сдвигового потока на полках, как указано на рисунке 38(d).

χ_{LT} — коэффициент уменьшения для бокового изгибающего момента, согласно п.п. 5.11.7-5.11.10.

7.27(6.8.2) Соппротивление поперечной силе V_{rd} может быть определено как

$$V_{Rd} = \rho_c t_w h_w \frac{f_0}{\gamma_{M1} \sqrt{3}} \quad (180)$$

где ρ_c — наименьший из коэффициентов уменьшения локального изгиба $\rho_{c,1}$; коэффициента уменьшения для глобального изгиба $\rho_{c,g}$ и коэффициента $\rho_{0,haz}$, учитывающего наличие зоны HAZ.

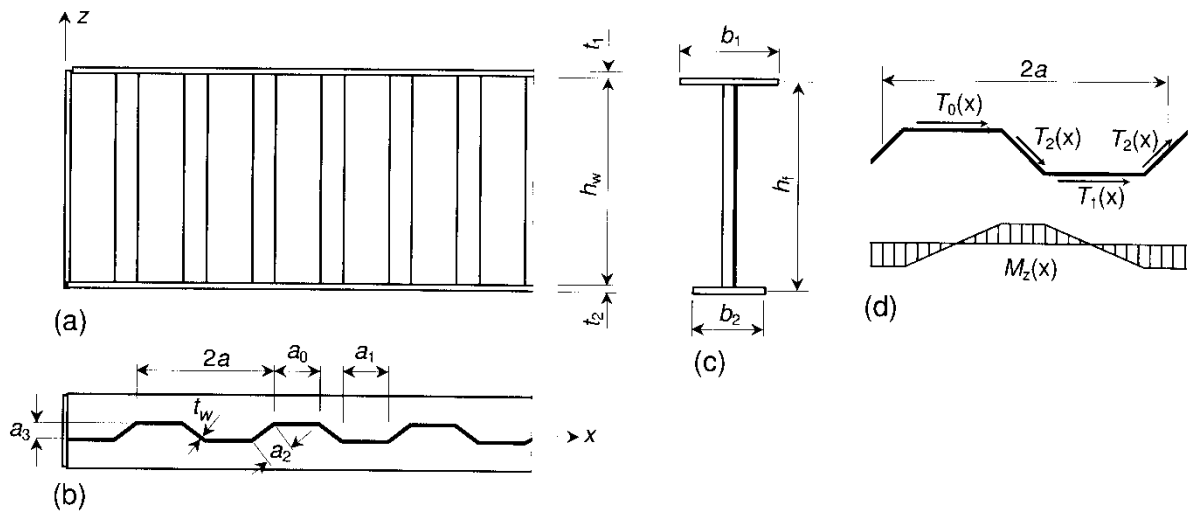


Рисунок 38[6.33]. Гофрированная стенка балки

Коэффициент уменьшения $\rho_{c,1}$ для локального прогиба может быть определен из выражения:

$$\rho_{c,1} = \frac{1,15}{0,9 + \lambda_{c,1}} \leq 1,0 \quad (181)$$

где относительная гибкость $\lambda_{c,1}$ для трапецидальных гофрированных стенок может определяться как:

$$\lambda_{c,1} = 0,35 \frac{a_{\max}}{t_w} \sqrt{\frac{f_0}{E}} \quad (182)$$

при a_{\max} равному наибольшей ширине гофрированных панелей стенки балки, a_0 , a_1

или a_2 (рисунок 38).

Коэффициент уменьшения, $\rho_{c,g}$, для глобального изгиба должен определяться из выражения:

$$\rho_{c,g} = \frac{1,5}{0,5 + \lambda_{c,g}^2} \leq 1,0 \quad (183)$$

где относительная гибкость $\lambda_{c,g}$ может определяться как:

$$\lambda_{c,g} = \sqrt{\frac{f_0}{\sqrt{3}\tau_{cr,g}}} \quad (184)$$

где значение $\tau_{cr,g}$ может определяться как:

$$\tau_{cr,g} = \frac{32,4}{t_w h_w^2} \sqrt[4]{B_x B_z^3} \quad (185)$$

где:

$$B_x = \frac{2a}{a_0 + a_1 + 2a_2} \frac{Et_w^3}{10,9}$$

$$B_z = \frac{EI_x}{2a}$$

$2a$ — длина гофрировки (рисунок 38);

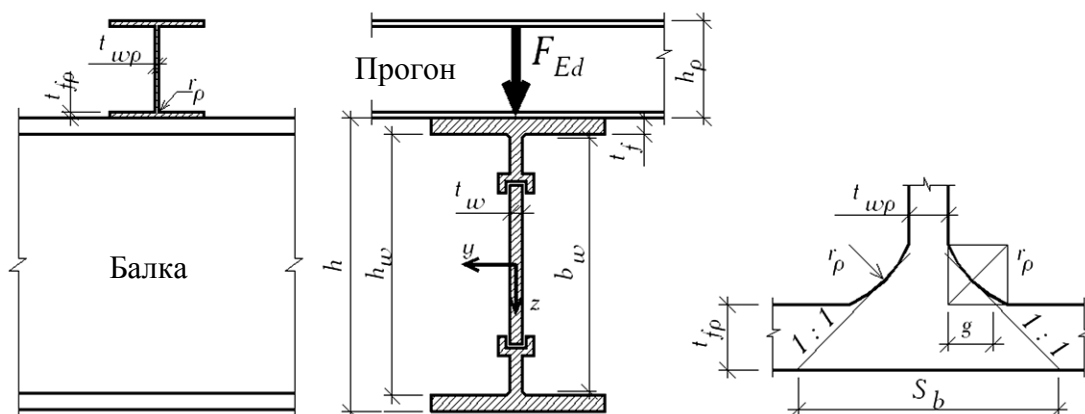
a_0 , a_1 и a_2 — ширина изогнутых панелей стенки (рисунок 38);

I_x — момент инерции одной гофрировки длиной $2a$ (рисунок 38).

Коэффициент уменьшения $\rho_{0,haz}$ для зоны HAZ представлен в п.п.5.1.12-5.1.19(6.1.6).

ПРИМЕР 19 Дано: Сварная балка двутаврового сечения длиной $L = 10$ м. Высота балки $h = 570$ мм, ширина полки $b_f = 160$ мм, толщина полки $t_f = 16$ мм, толщина стенки $t_w = 5$ мм, радиус закругления $r = 4$ мм. На верхней полке балки уложены прогоны двутаврового сечения с шагом 1.2 м. Высота прогона $h_p = 180$ мм, ширина полки $b_p = 120$ мм, толщина полки $t_{fp} = 12$ мм, толщина стенки $t_{wp} = 5$ мм, радиус закругления $r = 5$ мм. Материал балки — алюминиевый сплав EN AW-6082 T6 EP/O; $t > 5$ мм, $f_0 = 260$ Н/мм², $f_u = 310$ Н/мм² (таб. 6), $E = 70000$ Н/мм², $\gamma_{M1} = 1.1$ (таб.10).

Требуется определить несущую способность балки и прогона при действии сосредоточенной нагрузки.



Несущая способность балки при действии сосредоточенной нагрузки:

$b_f = b$; $f_{0f} = f_0$; $f_{0w} = f_0$; $h_w = h - 2 t_f = 570 - 2 \times 16 = 538$ мм; $a = L$.

Длина жесткой опоры (рисунок 6): $g = (r\sqrt{2} - r)\sqrt{2} = 2.9$ мм; $s_s = t_{wp} + 2g + 2t_{fp} = 34.9$ мм.

Параметр m_1 по выражению (163): $m_1 = \frac{f_{of}b_f}{f_{ow}t_w} = 32$.

Коэффициент прогиба: $k_F = 6 + 2\left(\frac{h_w}{a}\right)^2 = 6.01$ (161).

Параметр m_2 по выражению (164): $m_2 = 0.02\left(\frac{h_w}{t_f}\right)^2 = 22.6$.

Эффективная длина нагружения по выражению (165): $l_y = s_s + 2t_f(1 + \sqrt{m_1 + m_2}) = 303.3$ мм.

Несущая способность балки по выражению (156): $\chi_F = 0.5/\bar{\lambda}_F$, но не более 1.0;
 $\bar{\lambda}_F = \sqrt{\frac{l_y t_w f_{ow}}{F_{cr}}}$; $F_{cr} = 0.9k_F E t_w^3 / h_w = 87971.65$ Н; $\bar{\lambda}_F = 2.12$; $\chi_F = 0.236$; $F_{Rd} = \chi_F l_y t_w f_{ow} / \gamma_{M1} = 84.6$ кН.

Изгиб, обусловленный сжатой полкой (п.7.20(6.7.7)):

Используя пластический момент сопротивления, принимаем $k = 0.55$; $h_w/t_w = 107.6 <$
 $\frac{kE}{f_{of}} \sqrt{\frac{A_w}{A_{fc}}} = \frac{kE}{f_{of}} \sqrt{\frac{h_w t_w}{b t_f}} = 151.8$.

Несущая способность прогона при действии сосредоточенной нагрузки:

$b_f = b_p$; $f_{of} = f_0$; $f_{ow} = f_0$; $h_{wp} = h_p - 2t_{fp} = 180 - 2 \times 12 = 156$ мм; $a_p = L$.

Длина жесткой опоры: $g = (r\sqrt{2} - r)\sqrt{2} = 2.3$ мм; $s_s = t_w + 2g + 2t_f = 41.7$ мм.

Параметр m_1 по выражению (163): $m_1 = \frac{f_{of}b_f}{f_{ow}t_w} = 2.4$.

Коэффициент прогиба: $k_F = 6 + 2\left(\frac{h_{wp}}{a_p}\right)^2 = 6$ (161).

Параметр m_2 по выражению (164)[1]: $m_2 = 0.02\left(\frac{h_{wp}}{t_{fp}}\right)^2 = 3.4$.

Эффективная длина нагружения по выражению (165): $l_y = s_s + 2t_{fp}(1 + \sqrt{m_1 + m_2}) = 123.4$ мм.

Несущая способность прогона по выражению (156): $\chi_F = 0.5/\bar{\lambda}_F$, но не более 1.0;
 $\bar{\lambda}_F = \sqrt{\frac{l_y t_{wp} f_{ow}}{F_{cr}}}$; $F_{cr} = 0.9k_F E t_{wp}^3 / h_{wp} = 302885$ Н; $\bar{\lambda}_F = 0.728$; $\chi_F = 0.687$; $F_{Rd} = \chi_F l_y t_{wp} f_{ow} / \gamma_{M1} = 100.2$ кН.

ПРИМЕР 20 Дано: Двутаговая балка без промежуточных ребер жесткости: высота стенки $h_w = 2000$ мм, полная длина панели стенки $l_w = a = 4000$ мм; толщина стенки $t_w = 15$ мм; $f_{ow} = 355$ Н/мм²; $f_{uw} = 470$ Н/мм²; $E = 70000$ Н/мм²; $\gamma_{M1} = 1.1$; $\gamma_{M2} = 1.25$ (таб.10).

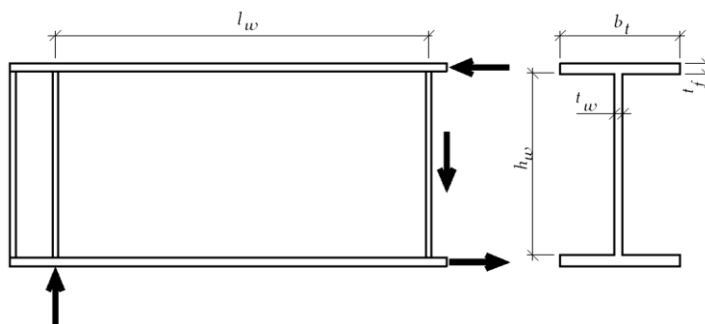
По таблице 25: $\eta = 0.7 + 0.35(f_{uw}/f_{ow}) = 1.163 < 1.2$.

Требуется определить несущую способность стенки на сдвиг (срез).

$a/h_w = 4000/2000 = 2 > 1.0$; $k_\tau = 5.34 + 4.00(h_w/a)^2 = 6.34$ (147); $\lambda_w = \frac{0.81}{\sqrt{k_\tau}} \frac{b_w}{t_w} \sqrt{\frac{f_{ow}}{E}} = 3.055$ (151); т.к. $\lambda_w > 0.937 \rho_v = 2.3/(1.66 + \lambda_w) = 0.488$, или $\rho_v = 0.83/\lambda_w = 0.272$, принимаем $\rho_v = 0.488$.

Несущая способность стенки балки на сдвиг (срез):

$$V_{w,Rd} = \rho_v t_w h_w f_0 / \sqrt{3} \gamma_{M1} = 0.488 \times 15 \times 2000 \times 355 / (1.732 \times 1.1) = 2.727 \times 10^3 \text{ кН (145).}$$

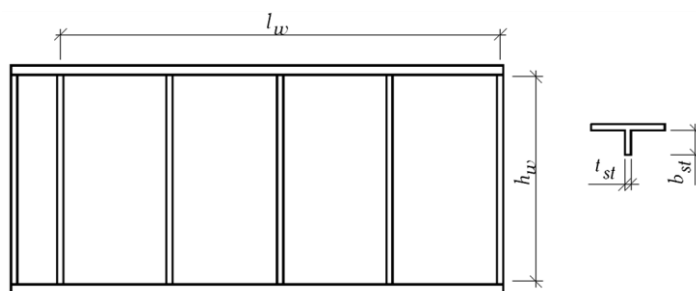


ПРИМЕР 21 Дано: Двутавровая балка с равномерно расположенными нежесткими поперечными ребрами жесткости: высота стенки $h_w = 2000$ мм, полная длина панели стенки $l_w = 4000$ мм; толщина стенки $t_w = 15$ мм; $f_{0w} = 355$ Н/мм²; $f_{uw} = 470$ Н/мм²; $E = 70000$ Н/мм²; $\gamma_{M1} = 1.1$; $\gamma_{M2} = 1.25$ (таб.10).

По таблице 25: $\eta = 0.7 + 0.35(f_{uw}/f_{0w}) = 1.163 < 1.2$.

Количество ребер $n_{st} = 3$; толщина ребра $t_{st} = 15$ мм; ширина ребра $b_{st} = 120$ мм; $b_{st}/t_{st} = 8$.

Требуется определить несущую способность стенки на сдвиг (срез).



Полная панель стенки. Продольный изгиб ребра жесткости.

Площадь сечения: $A_{st} = t_{st} b_{st} + 30 t_w^2 = 8.55 \times 10^3 \text{ мм}^2$.

Центр тяжести: $e_{st} = t_{st} b_{st}^2 / (2 A_{st}) = 12.632 \text{ мм}$.

Момент инерции: $I_{st} = t_{st} b_{st}^3 / 3 - A_{st} e_{st}^2 = 7.276 \times 10^6 \text{ мм}^4$.

Длина панели: $a = l_w = 4000 \text{ мм}$.

$$k_{\tau, st} = 9 \left(\frac{h_w}{a} \right)^2 \left(\frac{I_{st}}{t_w^3 h_w} \right)^{3/4} = 2.38; k_{\tau, stmin} = \frac{2.1}{t_w} \left(\frac{I_{st}}{h_w} \right)^{1/3} = 2.153; \text{принимаем } k_{\tau, st} = 2.38 \text{ (149).}$$

$$a/h_w = 4000/2000 = 2 > 1.0; k_{\tau} = 5.34 + 4.00(h_w/a)^2 + k_{\tau, st} = 8.72 \text{ (147); } \lambda_w = \frac{0.81}{\sqrt{k_{\tau}}} \frac{b_w}{t_w} \sqrt{\frac{f_{0w}}{E}} = 2.605 \text{ (151); } \lambda_{w, tot} = \lambda_w = 2.605.$$

Подпанель.

$$\text{Длина : } a = l_w / (n_{st} + 1) = 1000 \text{ мм; } a/h_w = 0.5 < 1.0; k_{\tau} = 4.00 + 5.34(h_w/a)^2 = 25.36 \text{ (148); } \lambda_w = \frac{0.81}{\sqrt{k_{\tau}}} \frac{b_w}{t_w} \sqrt{\frac{f_0}{E}} = 1.527 \text{ (151); } \lambda_{w, sub} = \lambda_w = 1.527; \text{Т.к. } \lambda_{w, tot} > \lambda_{w, sub}, \text{ то ребра жесткости относятся к нежестким.}$$

Т.к. $\lambda_w > 0.937$ $\rho_v = 2.3/(1.66 + \lambda_w) = 0.722$, или $\rho_v = 0.83/\lambda_w = 0.544$, принимаем $\rho_v = 0.722$.

Несущая способность стенки балки на сдвиг (срез):

$$V_{w,Rd} = \rho_v t_w h_w f_0 / \sqrt{3} \gamma_{M1} = 0.722 \times 15 \times 2000 \times 355 / (1.732 \times 1.1) = 4.036 \times 10^3 \text{ кН (145).}$$

ПРИМЕР 22 Дано: Двутавровая балка с равномерно расположенными жесткими поперечными ребрами жесткости: высота стенки $h_w = 2000$ мм, полная длина панели стенки $l_w = 4000$ мм; толщина стенки $t_w = 15$ мм; $f_{0w} = 355$ Н/мм²; $f_{uw} = 470$ Н/мм²; $E = 70000$ Н/мм²; $\gamma_{M1} = 1.1$; $\gamma_{M2} = 1.25$ (таб.10).

По таблице 25: $\eta = 0.7 + 0.35(f_{uw}/f_{0w}) = 1.163 < 1.2$.

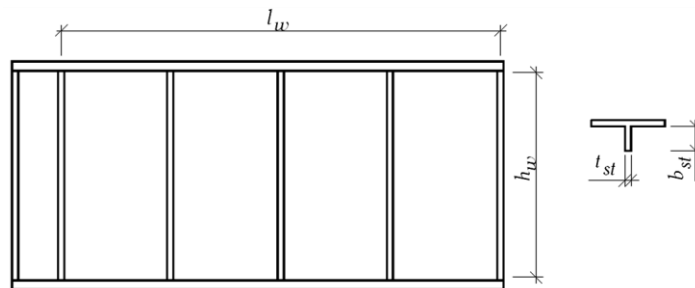
Количество ребер $n_{st} = 3$; толщина ребра $t_{st} = 18$ мм; ширина ребра $b_{st} = 220$ мм; $b_{st}/t_{st} = 12.22$.

Требуется определить несущую способность стенки на сдвиг (срез).

Длина панели: $a = l_w / (n_{st} + 1) = 1000$ мм.

При $a/h_w = 0.5 < 1.0$ $k_\tau = 4.00 + 5.34(h_w/a)^2 = 25.36$ (148); $\lambda_w = \frac{0.81}{\sqrt{k_\tau}} \frac{b_w}{t_w} \sqrt{\frac{f_{0w}}{E}} = 1.527$ (151);

Т.к. $\lambda_w > 0.937$ $\rho_v = 2.3/(1.66 + \lambda_w) = 0.722$, или $\rho_v = 0.83/\lambda_w = 0.544$, принимаем $\rho_v = 0.722$ (таблица 25).



Несущая способность стенки балки на сдвиг (срез):

$$V_{w,Rd} = \rho_v t_w h_w f_0 / \sqrt{3} \gamma_{M1} = 0.722 \times 15 \times 2000 \times 355 / (1.732 \times 1.1) = 4.036 \times 10^3 \text{ кН (145).}$$

ПРИМЕР 23 Дано: Двутавровая балка с равномерно расположенными жесткими поперечными и продольными ребрами жесткости: высота стенки $h_w = 2000$ мм, полная длина панели стенки $l_w = 4000$ мм; толщина стенки $t_w = 15$ мм; $f_{0w} = 355$ Н/мм²; $f_{uw} = 470$ Н/мм²; $E = 70000$ Н/мм²; $\gamma_{M1} = 1.1$; $\gamma_{M2} = 1.25$ (таб.10).

По таблице 25: $\eta = 0.7 + 0.35(f_{uw}/f_{0w}) = 1.163 < 1.2$.

Количество жестких поперечных ребер $n_{st} = 3$; количество продольных ребер $n_{sl} = 2$; толщина продольного ребра $t_{sl} = 15$ мм; ширина продольного ребра $b_{sl} = 120$ мм; $b_{sl}/t_{sl} = 8$.

Требуется определить несущую способность стенки на сдвиг (срез).

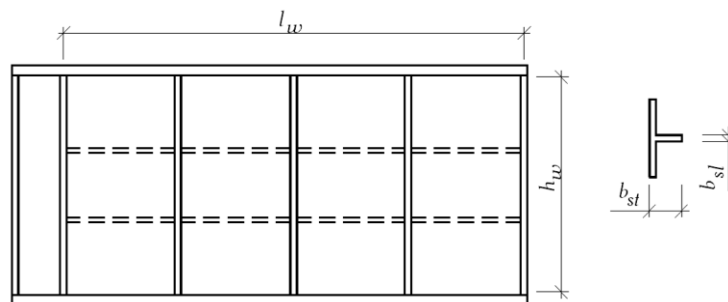
Продольный изгиб продольного ребра жесткости.

$$\text{Площадь сечения: } A_{sl} = t_{sl} b_{sl} + 40 t_w^2 = 1.08 \times 10^4 \text{ мм}^2.$$

$$\text{Центр тяжести: } e_{sl} = t_{sl} b_{sl}^2 / (2 A_{sl}) = 10 \text{ мм.}$$

$$\text{Момент инерции: } I_{sl} = t_{sl} b_{sl}^3 / 3 - A_{sl} e_{sl}^2 = 7.56 \times 10^6 \text{ мм}^4.$$

$$\text{Длина панели: } a = l_w / (n_{st} + 1) = 1000 \text{ мм.}$$



$$k_{\tau, \text{st}} = 9 \left(\frac{h_w}{a} \right)^2 \left(\frac{I_{sl} n_{sl}}{t_w^3 h_w} \right)^{3/4} = 65.916; k_{\tau, \text{stmin}} = \frac{2.1}{t_w} \left(\frac{I_{sl} n_{sl}}{h_w} \right)^{1/3} = 2.748; \text{принимаем } k_{\tau, \text{st}} = 65.916 \quad (149).$$

$$a/h_w = 4000/2000 = 2 > 1.0; k_{\tau} = 5.34 + 4.00(h_w/a)^2 + k_{\tau, \text{st}} = 87.256 \quad (147); \lambda_w = \frac{0.81}{\sqrt{k_{\tau}}} \frac{b_w}{t_w} \sqrt{\frac{f_0}{E}} = 0.823 \quad (151); \lambda_{w, \text{tot}} = \lambda_w = 0.823.$$

Подпанель.

Высота : $h_1 = h_w/3 = 1000$ мм; $a/h_w = 0.5 < 1.0$; $k_{\tau} = 4.00 + 5.34(h_1/a)^2 = 6.373 \quad (148)$; $\lambda_w = \frac{0.81}{\sqrt{k_{\tau}}} \frac{h_1}{t_w} \sqrt{\frac{f_{0w}}{E}} = 1.016 \quad (151)$; $\lambda_{w, \text{sub}} = \lambda_w = 1.016$; т.к. $\lambda_{w, \text{tot}} < \lambda_{w, \text{sub}}$, то ребра жесткости относятся к жестким.

Т.к. $\lambda_w > 0.937$ $\rho_v = 2.3/(1.66 + \lambda_w) = 0.859$, или $\rho_v = 0.83/\lambda_w = 0.817$, принимаем $\rho_v = 0.859$.

Несущая способность стенки балки на сдвиг (срез):

$$V_{w, \text{Rd}} = \rho_v t_w h_w f_0 / \sqrt{3} \gamma_{M1} = 0.859 \times 15 \times 2000 \times 355 / (1.732 \times 1.1) = 4.802 \times 10^3 \text{ кН} \quad (145).$$

ПРИМЕР 24 Дано: В сечении двутавровой сварной балки длиной $L = 6.0$ м действует изгибающий момент $M_{\text{Ed}} = 86.4$ кНм. Высота балки $h = 300$ мм, ширина полки $b_f = 120$ мм, толщина полки $t_f = 12$ мм, толщина стенки $t_w = 4$ мм, радиус закруглений $r = 3$ мм; ширина стенки $b_w = h - 2 t_f - 2r = 300 - 2 \times 12 - 2 \times 3 = 270$ мм; ширина части стенки, примыкающей к полке $b_{w1} = (h - 2 t_f)/2 = (300 - 2 \times 12)/2 = 138$ мм. Материал балки – алюминиевый сплав EN AW-6082 T6 EP/O; $t > 5$ мм; $f_0 = 260$ Н/мм²; $f_u = 310$ Н/мм²; $\rho_{0, \text{haz}} = 0.48$; $\rho_{u, \text{haz}} = 0.6$ (таб. 6); $\gamma_{M1} = 1.1$; $\gamma_{M2} = 1.25$ (таб.10).

Требуется проверить несущую способность поперечного сечения балки.

Классификация элементов (п.5.4(6.1.4.4)).

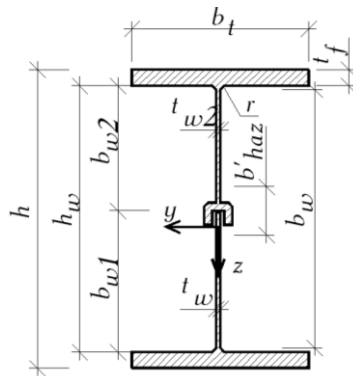
а) стенка балки:

- если полки относятся к классу, ниже 4 и поперечное сечение симметрично, нет необходимости производить итерацию при определении положения нейтральной оси при вычислении значения ψ ;

- если продольная сварка расположена близко к нейтральной оси, стенка классифицируется как несварная. Тем не менее, по всей длине она рассматривается как сварная;

$$\text{При } \psi = -1 \beta_w = 0.4 b_w / t_w = 27; \varepsilon = \sqrt{\frac{250}{f_0}} = 0.981; \beta_{1w} = 9\varepsilon = 8.825; \beta_{2w} = 13\varepsilon = 12.748; \beta_{3w} = 18\varepsilon = 17.65; \text{т.к. } \beta_w > \beta_{1w}, \beta_w > \beta_{2w}, \beta_w > \beta_{3w}, \text{ класс стенки принимаем 4.}$$

Определяем коэффициент локального продольного изгиба ρ_c по выражению (27), принимая $C_1 = 29$ и $C_2 = 198$ (таб. 14):



$$\rho_{\text{cw}} = C_1/(\beta_{\text{w}}/\varepsilon) - C_2/(\beta_{\text{w}}/\varepsilon)^2 = 0.792, \text{ принимаем } \rho_{\text{cw}} = 0.792, \text{ т.к. } \beta_{\text{w}} > \beta_{3\text{w}}.$$

Эффективная толщина стенки: $t_{w,eff,b} = \rho_{cw} t = 3.2$ мм.

б) термоупрочненной несварной полки балки: при $\psi = 1$ и $\eta = 1$ $\beta_f = \eta(b_f - t_w - 2r)/2t_f$
 $= 4.583$; $\varepsilon = \sqrt{\frac{250}{f_0}} = 0.981$; $\beta_{1f} = 3\varepsilon = 2.942$; $\beta_{2f} = 4.5\varepsilon = 4.413$; $\beta_{3f} = 6\varepsilon = 5.883$; т.к. $\beta_f > \beta_{1f}$, β_f
 $> \beta_{2f}$, $\beta_f < \beta_{3f}$, класс стенки принимаем 3.

Определяем коэффициент локального продольного изгиба ρ_c по выражению (27), принимая $C_1 = 10$ и $C_2 = 24$ (таб. 14):

$$\rho_{\text{cf}} = C_1/(\beta_{\text{f}}/\varepsilon) - C_2/(\beta_{\text{f}}/\varepsilon)^2 = 1.$$

Эффективная толщина стенки: $t_{f,ef,b} = \rho_{cf} t_f = 1 \times 12 = 12$ мм.

Для полного поперечного сечения принимаем класс 4.

Учет зоны HAZ (MIG-сварка).

Эффективная толщина полки: $t_{f.haz} = \rho_{0.haz} t_f = 0.48 \times 12 = 5.76 \text{ мм};$

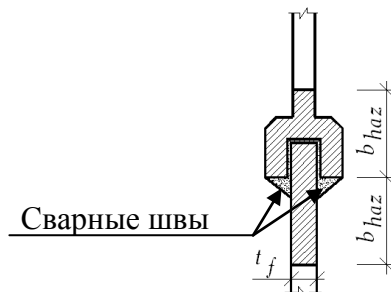
$$t_{f,ef} = t_{f,haz} = 5.76 \text{ mm.}$$

Эффективная толщина стенки: $t_{w.haz} = \rho_{0.haz} t_f = 0.48 \times 4 = 1.92 \text{ мм};$

$$t_{w,ef} = t_{w,haz} = t_{f,ef} = 1.92 \text{ mm.}$$

Т.к. $t < 6$ мм, принимаем ширину зоны HAZ $b_{\text{haz}} = 20$ мм, $b'_{\text{haz}} = 2 \times 20 = 40$ мм (п.5.15 (6.1.6.3)).

Определяем упругий момент сопротивления полного поперечного сечения балки: $A_g = 2bt_f + (h - 2t_f)t_w = 3.984 \times 10^3 \text{ мм}^2$; $I_g = \frac{1}{12}[bh^3 - (b - t_w)(h - 2t_f)^3] = 6.676 \times 10^7 \text{ мм}^4$; $W_{el} = \frac{2I_g}{h} = 4.451 \times 10^5 \text{ мм}^3$.



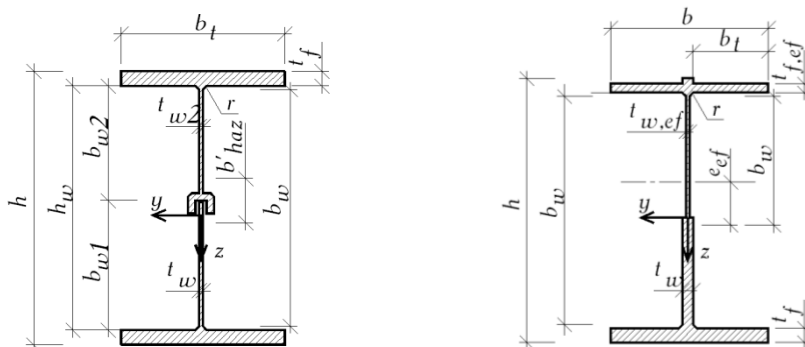
Прочность сечения при изгибе. Т.к. сварка выполнена вблизи центральной оси, можно не учитывать влияние зоны HAZ. Поэтому $W_{el,haz} = W_{el} = 4.451 \times 10^5 \text{ мм}^3$; $t_{f,ef} = 12 \text{ мм}$; $b_c = b_w/2 = 135 \text{ мм}$; $t_{w,eff,b} = 3.2 \text{ мм}$; $b_f = (b - t_w - 2r) = 55 \text{ мм}$.

Площадь поперечного сечения с учетом зоны HAZ: $A_{\text{eff.haz}} = A_g - b_f(t_f - t_{f,\text{ef}}) - b_c(t_w - t_{w,\text{ef},b}) = 3.872 \times 10^3 \text{ мм}^2$.

Смещение центра тяжести сечения: $e_{\text{ef}} = \left[b_f(t_f - t_{f,\text{ef}}) \left(\frac{h}{2} - \frac{t_f}{2} \right) + b_c^2(t_w - t_{w,\text{ef},b}) \right] \frac{1}{A_{\text{eff.haz}}} = 1.958 \text{ мм}$.

Моменты инерции и сопротивления относительно центра эффективного сечения:

$$I_{\text{eff.haz}} = I_g - b_f(t_f - t_{f,\text{ef}}) \left(\frac{h}{2} - \frac{t_f}{2} \right)^2 - \frac{b_c^3}{3}(t_w - t_{w,\text{ef},b}) = 6.608 \times 10^7 \text{ мм}^4; W_{\text{eff.haz}} = I_{\text{eff.haz}} - e_{\text{ef}}^2$$



$$A_{\text{eff.haz}} = 4.348 \times 10^5 \text{ мм}^3.$$

Значение формфактора определяем по таб. 15:

- для 1 или 2 классов: $\alpha_{1,2,w} = W_{\text{pl}}/W_{\text{el}} = 1.103$;

- для 3 класса: $\alpha_{3,w,w} = \left[\frac{W_{\text{el,haz}}}{W_{\text{el}}} + \left(\frac{\beta_{3w} - \beta_w}{\beta_{3w} - \beta_{2w}} \right) \left(\frac{W_{\text{pl,haz}} - W_{\text{el,haz}}}{W_{\text{el}}} \right) \right] = 0.804$;

$\alpha_{3,w,f} = \left[\frac{W_{\text{el,haz}}}{W_{\text{el}}} + \left(\frac{\beta_{3f} - \beta_f}{\beta_{3f} - \beta_{2f}} \right) \left(\frac{W_{\text{pl,haz}} - W_{\text{el,haz}}}{W_{\text{el}}} \right) \right] = 1.091$, где β , β_2 и β_3 параметры гибкости

и предельное значение для возможного критического сечения элемента, поэтому необходимо выбрать наименьшее значение формфактора; принимаем $\alpha_{3,w} = 0.804$;

- для 4 класса: $\alpha_{4,w} = W_{\text{eff,haz}}/W_{\text{el}} = 0.977$;

Окончательно для 4 класса принимаем $\alpha = 0.977$.

Определение несущей способности поперечного сечения на изгиб.

$$M_{\text{c,Rd}} = \alpha \frac{f_y W_{\text{el}}}{\gamma_{M1}} = 102.8 \text{ кНм (41)}.$$

Определение несущей способности элемента с отверстиями.

Ослабление растянутой полки отверстиями под болты учитывается снижением толщины полки под 2 болта диаметром $d_b = 12 \text{ мм}$.

Момент инерции сечения с учетом отверстий, расположенных в нижней и верхней полках (без учета зоны HAZ): $I_{\text{net}} = I_g - 2d_b 2t_f \left(\frac{h}{2} - \frac{t_f}{2} \right)^2 - 2d_b \frac{t_f^3}{12} = 5.481 \times 10^7 \text{ мм}^4$; $W_{\text{net}} = \frac{2I_{\text{net}}}{h} = 3.654 \times 10^5 \text{ мм}^3$.

Сопротивление сечения: $M_{u,Rd} = f_u W_{\text{net}}/\gamma_{M2} = 90.6 \text{ кНм}$.

Несущая способность элемента (окончательно): $M_{\text{Rd}} = M_{u,Rd} = 90.6 \text{ кНм}$.

Проверяем сопротивление поперечного сечения балки: $M_{\text{Ed}}/M_{\text{Rd}} = 86.4/90.6 = 0.954 < 1.0$, т.е. несущая способность балки на изгиб обеспечена.

8 ПРЕДЕЛЬНЫЕ СОСТОЯНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ПРИГОДНОСТИ

8.1 Основным свойством, определяющим надежность алюминиевых конструкций, является безотказность их работы – способность сохранять заданные эксплуатационные качества в течение определенного срока службы.

Основные требования для пределов эксплуатационной надежности представлены в разделе 3.4 стандарта EN 1990:2002+A1:2005/2011 «Основы строительного проектирования».

При проектировании должны быть учтены все предельные состояния эксплуатационной пригодности. При этом необходимо, чтобы расчетные модели (расчетные схемы, основные предпосылки для расчета) конструкций отражали их действительные условия работы, отвечающие рассматриваемой расчетной ситуации. При этом должны учитываться факторы, определяющие напряженное и деформированное состояния, особенности взаимодействия элементов конструкции между собой, геометрическая и физическая нелинейности, пластические свойства материалов, возможные отклонения геометрических размеров от их номинальных размеров.

8.2 Предельные состояния эксплуатационной пригодности соответствуют состояниям, при достижении которых конструкция не отвечает эксплуатационным требованиям, включает в себя расчеты по определению деформаций или прогибов, влияющих на внешний вид, эффективное использование конструкции или вызывающих повреждение отделки и других элементов.

8.3 Пределы для прогибов (вертикальные отклонения) устанавливаются исходя из следующих требований:

- технологических (обеспечение условий нормальной эксплуатации технологического и подъемно-транспортного оборудования, контрольно-измерительной аппаратуры);
- конструктивных (обеспечение целостности примыкающих друг к другу конструкций и их стыков, обеспечения заданных уклонов);
- физиологических (предотвращение вредных воздействий и ощущения дискомфорта при колебаниях);
- эстетико-психологических (обеспечение благоприятных впечатлений от внешнего вида конструкций, предотвращение ощущения опасности).

Пределы для прогибов, соответствующие показанным на рисунке 39, должны быть определены для каждого проекта и согласованы с заказчиком строительных работ.

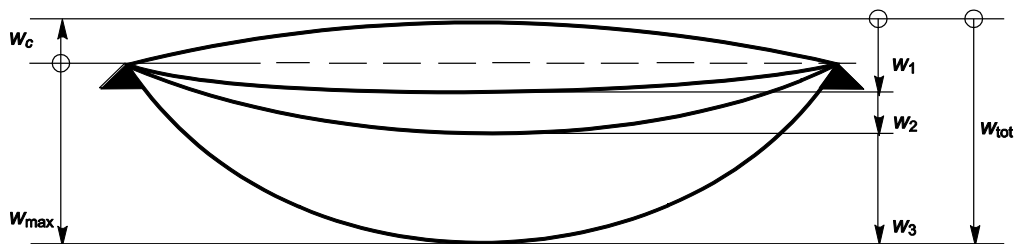


Рисунок 39. Определение прогибов

8.4 Горизонтальные отклонения, соответствующие показанным на рисунке 40, должны быть определены для каждого проекта и согласованы с заказчиком строительных работ.

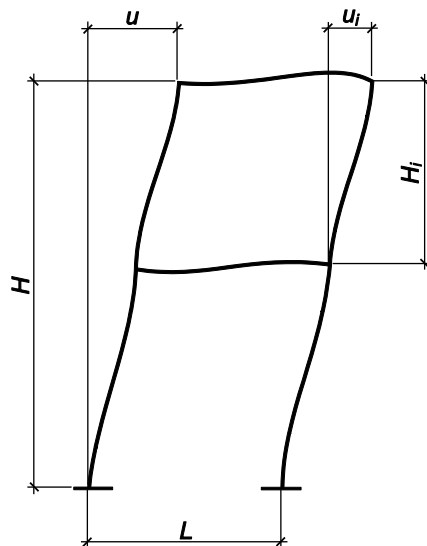
8.5 Колебания конструкции или ее частей при эксплуатации следует проверять с учетом следующих факторов:

- а) удовлетворительное самочувствие пользователей;
- б) функциональная пригодность несущей конструкции или ее частей.

Другие влияния следует согласовывать с заказчиком в каждом отдельном случае.

Эксплуатационная пригодность при колебаниях может достигаться за счет того, что частота собственных колебаний несущей конструкции или элемента конструкции будет выше пределов, которые зависят от возбуждения колебаний при эксплуатации, значения которых согласовываются с заказчиком и/или компетентным ведомством.

Если частота собственных колебаний несущей конструкции или элемента конструкции ниже предельных значений, необходимо провести более точный динамический расчет с учетом амортизации.



u — общее горизонтальное перемещение здания по высоте здания H ;

u_i — горизонтальное перемещение этажа по высоте этажа H_i

Рисунок 40. Определение горизонтальных перемещений

Механизмами возбуждения колебаний могут быть, например, бег или синхронизированные движения людей, работа машин и механизмов, движение транспорта или ветровые нагрузки. Механизмы возбуждения должны согласовываться с заказчиком в каждом отдельном случае.

Пределы колебаний должны быть определены для каждого проекта и согласованы с заказчиком строительных работ.

8.6 Согласно п. 7.2.4 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011 расчет упругого отклонения должен основываться на свойствах полного поперечного сечения элемента. Однако для тонкостенных профилей может понадобиться использование свойств уменьшенных сечений, что позволяет учесть локальный продольный изгиб (п.п.7.13-7.17(6.7.5)). Также необходимо вводить соответствующую поправку на разделение конструкций и другие

эффекты, возникающие при монтаже, эффекты второго порядка и изменения в геометрии.

Для сечений класса 4 можно использовать следующий эффективный момент инерции I_{ser} , постоянный вдоль стойки:

$$I_{ser} = I_{gr} - \frac{\sigma_{gr}}{f_0} (I_{gr} - I_{eff}) \quad (186)$$

где I_{gr} — момент инерции полного поперечного сечения;

I_{eff} — момент инерции эффективного поперечного сечения в конечном предельном состоянии, с поправкой на локальный продольный изгиб (п.п. 7.13-7.17(6.7.5));

σ_{gr} — максимальное значение сжимающей и изгибающей нагрузки на пределе эксплуатационной надежности конструкции, определенное по полному поперечному сечению (положительная величина в формуле).

Отклонения должны рассчитываться, также с вводом поправки на жесткость к вращению для всех полужестких соединений, и на возможную повторяемость локальной пластической деформации при предельном состоянии эксплуатационной пригодности.

ПРИМЕР 25 Дано: Сварная балка двутаврового сечения длиной $L = 7.2$ м, нагруженная распределенной нагрузкой: постоянная - $q_{p,roof} = 2.0$ кН/м; снеговая - $q_{k,roof} = 4.0$ кН/м. Высота балки $h = 350$ мм; ширина полки $b_f = 110$ мм; толщина полки $t_f = 10$ мм; толщина стенки $t_w = 5$ мм; высота стенки $b_w = h - 2 t_f = 350 - 2 \times 10 = 330$ мм. Материал балки – алюминиевый сплав EN AW-6082 T6 EP/O; $t > 5$ мм; $f_0 = 260$ Н/мм² (таб. 6); $E = 70000$ Н/мм².

Требуется проверить прогиб поперечного сечения балки.

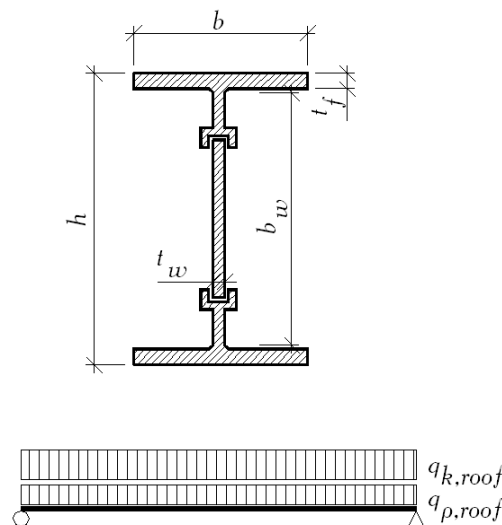
Расчет. При определении прогиба учитывается фиктивный момент инерции второго порядка I_{ser} согласно (186), учитывающий локальный продольный изгиб.

$$I_{ser} = I_g - \sigma_g (I_g - I_{eff})/f_0.$$

Локальный продольный изгиб (п.п. 5.1.6-5.1.10(6.1.4))

а) сварная стенка: $\eta = 0.4$; $\varepsilon = \sqrt{\frac{250}{f_0}} = 0.981$; $\beta_w = \eta(b_w/t_w) = 26.4$; $\beta_{3w} = 18\varepsilon = 17.65$;

при $\beta_w > \beta_{3w}$ класс стенки принимаем 4.



Определяем коэффициент локального продольного изгиба ρ_{cw} по выражению (27), принимая $C_1 = 29$ и $C_2 = 198$ (таб. 14):

$$\rho_{cw} = C_1/(\beta_w/\varepsilon) - C_2/(\beta_w/\varepsilon)^2 = 0.804.$$

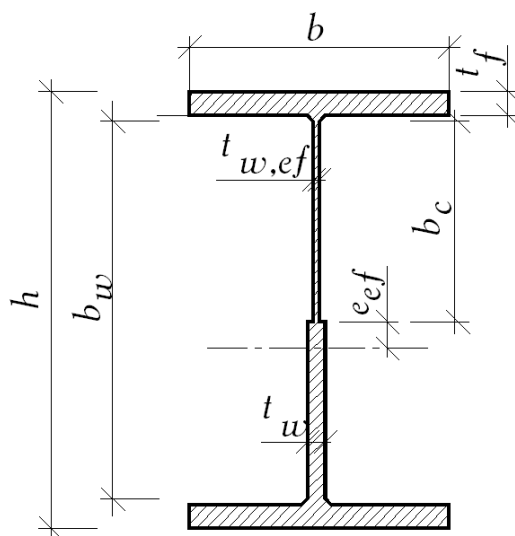
Эффективная толщина стенки: $t_{w,ef} = \rho_{cw} t_w = 4$ мм.

б) полки: $\eta = 1$ при $\psi = 1$; $\beta_f = \eta(b - t_w)/2t_f = 5.25$; $\beta_{3f} = 6\varepsilon = 5.883$; при $\beta_f < \beta_{3f}$ класс полки принимаем 3; $\rho_{cf} = 1.0$; $t_{f,ef} = t_f$.

Окончательно для полного поперечного сечения балки принимаем класс 4.

в) изгиб, обусловленный сжатой полкой по п. 7.20: $k = 0.55$; $f_{0f} = f_0$; $b_w/t_w = 66 <$

$$\frac{kE}{f_{0f}} \sqrt{\frac{b_w t_w}{b t_f}} = 181.4.$$



Изгибная жесткость.

Определяем упругий момент сопротивления полного поперечного сечения:

$$A_g = 2bt_f + (h - 2t_f)t_w = 3.85 \times 10^3 \text{ мм}^2; I_g = 1/12[bh^3 - (b - t_w)(h - 2t_f)^3] = 7.857 \times 10^7 \text{ мм}^4; W_{el} = I_g^2/h = 4.49 \times 10^5 \text{ мм}^3.$$

Определяем момент инерции для эффективного поперечного сечения:

если $t_{f,ef} = t_f$, то $b_c = b_w/2 = 165$ мм; $t_w = 5$ мм; $t_{w,ef} = 4$ мм.

Площадь эффективного сечения: $A_{eff} = A_g - b(t_f - t_{f,ef}) - b_c(t_w - t_{w,ef}) = 3.688 \times 10^3 \text{ мм}^2$.

Смещение центра тяжести:

$$e_{eff} = \left[b(t_f - t_{e,ef}) \left(\frac{h}{2} - \frac{t_f}{2} \right) + \frac{b_c^2}{2} (t_w - t_{w,ef}) \right] \frac{1}{A_{eff}} = 3.617 \text{ мм}.$$

Определяем момент инерции относительно центра полного поперечного сечения:

$$I_{eff} = I_g - b(t_f - t_{f,ef}) \left(\frac{h}{2} - \frac{t_f}{2} \right)^2 - \frac{b_c^3}{3} (t_w - t_{w,ef}) = 7.71 \times 10^7 \text{ мм}^4.$$

Определяем момент инерции относительно центра эффективного поперечного сечения:

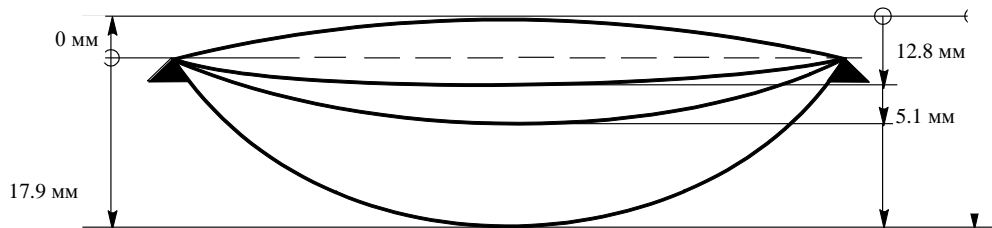
$$I_{eff} = I_{eff} - e_{eff}^2 A_{eff} = 7.706 \times 10^7 \text{ мм}^4.$$

Снижение уровня напряжения, используя I_{ser} , может быть принято постоянным по всей длине балки.

Определяем комбинацию постоянной и снеговой нагрузок:

Принимаем $\Psi_1 = 0.2$ (таб. А.1.1 СН РК EN 1990:2002+A1:2005/2011); $M_{Ed} = (q_{p.roof} + \Psi_1 q_{k.roof})L^2/8 = 18.1$ кНм; $\sigma_g = M_{Ed}/W_{el} = 40.4$ кН/мм²; $I_{ser} = I_g - \sigma_g(I_g - I_{eff})/f_0 = 7.834 \times 10^7$ мм⁴.

Прогибы.



$$w_1 = \frac{5q_{p.roof}L^4}{384EI_{ser}} = 12.8 \text{ мм};$$

$$w_2 = \frac{5q_{k.roof}L^4}{384EI_{ser}} = 5.1 \text{ мм}.$$

Выгиб отсутствует, т.е. $w_0 = 0$.

Суммарный прогиб: $w_{max} = w_1 + w_2 - w_0 = 12.8 + 5.1 = 17.9$ мм.

Для балок покрытия $w_{limit} = L/150 = 7200/150 = 48$ мм.

Таким образом, $w_{max} = 17.9 \text{ мм} < w_{limit} = 48 \text{ мм}$.

9 РАСЧЕТ И КОНСТРУИРОВАНИЕ СОЕДИНЕНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

9.1 Болтовые и заклепочные соединения

9.1.1[8.5.1] Отверстия под болты и заклепки необходимо располагать так, чтобы не возникало коррозии, и предотвратить местный прогиб, а также облегчить установку болтов и заклепок.

В таблице 26 приведены минимальные и максимальные конечные расстояния, краевые расстояния и шаг межцентровых расстояний. Отрицательные допуски не допускаются.

Расстояния между дальними краями щелевого отверстия, т.е. в направлении щели, не должны превышать $1,5(d+1)$ мм (короткая щель), или $2,5(d+1)$ мм (длинная щель).

Ширина щелевого отверстия в направлении перпендикулярном направлению щели, т.е. в направлении нагрузки, принимается не более $d + 1$ мм.

Расстояние e_3 между краем щелевого отверстия и концом элемента, в направлении нагрузки, должна быть не более $1,5(d + 1)$ мм; расстояние e_4 между краем щелевого отверстия и краем элемента, перпендикулярно направлению нагрузки, должно быть не менее $d+1$ мм.

Расстояние p_3 между краями двух соседних щелевых отверстий, в направлении нагрузки, и расстояние p_4 между краями двух соседних щелевых отверстий, перпендикулярно направлению нагрузки, должно быть не менее $2(d + 1)$ мм.

9.1.2[8.5.2.2] Разрыв блока представляет собой разрушение в результате сдвига (среза) по ряду отверстий болтового крепления, а также вдоль поверхности сдвига (среза), которому сопутствует разрушение разрыва материала прилегающих участков соединяемых элементов вдоль линии отверстий болтового крепления.

На рисунке 45 показаны варианты разрыва блока.

Для симметричной группы болтов, на которую действует сосредоточенная нагрузка, расчетное сопротивление разрыву блока $V_{\text{eff}, \text{Rd}}$ вычисляется по формуле:

$$V_{\text{eff}, 1, \text{Rd}} = f_u A_{\text{nt}} / \gamma_{\text{M2}} + (1/\sqrt{3}) f_0 A_{\text{nv}} / \gamma_{\text{M1}}, \quad (187)$$

где A_{nt} — площадь нетто, подвергающаяся нагрузке на растяжение;

A_{nv} — площадь нетто, подвергающаяся нагрузке на сдвиг (срез).

Для группы болтов, на которую приложена нагрузка с эксцентриситетом, расчетное сопротивление разрыву блока $V_{\text{eff}, 2, \text{Rd}}$ вычисляется по формуле:

$$V_{\text{eff}, 2, \text{Rd}} = 0,5 f_u A_{\text{nt}} / \gamma_{\text{M2}} + (1/\sqrt{3}) f_0 A_{\text{nv}} / \gamma_{\text{M1}}. \quad (188)$$

9.1.3[8.5.2.3] При определении расчетных сопротивлений несимметричных или несимметрично соединенных элементов, таких, например, как уголки или уголки с утолщением, необходимо учитывать эксцентриситет крепежных элементов в крайних точках крепления и влияние шага межцентровых и краевых расстояний между болтами.

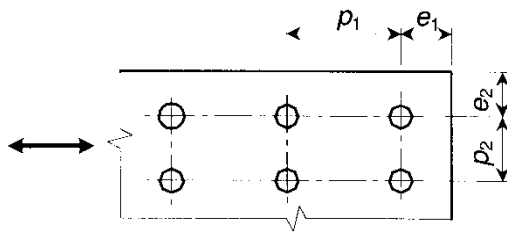


Рисунок 41[8.1]. Расстояния между отверстиями

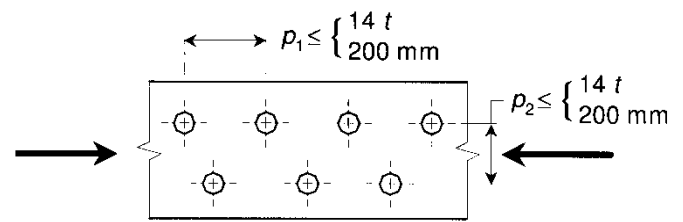
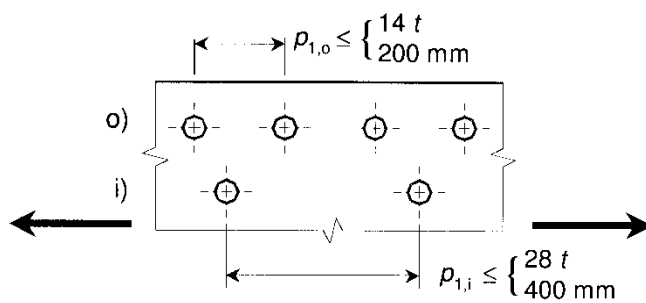


Рисунок 42[8.2]. Крепежные отверстия в шахматном порядке — элемент, работающий на сжатие



о) внешняя линия, i) внутренняя линия

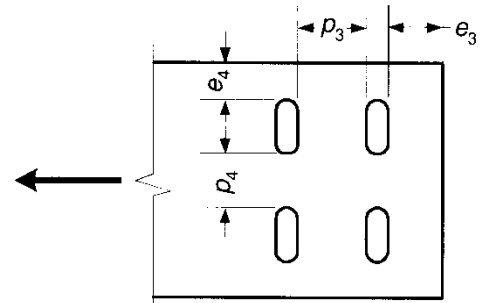


Рисунок 43[8.3]. Шаг междоустьевых отверстий в растянутом элементе

Рисунок 44[8.4]. Щелевые отверстия

В случае соединения уголков или уголков с утолщением одним рядом болтов (рисунок 46) такой узел можно считать центрально нагруженным и расчетный предел прочности этого участка соединения можно определить следующим образом:

— с одним болтом:

$$N_{u,Rd} = \frac{2A_1f_u}{\gamma_{M2}} \quad (189)$$

— с двумя болтами:

$$N_{u,Rd} = \frac{\beta_2 A_{net} f_u}{\gamma_{M2}} \quad (190)$$

— с тремя болтами:

$$N_{u,Rd} = \frac{\beta_3 A_{net} f_u}{\gamma_{M2}} \quad (191)$$

Таблица 26[8.2]

Минимальные, стандартные и максимальные межцентровые, конечные и краевые расстояния				
1	2	3	4	5
Расстояния (рисунок 41 и рисунок 42)	Минимальное значение	Стандартное значение	Максимальное значение ¹⁾²⁾³⁾	
			Конструкции из алюминия в соответствии с таблицей 5	
			Алюминий, находящийся под атмосферным или другим коррозионным воздействием	Алюминий, не находящийся под атмосферным или другим коррозионным воздействием
Конечное расстояние (расстояние от центра отверстия до конца элемента) e_1	$1,2d_0^{6)}$	$2,0d_0$	$4t + 40$ мм	Более $12t$ или 150 мм
Краевое расстояние (расстояние от центра отверстия до края элемента) e_2	$1,2d_0^{6)}$	$1,5d_0$	$4t + 40$ мм	Более $12t$ или 150 мм
Конечное расстояние для щелевых отверстий (расстояние от края отверстия до конца элемента) $e_3^{4)}$	Щелевые отверстия не рекомендуются Щелевые отверстия категории А (п. 9.1.1(8.5.1))			
Краевое расстояние для щелевых отверстий (расстояние от края отверстия до края элемента) $e_4^{4)}$	Щелевые отверстия не рекомендуются Щелевые отверстия категории А (п. 9.1.1(8.5.1))			
Элементы, работающие на сжатие (рисунок 42): шаг межцентрового расстояния p_1	$2,2d_0$	$2,5d_0$	Элементы, работающие на сжатие: менее $14t$ или 200 мм	Элементы, работающие на сжатие: менее $14t$ или 200 мм
Элементы, работающие на растяжение (рисунок 43): шаг межцентровых расстояний $p_1, p_{1,0}, p_{1,j}$	$2,2d_0$	$2,5d_0$	Внешние линии: менее $14t$ или 200 мм; внутренние линии: менее $28t$ или 400 мм	в 1,5 раз больше значений в столбце 4

Продолжение таблицы 26[8.2]

1	2	3	4	5
Расстояния (рисунок 41 и рисунок 42)	Минимальное значение	Стандартное значение	Максимальное значение ¹⁾²⁾³⁾	
			Конструкции из алюминия в соответствии с таблицей 5	
			Алюминий, находящийся под атмосферным или другим коррозионным воздействием	Алюминий, не находящийся под атмосферным или другим коррозионным воздействием
Межцентровое расстояние p_2 ⁵⁾	$2,4d_0$	$3,0d_0$	Менее $14t$ или 200 мм	Менее $14t$ или 200 мм

¹⁾ Максимальные значения для шага межцентровых расстояний, конечных и краевых расстояний не ограничиваются, за исключением следующих случаев:

- для элементов, работающих на сжатие, чтобы избежать местного изгиба и предотвратить коррозию в элементах, подверженных атмосферному воздействию;
- для элементов, работающих на растяжение подверженных атмосферному воздействию, чтобы предотвратить коррозию.

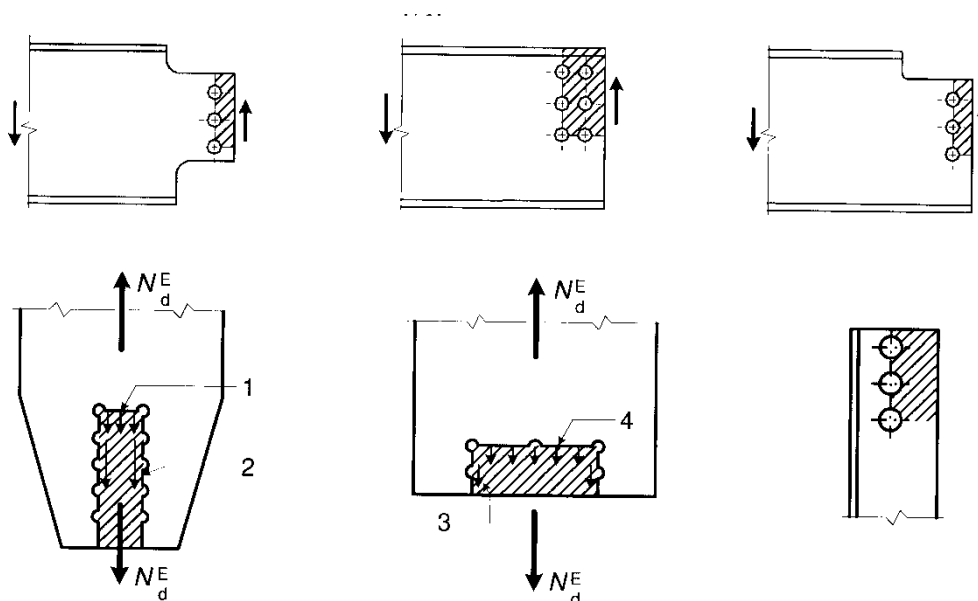
²⁾ Сопротивление местному изгибу пластины, зажатой между элементами крепежа, необходимо рассчитывать как стойку при использовании $0,6p_1$ как предельной длины, выдерживающей нагрузку без деформации. Местная деформация между отдельными крепежными элементами не учитывается, если p/t меньше, чем 9ε. Краевое расстояние не должно превышать максимального значения, чтобы удовлетворять требованиям по местному прогибу для выступающей части в элементах, работающих на сжатие. Это требование не касается конечного расстояния.

³⁾ t представляет собой толщину более тонкой внешней прикрепленной детали.

⁴⁾ Щелевые отверстия не рекомендуются. Щелевые отверстия категории А см. п. 9.1(8.5.1).

⁵⁾ Для крепежных элементов, расположенных в шахматном порядке, можно использовать минимальное расстояние между рядами $p_2 = 1,2d_0$, если минимальное расстояние между двумя крепежными элементами в ряду $p_1 = 2,4d_0$ (см. рисунок 42).

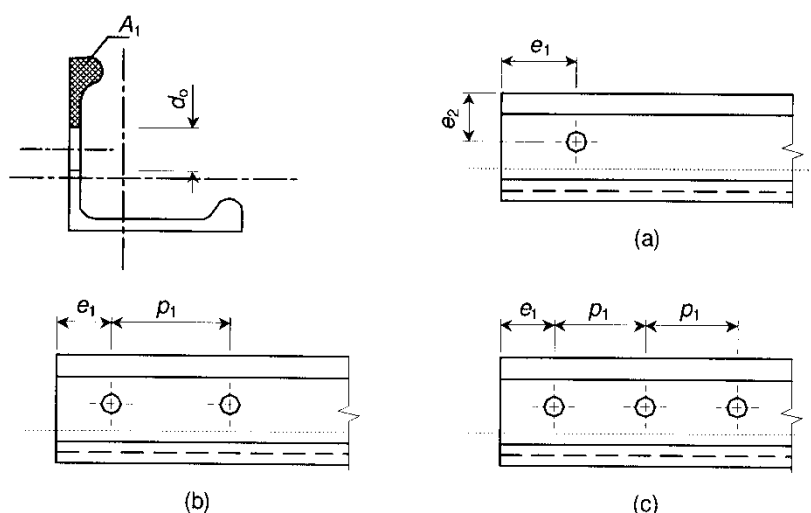
⁶⁾ Минимальные значения e_1 и e_2 должны быть указаны без отрицательного допуска, т. е. только с положительным допуском.



1 — малое усилие разрыва, 2 — большое усилие сдвига,
3 — малое усилие сдвига, 4 — большое усилие разрыва

Рисунок 45[8.5]. Разрыв блока

где β_2 и β_3 — понижающие коэффициенты, зависящие от значений межцентрового расстояния p_1 , приведенных в таблице 27. Значения коэффициентов для промежуточных значений p_1 можно определить при помощи линейной интерполяции;
 A_{net} — площадь уголка нетто. Для несимметричного уголка со сторонами разной длины, в котором для соединения используется меньшая сторона, A_{net} необходимо принять равной эквивалентной площади нетто уголка со сторонами, равными меньшей стороне уголка.



(a) — один болт; (b) — два болта; (c) — три болта

Рисунок 46[8.6]. Соединения уголками с утолщением (относится также к уголкам без утолщений)

Учет продольного изгиба элемента, работающего на сжатие, должен основываться на площади поперечного сечения брутто, однако эту прочность не следует принимать большей, чем предел прочности определенный по формулам (189) – (191).

Таблица 27[8.3]

Понижающие коэффициенты β_2 и β_3		
Шаг межцентровых расстояний p_1	$\leq 2,5d_0$	$\geq 5,0d_0$
β_2 для двух болтов	0,4	0,7
β_3 для трех болтов	0,5	0,7

9.1.4 Согласно п.п. 8.5.3.1 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011 проектирование болтовых соединений, находящихся под воздействием сдвига (среза), необходимо выполнять в соответствии с категориями, представленными в таблице 28.

Категория А: Сопротивление смятию

К данной категории относятся стальные болты с защитным покрытием (обычные или высокопрочные), болты из нержавеющей стали, алюминиевые болты, алюминиевые заклепки. Контактующие поверхности не требуют какого-либо предварительного натяжения и применение каких-либо специальных норм не предусмотрено. Расчетная предельная нагрузка сдвига не должна превышать расчетное сопротивление сдвигу (срезу) и расчетное сопротивление смятию, полученное из соотношений п. 9.1.7(8.5.5).

Категория В: Проскальзывание при предельном состоянии второй группы (по пригодности к нормальной эксплуатации)

К данной категории относятся высокопрочные болты с контролируемым моментом затягивания в соответствии со стандартом prEN 1090-3. При предельном состоянии эксплуатационной пригодности должно отсутствовать проскальзывание.

При проектировании необходимо учитывать комбинацию воздействий, которую следует выбрать в зависимости от вариантов нагружения, при которых требуется обеспечить сопротивление проскальзыванию. Расчетная нагрузка сдвига (среза) при предельном состоянии эксплуатационной пригодности не должна превышать расчетное сопротивление проскальзыванию, полученное из раздела 8.5.9. Расчетная предельная нагрузка сдвига (среза) не должна превышать расчетное сопротивление сдвигу (срезу) и расчетное сопротивление смятию, полученное из раздела 8.5.5.

Категория С: Проскальзывание в критическом предельном состоянии

К данной категории относятся высокопрочные болты с контролируемым моментом затягивания в соответствии со стандартом prEN 1090-3. В критическом предельном состоянии должно отсутствовать проскальзывание. Расчетная предельная нагрузка сдвига (среза) не должна превышать расчетное сопротивление проскальзыванию, полученное из раздела 8.5.9. и расчетное сопротивление смятию, полученное из раздела 8.5.5.

В критическом предельном состоянии элемента необходимо учесть расчетное упругое сопротивление рабочего сечения с отверстиями под болты $N_{\text{net,Rd}}$, определяемое из выражения:

$$N_{\text{net,Rd}} = A_{\text{net}} f_u / \gamma_{M2} \quad (192)$$

9.1.5[8.5.3.2] Проектирование болтовых соединений на растяжение необходимо выполнять в соответствии с одной из следующих категорий (таблица 28).

Категория D: Соединения с болтами без предварительного натяжения

К данной категории относятся болты классов с 4.6 по 10.9 включительно: алюминиевые болты, стальные болты. Предварительного натяжения болтов данной категории не производится. Данная категория не применима в соединениях, часто подверженных изменениям растягивающих нагрузок. Однако такие соединения могут использоваться в конструкциях, предназначенных для восприятия ветровых нагрузок.

Категория E: Соединения с высокопрочными болтами с предварительным натяжением

К данной категории относятся высокопрочные болты с контролируемым моментом затягивания в соответствии со стандартом prEN 1090-3. Использование контролируемого затягивания повышает сопротивляемость узлов соединения усталостным нагрузкам. Однако требуется определение степени применимости таких соединений с учетом детальной проработки соединяемых элементов и допусков.

В соответствии с п.п. 8.5.3.2 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011 для соединений категории *D* и категории *E*, воспринимающих растягивающие усилия, не требуется специальной обработки поверхностей, за исключением случаев, когда соединение категории *E* загружено комбинацией усилий растяжения и сдвига (среза) (сочетание E-B или E-C).

9.1.6 Согласно п. 8.5.4 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011 в случае действия изгибающего момента распределение внутренних сил между крепежными элементами в критическом предельном состоянии должно быть пропорционально расстоянию от центра вращения, а распределение сил сдвига (среза) должно быть аналогичным (рисунок 47(a)), в следующих случаях:

- в соединениях категории *C*, устойчивых к проскальзыванию;
- других соединениях, находящихся под нагрузкой сдвига (среза), когда расчетное сопротивление сдвигу (срезу) $F_{v,Rd}$ крепежного элемента меньше, чем расчетное сопротивление смятию $F_{b,Rd}$.

В других случаях при действии изгибающего момента распределение внутренних сил между крепежными элементами в критическом предельном состоянии может быть принято упругим, а распределение сил сдвига (среза) может быть принято аналогичным (рисунок 47(b)).

При соединениях внахлестку одно и то же сопротивление смятию в любом конкретном направлении может быть принято для каждого крепежного элемента при длине нахлеста максимум до $L = 15d$, где d — номинальное значение диаметра болта или заклепки. Если длина нахлеста $L > 15d$ см. положения п. 9.1.13(8.5.11).

Таблица 28[8.4]

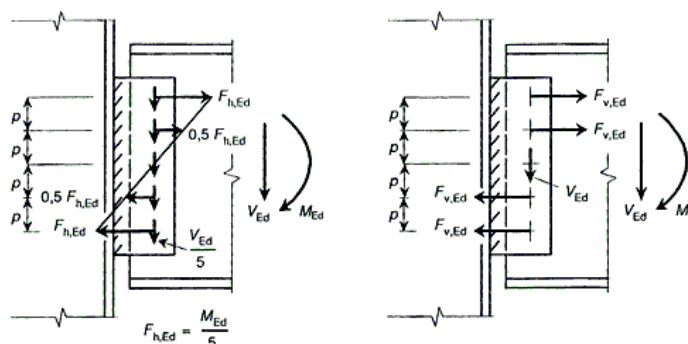
Категории болтовых соединений		
Соединения под нагрузкой сдвига (среза)		
Категория	Критерий	Примечания
А; Сопротивление смятию	$F_{v,Ed} \leq F_{v,Rd}$	Предварительного натяжения не требуется. Все классы с 4.6 по 10.9
В; Проскальзывание в предельном состоянии эксплуатационной пригодности	$F_{v,Ed,ser} \leq F_{s,Rd,ser}$ $F_{v,Ed} \leq F_{s,Rd}$ $F_{v,Ed} \leq F_{b,Rd}$	Высокопрочные болты с предварительным натяжением. Не допускается проскальзывания на предельном состоянии эксплуатационной пригодности
С; Проскальзывание в критическом предельном состоянии	$F_{v,Ed} \leq F_{s,Rd}$ $F_{v,Ed} \leq F_{b,Rd}$	Высокопрочные болты с предварительным натяжением. Не допускается проскальзывания в критическом предельном состоянии
Д; Без предварительного натяжения	$F_{t,Ed} \leq F_{t,Rd}$	Предварительного натяжения не требуется. Все классы с 4.6 по 10.9
Е; С предварительным натяжением	$F_{t,Ed} \leq F_{t,Rd}$	Высокопрочные болты с предварительным натяжением
<p>Обозначения:</p> <p>$F_{v,Ed}$ — расчетная сила сдвига на один болт в критическом предельном состоянии;</p> <p>$F_{v,Rd,ser}$ — расчетная сила сдвига на один болт в предельном состоянии эксплуатационной пригодности;</p> <p>$F_{v,Rd}$ — расчетное сопротивление сдвигу на один болт;</p> <p>$F_{b,Rd}$ — расчетное сопротивление смятию на один болт;</p> <p>$F_{s,Rd,ser}$ — расчетное сопротивление проскальзыванию на один болт в предельном состоянии эксплуатационной пригодности;</p> <p>$F_{s,Rd}$ — расчетное сопротивление проскальзыванию на один болт в критическом предельном состоянии;</p> <p>$F_{t,Ed}$ — расчетная сила растяжения на один болт в критическом предельном состоянии;</p> <p>$F_{t,Rd}$ — расчетное сопротивление растяжению на один болт.</p>		

9.1.7[8.5.5] Расчетные сопротивления, приведенные в настоящем пункте, применимы к промышленно выпускаемым стальным болтам, болтам из нержавеющей стали и алюминиевым болтам в соответствии с таблицей 9, которые соответствуют, включая соответ-

ствующие гайки и шайбы, эталонам, приведенным в стандарте prEN 1090-3. Для алюминиевых болтов необходимо, кроме того, выполнять требования п. С.4.1 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011.

В критическом предельном состоянии расчетная сила сдвига (среза) $F_{v,Ed}$, воздействующая на болт, не должна превышать наименьшего из следующих значений:

— расчетного сопротивления сдвигу (срезу) $F_{v,Ed}$;



(а) Распределение упругой нагрузки
распределение пропорционально
расстоянию от центра вращения

(б) Распределение пластической нагрузки
Возможное пластическое распределение
с одним крепежным сопротивлением
 V_{Ed} и четырьмя сопротивлениями M_{Ed}

$$F_{v,Ed} = \sqrt{\left(\frac{M_{Ed}}{5p}\right)^2 + \left(\frac{V_{Ed}}{5}\right)^2} \quad (193)$$

$$F_{v,Ed} = \frac{M_{Ed}}{6p} \quad (194)$$

Рисунок 47[8.7]. Примеры распределения нагрузки между крепежными элементами (пятью болтами)

— расчетного сопротивления смятию (срезу) $F_{b,Rd}$ того болта из соединения, который обладает наименьшим сопротивлением смятию (срезу); оба этих значения приведены в таблице 29.

Расчетная сила растяжения в критическом предельном состоянии $F_{t,Ed}$, учитывая любую силу, возникающую вследствие эффекта рычага, не должна превышать расчетное сопротивление растяжения $B_{t,Rd}$ узла болт-пластина.

Расчетные сопротивления на растяжение и сдвиг (срез) через часть болта с резьбой, приведенные в таблице 29, пригодны только для болтов с накатанной резьбой. Для других крепежных элементов с нарезанной резьбой, таких как анкерные болты и стяжные шпильки, которые изготавливаются из круглых стальных прутков, а резьба нарезается на отдельном предприятии металлообработки, а не на специализированном предприятии, выпускающем болты, соответствующие значения, приведенные в таблице 29, такие как область болта под растягивающим напряжением A_s , должны быть уменьшены посредством умножения их на коэффициент 0,85.

Значения расчетных сопротивлений сдвигу (срезу) $F_{v,Rd}$, приведенные в таблице 29, применимы только для болтов в отверстиях с номинальными зазорами, не превышающими

ми установленные значения для стандартных отверстий в стандарте prEN 1090-3. Для увеличенных зазоров и щелевых отверстий значение $F_{v,Rd}$ необходимо умножить на коэффициент 0,7.

9.1.8[8.5.6] Клепанные соединения проектируются с учетом восприятия сил сдвига (среза) и смятия. Расчетные сопротивления алюминиевых заклепок принимаются в соответствии с таблицей 9. Необходимо также выполнять требования, приведенные в Приложении С.4.2 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011.

В критическом предельном состоянии сила сдвига (среза) $F_{v,Ed}$, действующая на заклепку, не должна превышать меньшего из следующих значений:

- расчетного сопротивления сдвигу (срезу) $F_{v,Rd}$;
- расчетного сопротивления смятию $F_{b,Rd}$.

Указания по определению значений расчетных сопротивлений приведены в таблице 29.

Напряжения, возникающие в алюминиевых заклепках, ограничиваются в исключительных случаях (таблица 29).

Для критических предельных состояний расчетная сила растяжения $F_{t,Ed}$, действующая на заклепку, не должна превышать расчетного предельного сопротивления растяжению $F_{t,Rd}$, значения которого приведены в таблице 29.

Заклепки, подверженные как сдвигу (срезу), так и растяжению, должны дополнительно удовлетворять требованиям по восприятию комбинации усилий сдвига (среза) и растяжения, приведенным в таблице 29.

Значения расчетных сопротивлений смятию $F_{b,Rd}$, приведенные в таблице 29, применимы только в случае, когда краевое расстояние e_2 не меньше, чем $1,5d_0$, а межцентровое расстояние p_2 , измеренное перпендикулярно направлению нагрузки, составляет, по крайней мере, $3,0d_0$.

Для меньших значений e_2 и/или p_2 необходимо понижать значение $F_{b,Rd}$ аналогично тому, как это принято для болтов.

Защемленная длина заклепки не должна превышать $4,5d$ для клепки молотком и $6,5d$ - для клепки прессованием.

В однорядных соединениях внахлестку запрещено использовать одиночные заклепки.

9.1.9[8.5.7] Соединения с использованием стальных болтов и заклепок с потайными головками, должны обеспечивать передачу сил сдвига (среза) и смятия.

В предельном критическом состоянии сила сдвига (среза) $F_{v,Ed}$, действующая на болт или заклепку с потайной головкой, не должна превышать меньшего из следующих значений:

- 0,7 от расчетного сопротивления сдвигу (срезу) $F_{v,Rd}$, как приведено в таблице 29;
- расчетного сопротивления смятию $F_{b,Rd}$, причем из толщины t соответствующей прикрепленной детали соединения необходимо вычесть половину глубины зенковки.

Напряжения в стальном болте с потайной головкой должны быть рассчитаны с учетом восприятия силы $F_{t,Ed}$. Их ограничение проводится в исключительных случаях (таблица 29).

Для критических предельных состояний расчетная сила растяжения $F_{t,Ed}$, действующая на стальной болт с потайной головкой, не должна превышать расчетного сопротивления растяжению $F_{t,Rd}$, значения которого приведены в таблице 29.

В случае действия на болты и заклепки комбинации силы сдвига (среза) и силы растяжения необходимо произвести их проверку на соответствие требованиям, приведенным в таблице 29. Причем угол и глубина зенковки должны соответствовать стандарту prEN 1090-3.

Когда краевое расстояние e_2 не меньше, чем $1.5d_0$, а межцентровое расстояние p_2 , измеренное перпендикулярно направлению нагрузки, составляет, по крайней мере, $3.0d_0$, то при проверке соединения используются значения расчетных сопротивлений смятию $F_{b,Rd}$ из таблицы 29.

Для меньших значений e_2 и/или p_2 необходимо учитывать снижение значения $F_{b,Rd}$ по подобию тому, как это рекомендовано для болтов.

Защемленная длина болта или заклепки с потайной головкой не должна превышать $4.5d$ для клепки молотком и $6.5d$ - для клепки прессованием.

В однорядных соединениях внахлестку нельзя использовать одиночные болты и заклепки с потайной головкой.

9.1.10 Согласно п. 8.5.9 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011 сопротивление проскальзыванию высокопрочных болтов можно определять для критического предельного состояния либо для предельного состояния эксплуатационной пригодности, кроме того, в предельном состоянии расчетная сила сдвига (среза) $F_{v,Ed}$ на высокопрочном болте не должна превышать наименьшего из следующих значений:

- расчетного сопротивления сдвигу (срезу) $F_{v,Rd}$;
- расчетного сопротивления смятию $F_{b,Rd}$;
- сопротивления растяжению, сжатию или изгибу элемента по площади сечения нетто и по площади сечения брутто.

Расчет сопротивления проскальзыванию высокопрочного болта с предварительным натяжением необходимо производить по формуле

$$F_{s,Rd} = \frac{n\mu}{\gamma_{Ms}} F_{p,C} \quad (207)$$

где $F_{p,C}$ — сила предварительного натяжения;

μ — коэффициент скольжения;

n — количество фрикционных границ раздела деталей соединения.

В случае установки болтов в отверстиях с номинальными зазорами, в качестве частного коэффициента для сопротивления проскальзыванию γ_{Ms} необходимо принимать либо $\gamma_{Ms,ult}$ — для критического предельного состояния, либо $\gamma_{Ms,ser}$ — для предельного состояния эксплуатационной пригодности, где $\gamma_{Ms,ult}$ и $\gamma_{Ms,ser}$ приведены в таблице 11.

Усилие предварительного натяжения $F_{p,C}$ для высокопрочных болтов классов с 8.8 или 10.9 с контролируемым усилием затягивания определяется из выражения:

$$F_{p,C} = 0,7f_{ub}A_s. \quad (208)$$

При определении коэффициента скольжения μ посредством испытаний, частный коэффициент надежности для критического предельного состояния может быть уменьшен

умножением на 0.1.

Расчетное значение коэффициента скольжения μ определяется классом обработки поверхности. Значение коэффициента μ для поверхности после пескоструйной обработки с целью получения показателя чистоты поверхности $R_a 12,5$ (стандарт EN ISO 1302 и EN ISO 4288), но без обработки с целью защиты поверхности, необходимо брать из таблицы 30.

9.1.11 В соответствии с п. 8.5.9 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011 в случае действия на соединение, устойчивому к проскальзыванию, комбинации силы растяжения F_t и силы сдвига (среза) F_v , в результате чего проявляется эффект проскальзывания, сопротивление проскальзыванию одного болта принимается:

- для категории В (устойчивость к проскальзыванию в предельном состоянии эксплуатационной пригодности):

$$F_{s,Rd,ser} = \frac{n\mu(F_{p,C} - 0,8F_{t,ed,ser})}{\gamma_{Ms,ser}} \quad (209)$$

- для категории С (устойчивость в критическом предельном состоянии):

$$F_{s,Rd} = \frac{n\mu(F_{p,C} - 0,8F_{t,ed})}{\gamma_{Ms,ult}} \quad (210)$$

9.1.12 Согласно п. 8.5.10 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011 при воздействии растяжения крепежные элементы должны быть соответствующим образом рассчитаны также на возникающие силы, действующие как рычаги (рисунок 48), зависящие от относительной жесткости и геометрических пропорций частей соединения (рисунок 49).

9.1.13 В соответствии с п. 8.5.11 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011 в случае если расстояние L_j между центрами оконечных крепежных элементов соединения, измеренное в направлении действия силы (рисунок 50), составляет более $15d$, то расчетное сопротивление сдвигу (срезу) $F_{v,Rd}$ всех крепежных элементов должно быть уменьшено путем умножения его на понижающий коэффициент β_{Lf} , определяемый из выражения:

$$\beta_{Lf} = 1 - \frac{L_j - 15d}{200d}, \text{ но } 0,75 < \beta_{Lf} < 1,0 \quad (211)$$

В случае равномерной передачи силы по всей длине соединения, например передача силы сдвига от стенки секции к полке, данное положение не применимо.

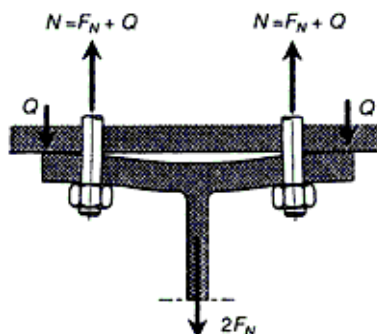


Рисунок 48[8.8]. Силы, действующие как рычаг (Q)

Таблица 29[8.5]

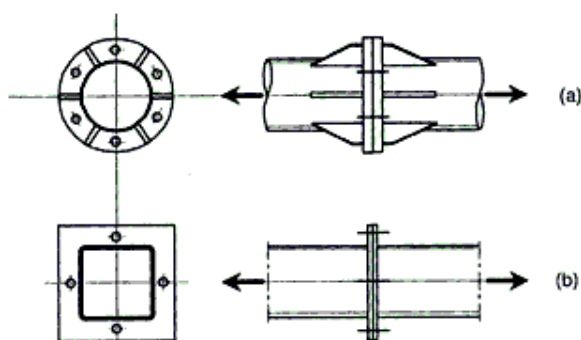
Расчетные сопротивления для болтов и заклепок		
Вид дефекта	Болты	Заклепки
Сопротивление сдвигу (среза) в плоскости сдвига (среза)	$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v A f_{ub}}{\gamma_{M2}} \quad (195)$ <p>— где плоскость сдвига (среза) проходит через часть болта с резьбой (А представляет собой область болта под растягивающим напряжением A_s):</p> <p>— для стальных болтов классов 4.6, 5.6 и 8.8: $\alpha_v = 0,6$</p> <p>— для стальных болтов классов 4.8, 5.8, 6.8 и 10.9, болтов из нержавеющей стали и алюминиевых болтов: $\alpha_v = 0,5$</p> <p>— где плоскость сдвига (среза) проходит через часть болта без резьбы (А представляет собой площадь сечения болта брутто): $\alpha_v = 0,6$</p> <p>f_{ub} — характеристический предел прочности материала болта</p>	$F_{v,Rd} = \frac{0,6 A_0 f_{ur}}{\gamma_{M2}} \quad (196)$ <p>f_{ur} — характеристический предел прочности материала заклепки; A_0 — поперечное сечение отверстия.</p>
Сопротивление смятию 1)2)3)4)5)6)	$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \alpha_b d t f_{ub}}{\gamma_{M2}} \quad (197)$ <p>— где α_b — наименьшее из: α_d, или f_{ub}/f_u, или 1.0; но ≤ 0.66 —</p> <p>для щелевых отверстий в направлении передачи нагрузки:</p> <p>— для концевых болтов: $\alpha_d = e_1/3d_0$; (198)</p> <p>— для внутренних болтов: $\alpha_d = p_1/3d_0 - 1/4$; (199)</p> <p>перпендикулярно направлению передачи нагрузки:</p> <p>— для болтов по краю: k_1 наименьшее из: 2,8 $e_2/d_0 - 1,7$, или 2,5; (200)</p> <p>— для внутренних болтов k_1 наименьшее из:</p> <p>1,4 $p_2/d_0 - 1,7$, или 2,5. (201)</p> <p>f_u — характеристический предел прочности материала соединенных частей;</p> <p>f_{ub} — характеристический предел прочности материала болта;</p> <p>d — диаметр болта;</p> <p>d_0 — диаметр отверстия;</p> <p>d — диаметр болта;</p> <p>e_1, e_2, p_1, p_2 — см. рисунок 41⁵⁾</p>	$F_{t,Rd} = \frac{0,6 A_0 f_{ur}}{\gamma_{M2}} \quad (204)$ <p>Для цельных заклепок с размерами головки в соответствии с Приложением С (рисунок С.1) СН РК EN 1999-1-1:2007/2011+A1: 2009/2011 или большими, с двух сторон</p>
Сопротивление растяжению	$F_{t,Rd} = \frac{k_2 A_s f_{ub}}{\gamma_{M2}} \quad (203)$ <p>где $k_2 = 0,9$ для стальных болтов; $k_2 = 0,5$ для алюминиевых болтов; $k_2 = 0,63$ для болтов болт с потайной головкой;</p>	

Продолжение таблицы 29[8.5]

Соппротивление продавливанию	$B_{p,Rd} = 0,6\pi d_m t_p f_0 / \gamma_{M2} \quad (205)$ <p>где d_m — средняя величина от диаметра описанной окружности вокруг головки болта и вписанной окружности, или гайки, или, если используются, внешнего диаметра шайб; наименьшее из них; t_p — толщина пластины под головкой болта или под гайкой; f_u — характеристический предел прочности материала элемента.</p>
Сочетание сдвига (среза) и растяжения	$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4F_{t,Rd}} \leq 1,0 \quad (206)$
<p>¹⁾ Соппротивление смятию $F_{b,Rd}$ для болтов:</p> <ul style="list-style-type: none"> — в отверстиях увеличенного размера в соответствии со стандартом prEN 1090-3 составляет 0,8 от величины сопротивления смятию болтов, установленных в отверстия нормальных размеров; — в коротких щелевых отверстиях, когда продольная ось отверстий перпендикулярна направлению передачи силы, а длина щелевого отверстия не превышает 1,5 диаметра круглой части отверстий, составляет 0,8 от величины сопротивления смятию болтов, установленных в обычных круглых отверстиях; — в длинных щелевых отверстиях, когда продольная ось отверстий перпендикулярна направлению передачи силы, а длина щелевого отверстия находится в пределах от 1,5 до 2,5 диаметра круглой части отверстий, составляет 0,65 от величины сопротивления смятию болтов, установленных в обычных круглых отверстиях. <p>²⁾ Для болтов с потайными головками:</p> <ul style="list-style-type: none"> — сопротивление смятию $F_{b,Rd}$ должно основываться на толщине пластины t, равной толщине пластины в соединении минус глубина зенковки. <p>³⁾ Кроме сопротивления смятию необходимо дополнительно проверять сопротивление площади нетто участка с болтовым креплением.</p> <p>⁴⁾ Если нагрузка на болт не параллельна краю, то сопротивление смятию может быть проверено отдельно для компонентов нагрузки болта в направлениях, параллельном и перпендикулярном концу.</p> <p>⁵⁾ Алюминиевые болты не должны использоваться в соединениях с щелевыми отверстиями.</p> <p>⁶⁾ Для щелевых отверстий необходимо заменить d_0 на $(d + 1 \text{ мм})$, e_1 — на $(e_3 + d/2)$, e_2 — на $(e_4 + d/2)$, p_1 — на $(p_3 + d)$, p_2 — на $(p_4 + d)$, где p_1, p_2, p_3, p_4 показаны на рисунке 43.</p>	

Таблица 30[8.6]

Коэффициент скольжения для обработанных поверхностей трения	
Общая толщина соединения, мм	Коэффициент скольжения μ
$12 \leq \sum t < 18$	0,27
$18 \leq \sum t < 24$	0,33
$24 \leq \sum t < 30$	0,37
$30 \leq \sum t$	0,40



(a) — толстая концевая пластина, малая сила рычага;

(b) — тонкая концевая пластина, большая сила рычага

Рисунок 49[8.9]. Влияние деталей соединения на эффект рычага

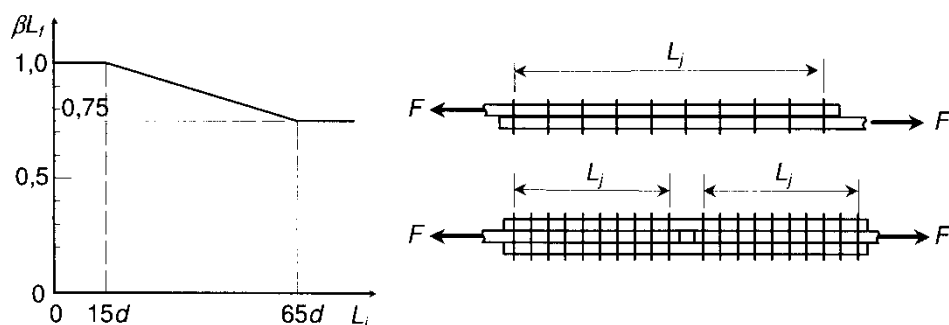


Рисунок 50[8.10]. Длинные соединения

9.1.14[8.5.12] В однорядных соединениях внахлестку не должна использоваться единственная заклепка или единственный ряд заклепок.

Сопротивление смятию (срезу) $F_{b,Rd}$ должно удовлетворять условию:

$$F_{b,Rd} \leq 1,5 f_u d t / \gamma_{M2}. \quad (212)$$



Рисунок 51[8.11]. Однорядное соединение внахлестку с одним рядом болтов

При использовании в креплении только одного болта или одного ряда болтов (высокопрочные болты класса 8.8 или 10.9) необходимо применять соответствующие шайбы (в направлении перпендикулярном нагрузке) даже в случае, когда не используется предварительное натяжение.

9.1.15 Согласно п. 8.5.13 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011 при установке болтов или заклепок сквозь пакет соединяемых деталей общей толщиной t_p , которая превы-

шает треть номинального диаметра d , и передающих нагрузку в направлении сдвига и смятия, расчетное сопротивление сдвигу $F_{v,Rd}$ должно быть уменьшено путем умножения на понижающий коэффициент β_p , определяемый выражением:

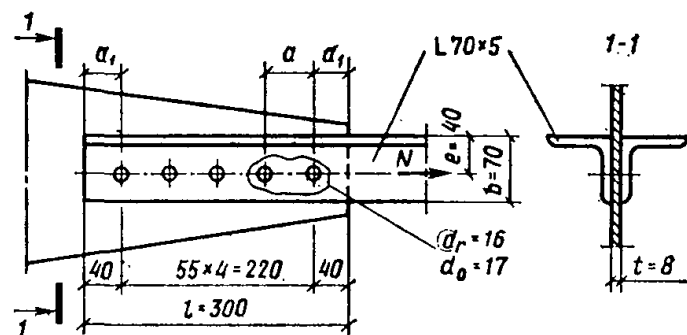
$$F_{b,Rd} \leq 1,5 f_u dt / \gamma_{M2} \quad (213)$$

Если на два пакета по обе стороны соединения действует двойная нагрузка сдвига (среза), то в качестве общей толщины t_p необходимо принимать толщину более толстого пакета.

В случае необходимости (по результатам проверочного расчета с использованием понижающего коэффициента β_p) установки дополнительных крепежных элементов, их можно расположить на продолжении пакета.

ПРИМЕР 26 Дано: Соединение элемента фермы из двух уголков L70x70x5 ($A_g = 2 \times 6.86 = 1372 \text{ мм}^2$) и фасонки толщиной 8 мм. Материал конструкций: фермы – алюминиевый сплав EN AW-6082 T6 EP/O, $t \leq 5 \text{ мм}$, $f_0 = 250 \text{ Н/мм}^2$, $f_u = 290 \text{ Н/мм}^2$ (таб. 6); заклепок – EN AW-6082 T6, $f_{0r} = 240 \text{ Н/мм}^2$; $f_{ur} = 300 \text{ Н/мм}^2$ (таб. 9); $\gamma_{M1} = 1.1$, $\gamma_{M2} = 1.25$ (таб.10). Расчетное усилие $N = 240 \text{ кН}$.

Требуется произвести расчет заклепочного соединения.



Диаметр заклепок $d = 16 \text{ мм}$; отверстий $d_0 = 17 \text{ мм}$; пять заклепок располагаются в один ряд ($e = e_2 = 40 \text{ мм}$).

Несущая способность двух уголков L70x70x5:

$N_{0,Rd} = A_g f_0 / \gamma_{M1} = 1372 \times 250 / 1.1 = 311.82 \text{ кН}$ (34); $A_{net} = 2(6.86 - 17 \times 5) = 1202 \text{ мм}^2$; $N_{u,Rd} = 0.9 A_{net} f_u / \gamma_{M2} = 0.9 \times 1202 \times 290 / 1.25 = 250.98 \text{ кН}$ (35); $N_{t,Rd} = N_{u,Rd} = 250.98 \text{ кН} > N = 240 \text{ кН}$, т.е. прочность двух уголков на растяжение обеспечена.

Расчетное сопротивление сдвигу (срезу) на одну заклепку (таб. 29): $F_{v,Rd} = 0.6 f_{ur} A_0 / \gamma_{M2} = 0.6 \times 300 \times 3.14 \times 17^2 / 1.25 = 130.67 \text{ кН}$.

Расчетное сопротивление смятию (таб. 29): $k_1 = 2.8 \times 40 / 17 - 1.7 = 4.88 > 2.5$; $k_1 = 2.5$; $\alpha_b = f_{ur} / f_u = 1.034 > 1.0$; $\alpha_b = 1.0$; $F_{b,Rd} = k_1 \alpha_b f_u d_0 t / \gamma_{M2} = 0.6 \times 300 \times 17 \times 8 / 1.25 = 78.88 \text{ кН}$.

Принимаем $F_{v,Rd} = 78.88 \text{ кН}$.

Действующая сдвигающая сила на одну заклепку $N_1 = 240 / 5 = 48 \text{ кН} < F_{v,Rd} = 78.88 \text{ кН}$.

Заклепки располагаем с шагом $p_1 = 55 \text{ мм}$; $p_1 > 2.2 d_0 = 37.4 \text{ мм}$; $p_1 < 14 t = 70 \text{ мм}$; $p_1 < 200 \text{ мм}$;

$e_1 = 40 \text{ мм}$; $e_1 > 1.2 d_0 = 20.4 \text{ мм}$; $e_1 < 4 t + 40 \text{ мм} = 60 \text{ мм}$.

Длина прикрепления фасонки: $l = 4p_1 + 2e_1 = 300$ мм.

9.2 Соединения на штифтах

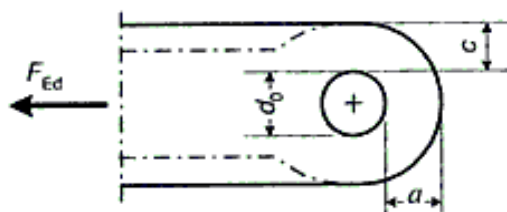
9.2.1 Согласно п. 8.5.14 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011 у применяемых штифтов один из соединяемых элементов должен иметь вильчатое окончание или скобу. При проектировании фиксирующей системы штифтов (например, пружинный зажим) необходимо учитывать, что она должна воспринимать растягивающее усилие не менее 10 % от общей нагрузки сдвига (среза) на штифт.

Геометрия пластин в штифтовых соединениях с учетом соблюдения их размеров приведена на рисунке 52.

Для критических предельных состояний расчетная сила F_{Ed} , действующая на пластину, не должна превышать значение расчетного сопротивления, приведенное в таблице 31.

Для передачи расчетной силы от штифта к элементу и предотвращения появления эксцентриситета размеры пластин штифтовых соединений подбираются за счет увеличения рабочей площади элементов или повышения сопротивления смятию штифта.

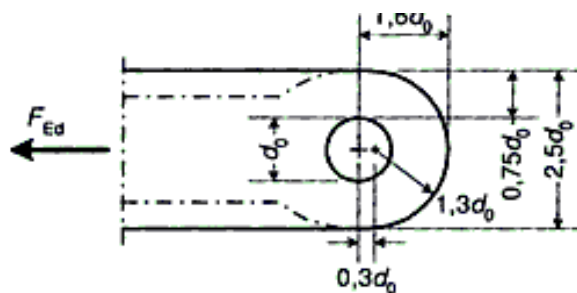
а) при данных толщине и диаметре отверстия.



$$a \geq \frac{F_{Ed} \gamma_{M1}}{2t f_0} + \frac{2d_0}{3}$$

$$c \geq \frac{F_{Ed} \gamma_{M1}}{2t f_0} + \frac{d_0}{3}$$

б) при данной геометрии



$$t \geq 0,7 \sqrt{\frac{F_{Ed} \gamma_{M1}}{f_0}}$$

$$d_0 \geq 1,75 \sqrt{\frac{F_{Ed} \gamma_{M1}}{f_0}}$$

d_0 — диаметр отверстия; t — толщина материала (пластины)

Рисунок 52[8.10]. Геометрические требования для элементов штифтовых соединений

Определение значений изгибающих моментов в штифте производится в соответствии с рисунком 53.

При рассмотрении критического предельного состояния расчетные значения сил и моментов, приложенных к штифту, не должны превышать соответствующие расчетные сопротивления, приведенные в таблице 31.

Таблица 31[8.7]

Расчетные сопротивления для штифтовых соединений	
Критерий	Сопротивление
Сдвиг (срез) штифта	$F_{v,Rd} = 0,6 A f_{up} / \gamma_{Mp}$
Изгиб штифта	$M_{Rd} = 0,8 W_{el} f_{up} / \gamma_{Mp}$
Сочетание сдвига (среза) и изгиба штифта	$[M_{Ed} / M_{Rd}]^2 + [F_{v,Ed} / F_{v,Rd}]^2 \leq 1,0$
Смятие пластины в штифтовом соединении	$F_{b,Rd} = 1,5 t d f_0 / \gamma_{M1}$
Смятие штифта в предельном состоянии эксплуатационной пригодности	$F_{b,Rd,ser} = 0,6 t d f_0 / \gamma_{M6,ser}$

$$M_{Ed} = F_{Ed} (2t_2 + 4e + t_1) / 8. \quad (214)$$

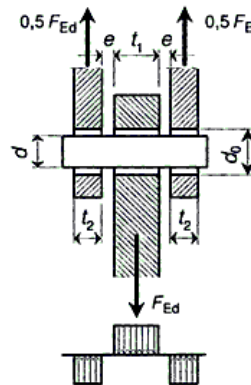
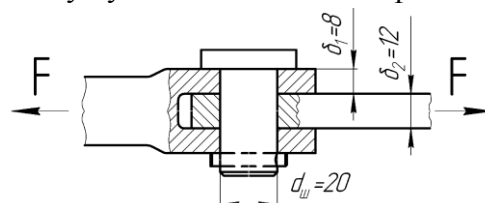
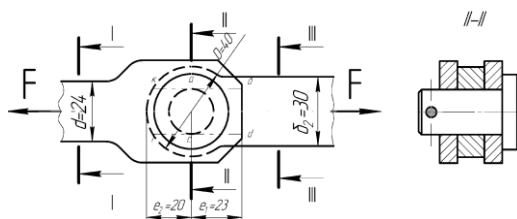


Рисунок 53[8.13]. Воздействия и влияние воздействий на штифт

ПРИМЕР 27. Дано: Тяги с двумя и одной проушинами соединены между собой штифтом согласно рисунку и загружены продольной силой. Материал конструкций: тяга с двумя проушинами и штифт – алюминиевый сплав EN AW-6082 T6 ER/B, $20 \leq t \leq 150$ мм, $f_0 = 260$ Н/мм², $f_u = 310$ Н/мм² (таб. 6); тяга с одной проушиной – EN AW-6082 T6, $20 \leq t$, $f_0 = 205$ Н/мм², $f_u = 280$ Н/мм² (таб. 5); $\gamma_{M1} = 1.1$, $\gamma_{M2} = 1.25$ (таб.10), $\gamma_{Mp} = 1.25$ (таб.11).

Требуется определить несущую способность штифтового соединения.





Допускаемая расчетная нагрузка на растяжение тяги с двумя проушинами.

Сечение I – I (неослабленное сечение) (34): $N_{0,Rd} = Af_0/\gamma_{M1} = 3.14 \times 24^2 \times 260 / (4 \times 1.1) = 106.87$ кН.

Сечение II – II (ослабленное сечение) (35): $N_{u,Rd} = 0.9A_{net} f_u/\gamma_{M2} = 0.9 \times [2(44 - 20) \times 8 \times 310] / 1.25 = 85.71$ кН.

Допускаемая расчетная нагрузка на растяжение тяги с одной проушиной.

Сечение III – III (неослабленное сечение) (34): $N_{0,Rd} = Af_0/\gamma_{M1} = 30 \times 12 \times 205 / 1.1 = 67.1$ кН.

Сечение II – II (ослабленное сечение) (35): $N_{u,Rd} = 0.9A_{net} f_u/\gamma_{M2} = 0.9 \times (40 - 20) \times 12 \times 280 / 1.25 = 48.38$ кН.

Допускаемая расчетная нагрузка на сдвиг (срез) штифта (таб. 31).

$F_{v,Rd} = 0.6A f_{up}/\gamma_{Mp} = 0.6 \times 3.14 \times 20^2 \times 310 / (4 \times \sqrt{3} \times 1.25) = 26.98$ кН.

Допускаемая расчетная нагрузка на смятие для тяг (таб. 31).

Площадь поперечного сечения тяг с двумя проушинами: $A_2 = 2 \times 8 \times 20 = 320$ мм²;

Площадь поперечного сечения тяги с одной проушиной: $A_1 = 12 \times 20 = 240$ мм².

Допускаемая нагрузка на смятие тяги с одной проушиной: $F_{b,Rd} = 1.5tdf_0/\gamma_{M1} = 1.5 \times 240 \times 205 / 1.1 = 67.09$ кН.

9.3 Сварные соединения

9.3.1 Согласно п. 8.6.1 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011 при проектировании сварных соединений необходимо рассматривать прочность сварных швов с учетом зоны термического влияния (HAZ).

[8.6.1] Указания по проектированию, приведенные в настоящем разделе, относятся к:

— технологическим процессам сварки MIG (дуговой сварки металлическим электродом в среде инертного газа) и TIG (дуговой сварки вольфрамовым электродом в среде инертного газа) для сварки материалов с толщиной в соответствии с таблицей 5 и таблицей 6, и при проведении ремонта;

— обеспечению уровня качества в соответствии со стандартом prEN 1090-3;

— сочетанию основного и присадочных металлов как указано в п. 2.6(3.3.4);

— конструкциям, подверженным преимущественно воздействию статических нагрузок.

В соответствии с требованиями п. 8.6.1 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011, если для основных несущих элементов конструкции вышеприведенные условия не выполняются, необходимо произвести сварку и испытания опытных образцов. Содержание этих испытаний утверждается контрактантами.

В случае указания более низкого уровня качества для вторичных или ненесущих

элементов необходимо использовать пониженные расчетные значения прочностей.

В Приложении Б рассмотрены различные виды сварки алюминиевых конструкций.

9.3.2[8.6.2] Учет зоны термического влияния HAZ должен выполняться для следующих классов алюминиевых сплавов (см. также раздел 6(6.5)).

- сплавы, подвергаемые термообработке, марки Т4 и выше (серий 6xxx и 7xxx);
- сплавы, не подвергаемые термообработке, в любом нагартованном состоянии (серий 3xxx, 5xxx и 8xxx).

При этом учитывается степень и размеры разупрочнения материалов в зоне термического влияния HAZ, приведенные в разделе 6(6.5). Как степень разупрочнения, так и размеры области, различаются при применении технологий сварки MIG и TIG. При сварке с применением технологии TIG учитывается более обширная зона HAZ и более интенсивное разупрочнение вследствие более высокой подводимой теплоты.

Характеристические значения прочности $f_{u,haz}$ для материала в зоне термического влияния HAZ приведены в таблицах 5-7. Характеристическая прочность сдвига в зоне HAZ определяется как $f_{v,haz} = f_{u,haz} / \sqrt{3}$.

9.3.3[8.6.3] При расчете сварных соединений необходимо выполнять следующее:

- расчет сварных швов (п.п. 9.3.5(8.6.3.2), 9.3.6(8.6.3.3));
- расчет прочности зоны термического влияния HAZ, примыкающей к сварке (п.9.3.7(8.6.3.4));
- расчет соединений с комбинированными сварными швами (п.9.3.8(8.6.3.5)).

Деформативные показатели сварного соединения могут быть улучшены, если расчетная прочность сварных швов больше, чем прочность материала в зоне термического влияния HAZ.

9.3.4 Согласно п.п. 8.6.3.1 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011 значения характеристической прочности наплавленного металла (f_w) принимаются из таблицы 32. Причем в сварных соединениях прочность наплавленного металла, как правило, ниже, чем прочность основного металла за исключением прочности в зоне термического влияния HAZ.

Характеристическая прочность наплавленного металла определяется с учетом вида используемого присадочного металла, который оказывает существенное влияние на прочность свариваемых элементов.

9.3.5 В соответствии с п.п. 8.6.3.2 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011 стыковые сварные швы с полным проплавлением, как правило, применяются при сварке основных несущих элементов конструкции.

За эффективную толщину сварного шва с полным проплавлением принимается толщина соединенных элементов. При разной толщине элементов в качестве эффективной толщины шва необходимо принять толщину самого тонкого элемента.

При расчете следует не принимать во внимание усиление или ослабление шва в указанных пределах.

При использовании начальных и конечных пластин эффективную длину сварки следует принять равной общей длине шва. В противном случае общую длину шва необходимо уменьшить на удвоенное значение t .

Стыковые сварные швы с частичным проплавлением используются только для со-

единения вторичных элементов конструкции и несущих элементов.

Для сварных швов с частичным проплавлением используется показатель эффективного сечения толщины шва t_e (рисунок 61).

Определение расчетных напряжений производится из следующих выражений:

— нормальная сила, растяжение или сжатие, перпендикулярное оси сварки (рисунок 54):

Таблица 32[8.8]

Характеристические сопротивления для сварных соединений										
Характеристическая прочность	Присадочный металл	Сплав								
		3103	5052	5083	5454	6060	6005A	6061	6082	7020
f_w [Н/мм ²]	5336	—	170	240	220	160	180	190	210	260
	4043A	95	—	—	—	150	160	170	190	210

1) Для сплавов EN AW-5754 и EN AW-5049 можно использовать значения для сплава 5454;
 — для сплавов EN AW-6063, EN AW-3005 и EN AW-5005 можно использовать значения для сплава 6060;
 — для сплава EN AW-6106 можно использовать значения для сплава 6005A;
 — для сплава EN AW-3004 можно использовать значения для сплава 6082;
 — для сплава EN AW-8011A значение, равное 100 Н/мм² может использоваться для присадочных металлов тип 4 и тип 5.

2) Если используются присадочные металлы 5056A, 5556A или 5183, необходимо применять значения для сплава 5356.

3) Если используются присадочные металлы 4047A или 3103, необходимо применять значения для сплава 4043A.

4) При сочетаниях различных сплавов необходимо использовать самую низкую характеристическую прочность наплавленных металлов.

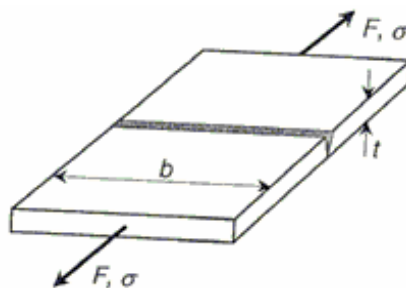


Рисунок 54[8.14]. Стыковой сварной шов при действии нормальной силы

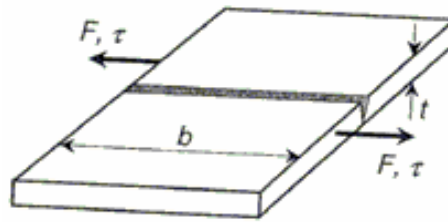


Рисунок 55[8.15]. Стыковой сварной шов, подверженный сдвигу

$$\sigma_{\perp Ed} \leq \frac{f_w}{\gamma_{Mw}} \quad (215)$$

— напряжение сдвига (рисунок 55):

$$\tau_{Ed} \leq 0,6 \frac{f_w}{\gamma_{Mw}} \quad (216)$$

— сочетание напряжений от действия нормальной силы и усилия сдвига:

$$\sqrt{\sigma_{\perp Ed}^2 + 3\tau_{Ed}^2} \leq \frac{f_w}{\gamma_{Mw}} \quad (217)$$

где f_w — характеристическая прочность сварного соединения в соответствии с таблицей 32;

$\sigma_{\perp Ed}$ — нормальное напряжение, перпендикулярное оси сварки;

τ_{Ed} — напряжение сдвига, параллельное оси сварки;

γ_{Mw} — частный коэффициент для сварных соединений.

9.3.6[8.6.3.3] Сечение стыкового шва определяется эффективной длиной сварки и эффективной толщиной сварного шва.

Эффективная длина сварки принимается равной общей длине сварки если:

- длина сварного шва, по крайней мере, в 8 раз больше его толщины в самом узком месте;
- при неравномерном распределении напряжений, когда длина сварочного шва не превышает более чем в 100 раз его толщину в самом узком месте;
- при постоянном распределении напряжений по длине сварки, как в примере соединения внахлестку на рисунке 56а.

В случае невыполнения, приведенные выше ограничений, эффективную длину сварки для продольных швов принимается равной:

$$L_{w,eff} = (1,2 - 0,2 L_w/100a) L_w \text{ при } L_w \geq 100a, \quad (218)$$

где $L_{w,eff}$ — эффективная длина продольного углового шва;

L_w — общая длина продольного углового сварного шва;

a — эффективная толщина шва.

При неравномерном распределении напряжений и использовании тонких длинных швов деформативная способность на концах может оказаться ниже расчетного предела прочности ранее, чем в середине; при этом соединение разрушается с эффектом «застежки-молнии».

Определение эффективной толщины шва a приведено на рисунке 56 (a соответствует высоте максимально вписанного в шов треугольника).

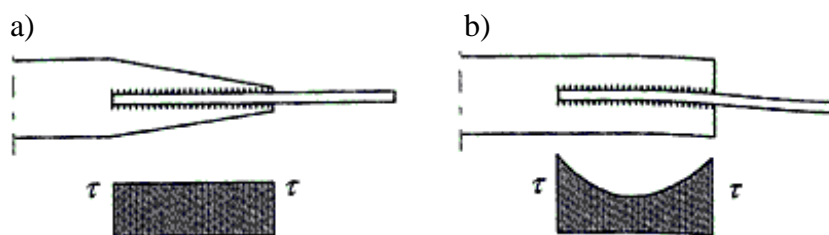


Рисунок 56[8.16]. Распределение напряжений в соединениях с угловыми сварными швами

а) пример равномерного распределения напряжения

б) пример неравномерного распределения напряжения

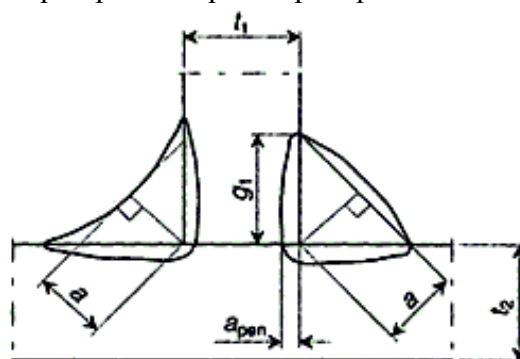


Рисунок 57[8.17]. Эффективная толщина шва a ; положительное проплавление у основания a_{pen}

В случае получения положительного стойкого проплавления у основания шва по результатам квалификационных испытаний образцов, для целей проектирования приняты следующие допущения:

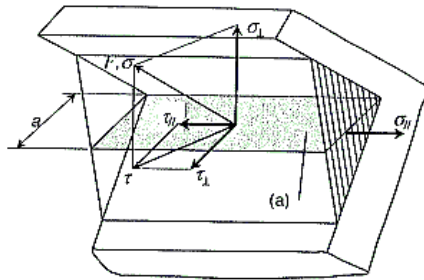
— расчетная толщина шва может быть увеличена на 20% или на 2 мм; в расчете принимается меньшее значение из: $a = 1,2a$, или $a = a + 2$ мм;

— при глубоком проплавлении угловых швов может быть принята во внимание дополнительная толщина шва, при условии проведения экспериментальной проверки. Таким образом: $a = a + a_{pen}$ (рисунок 57).

На рисунке 58 показано разложение силы, действующей на угловой сварной шов, на компоненты напряжений по отношению к сечению шва. Таковыми являются:

- нормальное напряжение $\sigma_{\perp Ed}$, перпендикулярное сечению шва сварки;
- нормальное напряжение $\sigma_{\parallel Ed}$, параллельное оси сварки;
- напряжение сдвига τ_{\perp} , воздействующее на сечение шва, перпендикулярно оси сварки;
- напряжение сдвига τ_{\parallel} , воздействующее на сечение шва, параллельно оси сварки.

Остаточные напряжения или напряжения, не участвующие в переносе нагрузки, при проверке прочности угловых сварных швов не учитываются (например, напряжение от нормальной силы $\sigma_{\parallel Ed}$, параллельное оси сварки).



(a) — сечение углового сварного шва

Рисунок 58[8.18]. Напряжения σ_{\perp} , τ_{\perp} , σ_{\parallel} , и τ_{\parallel} , действующие в сечении углового сварного шва

Расчетное сопротивление углового сварного шва должно удовлетворять условию:

$$\sqrt{\sigma_{\perp Ed}^2 + (3\tau_{\perp Ed}^2 + \tau_{\parallel Ed}^2)} \leq \frac{f_w}{\gamma_{Mw}} \quad (219)$$

где f_w — характеристическая прочность сварного соединения в соответствии с таблицей 32;

γ_{Mw} — частный коэффициент для сварного соединения.

При проектировании сварных швов рекомендуется применять следующие две формулы, полученные из выражения (219):

— для двойного углового сварного шва, нагруженного перпендикулярно к оси сварки (рисунок 59). Толщина сварного шва a должна удовлетворять следующему условию:

$$a \geq 0,7 \frac{\sigma_{Ed} t}{f_w / \gamma_{Mw}} \quad (220)$$

где σ_{Ed} — нормальное напряжение в прикрепленном элементе:

$$\sigma_{Ed} = F_{Ed} / t b f_w ; \quad (221)$$

F_{Ed} — расчетная нагрузка в соединяемых элементах;

f_w — характеристическая прочность сварного соединения в соответствии с таблицей 32;

t — толщина прикрепленного элемента соединения (рисунок 59);

b — ширина прикрепленного элемента соединения.

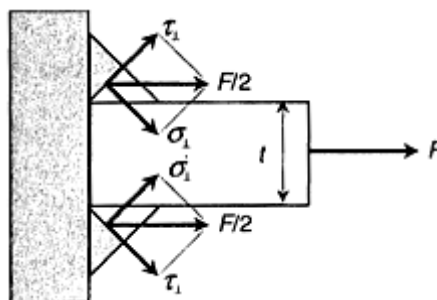


Рисунок 59[8.19]. Двойной угловой сварной шов, нагруженный перпендикулярно оси сварки

— для двойного углового сварного шва, нагруженного параллельно оси сварки (рисунок 60). Толщина сварного шва a должна удовлетворять следующему условию:

$$a \geq 0,85 \frac{\tau_{Ed} t}{f_w / \gamma_{Mw}} \quad (222)$$

где τ_{Ed} — напряжение сдвига в прикрепленном элементе соединения:

$$\tau_{Ed} = F_{Ed} / t b \quad (223)$$

F_{Ed} — расчетная нагрузка в соединяемых элементах;

f_w — характеристическая прочность сварного соединения в соответствии с таблицей 32;

t — толщина прикрепленного элемента соединения (рисунок 60);

b — высота прикрепленного элемента соединения (рисунок 60).

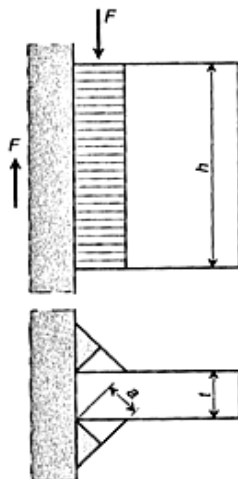


Рисунок 60[8.20]. Двойной угловой сварной шов, нагруженный параллельно оси сварки

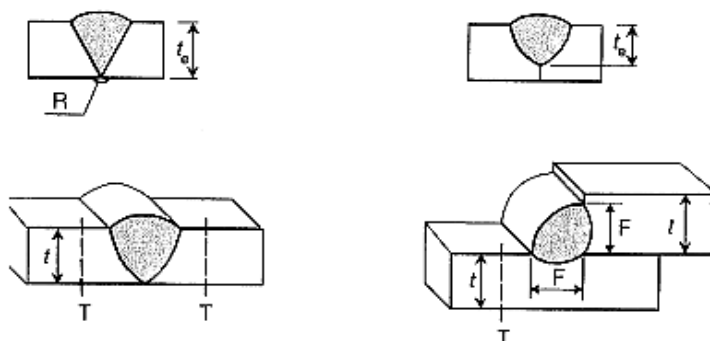
9.3.7[8.6.3.4] Рекомендуется производить расчет в зоне термического влияния HAZ, примыкающей к сварке, следующим образом:

а) определяется сила растяжения, перпендикулярная к плоскости разрушения (рисунок 61):

— в зоне HAZ для стыковых сварных швов:

— в основании шва (полное поперечное сечение):

$$\sigma_{haz, Ed} \leq f_{u, haz} / \gamma_{Mw}; \quad (224)$$



Линия F — зона HAZ на границе плавления; линия T — зона у основания шва, полное поперечное сечение, t_e — эффективная толщина шва, R — капля сварки

Рисунок 618.21]. Плоскости напряжений в зоне термического влияния HAZ, примыкающей к сварке

— в зоне HAZ для угловых сварных швов:

— на границе плавления и в основании шва (полное поперечное сечение):

$$\sigma_{\text{haz, Ed}} \leq f_{\text{u, haz}} / \gamma_{\text{Mw}}; \quad (225)$$

где $\sigma_{\text{haz, Ed}}$ — расчетное нормальное напряжение, перпендикулярное оси сварки;

t — толщина прикрепленного элемента соединения;

$f_{\text{u, haz}}$ — характеристическая прочность в зоне HAZ;

γ_{Mw} — частный коэффициент для сварного соединения

б) определяется усилие сдвига в плоскости разрушения:

— в зоне HAZ для стыковых сварных швов:

— в основании шва (полное поперечное сечение):

$$\tau_{\text{haz, Ed}} \leq f_{\text{v, haz}} / \gamma_{\text{Mw}}; \quad (226)$$

— в зоне HAZ для угловых сварных швов:

— в основании шва (полное поперечное сечение):

$$\tau_{\text{haz, Ed}} \leq f_{\text{v, haz}} / \gamma_{\text{Mw}}; \quad (227)$$

где $\tau_{\text{haz, Ed}}$ — напряжение сдвига, параллельное оси сварки;

$f_{\text{v, haz}}$ — характеристическая прочность сдвига в зоне HAZ;

γ_{Mw} — частный коэффициент для сварного соединения.

в) определяется сочетание силы растяжения и усилия сдвига (среза):

— в зоне HAZ для стыковых сварных швов:

— в основании шва (полное поперечное сечение);

$$\sqrt{\sigma_{\text{haz, Ed}}^2 + 3\tau_{\text{haz, Ed}}^2} \leq \frac{f_{\text{u, haz}}}{\gamma_{\text{Mw}}} \quad (228)$$

— в зоне HAZ для угловых сварных швов:

— в основании шва (полное поперечное сечение);

$$\sqrt{\sigma_{\text{haz, Ed}}^2 + 3\tau_{\text{haz, Ed}}^2} \leq \frac{f_{\text{u, haz}}}{\gamma_{\text{Mw}}} \quad (229)$$

9.3.8[8.6.3.5] При проектировании соединений с комбинированными сварными швами, рекомендуется применять один из следующих двух методов:

— метод 1: распределение нагрузок, действующих на сварные швы, так, чтобы они выдерживали эти нагрузки;

— метод 2: сварные швы рассчитаны для напряжений, возникающих в прилегающих основных металлах в различных частях соединения.

При применении одного из двух вышеуказанных методов, проектирование комбинированного сварного соединения сводится к проектированию обычных сварных соединений.

При использовании метода 1, необходимо проверить, обладают ли сварные соединения достаточной деформативной способностью воспринимать нагрузки с учетом упрощенного распределения. Причем, распределенные нагрузки в соединениях не должны приводить к перегрузкам соединяемых элементов.

При использовании метода 2, вышеупомянутые проблемы не существуют, однако иногда оказывается затруднительным определить напряжения в основных металлах и в

различных частях соединения.

Чаще всего используется упрощенное распределение нагрузок, как описано в методе 1. Поскольку фактическое распределение нагрузок между сварными швами в высокой степени неопределенно, такие предположения считаются удовлетворительными и приемлемыми, исходя из практики проектирования. Эти предположения приняты с учетом упругого восприятия нагрузок сварными соединениями.

При проектировании не требуется учитывать остаточные напряжения или другие напряжения, не участвующие в передаче нагрузки. Например, не требуется рассматривать напряжения, возникающие в соединениях вследствие малых эксцентриситетов.

9.3.9[8.7] В случае использования для передачи нагрузки сдвига различных форм крепежных элементов, или же, если применяется сочетание сварки и механического крепления (гибридные соединения), необходимо проверить совместность их работы.

Степень совместной работы можно оценить, рассматривая кривые изменения нагрузок для конкретного соединения совместно с каждым видом крепления или же посредством адекватного испытания узла гибридного соединения.

В частности, обычные болты с зазорами в отверстиях не функционируют совместно со сваркой.

Высокопрочные болты с предварительным натяжением в соединениях, спроектированных для устойчивости к проскальзыванию в критическом предельном состоянии (категория С в п. 9.1.4(8.5.3.1)), можно использовать для раздельной передачи нагрузки со сварными соединениями, при условии, что окончательная затяжка болтового соединения производится после завершения сварочных работ. Общая расчетная нагрузка должна быть представлена как сумма соответствующих сопротивлений каждого из крепежных элементов с учетом соответствующих частных коэффициентов безопасности γ_M .

9.3.10 Согласно п. 8.8 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011 при применении других методов соединений элементов алюминиевых конструкций необходимо руководствоваться указаниями соответствующих нормативных документов:

— адгезионные соединения, см. Приложение М СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011;

— механические крепежные элементы, см. СН РК EN 1999-1-4:2007/2011.

В случае отсутствия нормативных указаний для других методов соединений необходимо провести соответствующие испытания согласно стандарту СН РК EN 1990:2002+A1:2005/2011.

ПРИМЕР 28 Дано: Стык двутавровой сварной балки и колонны. Высота балки $h = 300$ мм, ширина полки $b_f = 120$ мм, толщина полки $t_f = 12$ мм, толщина стенки $t_w = 4$ мм, площадь сечения балки $A = 3984$ мм², момент инерции сечения $I_y = 6.676 \times 10^7$ мм⁴. Высота сечения колонны $h = 200$ мм, ширина полки $b = 160$ мм, толщина полки $t_f = 16$ мм, толщина стенки $t_w = 7$ мм, площадь сечения колонны $A = 6296$ мм², момент инерции сечения $I_y = 4.621 \times 10^7$ мм⁴. Материал конструкций – алюминиевый сплав EN AW-6082 T6 EP/O; $t > 5$ мм; $f_{u,haz} = 185$ Н/мм² (таб. 6); $f_w = 210$ Н/мм² (таб. 32); $\gamma_{Mw} = 1.25$ (таб. 11).

Требуется произвести расчет сварных швов в стыке.

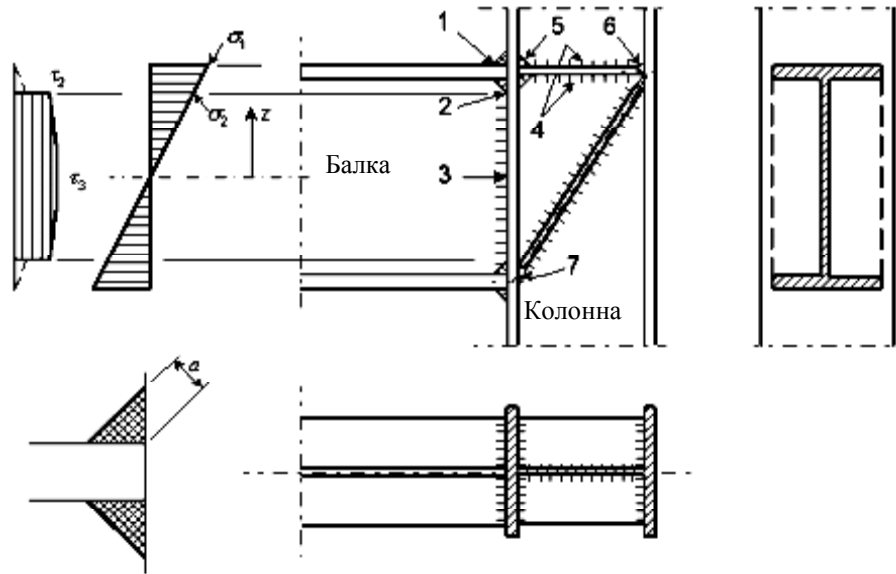
а) Расчет сварных швов балки

В крайнем опорном сечении балки действуют изгибающий момент $M_{Ed} = 64.4$ кНм и поперечная сила $V_{Ed} = 91.7$ кН.

Определяем нормальные напряжения в элементе.

В растянутой фибровой зоне (позиция 1).

$z = h/2 = 300/2 = 150$ мм; $\sigma_t = M_{Ed}z/I_y = 145$ МПа.



Нормальные напряжения в крайней фибре элемента раскладываются в сварочном шве на нормальную σ_{\perp} и касательную τ_{\perp} составляющие. Минимальная высота катета сварного шва $a = 8$ мм.

$\sigma_{\perp} = \frac{\sigma_t t_f}{2\sqrt{2}a} = 76.7$ МПа; $\sigma_{\perp} = \tau_{\perp} = 76.7$ МПа; касательными напряжениями τ_{\parallel} в полке пренебрегаем, тогда полное напряжение в угловом шве $\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3\tau_{\perp}^2} = 153$ МПа $< f_w/\gamma_{Mw} = 168$ МПа (219). Прочность углового шва по позиции 1 обеспечена.

В позиции 2 стенки балки.

$z = (h/2 - t_f - a\sqrt{2}) = 127$ мм; $\sigma_t = M_{Ed}z/I_y = 122$ МПа. Минимальная высота катета сварного шва $a = 5$ мм.

$\sigma_{\perp} = \frac{\sigma_t t_f}{2\sqrt{2}a} = 34.6$ МПа; $\tau_{\perp} = \sigma_{\perp} = 34.6$ МПа; статический момент для полки $S_z = b t_f (h/2 - t_f/2) = 1.037 \times 10^5$ мм³.

Касательные напряжения $\tau = \frac{V_{Ed} S_z}{t_w I_y} = 71.25$ МПа; в сварном шве $\tau_{\parallel} = \frac{\tau t_w}{2a_w} = 28.5$ МПа. Сравниваем с $\tau = \frac{V_{Ed}}{t_w (h - t_f)} = 79.6$ МПа.

Полное напряжение в шве $\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\parallel}^2 + \tau_{\perp}^2)} = 85$ МПа $< f_w/\gamma_{Mw} = 168$ МПа (219).

Прочность шва по позиции 2 обеспечена.

В позиции 3 (середина стенки балки).

$\sigma_t = 0$ МПа; $\tau = \frac{V_{Ed}}{t_w (h - t_f)} = 79.6$ МПа; в сварном шве $\tau_{\parallel} = \frac{\tau t_w}{2a_w} = 31.8$ МПа.

Полное напряжение в шве $\sqrt{3\tau_{\parallel}} = 55 \text{ МПа} < f_w/\gamma_{Mw} = 168 \text{ МПа}$ (219). Прочность шва по позиции 3 обеспечена.

б) Расчет прочности зоны HAZ балки

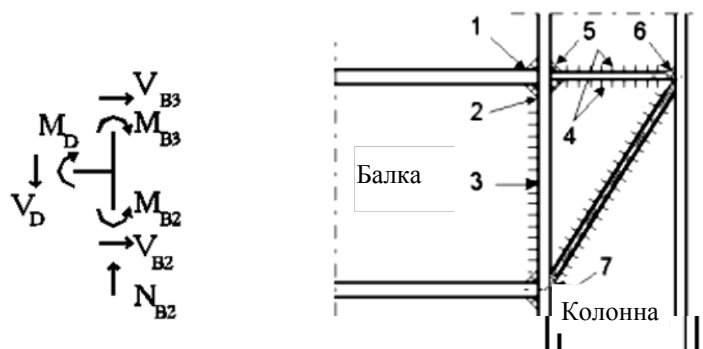
- в основании шва (228): $\sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} < f_{u,haz}/\gamma_{Mw}$;

- в полке: $\sigma = \sigma_t = 145 \text{ МПа}$; $\tau = 0 \text{ МПа}$; $\sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} = 145 \text{ МПа} < f_{u,haz}/\gamma_{Mw} = 148 \text{ МПа}$, т.е. прочность зоны HAZ обеспечена.

- в стенке: $\sigma = \sigma_t = 122 \text{ МПа}$; $\tau = 71.25 \text{ МПа}$; $\sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} = 174 \text{ МПа} > f_{u,haz}/\gamma_{Mw} = 148 \text{ МПа}$, т.е. прочность зоны HAZ не обеспечена. Необходимо увеличить высоту катета сварного шва.

в) Расчет сварных швов ребер жесткости на колонне.

В узле действуют изгибающие моменты $M_{B2} = -34 \text{ кНм}$, $M_{B3} = 32.4 \text{ кНм}$, $M_D = -64.4 \text{ кНм}$; поперечные силы $V_{B2} = -18.2 \text{ кН}$, $V_{B3} = 2.31 \text{ кН}$, $V_D = 91.7 \text{ кН}$; осевые силы $N_{B2} = -307 \text{ кН}$, $N_{B3} = 240 \text{ кН}$, $N_D = 0 \text{ кН}$.



Сварные швы (позиция 5) между верхним ребром жесткости и полками колонны.

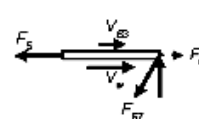
Эти швы воспринимают одинаковые усилия со швами по позиции 1. Проверку не производим.

Сварные швы (позиция 4) между верхним ребром жесткости и стенкой колонны.

Растягивающая сила в ребре жесткости равна усилию F_5 в верхней полке балки: $F_5 = (1 - t_f)\sigma_t b t_f = 200 \text{ кН}$; $h_{fD} = h - t_f$; $b_D = b$.

Это усилие F_5 находится в равновесии с поперечной силой V_{B3} в колонне выше ребра жесткости, поперечной силой V_w в стенке ниже ребра жесткости и с горизонтальной компонентой F_6 в диагональном ребре жесткости, т.е. $F_5 - V_{B3} - V_w - F_6 = 0$.

Сопротивление сдвигу в стенке ниже ребра жесткости ($f_0 = 255 \text{ Н/мм}^2$, (таб.10)): $V_{w0} = (h - 2t_f)t_w \frac{f_0}{\sqrt{3}\gamma_{M1}} = 157.4 \text{ кН}$; $V_{w,haz} = (h - 2t_f)t_w \frac{f_{v,haz}}{\sqrt{3}\gamma_{Mw}} = 100.5 \text{ кН}$ 100.5 кН.



Т.к. стенка колонны усилена ребром жесткости, проверку на продольный изгиб при сдвиге не производим.

Проверка сварного шва на сдвиг при действии поперечной нагрузки $V_{B3} + V_w = 102.81 \text{ кН}$. Принимаем $a_4 = 4 \text{ мм}$. Тогда $\tau = \frac{V_{B3} + V_w}{4a_4(h - 2t_f)} = 38.2 \text{ МПа} < \frac{f_w}{\sqrt{3}\gamma_{Mw}} = 97 \text{ МПа}$.

Ребро жесткости (позиция 4) и сварные швы по позиции 6.

Ребро жесткости растянуто под действием силы $F_5 = 200$ кН, ширина $b_D = 120$ мм, толщина $t_4 = 12$ мм.

$$\sigma = \frac{F_5}{b_D t_4} = 139 \text{ МПа} < f_{u,haz}/\gamma_{Mw} = 148 \text{ МПа};$$

$$\text{Стыковой шов по позиции 6: } \sigma = \frac{F_5 - V_{B3} - V_w}{b_D t_4} = 74 \text{ МПа} < \frac{f_w}{\gamma_{Mw}} = 168 \text{ МПа}.$$

Ребро жесткости (позиции 6-7).

$$F_6 = F_5 - V_{B3} - V_w = 97.2 \text{ кН}; F_{67} = F_6 \frac{\sqrt{(h-t_f)^2 + h_{fD}^2}}{h - t_f} = 199 \text{ кН}.$$

При ширине $b_D = 120$ мм, толщина $t_{67} = 12$ мм:

$$\sigma = \frac{F_{67}}{b_D t_{67}} = 138 \text{ МПа} < f_{u,haz}/\gamma_{Mw} = 148 \text{ МПа}.$$

Стыковые швы по позициям 6 и 7 (несимметричный стыковой шов): $\sigma = 138 \text{ МПа} < \frac{f_w}{\gamma_{Mw}} = 168 \text{ МПа}.$

Сварной шов между ребром жесткости и стенкой колонны выполнять по возможности минимальным.

10 КОРРОЗИЯ И ЗАЩИТА АЛЮМИНИЕВЫХ КОНСТРУКЦИЙ

10.1 Коррозия алюминия под воздействием различных атмосферных условий

10.1.1 В соответствии с п. D.1 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011 защитная оксидная пленка, которая образуется на поверхности материала под воздействием атмосферного воздуха, определяет коррозионную стойкость алюминиевых сплавов. Она образуется естественным образом под воздействием воздуха или кислорода, а также во многих сложносоставных атмосферах, содержащих кислород. Как правило, эта защитная пленка невидимая и сравнительно инертная, то есть, она является самоизолирующей.

Если поверхность алюминиевых конструкций находится в умеренных условиях окружающей среды, то она будет оставаться в своем первозданном виде многие годы. Для большинства алюминиевых сплавов разработки специальной защиты не потребуется.

В случае нахождения алюминиевых конструкций в умеренных промышленных условиях на их поверхности возможно проявление изменения цвета защитной пленки (потемнение) и образование шероховатостей.

Когда же атмосфера приобретает повышенную агрессивность за счет наличия и повышенного содержания кислот или щелочей, потеря цвета и шероховатость поверхности становятся более заметными. В такой среде на защитной оксидной пленке появляется белый порошкообразный налет, а сама пленка может растворяться. При таких условиях защищенность алюминиевых элементов от воздействия внешней среды будет снижена, что повлечет за собой создания дополнительной защиты. При наличии трещин в конструкциях подобные условия могут также возникнуть из-за высокой местной концентрации кислоты или щелочи, но количество химических веществ, имеющих такое экстремальное воздействие, сравнительно невелико.

В случае нахождения элементов алюминиевых конструкций в прибрежных водах и морской окружающей среде их поверхность приобретает шероховатый вид и серый, каменистый цвет. В таких условиях некоторым сплавам потребуется дополнительная защита. При погружении алюминиевых конструкций в воду возникает необходимость предпринять особые меры предосторожности.

10.1.2 Согласно п. D.1 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011, если рассматривать кривые зависимости коррозии от времени для алюминия и алюминиевых сплавов, то в случае проявления агрессивного воздействия на поверхности, они будут, как правило, иметь экспоненциальную форму. Первоначально после небольшого атмосферного старения на поверхности происходит потеря отражательной способности. Затем, в течение очень продолжительного периода времени дальнейшие изменения будут проявляться слишком слабо. Начальная стадия изменений под влиянием воздушной атмосферы может затянуться на довольно продолжительный срок (от нескольких месяцев до двух–трех лет). Затем в течение довольно длительного срока (двадцати, тридцати или даже восьмидесяти лет) изменения на поверхности сплавов будут малозаметными, или полностью будут отсутствовать. Аналогичное поведение зафиксировано при стабильных условиях внешнего обычного воздействия или во всех случаях внутреннего воздействия или защищенного

состояния, за исключением тех случаев, когда могут возникнуть экстремальные условия с повышенной кислотностью или выщелачиванию. В условиях тропической атмосферы разрушительные процессы для алюминия ни чем не отличаются от умеренной окружающей среды. Некоторые алюминиевые сплавы 5xxx-ной серии корродируют при длительном воздействии высоких окружающих температур, особенно при нахождении в морской воде.

10.1.3 В соответствии с п. D.1 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011 при проектировании алюминиевых конструкции необходима разработка антикоррозийных мероприятий с применением известных технологий. Тщательное дренирование деталей позволит избежать гальванической или щелевой коррозии, а разработка соответствующих разделов по антикоррозийной защите при проектировании помогут ее избежать.

В случае необходимости сохранения на продолжительное время декоративного внешнего вида алюминия, подходящими для обработки поверхности являются органические покрытия (жидкие лакокрасочные покрытия, порошковые напыления) и анодированное окисление. При назначении технических требований на исполнение должна быть выполнена их детальная проработка. Внешние цветовые решения необходимо учитывать, согласовывать и определять, например, с помощью фактурных образцов. В случае использования различных партий полуфабрикатов, различных партий лакокрасочных материалов и различных установок для нанесения покрытий могут возникнуть отличия в цвете.

Для определения вариантов подходящей поверхностной обработки перед нанесением декоративного покрытия необходимо принять во внимание такие факторы, как ремонтпригодность, сопротивление атмосферному воздействию и возможность чистки. Технические требования на анодированное окисление приводятся в стандарте EN 12373-1.

10.2 Классы долговечности алюминиевых сплавов

В соответствии с требованиями п. D.2 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011 в таблицах 1 и 2 для алюминиевых сплавов установлены три класса по долговечности, от А до С в порядке ее снижения. Этими классами определяется необходимость и степени необходимой защиты. В случае применения в алюминиевых конструкциях элементов из различных сплавов, включая присадочные металлы в сварных швах, при определении класса их долговечности принимается наименьший.

В Приложении С СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011 приведена полная информация о классах долговечности алюминиевых сплавов.

Рекомендации по антикоррозийной защите для различных атмосферных условий и классов долговечности приведены в таблице 33.

10.3 Антикоррозийная защита

Согласно п. D.3.1 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011 при разработке технических условий на изготовление алюминиевых конструкций необходимо учитывать тип и объем антикоррозионной обработки.

Тип антикоррозийной защиты зависит от механизма коррозии. Например, это может

быть трещинная коррозия, поверхностная коррозия, коррозия гальванического происхождения и коррозия, вызванная загрязнением другими строительными материалами. Трещинная коррозия может возникнуть при любом типе трещин в элементах алюминиевых конструкций, а также на стыке между металлом и неметаллом (пластмасса и пр.). Гальваническая коррозия может быть спровоцирована особыми условиями строительства, например, если поверх алюминиевых стропильных элементов укладывается медное кровельное покрытие, то есть возникает гальваническая пара.

Для выбора эффективной антикоррозийной защиты, необходимо принимать во внимание следующие факторы:

- имеется ли возможность проведения ремонта для ликвидации повреждений органических покрытий на поверхности элементов алюминиевых строительных конструкций;
- обеспечить сохранность анодированных деталей алюминиевых конструкций при транспортировке и проведении монтажно-строительных работ, для чего рекомендуется использование защитной фольги.

Использование анодированного окисления и нанесение органических покрытий на поверхности деталей во многих обстоятельствах эквивалентно. В особых условиях выбор поверхностной обработки зависит от химического состава коррозионных веществ и от условий окружающей среды, которые будут влиять на коррозионное воздействие.

Технические требования на выполнение анодированного окисления поверхностей приведены в стандарте EN 12373-1.

Для кратковременной защиты или при наличии умеренных атмосферных условий возможно применение только поверхностной протравки.

10.4 Общая антикоррозийная защита конструкционного алюминия

10.4.1 В соответствии с требованиями п. D.3.2 СН РК EN 1999-1-1:2007 +A1:2009/2011, если алюминиевые конструкции, выполненные из сплавов, подвергаются различным воздействиям окружающей среды, то согласно указаниям таблицы 33 необходимо обеспечить общую антикоррозийную защиту для материалов, перечисленных в таблицах 1 и 2.

Методические указания по выбору и обеспечению антикоррозийной защиты приведены в стандарте prEN 1090-3.

Указания по применению защитной обработки листового материала, используемого для крыш и наружной облицовки, приведены в стандарте prEN 508-2:1996.

При анализе таблицы 33 можно сделать вывод о том, что для определенной атмосферы необходимо принимать во внимание наличие местных отличий («микроклиматы»), существенно отличающихся от параметров окружающей среды, типичных для региона в целом. Например, регион, обозначенный как «сельский», может иметь участки, где местная окружающая среда больше будет напоминать промышленную атмосферу, если они находятся рядом с заводами или по ветру к ним.

В случае нахождения рассматриваемого участка, находящегося рядом с морем, но расположенного рядом с береговыми сооружениями, может, при наличии соответствующих преобладающих ветров, иметь параметры скорее промышленной, чем морской атмо-

сферы.

Параметры окружающей среды для алюминиевых конструкций, расположенных внутри сооружения, могут значительно отличаться, чем для конструкций, находящихся снаружи.

10.4.2 Согласно п. D.3.2 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011 наличие и уровень проявления коррозии алюминиевых конструкций зависит не только от степени восприимчивости к ней материалов и параметров окружающей среды, но и от того периода времени, в течение которого в окружающей среде присутствует влага в сочетании с накопившейся грязью и коррозионными веществами. Особенно это проявляется для тех элементов или деталей конструкций, на которых скапливается или задерживается грязь, чем участков, где атмосферные осадки очищают поверхность, а приносящий их ветер способствует быстрому высушиванию. Проявление указанного эффекта позволяет сделать вывод о том, что необходимо избегать устройства крытых карнизов. Кроме того, рекомендуется применять эффективные водоотводящие системы и избегать образования заполненных влагой углублений.

10.4.3 В соответствии с требованиями п. D.3.2 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011 при определении потребности и уровня необходимой антикоррозионной защиты следует принимать во внимание условия эксплуатации сооружений из алюминиевых конструкций. При коротком сроке эксплуатации вполне возможно предусмотреть минимальные мероприятия по защите или вообще обойтись без них.

В местах, где в результате плановой проверки или обслуживания может быть обнаружено зарождение коррозии на ранних стадиях, что позволит вовремя принять соответствующие меры по ее устранению, назначается минимальный начальный уровень защиты конструкций.

Для участков, где проведение проверок практически нереально и признаки коррозионного воздействия обнаружить невозможно, назначается более высокий начальный уровень защиты.

На основании вышеперечисленного, в тех случаях, которые в таблице 33 обозначены буквой Р, потребность и уровень антикоррозионной защиты устанавливается техническими условиями, разрабатываемыми совместно с конструктором, изготовителем и, в случае необходимости, со специалистом по коррозии.

Кроме того, наряду с этими факторами, вполне вероятно проявление местных более неблагоприятных внешних факторов. Поэтому рекомендуется перед выбором в таблице 33 колонки с соответствующей окружающей средой эксплуатации алюминиевых конструкций, необходимо изучить реальные условия, преобладающие на конкретной строительной площадке.

10.4.4 Согласно п. D.3.2 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011 при использовании пустотелых элементов алюминиевых конструкций, необходимо предусмотреть мероприятия по защите внутренней полости для предотвращения коррозии, возникающей при попадании внутрь коррозионных веществ. В таких случаях рекомендуется использовать химическое конверсионное покрытие, так как окрашивание таких элементов конструкций изнутри довольно трудоемко. В случае обеспечения надежной изоляции внутренних поло-

стей или невозможности скопления воды внутри элемента конструкции, внутренняя защита не требуется.

10.5 Алюминий в контакте с алюминием и другими металлами

В соответствии с требованиями п. D.3.3 СН РК EN 1999-1-1:2007+ A1:2009/2011 возникновение электрохимической коррозии в алюминиевых конструкциях может быть обусловлено наличием контактирующих поверхностей в трещинах, а также контактами с другими металлами или прокладками из определенных металлов. Аналогичные условия могут возникнуть и в соединениях конструкций. Необходимо обеспечить дополнительную защиту контактными поверхностям и соединениям алюминия с алюминием или с другими металлами, согласно указаниям в таблице 34, помимо той, которая регламентируется положениями таблицы 33. Те же требования необходимо соблюдать относительно контактных поверхностей в болтовых и заклепочных соединениях, сварке, а также при использовании высокопрочных фрикционных зажимов на болтах.

Требования по выполнению антикоррозийной защиты для данных соединений алюминиевых конструкций приводятся в стандарте prEN 1090-3.

Указания по применению защитной обработки соединений листового материала, используемого для крыш и наружной облицовки, приведены в стандарте prEN 508-2:1996.

При проведении сборки предварительно окрашенных или защищенных элементов в технических условиях по выполнению антикоррозионной защиты необходимо учесть нанесение дополнительной изоляции на контактирующие поверхности с указанием типа и процедуры изоляции. При разработке технических требований необходимо учесть предполагаемый срок эксплуатации конструкций, характер воздействия внешних факторов и качество защиты у предварительно защищенных элементов.

10.6 Алюминиевые поверхности, находящиеся в контакте с неметаллическими материалами

10.6.1 Согласно п.п. D.3.4.1 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011 необходимо предусматривать для алюминиевых конструкций, находящихся в сухой незагрязненной или умеренной окружающей среде, нанесение защитного покрытия в виде битумной окраски или иного покрытия, обеспечивающего аналогичную защиту в местах контакта с плотно уложенным бетоном, каменной кладкой или штукатуркой, на контактирующих поверхностях.

В случае нахождения конструкций в промышленной или морской окружающей среде контактирующие поверхности алюминия и его сплавов должны быть покрыты, по крайней мере, двумя слоями битумной краски повышенной стойкости. Причем поверхность контактирующего материала также должна быть покрыта такой же краской.

При нахождении конструкций в погруженном состоянии контакт между алюминием и подобными материалами не рекомендуется. В противном случае, если этого невозможно избежать, необходимо предусмотреть возможность разделения материалов с использова-

нием специальных защитных мастик или путем нанесения слоя гидроизоляции повышенной стойкости.

В случае использования легких бетонов в контакте с алюминиевыми изделиями защитные мероприятия для них необходимо рассматривать отдельно, если вода или увеличивающаяся влажность могут привести к постоянному присутствию агрессивной щелочной среды в результате вытяжки из цемента. Причем вода с повышенным содержанием щелочи может воздействовать по всей поверхности элементов алюминиевых конструкций, а не только в зонах непосредственного контакта.

10.6.2 В соответствии с требованиями п.п. D.3.4.2 СН РК EN 1999-1-1:2007+ A1:2009/2011 при заделке в бетон поверхности алюминиевых конструкций должны иметь защиту, по крайней мере, из двух слоев битумной окраски или горячего битума, при этом покрытие должно выходить не меньше чем на 75 мм выше поверхности бетона.

При повышенном содержании в бетоне солей хлористоводородной кислоты, применяемых в качестве добавок или вследствие использования морского землесосного снаряда, то рекомендуется нанесение, по крайней мере, двух слоев пластифицированной каменноугольной смолы. Использование такого вида антикоррозионной защиты должно регламентироваться инструкциями изготовителя. После окончательного затвердевания бетона для изоляции поверхности смонтированной конструкции необходимо ее по месту окрасить тем же защитным материалом. При этом необходимо обратить особое внимание на места возможного контакта между алюминиевыми деталями и элементами арматурного каркаса.

10.6.3 Согласно п.п. D.3.4.3 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011 применяемую в промышленной, влажной или морской окружающей среде древесину необходимо загрунтовать и окрасить специальными составами.

Некоторые защитные составы, используемые для предохранения древесины, обладают активными коррозионными свойствами по отношению к алюминию и его сплавам. Рекомендуется применение следующих защитных средств, которые, в общем случае, относятся к безвредным для использования с алюминием без дополнительных мер предосторожности:

— креозот; нафтенаты цинка и карбоксилаты цинка; композиции, содержащие неионогенные органические биоциды (пропиконазол, карбендазим), а также произведенные из растворителей защитные средства.

Следующие защитные средства рекомендуются использовать только в сухих условиях и при наличии достаточного слоя изоляции алюминиевой поверхности, контактирующей с обработанной древесиной:

— нафтенат меди; фиксированные СС-, ССА- и ССВ-предохраняющие средства; композиции, содержащие производные бора или производные четвертичных солей аммония.

Следующие защитные средства не рекомендованы для использования совместно с алюминием и его сплавами:

— нефиксированные неорганические композиции, содержащие растворимые в воде

производные меди или цинка, а также композиции, содержащие кислотные или щелочные компоненты ($\text{pH} < 5$ и $\text{pH} > 8$).

Дуб, орех и западный можжевельник виргинский, если они хорошо не высушены в естественных условиях, обладают разрушительными свойствами для алюминия, особенно в местах сквозного крепления.

10.6.4 В соответствии с требованиями п.п. D.3.4.4 и п.п. D.3.4.5 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011 при контакте с землей поверхность алюминиевых конструкций должна быть защищена, по крайней мере, двумя слоями битумной окраски, горячего битума или пластифицированной каменноугольной смолы. Для предотвращения механических повреждений защитного покрытия элементов возможно использование дополнительной оберточной пленки.

При нахождении алюминиевых конструкций в пресной или морской воде, в том числе и в загрязненной воде, рекомендуется класс долговечности А. Кроме того, соединения выполняются из алюминия, коррозионно-устойчивой стали, или применяется крепление при помощи сварки. В таблицах 33 и 34 приведены требования к защите алюминия и его сплавов, погруженных в пресную или морскую воду.

Для учета всех факторов, влияющих на степень необходимой защиты, рекомендуется получить данные по содержанию кислорода, показателю кислотности, содержанию химических элементов, особенно меди, а также объемы перемещаемой воды.

10.6.5 Согласно п.п. D.3.4.6 СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011, в связи с тем, что противогрибковые средства и репелленты против плесени, которые используются для обработки поверхностей строительных конструкций, могут содержать компоненты, в состав которых входят металлы, такие как, медь, ртуть, олово или свинец. Во влажных или сырых окружающих условиях применение таких препаратов может привести к коррозии алюминия. Для предотвращения разрушительного воздействия рекомендуется предусмотреть специальную защиту контактирующих поверхностей, которые могут подвергнуться промывке или просачиванию химически активных веществ.

Кроме того, на поверхность алюминиевых конструкций могут воздействовать некоторые чистящие материалы ($\text{pH} < 5$ и $\text{pH} > 8$). При использовании таких химических веществ для очистки поверхностей алюминия или других материалов в конструкциях, необходимо проявлять осторожность, чтобы ограничить их губительное воздействие на алюминий. Одним из способов такого ограничения является быстрое смывание соответствующим количеством воды. При более сложных ситуациях возможно использование временных мер по защите алюминия от контакта с очищающими средствами.

10.6.6 В соответствии с требованиями п.п. D.3.4.7 СН РК EN 1999-1-1:2007+ A1:2009/2011 различные изолирующие изделия, такие как стекловолокно, полиуретан и другие, могут содержать химические вещества, которые выделяются во влажных условиях и могут вызвать коррозию алюминиевых конструкций. Для определения их сочетаемости с алюминием во влажных и соледержащих условиях рекомендуется проводить испытания изоляционных изделий. В противном случае, следует применять герметики для нанесения на соответствующие алюминиевые поверхности

Таблица 33[D.1]

Рекомендации по антикоррозийной обработке для различных атмосферных условий и классов долговечности									
Класс долговечности сплава	Толщина материала мм	Защита в зависимости от воздействия							
		Атмосферное						Погружное	
		Сель-ская	Промышленная/городская		Морская			Прес-ная вода	Мор-ская вода
			Средняя	Суровая	Не промыш-ленная	Средняя	Суро-вая		
A	Все	0	0	(Pr)	0	0		0	(Pr)
B	<3	0	0	(Pr)	(Pr)	(Pr)	(Pr)	Pr	Pr
	≥3	0	0	0	0	0	(Pr)	(Pr)	Pr
C	Все	0	0 ²⁾	(Pr) ²⁾	0 ²⁾	0 ²⁾	(Pr) ²⁾	(Pr) ¹⁾	NR
<p>0 — как правило, защита не требуется;</p> <p>Pr — как правило, требуется защита, за исключением особых случаев (п.п. 10.6-10.9(D.3.2));</p> <p>(Pr) — необходимость в защите определяется тем, есть ли особые условия для конструкции (п.п. 10.4.1-10.4.4(D.3.2)). Если необходимость существует, это должно быть указано в технических требованиях на конструкцию NR. Погружение в морскую воду не рекомендуется.</p> <p>¹⁾ Для сплава 7020, защита требуется только в области, подвергшейся нагреванию (HAZ), если после сварки термическая обработка не применялась</p> <p>²⁾ Если, для сплава 7020, после сварки термическая обработка не применялась, потребность в защите области HAZ должна определяться с учетом условий, изложенных в п.п.10.4.1-10.4.4(D.3.2).</p> <p>ПРИМЕЧАНИЕ Что касается защитной обработки листового материала, используемого для крыш и наружной облицовки, см. стандарт prEN 508-2:1996.</p>									

Таблица 34[D.2]

Дополнительная защита контактов металлов с металлами для предотвращения трещинного и гальванического воздействий																				
Металл, соединяемый с алюминием	Материал болтов или заклепок	Защита в зависимости от воздействия окружающей среды																		
		Атмосферное								Морское						Погруженное				
		Сельская				Промышленная/городская				Не промышленная		Промышленная				Пресная вода		Морская вода		
		Сухая,не-загряз-ненная		Мягкая		Умеренная		Суровая				Умеренная		Суровая						
(М)	(В/Р)	М	В/Р	М	В/Р	М	В/Р	М	В/Р	М	В/Р	М	В/Р	М	В/Р	М	В/Р	М	В/Р	
Алюминий	Алюминий	0	0	0	0	0/X	0	X _a	1	0/X	(1)	0/X _a	(1)	X _a z	1	X	1	X	1	
	Нержавеющая сталь		0		0		0		0		1		(1)		0/X _a		1		1	1 2
	Оцинкованная сталь		0		(2)		(1) (2)		1 (2)		(1) (2)		(1) (2)		1 (2)		1 2		1 2	
Оцинкованная сталь	Алюминий	0	0	0	0	0/X _a	0	X _a z	1	0/X _a	(1)	0/X _a	(1)	X _a z	1	X _z	1	Y (Z) z	1 2	
	Нержавеющая сталь		0		0		0		1		0		(1)		1		1 (2)		1 2	
	Оцинкованная сталь		0		(2)		(2)		1 (2)		(1) (2)		1 (2)		1 (2)		1 2		1 2	
Нержавею-щая сталь	Алюминий	0	0	0	0	0/X _a	0	X _a z	1	0/X _a	(1)	0/X _a	(1)	X _a	1	Y (X) (Z)	1 2	Y (Z)	1 2	
	Нержавеющая сталь		0		0		0		1		0		(1)		1		1		1 2	
	Оцинкованная сталь		0		(2)		(2)		1 (2)		(1) (2)		(1) (2)		1 (2)		1 2		1 2	
<p>ПРИМЕЧАНИЕ 1 Общая защита алюминиевых деталей должна быть определена в соответствии с таблицей 33.</p> <p>ПРИМЕЧАНИЕ 2 Элементы в скобках () должны иметь значения с учетом п.п.10.4.1-10.4.4(D.3.2).</p> <p>ПРИМЕЧАНИЕ 3 Что касается защитной обработки листового материала, используемого для крыш и наружной облицовки, смотрите стандарт pr EN 508-2:1996.</p> <p>ПРИМЕЧАНИЕ 4 Что касается нержавеющей стали, смотрите также стандарт EN 1993-1-4.</p>																				

Условные обозначения:

Обработка, применяемая к контактирующим областям конструктивных элементов:

Процедура 0. Как правило, причины, вызывающие коррозию, не требуют обработку.

Процедура 0/X. Обработка зависит от конструктивных условий. Небольшие контактирующие и быстро высыхающие области могут быть собраны без герметизации (смотрите процедуру X).

Процедура X. Обе контактирующие поверхности должны быть собраны таким образом, чтобы не оставалось щелей, в которые может проникнуть вода. Обе контактирующие поверхности, включая отверстия под болты и заклепки, до сборки должны быть очищены, предварительно обработаны и на них должен быть нанесен один слой грунтовки, смотрите prEN 1090-3, или герметизирующий компонент, так чтобы он выступал за пределы контактирующей области. Поверхности должны быть соединены вместе, пока слой грунтовки еще влажный. Если собираются предварительно окрашенные или защищенные компоненты, герметизация контактирующих поверхностей может быть ненужной, в зависимости от состава краски или действовавшей защитной системы, предполагаемого срока эксплуатации и окружающей среды.

Процедура Y. Полная электрическая изоляция между двумя металлами и всеми крепежными деталями должна быть обеспечена за счет установки неабсорбирующих, неэлектропроводящих пленок, шайб и прокладок, чтобы предотвратить контакт между материалами. Может потребоваться использование дополнительного покрытия или герметиков.

Процедура Z. Там, где требуется процедура Y и передача нагрузки через соединение препятствует использованию герметизирующего материала, соединение должно быть собрано без использования изолирующих материалов, но с выполнением полной внешней изоляции всей сборки, чтобы предотвратить проникновение влаги к элементам соединения. Процедуры должны быть установлены по согласованию между заинтересованными сторонами.

Обработка, применяемая к болтам и заклепкам.

Процедура 0. Как правило, никакой дополнительной обработки не требуется.

Процедура 1. Между головками болтов, гайками, шайбами и соединяемыми материалами должны быть установлены инертные прокладки или герметизирующая масса, чтобы заизолировать соединение и предотвратить попадание влаги на контактирующую поверхность между компонентами и крепежными деталями. Необходимо проявлять осторожность, чтобы гарантировать, что перемещение нагрузки через соединение не окажет негативного воздействия на прокладки или герметизирующую массу.

Процедура 2. Там, где соединение не покрашено или не имеет покрытия по другим причинам, головки болтов, гайки и заклепки, а также близлежащие участки, как указывается ниже, должны быть защищены, по крайней мере, одним слоем грунтовки (prEN 1090-3). Особое внимание следует уделить изолированию всех пустот) Там, где используются оцинкованные болты, защита соединения со стороны алюминия не требуется. Там, где используются алюминиевые болты или заклепки, защита соединения со стороны алюминия не требуется. Там, где используются болты из нержавеющей стали в комбинации с алюминиевыми или оцинкованными стальными деталями, близлежащая оцинкованная область соединения должна иметь аналогичную защиту.

Дополнительная обработка

Процедура a. Если прилегающие металлические детали контактирующей области не были окрашены по другим причинам, может потребоваться защитить их с помощью соответствующего лакокрасочного покрытия в тех случаях, когда может скапливаться грязь или удерживаться влага.

Процедура z Может потребоваться дополнительная защита оцинкованных конструктивных деталей в целом.

11 ПРОЕКТИРОВАНИЕ АЛЮМИНИЕВЫХ КОНСТРУКЦИЙ

11.1 Общие указания

11.1.1 При проектировании алюминиевых конструкций необходимо:

а) предусматривать связи, обеспечивающие в процессе монтажа и эксплуатации устойчивость и пространственную неизменяемость сооружения в целом и его элементов, назначая их в зависимости от основных параметров и режима эксплуатации сооружения (конструктивной схемы пролетов, температурных воздействий и т.д.);

б) учитывать производственные возможности предприятий-изготовителей металлоконструкций и мощность подъемно-транспортного оборудования монтажных организаций;

в) компоновать элементы конструкций из наименьшего числа деталей;

г) использовать металл с наименьшими отходами и потерями путем соответствующего размещения стыков в конструкции;

д) предусматривать конструктивные решения и производить разбивку конструкций на отправочные элементы с учетом рационального и экономичного транспортирования их на строительство;

е) предусматривать возможность укрупнения отправочных элементов конструкций на строительной площадке для монтажа их крупными блоками и обеспечения устойчивости отдельных элементов и блоков сооружения в процессе монтажа;

ж) предусматривать монтажные крепления элементов, обеспечивающие возможность их легкой сборки и удобного выполнения соединений на монтаже (устройство монтажных столиков и т.п.), а также быстроту выверки конструкций;

з) предусматривать монтажные соединения элементов болтовыми; сварные и клепаные монтажные соединения допускать лишь в тех случаях, когда применение болтов не рационально или не разрешается нормативными документами.

11.1.2 Прогибы и перемещения элементов конструкций не должны превышать предельных, установленных в нормативных документах. При установлении характеристических значений прогибов и перемещений учитываются нормальные условия для пребывания людей, работа технологического оборудования, сохранность ограждающих конструкций.

11.1.3 Ограждающие конструкции зданий (стены и покрытия, отдельные панели, настилы и их стыки), а также детали крепления ограждений к каркасу здания следует проектировать с учетом изменения температуры в течение года, обеспечивая при этом свободу температурных деформаций при сохранении теплотехнических свойств и герметичности ограждений.

11.1.4. При расчете ограждающих конструкций значения изменений температуры наружных поверхностей следует определять исходя из расчетных значений температуры наружного воздуха в летнее и в зимнее время года. При этом в летнее время должно быть учтено воздействие солнечной радиации.

11.1.5 Расчетные перепады температуры между наружными и внутренними поверх-

ностями ограждающих конструкций следует принимать с учетом внутреннего температурного режима эксплуатации здания.

11.1.6 Выбор материала для утеплителя, клея и герметиков при проектировании ограждающих конструкций следует производить с учетом величин расчетных перепадов температуры между наружными и внутренними поверхностями ограждающих конструкций.

11.1.7 При технико-экономическом обосновании в конструкциях допускается применять алюминий в сочетании с другими строительными материалами (алюминий и дерево в оконных и дверных конструкциях, алюминий и полимеры в стеновых и кровельных конструкциях и др.). При этом необходимо учитывать различие в величинах модулей упругости и коэффициентов линейного расширения материалов, а также предусматривать мероприятия по защите алюминия от контактной коррозии.

11.1.8 В конструкциях сборно-разборных зданий алюминий следует применять в виде:

— ограждающих полносборных элементов для стен, кровли, перегородок, дверных и оконных проемов и др.;

— несущих элементов полной заводской готовности с монтажными соединениями на болтах и др.

11.1.9 При проектировании элементов ограждающих и несущих конструкций сборно-разборных зданий следует предусматривать их взаимозаменяемость. Монтажные узлы и стыки необходимо располагать в местах, исключающих скопление грязи, пыли, влаги и др.

11.1.10 При транспортировании следует предусматривать сохранность элементов сборно-разборных зданий и сооружений путем их пакетирования и перевозки в контейнерах.

11.1.11 Для защитно-декоративной отделки алюминиевых конструкций и изделий архитектурного назначения надлежит применять материалы, предусмотренные государственными стандартами и типовыми чертежами конструкций соответствующего вида.

11.1.12 Ограждающие конструкции следует проектировать совместно с разработкой необходимых приборов открывания, фиксации, а также других изделий и материалов.

11.1.13 При проектировании ограждающих алюминиевых конструкций необходимо обеспечить возможность легкой замены элементов, подверженных ускоренному старению, износу или ремонту (например, уплотнительных прокладок, стекла и др.).

11.1.14 Коррозионную стойкость алюминиевых конструкций производственных и сельскохозяйственных зданий и сооружений, подвергающихся воздействию агрессивных сред, следует обеспечивать путем выбора марки и состояния алюминия, назначения рациональных конструктивных форм и минимальных толщин.

Приложение А
(обязательное)

Материалы, определенные на национальном уровне

Т а б л и ц а А.1. Характеристические значения условного предела текучести f_0 , предела прочности на растяжение f_u , удлинения δ листов и лент для закалов с $f_0 > 165 \text{ Н/мм}^2$ и толщиной от 0,5 до 6 мм

Марка алюминиевого сплава по НД (по ISO 209-1-89) и плакировка	Состояние материала листов	Обозначение сплава и состояние материала	Состояние испытываемых образцов	Толщина листа, мм	Механические свойства при растяжении		
					Временное сопротивление f_u , Н/мм ²	Предел текучести f_0 , Н/мм ²	Относительное удлинение δ , %
					Не менее		
Ленты (ГОСТ 13726-97) и листы (ГОСТ 21631-76)							
АМгЗ (AlMg3)	Полунагартованные	АМгЗН2	Полунагартованные	От 0,5 до 1,0 Св. 1,0 до 4,0	245	195	7,0
					245	195	7,0
Листы (ГОСТ 21631-76)							
Д16Б, Д16 (AlCuMg1)	Нагартованные после закалки и естественного старения	Д16БТН, Д16ТН	Нагартованные после закалки и естественного старения	От 1,5 до 3,0 Св. 3,0 до 6,0	475	360	10,0
					475	360	8,0
Д16А (AlCuMg1)	Нагартованные после закалки и естественного старения	Д16АТН	Нагартованные после закалки и естественного старения	От 1,5 до 1,9 Св. 1,9 до 6,0	425	335	10,0
					455	345	8,0
Ленты (ГОСТ 13726-97)							
АМг6Б, АМг6	Нагартованные	АМг6БН, АМг6Н	Нагартованные	От 1.0 до 4.0 включительно	375	275	6,0

Приложение Б (информационное)

Сварка алюминиевых сплавов

Б.1 Алюминий – легкий серебристый металл с достаточно высокими прочностными характеристиками, который отличается удивительной мягкостью (податлив к штамповке), высокими антикоррозийными свойствам и отсутствием ядовитых соединений.

Алюминиевые сплавы используют в сварных конструкциях различного назначения. Основными достоинствами их как конструкционных материалов являются малая плотность, высокая удельная прочность, высокая коррозионная стойкость. Чистый алюминий, ввиду низкой прочности, для изготовления конструкций используют в отдельных случаях в химической, пищевой и электротехнической промышленности. В качестве конструкционных материалов в основном используют полуфабрикаты из алюминиевых сплавов. По показателям отношения прочности и текучести к плотности высокопрочные алюминиевые сплавы значительно превосходят чугун, низкоуглеродистые и низколегированные стали, чистый титан и уступают лишь высоколегированным сталям повышенной прочности и сплавам титана.

В сварных конструкциях применяют как чистый алюминий, так и его сплавы:

- **деформируемые**, используемые в виде поковок, проката и т. д.; подразделяются на поддающиеся термической обработке и не поддающиеся термической обработке.
- **литые сплавы**, используемые для отливок; сварка таких сплавов применяется при исправлении дефектов литья.

Большинство элементов, входящих в состав алюминиевых сплавов, обладает ограниченной растворимостью, изменяющейся с температурой. Это дает возможность сплавам способность упрочняться термической обработкой. В связи с этим деформируемые сплавы разделяют на сплавы, не упрочняемые термической обработкой с концентрацией легирующих элементов ниже предела растворимости при 20 °С, и сплавы, упрочняемые термической обработкой (имеющие концентрацию легирующих элементов свыше этого предела).

Сплавы алюминия являются свариваемыми и получили наибольшее распространение при изготовлении сварных изделий.

Б.2 К деформируемым сплавам, поддающимся термической обработке, относятся следующие:

- EN AW-6082 и EN AW-6061 – основной материал для сварных и несварных конструкций; отличается высокой прочностью после термической обработки и антикоррозионной стойкостью; хорошей свариваемостью при применении как сварки вольфрамовым электродом в среде инертного газа (TIG), так и сварки металлическим электродом в среде инертного газа;
- EN AW-6005A – доступен только в форме экструдированных профилей; отличается хорошей свариваемостью при применении как сварки вольфрамовым электро-

дом в среде инертного газа (TIG), так и сварки металлическим электродом в среде инертного газа;

— EN AW-6060, EN AW-6063 и EN AW-6106 – доступны только в виде экструдированных и холодноформованных изделий, в том числе тонкостенных и сложных форм; легко свариваются при применении как сварки вольфрамовым электродом в среде инертного газа (TIG), так и сварки металлическим электродом в среде инертного газа;

— EN AW-7020 – рекомендован для использования в строительстве для сварных и несварных конструкций; имеет высокую прочность; доступен в форме сплошных и пустотелых экструдированных профилей, а также пластин, листового материала и труб; отличается чувствительностью к условиям окружающей среды.

Б.3 К деформируемым сплавам, неподдающимся термической обработке, относятся следующие:

— EN AW-5049, EN AW-5052, EN AW-5454 и EN AW-5754 – пригодны для сварных или механически соединенных элементов при среднем уровне напряжений; пластичны в отпущенном состоянии, но быстро теряют пластичность при холодной формовке; легко свариваются при применении как сварки вольфрамовым электродом в среде инертного газа (TIG), так и сварки металлическим электродом в среде инертного газа; обладают хорошей антикоррозионной стойкостью;

— EN AW-5083 – обладает высокими прочностными характеристиками; не поддается термической обработке; ограничен в применении в случае дальнейшей холодной обработки и при эксплуатационной температуре выше 65 °C; пригоден; при применении как сварки вольфрамовым электродом в среде инертного газа (TIG), так и сварки металлическим электродом в среде инертного газа;

— EN AW-3004, EN AW-3005, EN AW-3103 и EN AW-5005 – в основном используются в виде листового материала и пластин; имеют высокую пластичность, свариваемость и антикоррозионную стойкость;

— EN AW-8011 – изготовлен на основе системы Al-Fe-Si; используется в виде листового материала и пластин.

Б.4 При проведении сварки алюминия и его сплавов возникают следующие основные трудности.

1. Образование тугоплавкого оксида алюминия Al_2O_3 (температура плавления 2050°C) с большей плотностью, чем у алюминия, что усложняет сплавление кромок соединения и способствует загрязнению металла шва частичками этой пленки. Коэффициент теплового расширения окисной пленки почти в 3 раза меньше коэффициента расширения алюминия, поэтому при нагреве металла в ней образуются трещины. При наличии в алюминии легирующих добавок состав окисной пленки может существенно меняться. Возникающая сложная окисная пленка в большинстве случаев является более рыхлой, гигроскопичной и обладает худшими защитными свойствами.

Окисная пленка на поверхности алюминия и его сплавов затрудняет процесс сварки. Обладая высокой температурой плавления (2050 °C), она не расплавляется в процессе сварки и покрывает металл прочной оболочкой, затрудняющей образование общей ванны.

Вследствие высокой адсорбционной способности к газам и парам воды окисная пленка является источником газов, растворяющихся в металле, и косвенной причиной возникновения в нем несплошностей различного рода. Ее частицы, попавшие в ванну, а также часть пленок с поверхности основного металла, не разрушенных в процессе сварки, могут образовывать окисные включения в швах, снижающие свойства соединений и их работоспособность.

Для удаления этой пленки перед сваркой требуется очищать поверхности кромок и прилегающего основного металла и особенно тщательно поверхность присадочного металла (в связи с большой поверхностью и сравнительно малым объемом) механическим путем или травлением.

Оксидную пленку, образующуюся при сварке алюминия, удаляют либо с помощью катодного распыления, либо с применением флюсов, которые обеспечивают ее растворение или разрушение с переводом в летучее соединение.

Катодное распыление возможно при сварке на обратной полярности. При аргонной сварке неплавящимся электродом обратная полярность не применяется из-за нерационального распределения тепла между электродом и изделием (70% - на электроде и 30% - на свариваемом изделии). По этой причине сварка осуществляется на переменном токе, при котором разрушение пленки происходит в полупериоды обратной полярности.

2. При высоких температурах твердый металл нерасплавившейся части кромок может разрушиться под действием массы сварочной ванны и при этом резко снижается прочность. Алюминий обладает высокой жидкотекучестью и может вытекать через корень шва. Он практически не меняет своего цвета при нагреве, поэтому во время сварки сложно контролировать размеры сварочной ванны. Чтобы избежать прожогов или провалов при односторонней сварке металла или сварке первых слоев многопроходных швов на высокой погонной энергии используют формирующие подкладки из керамики, стали или графита.

3. В связи с высокой величиной коэффициента линейного расширения и низким модулем упругости алюминиевые сплавы обладают повышенной склонностью к короблению (деформации). Для снижения деформаций могут применяться специальные технологические мероприятия (оптимальные режимы сварки, подогрев и др.)

4. Сварка затрудняется не только появлением оксидной пленки, но и обусловленной водородом пористостью, уменьшающей пластичность и прочность металла. Поры возникают в основном в металле шва, а также у линии сплавления. Особенно склонными к образованию пор считаются сплавы системы Al-Mg.

Для предотвращения эффекта порообразования необходимо выполнять очень тщательную химическую очистку сварочной проволоки, механическую очистку и обезжиривание свариваемых кромок. При сварке металла большой толщины к снижению пористости приводит предварительный и сопутствующий подогрев до температуры 150–250°C.

5. Ввиду высокой теплопроводности алюминия для его сварки требуются дополнительные источники тепла, что вызывает необходимость применения больших токов и мощных машин для электроконтактной сварки, особенно при точечной сварке этих материалов. В некоторых случаях рекомендуется предварительный подогрев начальных участков сварного шва до температуры 120–150°C или сопутствующий подогрев.

6. При сварке в металле шва могут образовываться горячие трещины, что вызвано процессами внутренней деформации и напряжения при кристаллизации металла сварочной ванны. Для уменьшения вероятности их появления в сварные швы могут добавляться специальные модификаторы, улучшающие кристаллическую структуру шва, а также следует не допускать близкого расположения швов.

Б.5 Сварка в среде инертных газов.

Сварка алюминия в среде инертных газов осуществляется неплавящимся (вольфрамовым) или плавящимся (металлическим) электродами. В качестве инертных газов применяют аргон высшего или первого сорта, гелий повышенной чистоты или смеси аргона с гелием.



Рисунок Б.1 Схема сварки вольфрамовым электродом в среде инертного газа (TIG)

Вольфрамовые электроды могут быть иттрированными или лантанированными. Применение вольфрамового электрода диаметром от 2 до 6 мм целесообразно для сварки металла толщиной до 12 мм. Присадочную проволоку диаметром от 2 до 5 мм выбирают в зависимости от марки алюминиевого сплава согласно указаниям prEN 1011-4.

Ручная аргонная сварка вольфрамовым электродом может выполняться на установках переменного тока типа УДГ (УДГ-300, УДГ-500) с расходом аргона от 6 до 15 л/мин. Сварка металла может производиться и в гелии, с расходом гелия в 1,8–2,2 раза больше,

чем аргона. При сварке в аргоне напряжение дуги составляет 15–20 В, при сварке в гелии 25–30 В.

Сварка алюминиевых листов толщиной до 3 мм может выполняться за один проход на подкладке. Металл толщиной 4–6 мм можно сваривать без скоса кромок за два прохода с двух сторон. Для сварки металла толщиной более 6 мм требуется V-образная разделка и увеличение числа проходов до четырех (для толщины от 8 до 15 мм). Возможна также X-образная разделка. Протяженные швы выполняются автоматической сваркой.

Для повышения производительности сварки вольфрамовым электродом (в 3–5 раз) может использоваться трехфазная дуга. Более мощный источник нагрева позволяет за один проход на подкладке сваривать алюминий толщиной до 30 мм.

Таблица. Б.1

Рекомендуемые режимы сварки металла вольфрамовым электродом				
Толщина металла, мм	Диаметр, мм		Сила тока, А	
	вольфрамового электрода	присадочной проволоки	в аргоне	в гелии
1–2	2	1–2	50–70	30–40
4–6	3	2–3	100–130	60–90
4–6	4	3	160–180	110–130
6–10	5	3–4	220–300	160–240
11–15	6	4	280–360	220–300

Металл нагревается непрерывно, поскольку постоянно существует одна из трех совокупных дуг – одной независимой дуги, горящей между вольфрамовыми электродами, и двух зависимых дуг, горящих между изделием и электродами.

Б.6 Сварка плавящимся (металлическим) электродом выполняется как в чистом аргоне, так и в смеси аргона с гелием (до 70% гелия) проволокой диаметром 1,5–2,5 мм на постоянном токе обратной полярности. Разделка кромок может быть V-образной или X-образной с углом раскрытия 70–90° (для размещения в разделке наконечника горелки), либо рюмкообразной; притупление – 6 мм.

Скорость сварки зависит от сечения шва и может достигать 40 м/ч. Проволока подается со скоростью до 400 м/ч. С применением смеси из 30% аргона и 70% гелия возрастают глубина и ширина провара, что позволяет за один проход на подкладке выполнять сварку металла толщиной до 16 мм, а за два прохода – до 30 мм. Сварной шов в этом случае приобретает более благоприятную форму (см. рисунок Б.4).

Б.7 Автоматическая сварка алюминия и его сплавов выполняется полуоткрытой дугой по слою флюса или закрытой дугой под флюсом.

Автоматическая сварка плавящимся электродом по слою флюса может быть произведена с применением фторидно-хлоридных флюсов марок АН-А1 и АН-А4. Флюс марки АН-А1 используется для соединения технического алюминия, флюс марки АН-А4, не содержащий NaCl, – для сплавов системы Al-Mg. Для сплавов этого типа наличие NaCl во флюсе недопустимо, так как за счет алюминия и магния из флюса восстанавливается натрий, который попадает в шов и приводит к возникновению в металле пор и снижает пластичность.

Автоматическая сварка листов ведется по слою флюса, поскольку даже нерасплавленный флюс имеет высокую электропроводность, шунтирует электрическую дугу и нарушает стабильность процесса. Ширина и толщина слоя насыпаемого флюса зависят от толщины алюминиевого листа (как правило, ширина составляет 25–45 мм, а толщина 7–16 мм). Во избежание протекнов жидкого металла с обратной стороны сварного шва требуется стальная формирующая подкладка. Дуга питается постоянным током обратной полярности.

Автоматическую сварку под флюсом обычно выполняют расщепленным электродом на переменном токе или на постоянном токе обратной полярности. Применяют флюсы с пониженной электропроводностью, например, керамические флюсы марок ЖА-64 и ЖА-64А.

Б.8 При газовой сварке алюминия в качестве горючего газа в основном используется ацетилен. Расход ацетилена составляет около 100 л/ч на 1 мм толщины свариваемого металла.

Диаметр присадочного прутка, представляющего собой проволоку из алюминия или его сплавов, обычно составляет 1,5–5,5 мм в зависимости от толщины свариваемого изделия.

Для предотвращения окисления металла и удаления оксидов используют специальные флюсы, например, марки АФ-4А (50% KCl, 28% NaCl, 14% LiCl, 8% NaF). При сварке флюс вводят либо с присадочным прутком, либо предварительно наносят на свариваемые кромки в виде разведенной в воде пасты. Флюс в разведенном состоянии нельзя хранить свыше 8–10 ч.

При толщине заготовок более 4 мм желательно выполнять разделку кромок. При толщине листов свыше 8 мм осуществляют общий либо местный подогрев. Сварка производится «левым» способом. По окончании сварки для удаления флюсов сварные швы промывают теплой водой или 2%-ным раствором хромовой кислоты.

Б.9 Ручная дуговая сварка покрытыми электродами используется для сварки заготовок из технически чистого алюминия, сплавов алюминия с кремнием, сплавов систем Al-Mg (с содержанием магния до 5%) и Al-Mn при толщине изделия свыше 4 мм. Она выполняется на постоянном токе обратной полярности обычно на высоких скоростях без поперечных колебаний. При толщине металла 10 мм и выше желательно осуществлять разделку свариваемых кромок.

Как правило, применяется стыковое соединение. Не рекомендуется применение соединений внахлест и втавр, поскольку шлак может затечь в зазоры, что затрудняет его удаление при промывке. Остатки шлака могут привести к коррозии.

Перед сваркой необходимо подогреть детали до температуры 100–400 °С в зависимости от их толщины. Металлический стержень электрода изготавливается из проволок с составом, приближенным к составу основного металла (например, электроды марки ОЗА-1). Для сплавов системы Al-Mg используется проволока с повышенным количеством маг-

ния (на 1,5–2%) для компенсации его угара при сварке. Основными компонентами электродного покрытия являются криолит, фтористые и хлористые соли калия и натрия.

Ручная сварка угольным электродом применяется только для неответственных конструкций. Выполняется на постоянном токе прямой полярности. В качестве электродов используются угольные или графитовые стержни. При толщине свариваемого изделия более 2,5 мм производится разделка кромок. Диаметр присадочного прутка составляет 2–8 мм. Слой флюса наносится либо на пруток, либо на свариваемые кромки в виде пасты.

Б.10 Электрошлаковая сварка алюминия и его сплавов применяется для толщин изделия от 50 до 250 мм и особо эффективна для больших толщин. Ведется на переменном токе плавящимися мундштуками или пластинчатыми электродами, с использованием флюсов на основе галогенидов щелочноземельных и щелочных металлов (например, АН-301 и АН-302). Шов формируется с помощью медных водоохлаждаемых или графитовых кристаллизаторов. Скорость сварки составляет 6–8 м/ч. Получаемые сварные соединения имеют прочность, равную 80–100% прочности основного металла.

Б.11 Плазменная сварка благодаря высокой концентрации энергии в точке нагрева и глубокому проплавлению считается перспективным способом соединения алюминия и его сплавов.

При плазменной сварке, в связи с глубоким проплавлением, резко увеличивается доля основного металла в формировании шва. Однако при этом необходимо соблюдать точность сборки деталей под сварку и ведения горелки по стыку. Для алюминиевых сплавов необходимо применять плазменную сварку с питанием дуги переменным током.

Основные преимущества плазменной сварки алюминия:

- высокая скорость;
- стабильность и простота контроля процесса по сравнению с ручной дуговой сваркой;
- гораздо меньшая зона термического влияния.

В результате глубокого проплавления резко возрастает доля основного металла, участвующего в формировании сварного шва, но при этом требуется соблюдать точность при сборке деталей под сварку и ведении горелки по стыку. Для сплавов из алюминия необходимо питание плазменной дуги переменным током.

Б.12 Электронно-лучевая сварка – один из эффективных способов соединения изделий из алюминия и его сплавов.

Основные преимущества электронно-лучевой сварки металла:

- получение плотных качественных швов;
- минимальные тепловложения;
- минимальное разупрочнение алюминия в зоне термического влияния;
- высокая скорость сварки;
- минимальные деформации конструкций.

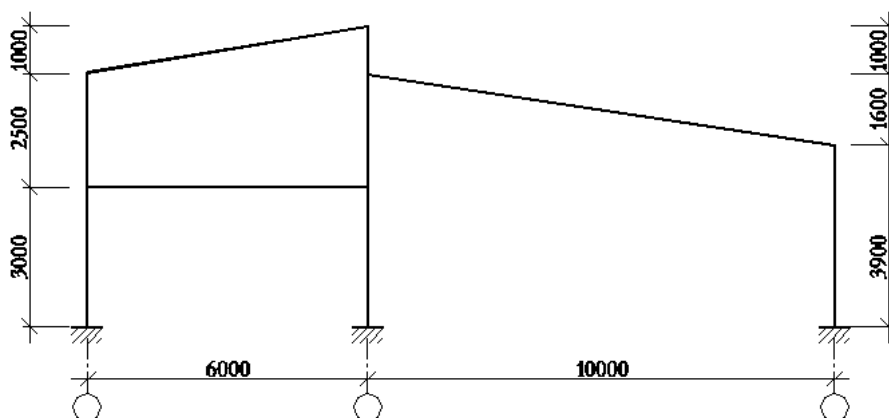
Оксидная пленка алюминия разрушается в результате воздействия на нее паров металла, а также из-за ее разложения в вакууме. Вакуум также способствует удалению водорода из сварного шва.

Приложение В (информационное)

Статический расчет рамы каркасного здания

В данном приложении рассматривается пример определения усилий в элементах рамы каркаса здания.

Дано: Одноэтажное производственное здание с примыкающей двухэтажной административной пристройкой, включающей офисные помещения с гардеробом, залом заседаний и т.п. Ширина площади нагружения системы соответствует шагу балок перекрытий и составляет 5000 мм, исходя из эксплуатационной пригодности, которая ограничивается допустимым прогибом $1/250$ от пролета.



При проведении расчетов используются ссылки на следующие нормативные документы:

[1] СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011 с Национальным приложением «Проектирование алюминиевых конструкций. Часть 1-1. Общие правила».

[2] СН РК EN 1991-1-1:2002/2011 с Национальным приложением «Воздействия на несущие конструкции. Часть 1-1. Удельный вес, постоянные и приложенные нагрузки на здания».

[3] СН РК EN 1991-1-3:2003/2011 с Национальным приложением «Воздействия на несущие конструкции. Часть 1-3. Общие воздействия. Снеговые нагрузки».

[4] СН РК EN 1991-1-4:2005/2011 с Национальным приложением «Воздействия на несущие конструкции. Часть 1-4. Общие воздействия. Ветровые воздействия».

[5] СН РК EN 1990:2002+A1:2005/2011 с Национальным приложением «Основы строительного проектирования».

Взамен ссылок на СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011 [1] используются ссылки на разделы и таблицы, приведенные в настоящем Пособии.

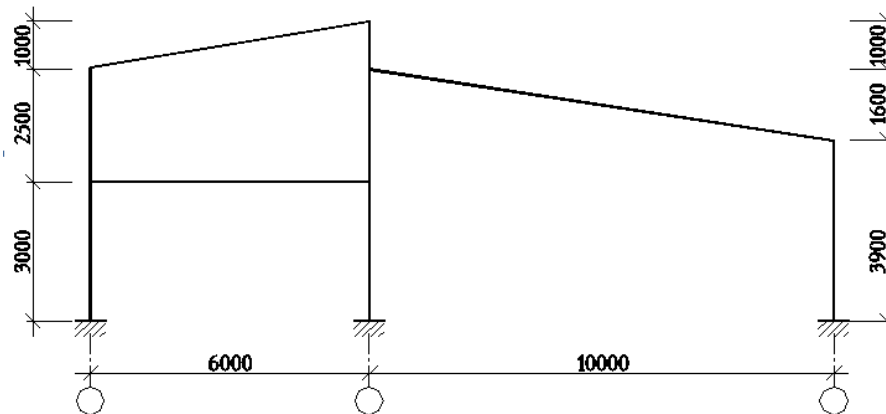


Схема каркаса здания

При проектировании несущих конструкций приняты следующие алюминиевые сплавы, см. п. 3.1:

- деформированный сплав EN AW-6082 с закалом T6;
- листы из сплава EN AW-5083 с закалом H24.

Характеристические значения 0,2% условного предела текучести f_0 и предела прочности при растяжении (сопротивление разрыву) f_u для данных сплавов принимаем по таблице 5:

EN AW-6082 T6	$f_0 = 260 \text{ Н/мм}^2$; $f_u = 310 \text{ Н/мм}^2$;
EN AW-5083 H24	$f_0 = 250 \text{ Н/мм}^2$; $f_u = 340 \text{ Н/мм}^2$.

Значения частных коэффициентов для элементов (таблица 11):

$$\gamma_{M1} = 1,1; \gamma_{M2} = 1,25.$$

Значения частного коэффициента для сварных соединений (таблица 11):

$$\gamma_w = 1,25.$$

Физические характеристики для расчета алюминиевых элементов (п. 2.8):

— модуль упругости (модуль Юнга)	$E = 70\,000 \text{ Н/мм}^2$;
— модуль сдвига	$G = 27\,000 \text{ Н/мм}^2$;
— коэффициент Пуассона в упругом состоянии	$\nu = 0,3$;
— коэффициент линейного термического расширения	$\alpha = 23 \times 10^{-6} \text{ на } ^\circ\text{C}$;
— единичная масса	$\rho = 2700 \text{ кг/м}^3$.

Постоянные нагрузки от собственного веса конструкций, изоляционных и отделочных материалов, стационарного оборудования [3]:

- постоянная нагрузка на покрытие: $q'_{p,roof} = 0,5 \text{ кН/м}^2$;
- постоянная нагрузка на междуэтажное перекрытие: $q'_{p,floor} = 0,7 \text{ кН/м}^2$.

Прикладываемые нагрузки [2].

При условии принятия категории офисных помещений – В:

- равномерно распределенная нагрузка: $q'_{k,floor} = 3,0 \text{ кН/м}^2$;
- сосредоточенная нагрузка: $Q_{k,floor} = 2,0 \text{ кН}$.

При условии нормальной эксплуатации покрытий (категория Н):

- равномерно распределенная нагрузка: $q'_{k,roof} = 0,75 \text{ кН/м}^2$;
- сосредоточенная нагрузка: $Q_{k,roof} = 1,5 \text{ кН}$.

Крановая нагрузка для производственного цеха принимается из условия расположения подвесного крана в середине пролета балки покрытия:

- сосредоточенная нагрузка: $Q_{crane} = 50 \text{ кН}$.

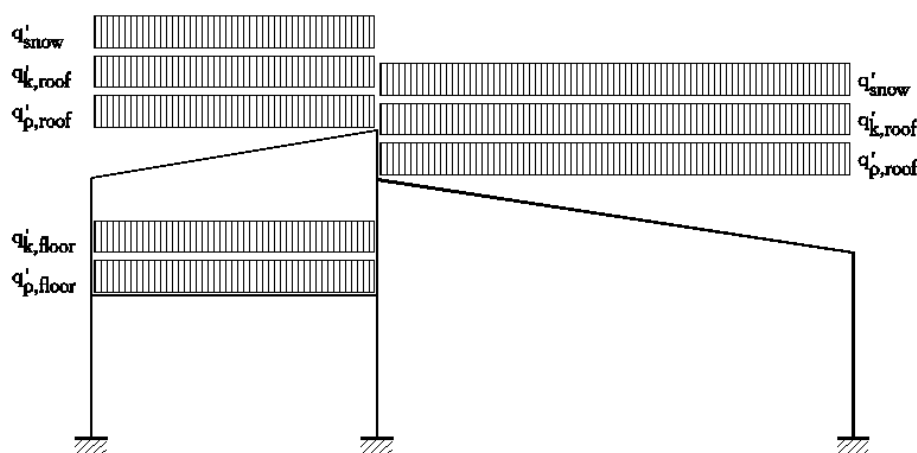


Схема нагружения рамы каркаса здания распределенными постоянными, прикладываемыми и снеговыми нагрузками

Нагрузки от воздействия окружающей среды.

Снеговая нагрузка [3].

Характеристическое значение снеговой нагрузки зависит от климатических условий площадки строительства. Для упрощения в данном примере значение снеговой нагрузки

включает в себя коэффициент формы, коэффициент окружающей среды и термический коэффициент. В результате расчета получено следующее значение снеговой нагрузки:

$$q'_{\text{snow}} = 2,0 \text{ кН/м}^2.$$

Ветровая нагрузка [4].

Характеристическое значение ветровой нагрузки зависит от климатических условий площадки строительства. Для упрощения в данном примере значение ветровой нагрузки включает в себя все соответствующие необходимые коэффициенты. В результате расчета получено следующие значения ветровой нагрузки:

- максимальная ветровая нагрузка на внешней стороне наружных стен:

$$q'_{\text{w.wall}} = 0,7 \text{ кН/м}^2;$$

- ветровая составляющая с подветренной стороны (отсос): $q'_{\text{w.lee}} = -0,27 \text{ кН/м}^2$;

- ветровая составляющая на покрытие: $q'_{\text{w.roof}} = 0,7 \text{ кН/м}^2$;

- ветровая составляющая от края покрытия на длину 1,6 м: $q'_{\text{w.edge}} = 1,0 \text{ кН/м}^2$.

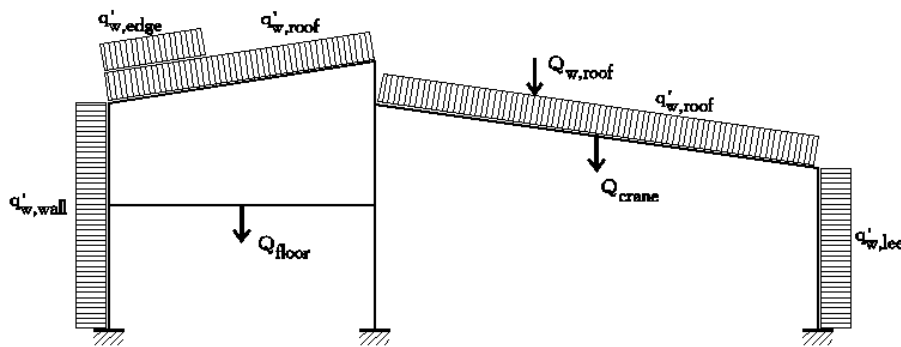


Схема нагружения рамы каркаса здания распределенными ветровыми и сосредоточенными прикладываемыми нагрузками

КОМБИНАЦИИ НАГРУЗОК

Критическое предельное состояние

Для определения усилий в сечениях различных элементов рассматриваются следующие комбинации нагрузок для дальнейшего расчета критических предельных состояний:

- LC1: постоянная + приложенная + крановая + снеговая нагрузки, где преобладающей является приложенная нагрузка;

- LC2: постоянная + приложенная + крановая + снеговая нагрузки, где преобладающей является крановая нагрузка;

- LC3: постоянная + приложенная + крановая + снеговая нагрузки, где преобладающей является снеговая нагрузка;

- LC4: пониженная постоянная + ветровая, где преобладающей является ветровая нагрузка;

- LC5: постоянная + приложенная + крановая + снеговая + ветровая нагрузки, где преобладающей является приложенная нагрузка;

- LC6: постоянная + приложенная + крановая + снеговая + ветровая нагрузки, где преобладающей является ветровая нагрузка.

Значения частных коэффициентов для различных комбинаций нагружения [5]:

- частный коэффициент для постоянного воздействия, невыгодное: $\gamma_{Gsup} = 1,35$;

- частный коэффициент для постоянного воздействия, выгодное: $\gamma_{Ginf} = 1,0$;

- частный коэффициент для переменного воздействия, невыгодное: $\gamma_Q = 1,5$.

Значения коэффициентов ψ [5]:

- коэффициент ψ для приложенных нагрузок: $\psi_{0i} = 0,7$;

- коэффициент ψ для снеговых нагрузок: $\psi_{0s} = 0,6$;

- коэффициент ψ для ветровых нагрузок: $\psi_{0w} = 0,6$;

В случае комбинации нагрузок, преобладающей является приложенная нагрузка, то коэффициент редукции ξ принимается равным 0,9.

Значения коэффициентов ψ для принятых комбинаций нагружения:

Комбинация LC1 LC2 LC3 LC4 LC5 LC6
нагружения

$\psi_u =$	$\xi \cdot \gamma_{Gsup}$	$\xi \cdot \gamma_{Gsup}$	$\xi \cdot \gamma_{Gsup}$	$\xi \cdot \gamma_{Ginf}$	$\xi \cdot \gamma_{Gsup}$	$\xi \cdot \gamma_{Gsup}$	Постоянная нагрузка
	γ_Q	$\psi_{0i} \cdot \gamma_Q$	$\psi_{0i} \cdot \gamma_Q$	0	γ_Q	$\psi_{0i} \cdot \gamma_Q$	Распределенная нагрузка
	$\psi_{0i} \cdot \gamma_Q$	γ_Q	$\psi_{0i} \cdot \gamma_Q$	0	$\psi_{0i} \cdot \gamma_Q$	$\psi_{0i} \cdot \gamma_Q$	Крановая нагрузка
	$\psi_{0s} \cdot \gamma_Q$	$\psi_{0s} \cdot \gamma_Q$	γ_Q	0	$\psi_{0s} \cdot \gamma_Q$	$\psi_{0s} \cdot \gamma_Q$	Снеговая нагрузка
	0	0	0	γ_Q	$\psi_{0w} \cdot \gamma_Q$	γ_Q	Ветровая нагрузка

$\psi_u =$	1,215	1,215	1,215	1	1,215	1,215
	1,5	1,05	1,05	0	1,5	1,05
	1,05	1,5	1,05	0	1,05	1,05
	0,9	0,9	1,5	0	0,9	0,9
	0	0	0	1,5	0,9	1,5

Предельные состояния по эксплуатационной пригодности

Значения частных коэффициентов для часто повторяющихся комбинаций нагружения для расчета предельных состояний по эксплуатационной пригодности [5]:

- LC1: преобладающей является приложенная нагрузка;
- LC2: преобладающей является крановая нагрузка;
- LC3: преобладающей является снеговая нагрузка;
- LC4: преобладающей является ветровая нагрузка;
- LC5: кроме ветровой нагрузки (по аналогии);
- LC6: упрощенная (по аналогии).

Значения коэффициентов ψ [5]:

- коэффициент ψ для приложенных нагрузок: $\psi_{1i} = 0,5$; $\psi_{2i} = 0,3$ (для покрытия = 0)
- коэффициент ψ для крановых нагрузок: $\psi_{1c} = 0,5$; $\psi_{2c} = 0,3$;
- коэффициент ψ для снеговых нагрузок: $\psi_{1s} = 0,2$; $\psi_{2s} = 0$;
- коэффициент ψ для ветровых нагрузок: $\psi_{1w} = 0,5$; $\psi_{2w} = 0$.

Значения коэффициентов ψ для принятых комбинаций нагружения:

$\psi_s =$	1	1	1	1	0	1	Постоянная нагрузка
	ψ_{1i}	0	0	0	0	0,9	Распределенная нагрузка
	ψ_{2c}	ψ_{1c}	ψ_{2c}	0	0	0,9	Крановая нагрузка
	ψ_{2s}	ψ_{2s}	ψ_{1s}	ψ_{2s}	0	0,9	Снеговая нагрузка
	ψ_{2w}	ψ_{2w}	ψ_{2w}	ψ_{1w}	1	0	Ветровая нагрузка

$\psi_s =$	1	1	1	1	0	1
	0,5	0	0	0	0	0,9
	0,3	0,5	0,3	0	0	0,9
	0	0	0,2	0	0	0,9
	0	0	0	0,5	1	0

1-я комбинация нагрузжений действительна для междуэтажных перекрытий.

2-я, 3-я и 4-я комбинации нагрузжений действительны для покрытия.

5-я и 6-я комбинации нагрузжений применяются по аналогии.

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСЧЕТНЫХ НАГРУЗОК И УСИЛИЙ В ЭЛЕМЕНТАХ КАРКАСА

Расстояние между поперечными рамами каркаса здания составляет $c_{\text{frame}} = 5000$ мм.

Так как, нагрузка от неразрезных прогонов и второстепенных балок перекрытий передается на главные балки поперечных рам, то грузовая площадь определяется исходя из расстояния между ними. Поэтому для второй рамы нагрузка увеличивается на коэффициент $k_f = 1,1$.

Постоянные нагрузки.

- постоянная нагрузка на этаж: $q_{\text{p.floor}} = k_f \cdot c_{\text{frame}} \cdot q'_{\text{p.floor}} = 3,85$ кН/м;

- постоянная нагрузка на покрытие: $q'_{\text{p.roof}} = k_f \cdot c_{\text{frame}} \cdot q'_{\text{p.roof}} = 2,75$ кН/м.

Прикладываемые равномерно распределенные нагрузки.

- равномерно распределенная нагрузка на этаж: $q_{\text{k.floor}} = k_f \cdot c_{\text{frame}} \cdot q'_{\text{k.floor}} = 16,5$ кН/м;

- равномерно распределенная нагрузка на покрытие: $q_{\text{k.roof}} = k_f \cdot c_{\text{frame}} \cdot q'_{\text{k.roof}} = 4,125$ кН/м.

Прикладываемые сосредоточенные нагрузки.

- сосредоточенная нагрузка на этаж: $Q_{\text{k.floor}} = 2,0$ кН;

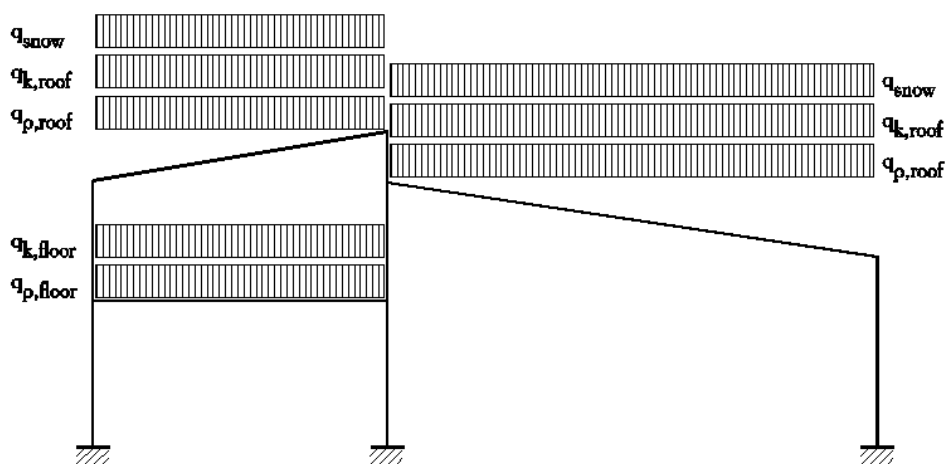
- сосредоточенная нагрузка на покрытие: $Q_{\text{k.roof}} = 1,5$ кН;

- сосредоточенная крановая нагрузка: $P_{\text{crane}} = 50$ кН.

Снеговая нагрузка.

Снеговая нагрузка на покрытие: $q_{\text{snow}} = k_f \cdot c_{\text{frame}} \cdot q'_{\text{snow}} = 11$ кН/м.

Ветровая нагрузка.



- максимальная ветровая нагрузка на внешней стороне наружных стен:

$$q_{w,wall} = k_f \cdot c_{frame} \cdot q'_{w,wall} = 3,85 \text{ кН/м};$$

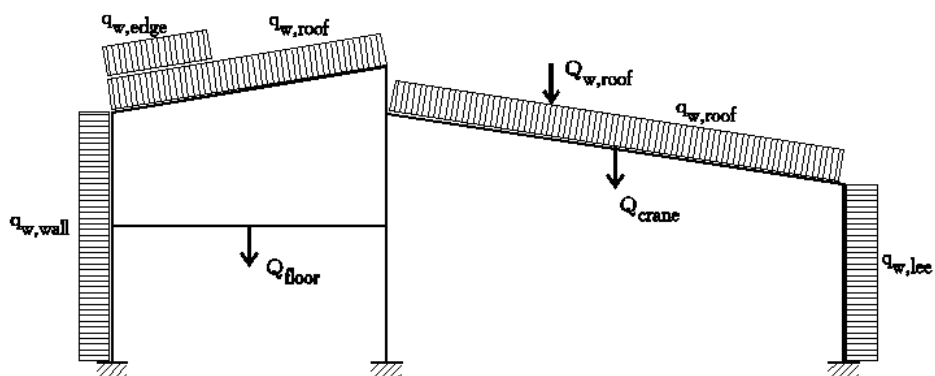
- ветровая составляющая с подветренной стороны (отсос):

$$q_{w,lee} = k_f \cdot c_{frame} \cdot q'_{w,lee} = -1,485 \text{ кН/м};$$

- ветровая составляющая на покрытие: $q_{w,roof} = k_f \cdot c_{frame} \cdot q'_{w,roof} = 3,85 \text{ кН/м};$

- ветровая составляющая от края покрытия на длину 1.6 м:

$$q_{w,edge} = k_f \cdot c_{frame} \cdot q'_{w,edge} = 5,5 \text{ кН/м}.$$



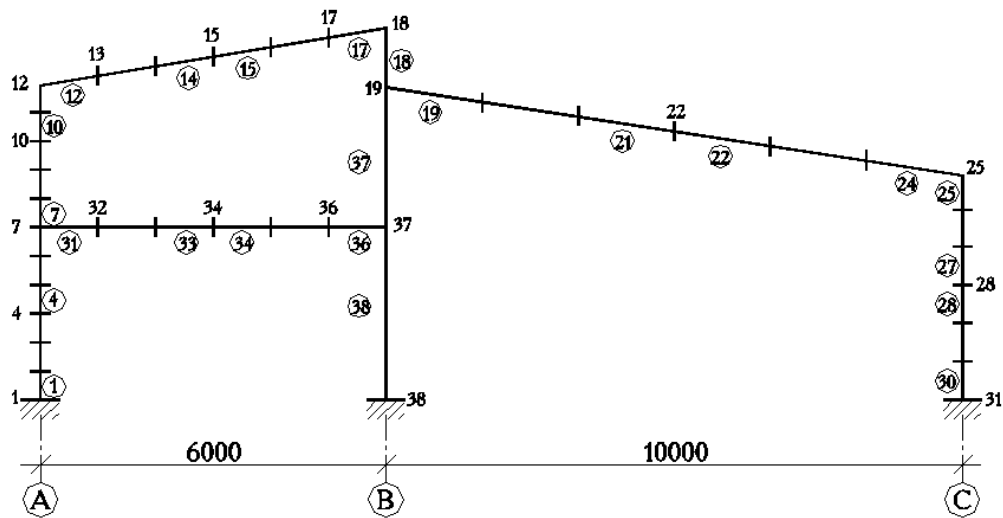
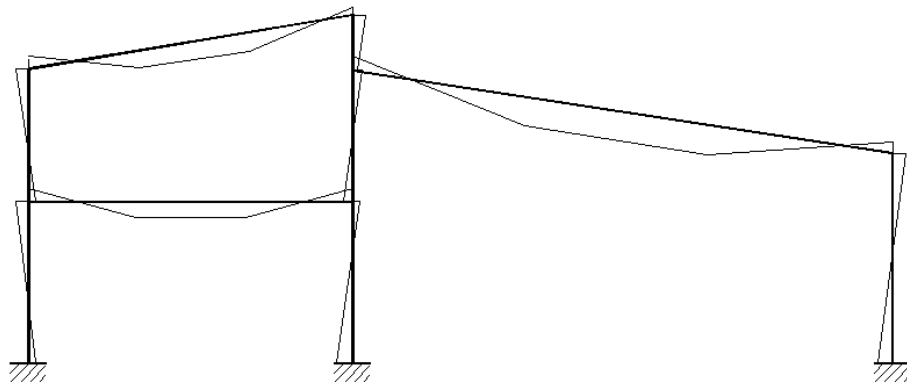


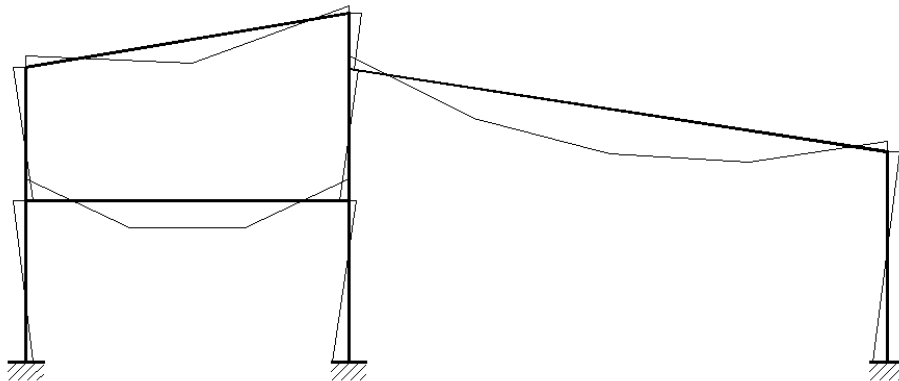
Схема нумерации узлов и элементов рамы каркаса здания

Значения моментов и поперечных сил отдельно для колонн и балок каркаса здания приведены ниже.

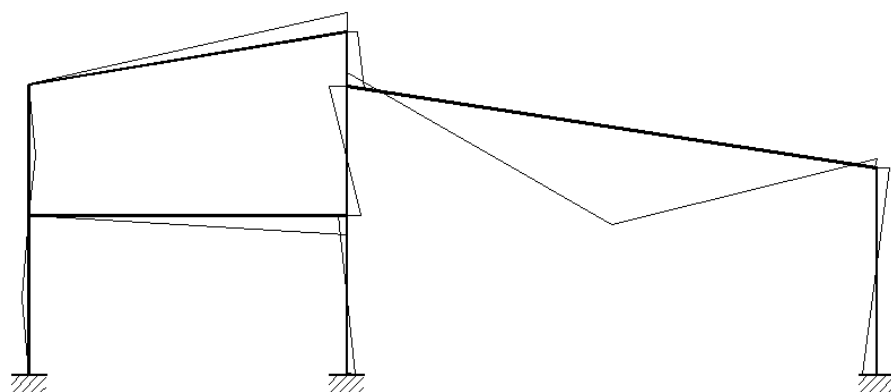
Эпюра моментов от постоянных нагрузок.



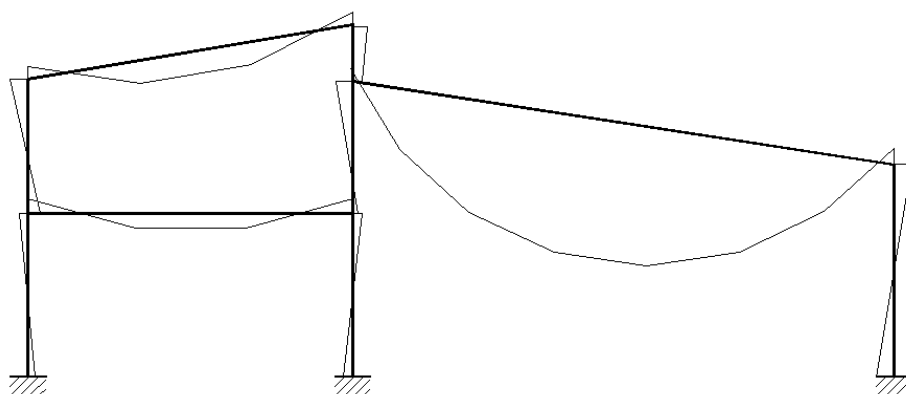
Эпюра моментов от приложенных распределенных нагрузок.



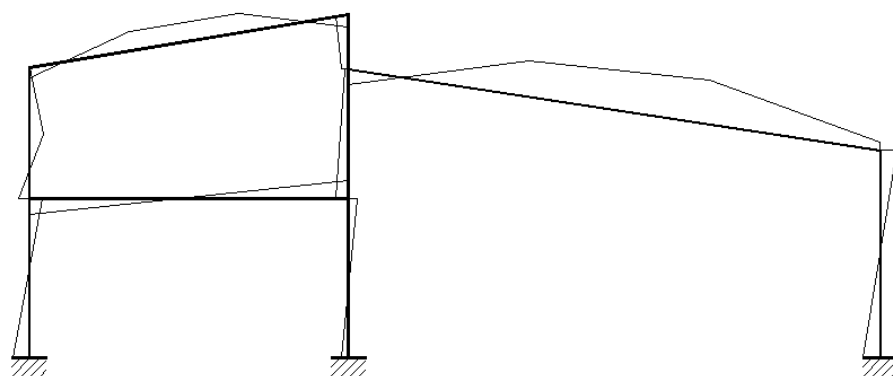
Эпюра моментов от приложенных сосредоточенных нагрузок.



Эпюра моментов от снеговой нагрузки.

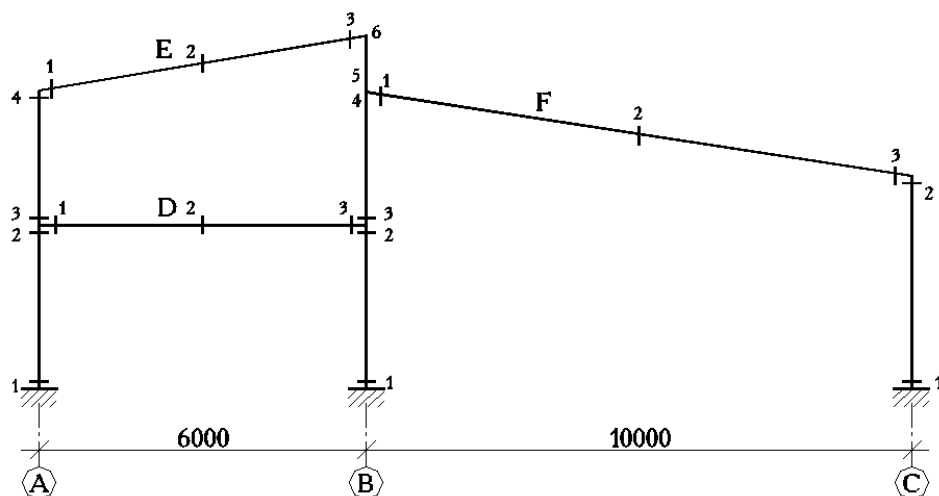


Эпюра моментов от ветровой нагрузки.



Эпюры моментов

Усилия в сечениях элементов каркаса при действии характеристических нагрузок.



Колонна А

Значения изгибающих моментов в сечениях 1, 2, 3 и 4 (кНм):

Сечения	1	2	3	4	
$M_A =$	2,90	-4,40	2,14	-1,88	Постоянная нагрузка
	9,43	-15,6	12,1	-5,96	Распределенная нагрузка
	3,65	-4,60	-5,22	5,81	Крановая нагрузка
	4,28	-4,63	-4,22	-3,04	Снеговая нагрузка
	-12,8	6,45	-2,52	1,95	Ветровая нагрузка

Значения нормальных сил, участки элемента 1-2 и 3-4 (кН):

Участок элемента	1-2	3-4	
$N_A =$	-18,8	-7,32	Постоянная нагрузка
	-60,5	-12,0	Распределенная нагрузка
	1,42	2,84	Крановая нагрузка
	-28,5	-27,8	Снеговая нагрузка
	15,6	12,0	Ветровая нагрузка

Значения перемещений в сечении 4 (мм):

$\delta_A =$	0,56	Постоянная нагрузка
	-0,50	Распределенная нагрузка
	2,48	Крановая нагрузка
	4,19	Снеговая нагрузка
	8,36	Ветровая нагрузка

Колонна В

Значения изгибающих моментов в сечениях 1, 2, 3, 4, 5 и 6 (кНм):

Сечения	1	2	3	4	5	6	
$M_B =$	-0,07	-2,73	4,51	4,35	-7,46	-9,07	Постоянная нагрузка
	4,26	-15,4	18,2	-4,69	-8,29	-15,5	Распределенная нагрузка
	-3,27	0,96	-2,15	19,27	-15,7	-11,2	Крановая нагрузка
	-6,57	5,24	1,59	20,0	-34,6	-33,5	Снеговая нагрузка
	17,0	-13,5	0,49	-10,95	11,4	12,7	Ветровая нагрузка

Значения нормальных сил, участки элемента 1-2, 3-4 и 5-6 (кН):

Участок элемента	1-2	3-4	5-6	
$N_B =$	-35,1	-23,5	-9,18	Постоянная нагрузка
	-84,4	-33,9	-12,8	Распределенная нагрузка
	-31,7	-31,1	-4,34	Крановая нагрузка
	-95,0	-95,7	-38,2	Снеговая нагрузка
	31,2	34,8	13,8	Ветровая нагрузка

Значения перемещений в сечении 6 (мм):

$\delta_B =$	0,57	Постоянная нагрузка
	-0,53	Распределенная нагрузка
	2,57	Крановая нагрузка
	4,30	Снеговая нагрузка
	8,32	Ветровая нагрузка

С целью упрощения данного примера колонна С не рассматривается. В случае необходимости можно выполнить расчет, приняв сечения, как в колонне В.

Балка междуэтажного перекрытия D

Значения изгибающих моментов в сечениях 1, 2 и 3 (кНм):

Сечения	1	2	3	
$M_D =$	-6,56	10,4	-7,25	Постоянная нагрузка
	-27,8	43,6	-33,6	Распределенная нагрузка
	0,62	4,86	3,11	Крановая нагрузка
	-0,40	1,62	3,65	Снеговая нагрузка
	8,97	2,00	-13,0	Ветровая нагрузка

Значения поперечных сил, сечения элемента 1 и 3 (кН):

Сечения	1	3	
$V_D =$	11,7	11,4	Постоянная нагрузка
	48,5	50,5	Распределенная нагрузка
	1,4	-0,6	Крановая нагрузка
	0,67	-0,67	Снеговая нагрузка
	-3,66	3,66	Ветровая нагрузка

Значения перемещений в сечении 2 (мм):

$\delta_D =$	3,21	Постоянная нагрузка
	13,1	Распределенная нагрузка
	1,63	Крановая нагрузка
	0,92	Снеговая нагрузка
	-0,91	Ветровая нагрузка

С целью упрощения данного примера балка покрытия Е не рассматривается.

Балка покрытия F

Значения изгибающих моментов в сечениях 1, 2 и 3 (кНм):

Сечения	1	2	3	
$M_F =$	-11,8	26,4	-4,08	Постоянная нагрузка
	-13,0	42,4	-5,28	Распределенная нагрузка
	-35,0	102,0	-10,94	Крановая нагрузка
	-54,1	101,7	-17,5	Снеговая нагрузка
	22,4	-38,0	0,26	Ветровая нагрузка

Значения поперечных сил, сечения элемента 1 и 3 (кН):

Сечения	1	3	
$V_F =$	14,3	13,2	Постоянная нагрузка
	21,1	20,1	Распределенная нагрузка
	43,4	23,3	Крановая нагрузка
	57,6	52,5	Снеговая нагрузка
	-21,1	-17,4	Ветровая нагрузка

Значения перемещений в сечении 2 (мм):

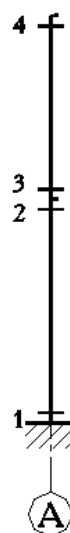
$\delta_F =$	7,71	Постоянная нагрузка
	12,6	Распределенная нагрузка
	22,2	Крановая нагрузка
	29,3	Снеговая нагрузка
	-11,1	Ветровая нагрузка

Расчетные значения изгибающих моментов, продольных и поперечных сил, перемещений.

Колонна А

Значения изгибающих моментов в сечении 1 (кНм):

$M_A^1 =$	2,90	Постоянная нагрузка
	9,43	Распределенная нагрузка
	3,65	Крановая нагрузка
	4,28	Снеговая нагрузка
	-12,8	Ветровая нагрузка



$\psi_u =$	1,215	1,215	1,215	1	1,215	1,215	Постоянная нагрузка
	1,5	1,05	1,05	0	1,5	1,05	Распределенная нагрузка
	1,05	1,5	1,05	0	1,05	1,05	Крановая нагрузка
	0,9	0,9	1,5	0	0,9	0,9	Снеговая нагрузка
	0	0	0	1,5	0,9	1,5	Ветровая нагрузка

Значения изгибающих моментов в сечении 1 определяются по формуле:

$$M^i = M_A^1 \cdot \psi_u^i,$$

где индекс i соответствует номеру колонки (комбинация нагружения) в матрице ψ_u .

После перемножения получаем матрицу:

$M =$	3,524	3,524	3,524	2,9	3,524	3,524	Постоянная нагрузка
	14,145	9,901	9,901	0	14,145	9,901	Распределенная нагрузка
	3,832	5,475	3,832	0	3,832	3,832	Крановая нагрузка
	3,852	3,852	6,42	0	3,852	3,852	Снеговая нагрузка
	0	0	0	-19,2	-11,52	-19,2	Ветровая нагрузка

Далее значения изгибающего момента суммируются по каждой колонке матрицы M :

$$M_{\text{sum}}^i = \Sigma M^i; M_{\text{sum}}^T = [25,353 \quad 22,752 \quad 23,677 \quad -16,3 \quad 13,833 \quad 1,909] \text{ кНм.}$$

Максимальные и минимальные значения изгибающего момента для колонны А в сечении 1:

$$M_{\text{Amax}}^1 = \max(M_{\text{sum}}) = 25,353 \text{ кНм}; M_{\text{Amin}}^1 = \min(M_{\text{sum}}) = -16,3 \text{ кНм.}$$

Значения изгибающих моментов в сечении 2:

$$s = 2; M^i = M_A^s \cdot \psi_u^i; M_{\text{sum}}^i = \Sigma M^i.$$

$$M_{\text{sum}}^T = [-37,743 \quad -32,793 \quad -33,501 \quad 5,275 \quad -31,938 \quad -21,048] \text{ кНм.}$$

$$M_{\text{Amax}}^2 = \max(M_{\text{sum}}) = 5,275 \text{ кНм}; M_{\text{Amin}}^2 = \min(M_{\text{sum}}) = -37,743 \text{ кНм.}$$

Значения изгибающих моментов в сечении 3:

$$s = 3; M^i = M_A^s \cdot \psi_u^i; M_{\text{sum}}^i = \Sigma M^i.$$

$$M_{\text{sum}}^T = [11,471 \quad 3,677 \quad 3,494 \quad -1,64 \quad 9,203 \quad 2,246] \text{ кНм.}$$

$$M_{\text{Amax}}^3 = \max(M_{\text{sum}}) = 11,471 \text{ кНм}; M_{\text{Amin}}^3 = \min(M_{\text{sum}}) = -1,64 \text{ кНм.}$$

Значения изгибающих моментов в сечении 4:

$$s = 4; M^i = M^s_A \cdot \psi_u^i; M^i_{\text{sum}} = \Sigma M^i.$$

$$M^T_{\text{sum}} = [-7,86 \quad -2,563 \quad -7,002 \quad 1,045 \quad -6,105 \quad -2,253] \text{ кНм.}$$

$$M^4_{\text{Amax}} = \max(M_{\text{sum}}) = 1,045 \text{ кНм}; M^4_{\text{Amin}} = \min(M_{\text{sum}}) = -7,86 \text{ кНм.}$$

Окончательно, максимальные и минимальные значения изгибающих моментов для сечений 1, 2, 3 и 4:

$$M_{\text{Amax}} = [25,353 \quad 5,275 \quad 11,471 \quad 1,045] \text{ кНм};$$

$$M_{\text{Amin}} = [-16,3 \quad -37,743 \quad -1,64 \quad -7,86] \text{ кНм.}$$

Значения нормальных сил на участке 1-2 (кН): при $s = 1$

$N^1_A =$	-18,8	Постоянная нагрузка
	-60,5	Распределенная нагрузка
	1,42	Крановая нагрузка
	-28,5	Снеговая нагрузка
	15,6	Ветровая нагрузка

$$N^i = N^s_A \cdot \psi_u^i; N^i_{\text{sum}} = \Sigma N^i.$$

$$N^T_{\text{sum}} = [-137,751 \quad -109,887 \quad -127,626 \quad 4,6 \quad -123,711 \quad -87,126] \text{ кН};$$

$$N^1_{\text{Amax}} = \max(N_{\text{sum}}) = 4,6 \text{ кН}; N^1_{\text{Amin}} = \min(N_{\text{sum}}) = -137,751 \text{ кН.}$$

Значения нормальных сил на участке 3-4 (кН): при $s = 2$

$N^2_A =$	-7,32	Постоянная нагрузка
	-12,0	Распределенная нагрузка
	2,84	Крановая нагрузка
	-27,8	Снеговая нагрузка
	12,0	Ветровая нагрузка

$$N_{\text{sum}}^T = [-48,932 \quad -42,254 \quad -60,212 \quad 10,68 \quad -38,132 \quad -25,532] \text{ кН};$$

$$N_{\text{Amax}}^2 = \max(N_{\text{sum}}) = 10,68 \text{ кН}; N_{\text{Amin}}^2 = \min(N_{\text{sum}}) = -60,212 \text{ кН}.$$

Окончательно, максимальные и минимальные значения продольных сил для участков 1-2 и 3-4:

$$N_{\text{Amax}}^T = [4,6 \quad 10,68] \text{ кН}; N_{\text{Amin}}^T = [-137,751 \quad -60,212] \text{ кН}.$$

Значения перемещений в сечении 6 (мм): при $s = 1$

$\delta_A^1 =$	0,56	Постоянная нагрузка
	-0,50	Распределенная нагрузка
	2,48	Крановая нагрузка
	4,19	Снеговая нагрузка
	8,36	Ветровая нагрузка

$$\delta^i = \delta_A^s \cdot \psi_u^i; \delta_{\text{sum}}^i = \Sigma \delta^i.$$

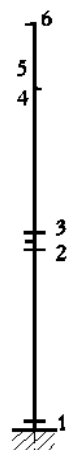
$$\delta_{\text{sum}}^T = [1,054 \quad 1,8 \quad 2,142 \quad 4,74 \quad 8,36 \quad 6,113] \text{ мм};$$

$$\delta_{\text{Amax}}^1 = \max(\delta_{\text{sum}}) = 8,36 \text{ мм}; \delta_{\text{Amin}}^1 = \min(\delta_{\text{sum}}) = 1,054 \text{ мм}.$$

Колонна В

Значения изгибающих моментов в сечении 1 (кНм):

$M_B^1 =$	-0,07	Постоянная нагрузка
	4,26	Распределенная нагрузка
	-3,27	Крановая нагрузка
	-6,57	Снеговая нагрузка
	17,0	Ветровая нагрузка



$$\psi_u = \begin{vmatrix} 1,215 & 1,215 & 1,215 & 1 & 1,215 & 1,215 \\ 1,5 & 1,05 & 1,05 & 0 & 1,5 & 1,05 \\ 1,05 & 1,5 & 1,05 & 0 & 1,05 & 1,05 \\ 0,9 & 0,9 & 1,5 & 0 & 0,9 & 0,9 \\ 0 & 0 & 0 & 1,5 & 0,9 & 1,5 \end{vmatrix} \begin{matrix} \text{Постоянная нагрузка} \\ \text{Распределенная нагрузка} \\ \text{Крановая нагрузка} \\ \text{Снеговая нагрузка} \\ \text{Ветровая нагрузка} \end{matrix}$$

Значения изгибающих моментов в сечении 1 определяются по формуле:

$$M^i = M_B^1 \cdot \psi_u^i,$$

где индекс i соответствует номеру колонки (комбинация нагружения) в матрице ψ_u .

После перемножения получаем матрицу:

$$M = \begin{vmatrix} -0,085 & -0,085 & -0,085 & -0,07 & -0,085 & -0,085 \\ 6,39 & 4,473 & 4,473 & 0 & 6,39 & 4,473 \\ -3,433 & -4,905 & -3,433 & 0 & -3,433 & -3,433 \\ -5,913 & -5,913 & -9,855 & 0 & -5,913 & -5,913 \\ 0 & 0 & 0 & 25,5 & 15,3 & 25,5 \end{vmatrix} \begin{matrix} \text{Постоянная нагрузка} \\ \text{Распределенная нагрузка} \\ \text{Крановая нагрузка} \\ \text{Снеговая нагрузка} \\ \text{Ветровая нагрузка} \end{matrix}$$

Далее значения изгибающего момента суммируются по каждой колонке матрицы M :

$$M_{\text{sum}}^i = \Sigma M^i; M_{\text{sum}}^T = [-3,042 \quad -6,43 \quad -8,901 \quad 25,43 \quad 12,258 \quad 20,541] \text{ кНм.}$$

Максимальные и минимальные значения изгибающего момента для колонны В в сечении 1:

$$M_{B\text{max}}^1 = \max(M_{\text{sum}}) = 25,43 \text{ кНм}; M_{B\text{min}}^1 = \min(M_{\text{sum}}) = -8,901 \text{ кНм.}$$

Значения изгибающих моментов в сечении 2: $s = 2$; $M^i = M_B^s \cdot \psi_u^i$; $M_{\text{sum}}^i = \Sigma M^i$.

$$M_{\text{sum}}^T = [-20,693 \quad -13,331 \quad -10,619 \quad -22,98 \quad -32,843 \quad -34,013] \text{ кНм.}$$

$$M_{Bmax}^2 = \max(M_{sum}) = -10,619 \text{ кНм}; M_{Bmin}^2 = \min(M_{sum}) = -34,013 \text{ кНм}.$$

Значения изгибающих моментов в сечении 3: $s = 3$; $M^i = M_B^s \cdot \psi_u^i$; $M_{sum}^i = \Sigma M^i$.

$$M_{sum}^T = [31,953 \quad 22,796 \quad 24,717 \quad 5,245 \quad 32,394 \quad 24,498] \text{ кНм}.$$

$$M_{Bmax}^3 = \max(M_{sum}) = 32,394 \text{ кНм}; M_{Bmin}^3 = \min(M_{sum}) = 5,245 \text{ кНм}.$$

Значения изгибающих моментов в сечении 4: $s = 4$; $M^i = M_B^s \cdot \psi_u^i$; $M_{sum}^i = \Sigma M^i$.

$$M_{sum}^T = [36,484 \quad 47,266 \quad 50,594 \quad -12,075 \quad 26,629 \quad 22,169] \text{ кНм}.$$

$$M_{Bmax}^4 = \max(M_{sum}) = 50,594 \text{ кНм}; M_{Bmin}^4 = \min(M_{sum}) = -12,075 \text{ кНм}.$$

Значения изгибающих моментов в сечении 5: $s = 5$; $M^i = M_B^s \cdot \psi_u^i$; $M_{sum}^i = \Sigma M^i$.

$$M_{sum}^T = [-69,124 \quad -72,458 \quad -86,153 \quad 9,64 \quad -58,864 \quad -48,293] \text{ кНм}.$$

$$M_{Bmax}^5 = \max(M_{sum}) = 9,64 \text{ кНм}; M_{Bmin}^5 = \min(M_{sum}) = -86,153 \text{ кНм}.$$

Значения изгибающих моментов в сечении 6: $s = 6$; $M^i = M_B^s \cdot \psi_u^i$; $M_{sum}^i = \Sigma M^i$.

$$M_{sum}^T = [-76,18 \quad -74,245 \quad -89,305 \quad 9,98 \quad -64,75 \quad -50,155] \text{ кНм}.$$

$$M_{Bmax}^6 = \max(M_{sum}) = 9,98 \text{ кНм}; M_{Bmin}^6 = \min(M_{sum}) = -89,305 \text{ кНм}.$$

Окончательно, максимальные и минимальные значения изгибающих моментов для сечений 1, 2, 3, 4, 5 и 6:

$$M_{Bmax} = [25,43 \quad -10,619 \quad 32,394 \quad 50,594 \quad 9,64 \quad 9,98] \text{ кНм};$$

$$M_{Bmin} = [-8,901 \quad -34,013 \quad 5,245 \quad -12,075 \quad -86,153 \quad -89,305] \text{ кНм}.$$

Значения нормальных сил на участке 1-2 (кН): при $s = 1$

$$N_B^1 = \begin{vmatrix} -35,1 \\ -84,4 \\ -31,7 \\ -95,0 \end{vmatrix} \begin{array}{l} \text{Постоянная нагрузка} \\ \text{Распределенная нагрузка} \\ \text{Крановая нагрузка} \\ \text{Снеговая нагрузка} \end{array}$$

$$N^i = N_B^s \cdot \psi_u^i; N_{\text{sum}}^i = \Sigma N^i.$$

31,2	Ветровая нагрузка
------	-------------------

$$N_{\text{sum}}^T = [-288,031 \quad -264,317 \quad -307,051 \quad 11,7 \quad -259,951 \quad -203,251] \text{ кН};$$

$$N_{\text{Bmax}}^1 = \max(N_{\text{sum}}) = 11,7 \text{ кН}; N_{\text{Bmin}}^1 = \min(N_{\text{sum}}) = -307,051 \text{ кН}.$$

Значения нормальных сил на участке 3-4 (кН): при $s = 2$

$$N_B^2 =$$

-23,5	Постоянная нагрузка
-33,9	Распределенная нагрузка
-31,1	Крановая нагрузка
-95,7	Снеговая нагрузка
34,8	Ветровая нагрузка

$$N_{\text{sum}}^T = [-198,187 \quad -196,927 \quad -240,352 \quad 28,7 \quad -166,868 \quad -130,732] \text{ кН};$$

$$N_{\text{Bmax}}^2 = \max(N_{\text{sum}}) = 28,7 \text{ кН}; N_{\text{Bmin}}^2 = \min(N_{\text{sum}}) = -240,352 \text{ кН}.$$

Значения нормальных сил на участке 5-6 (кН): при $s = 3$

$$N_B^3 =$$

-9,18	Постоянная нагрузка
-12,8	Распределенная нагрузка
-4,34	Крановая нагрузка
-38,2	Снеговая нагрузка
13,8	Ветровая нагрузка

$$N_{\text{sum}}^T = [-69,291 \quad -65,484 \quad -86,451 \quad 11,52 \quad -56,871 \quad -42,831] \text{ кН};$$

$$N_{\text{Bmax}}^3 = \max(N_{\text{sum}}) = 11,52 \text{ кН}; N_{\text{Bmin}}^3 = \min(N_{\text{sum}}) = -86,451 \text{ кН}.$$

Окончательно, максимальные и минимальные значения продольных сил для участков 1-2, 3-4 и 5-6:

$$N_{B\max}^T = [11,7 \quad 28,7 \quad 11,52] \text{ кН}; N_{B\min}^T = [-307,051 \quad -240,352 \quad -86,5] \text{ кН}.$$

Значения перемещений в сечении 6 (мм): при $s = 1$

$\delta_B^1 =$	0,57	Постоянная нагрузка
	-0,53	Распределенная нагрузка
	2,57	Крановая нагрузка
	4,30	Снеговая нагрузка
	8,32	Ветровая нагрузка

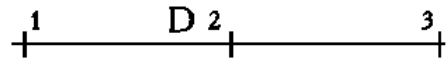
$$\delta^i = \delta_B^s \cdot \psi_u^i; \delta_{\text{sum}}^i = \sum \delta^i.$$

$$\delta_{\text{sum}}^T = [1,076 \quad 1,855 \quad 2,201 \quad 4,73 \quad 8,32 \quad 6,276] \text{ мм};$$

$$\delta_{B\max}^1 = \max(\delta_{\text{sum}}) = 8,32 \text{ мм}; \delta_{B\min}^1 = \min(\delta_{\text{sum}}) = 1,076 \text{ мм}.$$

Балка междуэтажного перекрытия D

Значения изгибающих моментов в сечении 1 (кНм):

$M_D =$	-6,56	Постоянная нагрузка					
	-27,8	Распределенная нагрузка					
	0,62	Крановая нагрузка					
	-0,40	Снеговая нагрузка					
	8,97	Ветровая нагрузка					
$\psi_u =$	1,215	1,215	1,215	1	1,215	1,215	Постоянная нагрузка
	1,5	1,05	1,05	0	1,5	1,05	Распределенная нагрузка
	1,05	1,5	1,05	0	1,05	1,05	Крановая нагрузка
	0,9	0,9	1,5	0	0,9	0,9	Снеговая нагрузка
	0	0	0	1,5	0,9	1,5	Ветровая нагрузка

Значения изгибающих моментов в сечении 1 определяются по формуле:

$$M^i = M_D^1 \cdot \psi_u^i,$$

где индекс i соответствует номеру колонки (комбинация нагружения) в матрице ψ_u .

После перемножения получаем матрицу:

$$M = \begin{vmatrix} -7,97 & -7,97 & -7,97 & -6,56 & -7,97 & -7,97 \\ -41,7 & -29,19 & -29,19 & 0 & -41,7 & -29,19 \\ 0,651 & 0,93 & 0,651 & 0 & 0,651 & 0,651 \\ -0,36 & -0,36 & 0,6 & 0 & -0,36 & -0,36 \\ 0 & 0 & 0 & 13,455 & 8,073 & 13,455 \end{vmatrix} \begin{matrix} \text{Постоянная нагрузка} \\ \text{Распределенная нагрузка} \\ \text{Крановая нагрузка} \\ \text{Снеговая нагрузка} \\ \text{Ветровая нагрузка} \end{matrix}$$

Далее значения изгибающего момента суммируются по каждой колонке матрицы M :

$$M_{\text{sum}}^i = \Sigma M^i; M_{\text{sum}}^T = [-49,379 \quad -36,59 \quad -37,109 \quad 6,895 \quad -41,306 \quad -23,414] \text{ кНм.}$$

Максимальные и минимальные значения изгибающего момента для сечения 1 балки междуэтажного перекрытия D:

$$M_{D\max}^1 = \max(M_{\text{sum}}) = 6,895 \text{ кНм}; M_{D\min}^1 = \min(M_{\text{sum}}) = -49,379 \text{ кНм.}$$

Значения изгибающих моментов в сечении 2:

$$s = 2; M^i = M_D^s \cdot \psi_u^i; M_{\text{sum}}^i = \Sigma M^i.$$

$$M_{\text{sum}}^T = [84,597 \quad 67,164 \quad 65,949 \quad 13,4 \quad 86,397 \quad 67,977] \text{ кНм.}$$

$$M_{D\max}^2 = \max(M_{\text{sum}}) = 86,397 \text{ кНм}; M_{D\min}^2 = \min(M_{\text{sum}}) = 13,4 \text{ кНм.}$$

Значения изгибающих моментов в сечении 3: $s = 3; M^i = M_D^s \cdot \psi_u^i; M_{\text{sum}}^i = \Sigma M^i$.

$$M_{\text{sum}}^T = [-52,658 \quad -36,139 \quad -35,348 \quad -26,75 \quad -64,358 \quad -57,038] \text{ кНм.}$$

$$M_{D\max}^3 = \max(M_{\text{sum}}) = -26,75 \text{ кНм}; M_{D\min}^3 = \min(M_{\text{sum}}) = -64,358 \text{ кНм.}$$

Окончательно, максимальные и минимальные значения изгибающих моментов для сечений 1, 2 и 3:

$$M_{Dmax} = [6,895 \quad 86,397 \quad -26,75] \text{ кНм};$$

$$M_{Dmin} = [-49,379 \quad 13,4 \quad -64,358] \text{ кНм}.$$

Значения поперечных сил в сечении 1 (кН):

при $s = 1$

$V^1_D =$	11,7	Постоянная нагрузка
	48,5	Распределенная нагрузка
	1,4	Крановая нагрузка
	0,67	Снеговая нагрузка
	-3,66	Ветровая нагрузка

$$V^i = V^s_D \cdot \psi_u^i; V^i_{sum} = \sum V^i.$$

$$V^T_{sum} = [89,038 \quad 67,844 \quad 67,615 \quad 6,21 \quad 85,745 \quad 61,723] \text{ кН};$$

$$V^1_{Dmax} = \max(V_{sum}) = 89,038 \text{ кН}; V^1_{Dmin} = \min(V_{sum}) = 6,21 \text{ кН}.$$

Значения поперечных сил в сечении 2 (кН): при $s = 2$

$V^2_D =$	11,4	Постоянная нагрузка
	50,5	Распределенная нагрузка
	-0,6	Крановая нагрузка
	-0,67	Снеговая нагрузка
	3,66	Ветровая нагрузка

$$V^T_{sum} = [88,368 \quad 65,373 \quad 65,241 \quad 16,89 \quad 91,662 \quad 71,133] \text{ кН};$$

$$V^2_{Dmax} = \max(V_{sum}) = 91,662 \text{ кН}; V^2_{Dmin} = \min(V_{sum}) = 16,89 \text{ кН}.$$

Окончательно, максимальные и минимальные значения поперечных сил в сечениях 1 и 3:

$$V_{D\max}^T = [89,038 \quad 91,662] \text{ кН}; V_{D\min}^T = [6,21 \quad 16,89] \text{ кН}.$$

Значения перемещений в сечении 2 (мм): при $s = 1$

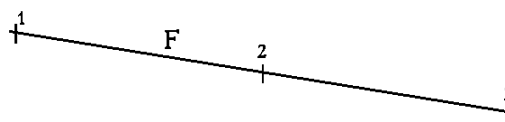
$\delta_D^1 =$	3,21	Постоянная нагрузка
	13,1	Распределенная нагрузка
	1,63	Крановая нагрузка
	0,92	Снеговая нагрузка
	-0,91	Ветровая нагрузка

$$\delta^i = \delta_D^s \cdot \psi_u^i; \delta_{\text{sum}}^i = \sum \delta^i.$$

$$\delta_{\text{sum}}^T = [10,249 \quad 4,025 \quad 3,883 \quad 2,755 \quad -0,91 \quad 17,295] \text{ мм};$$

$$\delta_{D\max}^1 = \max(\delta_{\text{sum}}) = 17,295 \text{ мм}; \delta_{D\min}^1 = \min(\delta_{\text{sum}}) = -0,91 \text{ мм}.$$

Балка покрытия F



Значения изгибающих моментов в сечении 1 (кНм):

$M_F =$	-11,8	Постоянная нагрузка
	-13,0	Распределенная нагрузка
	-35,0	Крановая нагрузка
	-54,1	Снеговая нагрузка
	22,4	Ветровая нагрузка

$\psi_u =$	1,215	1,215	1,215	1	1,215	1,215	Постоянная нагрузка
	1,5	1,05	1,05	0	1,5	1,05	Распределенная нагрузка
	1,05	1,5	1,05	0	1,05	1,05	Крановая нагрузка
	0,9	0,9	1,5	0	0,9	0,9	Снеговая нагрузка
	0	0	0	1,5	0,9	1,5	Ветровая нагрузка

Значения изгибающих моментов в сечении 1 определяются по формуле:

$$M^i = M_F^1 \cdot \psi_u^i,$$

где индекс i соответствует номеру колонки (комбинация нагружения) в матрице ψ_u .

После перемножения получаем матрицу:

$M =$	-14,34	-14,34	-14,34	-11,8	-14,34	-14,34	Постоянная нагрузка
	-19,5	-13,65	-13,65	0	-19,5	-13,65	Распределенная нагрузка
	-36,75	-52,5	-36,75	0	-36,75	-36,75	Крановая нагрузка
	-48,69	-48,69	-81,15	0	-48,69	-48,69	Снеговая нагрузка
	0	0	0	33,6	20,16	33,6	Ветровая нагрузка

Далее значения изгибающего момента суммируются по каждой колонке матрицы M :

$$M_{\text{sum}}^i = \Sigma M^i; M_{\text{sum}}^T = [-119,28 \quad -129,18 \quad -145,89 \quad 21,8 \quad -99,12 \quad -79,83] \text{ кНм.}$$

Максимальные и минимальные значения изгибающего момента для балки D:

$$M_{F_{\text{max}}}^1 = \max(M_{\text{sum}}) = 21,8 \text{ кНм}; M_{F_{\text{min}}}^1 = \min(M_{\text{sum}}) = -145,89 \text{ кНм.}$$

Значения изгибающих моментов в сечении 2: $s = 2$; $M^i = M_F^s \cdot \psi_u^i$; $M_{\text{sum}}^i = \Sigma M^i$.

$$M_{\text{sum}}^T = [294,31 \quad 321,13 \quad 336,25 \quad -30,6 \quad 260,11 \quad 218,23] \text{ кНм.}$$

$$M_{F_{\text{max}}}^2 = \max(M_{\text{sum}}) = 336,25 \text{ кНм}; M_{F_{\text{min}}}^2 = \min(M_{\text{sum}}) = -30,6 \text{ кНм.}$$

Значения изгибающих моментов в сечении 3: $s = 3$; $M^i = M_F^s \cdot \psi_u^i$; $M_{\text{sum}}^i = \Sigma M^i$.

$$M_{\text{sum}}^T = [-40,11 \quad -42,66 \quad -48,24 \quad -3,69 \quad -39,88 \quad -37,35] \text{ кНм.}$$

$$M_{Fmax}^3 = \max(M_{sum}) = -3,69 \text{ кНм}; M_{Fmin}^3 = \min(M_{sum}) = -48,24 \text{ кНм}.$$

Окончательно, максимальные и минимальные значения изгибающих моментов для сечений 1, 2 и 3:

$$M_{Fmax} = [21,8 \quad 336,25 \quad -3,69] \text{ кНм};$$

$$M_{Fmin} = [-145,89 \quad -30,6 \quad -48,24] \text{ кНм}.$$

Значения поперечных сил в сечении 1 (кН): при $s = 1$

$V_F^1 =$	14,3	Постоянная нагрузка
	21,1	Распределенная нагрузка
	43,4	Крановая нагрузка
	57,6	Снеговая нагрузка
	-21,1	Ветровая нагрузка

$$V^i = V_F^s \cdot \psi_u^i; V_{sum}^i = \Sigma V^i.$$

$$V_{sum}^T = [146,435 \quad 156,47 \quad 171,5 \quad -17,35 \quad 127,444 \quad 105,289] \text{ кН};$$

$$V_{Fmax}^1 = \max(V_{sum}) = 171,5 \text{ кН}; V_{Fmin}^1 = \min(V_{sum}) = -17,35 \text{ кН}.$$

Значения поперечных сил в сечении 3 (кН): при $s = 2$

$V_F^2 =$	13,2	Постоянная нагрузка
	20,1	Распределенная нагрузка
	23,3	Крановая нагрузка
	52,5	Снеговая нагрузка
	-17,4	Ветровая нагрузка

$$V_{sum}^T = [117,9 \quad 119,34 \quad 140,36 \quad -12,9 \quad 102,24 \quad 82,76] \text{ кН};$$

$$V_{Fmax}^2 = \max(V_{sum}) = 140,36 \text{ кН}; V_{Fmin}^2 = \min(V_{sum}) = -12,9 \text{ кН}.$$

Окончательно, максимальные и минимальные значения поперечных сил в сечениях 1 и 3:

$$V_{Fmax}^T = [171,5 \quad 140,36] \text{ кН}; V_{Fmin}^T = [-17,35 \quad -12,9] \text{ кН}.$$

Значения перемещений в сечении 2 (мм): при $s = 1$

$\delta_F^1 =$	7,71	Постоянная нагрузка
	12,6	Распределенная нагрузка
	22,2	Крановая нагрузка
	29,3	Снеговая нагрузка
	-11,1	Ветровая нагрузка

$$\delta^i = \delta_F^s \cdot \psi_u^i; \delta_{sum}^i = \sum \delta^i.$$

$$\delta_{sum}^T = [20,67 \quad 18,81 \quad 20,23 \quad 2,16 \quad -11,1 \quad 65,4] \text{ мм};$$

$$\delta_{Fmax}^1 = \max(\delta_{sum}) = 65,4 \text{ мм}; \delta_{Fmin}^1 = \min(\delta_{sum}) = -11,1 \text{ мм}.$$

Узел A-D

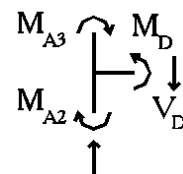
Изгибающий момент:

$$M_{Amax}^3 = 11,5 \text{ кНм};$$

$$M_{Dmin}^1 = -49,4 \text{ кНм};$$

$$M_{Amin}^2 = -37,7 \text{ кНм};$$

$$M_{Amax}^3 + M_{Dmin}^1 + (-M_{Amin}^2) = -0,17 \text{ кНм}.$$

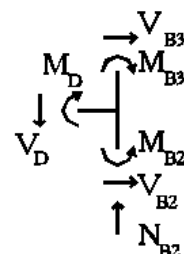


Поперечная сила:

$$V_{Dmax}^1 = 89 \text{ кН}.$$

Узел B-D

Изгибающий момент:



$$M^3_{B\max} = 32,4 \text{ кНм};$$

$$M^2_{B\min} = -34,0 \text{ кНм};$$

$$M^3_{D\min} = -64,4 \text{ кНм};$$

$$M^3_{B\max} + M^3_{D\min} + (-M^2_{B\min}) = 2,05 \text{ кНм}.$$

Поперечная сила:

$$V^2_{D\max} = 91,7 \text{ кН};$$

$$V^3_B = 2,306 \text{ кН}; V^2_B = -18,184 \text{ кН}.$$

Продольная сила:

$$N^3_B = -240,4 \text{ кН}; N^2_B = -307,1 \text{ кН}.$$

Узел B-F

Изгибающий момент:

$$M^4_{B\max} = 50,6 \text{ кНм};$$

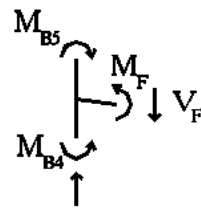
$$M^5_{B\min} = -86,153 \text{ кНм};$$

$$M^1_{F\min} = -145,9 \text{ кНм};$$

$$M^5_{B\min} - M^1_{F\min} - M^4_{B\max} = 9,14 \text{ кНм}.$$

Поперечная сила:

$$V^1_{F\max} = 171,5 \text{ кН}.$$

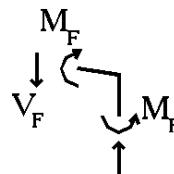


Объяснением тому, что сумма изгибающих моментов в узлах не равна нулю, является тот факт, что они получены из различных комбинаций нагружений.

Узел F-C

Изгибающий момент:

$$M^3_{F\max} = -3,7 \text{ кНм};$$



$$M^3_{Fmin} = -48,238 \text{ кНм};$$

Поперечная сила:

$$V^2_{Fmax} = 140,4 \text{ кН.}$$

$$V^2_{Fmin} = -12,9 \text{ кН.}$$

Примеры расчета поперечных сечений, а также сварных соединений элементов каркаса здания приведены в соответствующих разделах данного Пособия.

Приложение Г

(обязательное)

Основные буквенные обозначения величин

$x-x$ — продольная ось элемента;

$y-y$ — ось поперечного сечения;

$z-z$ — ось поперечного сечения;

$u-u$ — главная основная ось (там, где ось не совпадает с осью $y-y$);

$v-v$ — второстепенная основная ось (там, где ось не совпадает с осью $z-z$).

P_k — характеристическое значение усилия предварительного напряжения, возникающее в процессе изготовления;

G_k — характеристическое значение постоянного воздействия;

X_k — характеристическое значение показателя строительного материала или изделия;

X_n — номинальное значение показателя строительного материала или изделия;

R_d — расчетное значение сопротивления;

R_k — характеристическое значение сопротивления поперечного сечения или элемента;

γ_M — общий частный коэффициент;

γ_{Mi} — частный коэффициент для заданного параметра;

γ_{Mf} — частный коэффициент для усталости;

η — коэффициент пересчета;

a_d — расчетное значение геометрической величины.

f_0 — характеристическое значение 0.2 % условного предела текучести;

f_u — характеристическое значение предела прочности при растяжении (сопротивления разрыву);

f_{0c} — характеристическое значение 0.2 % условного предела текучести литых материалов;

f_{uc} — характеристическое значение предела прочности при растяжении (сопротивления разрыву) литых материалов;

A_{50} — показатель растяжения, измеренный на эталонном образце длиной 50 мм, см. стандарт EN 10002;

$A = 5,65\sqrt{A_0}$ — показатель растяжения, измеренный на эталонном образце длиной $5,65\sqrt{A_0}$ (стандарт EN 10002);

A_0 — исходная площадь поперечного сечения образца для испытаний;

$f_{0,haz}$ — характеристическое значение 0.2 % условного предела текучести f_0 в зоне термического влияния, HAZ;

$f_{u,haz}$ — характеристическое значение предела прочности при растяжении в зоне термического влияния, HAZ;

$\rho_{0,haz} = f_{0,haz}/f_0$, соотношение между 0.2% условным пределом текучести в зоне термического влияния (HAZ) и основным материалом;

$\rho_{u,haz} = f_{u,haz}/f_u$ — соотношение между пределом прочности при растяжении в зоне термического влияния (HAZ) и основным материалом;

BC — класс изгиба;

n_p — показатель степени в формуле Рамберга-Осгуда для расчета пластичного сопротивления;

E — модуль упругости (модуль Юнга);

G — модуль сдвига;

ν — коэффициент Пуассона в упругом состоянии;

α — коэффициент линейного термического расширения;

ρ — единичная масса.

α_{cr} — коэффициент, на который следует увеличить расчетную нагрузку, чтобы вызвать потерю устойчивости при упругих деформациях;

F_{Ed} — расчетная нагрузка на конструкцию;

F_{cr} — критическая (Эйлера) сила упругого прогиба для режима общей неустойчивости, основанная на исходных коэффициентах упругой деформации;

H_{Ed} — расчетное значение горизонтальной реакции в основании этажа на горизонтальные нагрузки и фиктивные горизонтальные нагрузки;

V_{Ed} — общая расчетная вертикальная нагрузка на конструкцию в основании этажа;

$\delta_{H,Ed}$ — горизонтальное смещение в верхней части этажа относительно основания этажа;

h — высота этажа, высота конструкции;

$\bar{\lambda}$ — безразмерный коэффициент относительной гибкости;

N_{Ed} — расчетное значение осевой силы;

φ — общий начальный дефект колебаний;

φ_0 — базовое значение общего начального дефекта колебаний;

α_n — понижающий коэффициент для высоты h , применительно к колоннам;

α_m — понижающий коэффициент для количества колонн в ряду;

m — количество колонн в ряду;

e_0 — максимальная амплитуда дефекта элемента;

L — длина элемента;

$e_{0,d}$ — расчетное значение максимальной амплитуды дефекта;

M_{Rk} — характеристический момент сопротивления критического поперечного сечения;

N_{Rk} — характеристическое сопротивление нормальной силе критического поперечного сечения;

Q — эквивалентная сила на единицу длины;

Δq — отклонение системы связей в плоскости;

q_d — эквивалентная расчетная сила на единицу длины;

M_{Ed} — расчетный изгибающий момент;

k — коэффициент для $e_{0,d}$.

γ_{M1} — частный коэффициент для сопротивления поперечного сечения независимо от класса;

γ_{M1} — частный коэффициент для сопротивления элементов потере устойчивости, определяемый проверкой элементов;

γ_{M2} — частный коэффициент для сопротивления поперечного сечения, работающего на разрыв;

b — ширина поперечного сечения элемента;

t — толщина поперечного сечения элемента;

β — отношение ширины к толщине b/t ;

η — коэффициент, учитывающий градиент напряжения или упрочнение поперечного сечения элемента;

ψ — коэффициент напряжения;

σ_{cr} — критическое напряжение упругости для усиленной части поперечного сечения;

σ_{cr0} — критическое напряжение упругости для не усиленной части поперечного сечения;

R — радиус кривизны в точке, соответствующей средней толщине материала;

D — диаметр трубы в точке, соответствующей средней толщине материала;

$\beta_1, \beta_2, \beta_3$ — предельные значения коэффициента β (податливости к продольному изгибу);

ε — коэффициент, равный $= 250/f_0$;

z_1 — расстояние от нейтральной оси изгиба эффективного сечения до наиболее сильно нагруженных элементов;

z_2 — расстояние от нейтральной оси изгиба эффективного сечения до рассматриваемого элемента;

C_1, C_2 — константы;

ρ_c — коэффициент локального изгиба;

b_{haz} — размер зоны, подверженной действию температуры HAZ;

T_1 — температура между проходами;

α_2 — коэффициент для b_{haz} .

$\sigma_{x,Ed}$ — расчетное значение локального продольного напряжения;

$\sigma_{z,Ed}$ — расчетное значение локального напряжения при поперечном изгибе;

τ_{Ed} — расчетное значение локального касательного напряжения;

N_{Ed} — расчетная осевая нагрузка на сжатие;

$M_{y,Ed}$ — расчетное значение изгибающего момента, ось $y-y$;

$M_{x,Ed}$ — расчетное значение изгибающего момента, ось $x-x$;

N_{Rd} — расчетные значения сопротивления нормальным силам;

$M_{y,Rd}$ — расчетное сопротивление изгибающему моменту вдоль одной главной оси поперечного сечения, ось $y-y$;

$M_{z,Rd}$ — расчетное сопротивление изгибающему моменту вдоль одной главной оси поперечного сечения ось $z-z$;

s — отверстия, расположенные в шахматном порядке, межцентровое расстояние двух соседних отверстий, измеренное в направлении, параллельном оси элемента;

p — межцентровое расстояние тех же двух отверстий, измеренное в направлении, перпендикулярном оси элемента;

n — количество отверстий, расположенных друг за другом по диагональной или зигзагообразной линии на элементе или на компоненте элемента;

d — диаметр отверстия;

A_g — полное поперечное сечение;

A_{net} — рабочая площадь поперечного сечения;

A_{eff} — эффективная площадь поперечного сечения;

b_0 — ширина выступа или половина ширины внутреннего поперечного сечения компонента

L_e — точки нулевого изгибающего момента;

$N_{t,Rd}$ — расчетные значения сопротивления растягивающей нагрузке для поперечного сечения;

$N_{0,Rd}$ — расчетное значение сопротивления общей пластической деформации элемента под растягивающей нагрузкой;

$N_{u,Rd}$ — расчетное значение сопротивления осевой силе в критическом сечении с отверстиями для крепежных деталей;

$N_{c,Rd}$ — расчетное сопротивление поперечного сечения при равномерном сжатии;

M_{Rd} — расчетное сопротивление изгибу вокруг одной главной оси поперечного сечения;

$M_{u,Rd}$ — расчетное сопротивление изгибу поперечного сечения нетто в местах расположения отверстий;

$M_{0,Rd}$ — расчетное сопротивление изгибу при общей пластической деформации;

α — форм-фактор;

W_{el} — момент сопротивления полного сечения;

W_{net} — момент сопротивления рабочего сечения нетто, с учетом отверстий и разупрочнения зоны HAZ (зоны, подверженной действию температуры), если проводились сварочные работы;

W_{pl} — пластический момент сопротивления для полного сечения;

W_{eff} — эффективный момент сопротивления сечения, полученный с помощью заниженной толщины t_{eff} для элементов класса 4;

$W_{el,haz}$ — эффективный момент сопротивления общего сечения, полученный при помощи заниженной толщины $\rho_{0,haz}t$ для материала HAZ (зоны, подверженной действию температуры);

$W_{pl,haz}$ — эффективный пластический момент сопротивления общего сечения, полученный при использовании заниженной толщины $\rho_{0,haz}t$ для материала HAZ (зоны, подверженной действию температуры);

$W_{eff,haz}$ — эффективный упругий момент сопротивления сечения, полученный с использованием приведенной толщины для компонентов класса 4 или приведение толщины для материалов HAZ, в зависимости от того, что меньше: эффективный модуль упругости сечения, полученный при помощи заниженной толщины $\rho_c t$ для элементов класса 4, или при использовании заниженной толщины ρt для HAZ материала; наименьший из них;

$\alpha_{3,u}$ — форм-фактор для поперечного сечения класса 3 без сварных швов;

$\alpha_{3,w}$ — форм-фактор для поперечного сечения класса 3 со сварными швами;

V_{ed} — расчетное значение силы поперечного сдвига (среза);

V_{Rd} — расчетное сопротивление сдвигу (срезу) для поперечного сечения;

A_v — площадь сдвига (среза);

η_y — коэффициент для типа области сдвига (среза);

h_w — высота стенки между полками;

t_w — толщина стенки;

A_e — полная площадь сечения, в котором отсутствуют сварные элементы, и эффективная площадь сечения, полученная с использованием заниженной толщины $\rho_{0,haz}t$ для материала HAZ сваренного элемента;

T_{ed} — расчетное значение крутящего момента;

T_{Rd} — расчетное значение сопротивления крутящему моменту Сен-Венана;

$W_{T,pl}$ — пластические моменты сопротивления при кручении;

$T_{t,Ed}$ — расчетное значение внутреннего крутящего момента Сен-Венана;

$T_{w,Ed}$ — расчетное значение внутреннего деформирующего крутящего момента;

$\tau_{1,Ed}$ — расчетное значение напряжения сдвига (среза) вследствие классического крутящего момента Сан-Венана;

$\tau_{w,Ed}$ — расчетные значения напряжения сдвига (среза) вследствие деформирующего крутящего момента;

$\sigma_{w,Ed}$ — расчетные значения напряжения сдвига (среза), обусловленные бимоментом;

B_{Ed} — бимомент;

$V_{T,Rd}$ — приведенное расчетное сопротивление сдвигу (срезу) для поперечного сечения с учетом крутящего момента;

$f_{0,v}$ — приведенное расчетное значение предела прочности с учетом силы сдвига (среза);

$M_{v,Rd}$ — приведенное расчетное значение сопротивления изгибающему моменту с учетом силы сдвига (среза).

N_{Rd} — расчетное значение сопротивления осевой силе сжатия;

$M_{v,Rd}$ — сопротивление изгибающему моменту вокруг оси $y-y$;

$M_{z,Rd}$ — сопротивление изгибающему моменту вокруг оси $z-z$;

$\eta_0, \gamma_0, \xi_0, \psi$ — показатели степени в формулах взаимодействия;

ω_0 — коэффициент для сечений с локализованными сварными швами;

ρ — понижающий коэффициент для определения приведенного расчетного значения сопротивления изгибающему моменту с учетом силы сдвига (среза);

$N_{b,Rd}$ — расчетное значение несущей способности при продольном изгибе для элемента, работающего на сжатие;

k — коэффициент, учитывающий ослабляющее влияние сварки;

χ — уменьшающий коэффициент для соответствующего варианта изгиба;

φ — величина для определения уменьшающего коэффициента χ ;

α — коэффициент наполнения;

λ_0 — граница горизонтальной плоскости кривых изгиба;

N_{cr} — критическое усилие в упругой области для соответствующего варианта изгиба, основанное на свойствах больших поперечных сечений;

i — радиус инерции сечения по соответствующей оси, определенный с использованием характеристик основного поперечного сечения;

$\bar{\lambda}$ — относительная гибкость;

$\bar{\lambda}_T$ — относительная гибкость для крутящего или изгибающе-крутящего момента;

N_{cr} — критическая упругая нагрузка при изгибающем крутящем моменте;

k — коэффициент длины продольного изгиба;

$M_{h,Rd}$ — расчетное значение момента сопротивления продольному изгибу;

χ_{LT} — коэффициент уменьшения при боковом изгибе от крутящего момента;

φ_{LT} — величина для определения коэффициент уменьшения χ_{LT} ;

α_{LT} — коэффициент наполнения;

$\bar{\lambda}_{LT}$ — относительная гибкость для продольного изгиба с кручением;

M_{cr} — критический момент упругости для бокового изгибающего крутящего момента;

$\bar{\lambda}_{0,LT}$ — граница горизонтального участка кривых продольного изгиба с кручением;

$\eta_c, \gamma_c, \xi_c, \psi_c$ — показатели степени в формулах взаимодействия;

$\omega_x, \omega_{x,LT}$ — коэффициенты для сечений с локализованными сварными швами;

$\bar{\lambda}_{haz}, \bar{\lambda}_{haz,LT}$ — параметры относительного удлинения для сечений с локализованными сварными швами;

x_s — расстояние от сечения с локализованными сварными швами до простой опоры или до точки перегиба кривой прогиба, при упругом прогибе под действием продольной нагрузки.

L_{ch} — длина прогиба для планок;

h_0 — расстояние между центрами тяжести планок обвязки;

a — расстояние между ограничителями планок обвязки;

α — угол между осями планок и раскосами;

i_{min} — минимальный радиус инерции одиночных углов;

A_{ch} — площадь поперечного сечения одной планки обвязки;

$N_{ch,Ed}$ — расчетная сила сжимающей нагрузки в планке обвязки, в средней части составного элемента;

M^I_{Ed} — расчетное значение наибольшего момента, действующего на среднюю часть составного элемента, без учета эффектов второго порядка;

I_{eff} — эффективный момент инерции площади составного элемента;

S_v — жесткость при сдвиге (срезе) для связанной панели;

n — число плоскостей обвязки;

A_d — площадь поперечного сечения диагональной планки (раскоса) обвязки;

d — длина диагонали составного элемента;

A_v — площадь поперечного сечения поперечной планки обвязки;

I_{ch} — момент инерции сечения в плоскости для одного раскоса обвязки;

I_{bl} — момент инерции сечения в плоскости для одной планки обвязки;

μ — коэффициент эффективности;

i_y, i_z — радиус инерции составного элемента (по оси y - y и по оси z - z).

v_1 — коэффициент уменьшения для изгиба со сдвигом (срезом);

k_τ — коэффициент прогиба для изгиба со сдвигом (срезом).

c — упругая опора пластины;

l_w — половина длины упругого прогиба;

χ_c — коэффициент уменьшения для изгиба подмодуля;

I_{eff} — момент инерции эффективного поперечного сечения пластины при прогибе в одной плоскости;

y_{st} — расстояние от центра пластины до центра наиболее удаленного элемента жесткости;

B_x — жесткость при изгибе ортотропной пластины в сечении $x = \text{константа}$;

B_y — жесткость при изгибе ортотропной пластины в сечении $y = \text{константа}$;

H — жесткость при кручении ортотропной пластины;

I_L — момент инерции области одного жесткого элемента и смежной пластины в продольном направлении;

I_{XT} — константа крутящего момента для одного жесткого элемента и смежной пластины в продольном направлении;

a — половина расстояния между элементами жесткости;

t_1, t_2 — толщины слоев в ортотропной пластине;

s — результирующая толщина жестких элементов и смежной пластины;

$\tau_{\text{cr,g}}$ — напряжение прогиба при сдвиге для ортотропной пластины;

ϕ, η_b — коэффициенты;

b_f — ширина полок составных балок;

b_w — ширина прямолинейных участков стенки балки;

t_f — толщина полок составных балок;

I_{st} — момент инерции основного поперечного сечения элемента жесткости и смежных эффективных участков стенок;

b_1, b_2 — расстояния от ребра жесткости до продольных концов полки (мест сварки);

a_c — половина длины упругого прогиба элемента жесткости;

ρ_v — коэффициент при определении прочности при изгибе со сдвигом (срезом);

η — коэффициент при определении прочности изгибу со сдвигом (срезом) в диапазоне пластичности;

λ_w — коэффициент гибкости при изгибе со сдвигом (срезом);

$V_{w,Rd}$ — частичный вклад сопротивления сдвигу (срезу) от напряжений стенок;

$V_{f,R}$ — частичный вклад сопротивления сдвигу (срезу) от изгиба полок;

$k_{\tau st}$ — вклад в коэффициент прогиба k_τ от продольных элементов жесткости;

$k_{\tau 1}$ — коэффициент прогиба для субпанели;

c — коэффициент в выражении для $V_{f,Rd}$;

$M_{f,Rd}$ — расчетный момент сопротивления для рассматриваемого поперечного сечения при учете только эффективных полок;

A_{f1}, A_{f2} — площадь поперечного сечения верхней и нижней полок;

F_{Ed} — расчетная поперечная нагрузка;

F_{Rd} — расчетная несущая способность действию поперечных сил;

L_{eff} — эффективная длина сопротивления изгибающим нагрузкам;

l_y — эффективная длина зоны приложения изгибающих нагрузок;
 χ_F — коэффициент уменьшения для локального продольного изгиба при действии изгибающей нагрузки;
 s_s — длина жесткой опоры на полке при действии изгибающей нагрузки;
 $\bar{\lambda}_F$ — коэффициент гибкости для местного изгиба от поперечной силы;
 k_F — коэффициент прогиба при действии изгибающей нагрузки;
 γ_s — относительный момент инерции ребра жесткости, ближайшего к нагруженной полке;
 I_{sl} — момент инерции ребра жесткости, ближайшего к нагруженной полке;
 m_1, m_2 — безразмерные параметры в формуле для эффективной длины приложения нагрузки;
 l_e — параметр в формуле для эффективной длины приложения нагрузки;
 $M_{N,Rd}$ — уменьшенный момент сопротивления при изгибе с учетом пластической деформации;
 A_w — площадь поперечного сечения ребра жесткости;
 A_{fc} — площадь поперечного сечения сжатой полки;
 κ — коэффициент прогиба вследствие влияния полки;
 r — собой радиус кривизны сжатой полки;
 h_f — расстояние между центрами полок;
 b_1, b_2 — ширина полок;
 t_1, t_2 — толщина полок;
 ρ_z — коэффициент уменьшения вследствие влияния поперечных моментов в полках;
 M_z — поперечный изгибающий момент, действующий на полках;
 $\rho_{c,g}$ — коэффициент уменьшения для глобального продольного изгиба;
 $\lambda_{c,g}$ — коэффициент гибкости для глобального продольного изгиба;
 $\tau_{cr,g}$ — напряжение прогиба при сдвиге (срезе) для глобального продольного изгиба;
 $\rho_{c,l}$ — коэффициент уменьшения для местного продольного изгиба;
 $\lambda_{c,l}$ — коэффициент гибкости для местного продольного изгиба;
 $\tau_{cr,l}$ — напряжение прогиба при сдвиге для местного продольного изгиба;
 $a_0, a_1, a_2, a_3, a_{max}$ — ширина рифлений;
 I_{ser} — эффективный момент инерции сечения для предельных состояний эксплуатационной пригодности;
 I_{eff} — момент инерции эффективного поперечного сечения в критическом предельном состоянии;
 σ_{gr} — максимальное значение сжимающей и изгибающей нагрузки при предельном состоянии эксплуатационной пригодности, основанное на полном поперечном сечении.
 $\gamma_{M2} \dots \gamma_{M7}$ — частные коэффициенты;
 γ_{Mw} — частный коэффициент для сопротивления штифтовых соединений;
 γ_{Mp} — частный коэффициент для сопротивления сварных соединений;
 γ_{Ma} — частный коэффициент для сопротивления адгезионных соединений;
 $\gamma_{M6,ser}$ — частный коэффициент для сопротивления штифтов в предельном состоянии эксплуатационной пригодности;

γ_{Mc} — частный коэффициент для сопротивления бетона;

$e_1 \dots e_4$ — расстояния от центра отверстий до конца или края элемента;

p_1, p_2, p_i — шаг межцентрового расстояния отверстий под болты;

d — диаметр крепежного элемента;

d_0 — диаметр отверстия под крепежный элемент;

$V_{eff,1,Rd}$ — расчетное сопротивление разрыву блока при центрально приложенной нагрузке;

$V_{eff,2,Rd}$ — расчетное сопротивление разрыву блока при внецентренно приложенной нагрузке;

A_{nt} — площадь нетто, при сжатии;

A_{nv} — площадь нетто, при сдвиге (срезе);

A_1 — площадь уголка без учета отверстия под болт;

β_2 и β_3 — понижающие коэффициенты для соединения уголков;

$F_{v,Ed}$ — расчетная сила сдвига (среза) на один болт в критическом предельном состоянии;

$F_{v,Rd,ser}$ — расчетная сила сдвига (среза) на один болт в предельном состоянии эксплуатационной пригодности;

$F_{v,Rd}$ — расчетное сопротивление сдвигу (срезу) одного болта;

$F_{b,Rd}$ — расчетное сопротивление смятию одного болта;

$F_{s,Rd,ser}$ — расчетное сопротивление проскальзыванию на один болт в предельном состоянии эксплуатационной пригодности;

$F_{s,Rd}$ — расчетное сопротивление проскальзыванию на один болт в критическом предельном состоянии;

$F_{t,Ed}$ — расчетная сила растяжения на один болт в критическом предельном состоянии;

$F_{t,Rd}$ — расчетное сопротивление растяжению на один болт;

$N_{net,Rd}$ — расчетное сопротивление участка с отверстиями под болты;

$B_{t,Rd}$ — расчетное сопротивление растяжению узла болт-пластина;

f_{ub} — характеристический предел прочности материала болта;

f_u — характеристический предел прочности материала соединенных частей;

A_0 — поперечное сечение отверстия;

A — площадь сечения болта брутто;

A_s — растянутая часть площади болта;

k_2 — коэффициент сопротивления растяжению для болта;

d_m — среднее арифметической от диаметра описанной окружности вокруг головки болта или гайки и вписанной окружности, или, если используются шайбы, внешнего диаметра шайб; наименьшее из них;

t_p — толщина пластины под головкой болта или под гайкой;

$F_{p,C}$ — сила предварительного натяжения;

μ — коэффициент скольжения;

n — количество фрикционных границ раздела деталей соединения;

β_{Lf} — понижающий коэффициент для длинного соединения;

L_j — расстояние между центрами оконечных крепежных элементов в длинном соединении;

β_p — понижающий коэффициент для крепежных элементов, проходящих сквозь пакет;

a, c — толщина пластин в штифтовом соединении;

e — зазор между пластинами в штифтовом соединении;

f_w — характеристическая прочность сварного соединения;

$\sigma_{\perp Ed}$ — нормальное напряжение, перпендикулярное сечению шва сварки;

$\sigma_{\parallel Ed}$ — нормальное напряжение, параллельное оси сварки;

τ_{\parallel} — касательное напряжение, параллельное оси сварки;

τ_{\perp} — касательное напряжение, перпендикулярное оси сварки;

γ_{Mw} — частный коэффициент надежности для сварного соединения;

L_w — общая длина продольного углового сварного шва;

$L_{w,eff}$ — эффективная длина продольного углового сварного шва;

a — эффективная толщина шва;

σ_{haz} — расчетное нормальное напряжение в зоне термического влияния HAZ;

τ_{haz} — расчетное касательное напряжение в зоне термического влияния HAZ;

$f_{v,haz}$ — характеристическое сопротивление сдвигу (срезу) в зоне термического влияния HAZ.

$F_{u,Rd}$ — сопротивление растяжению таврового элемента крепления;

B_u — сопротивление растяжению узла болт-пластина;

B_0 — прочность обычного болта на пределе упругости;

L_{eff} — эффективная длина;

e_{min} — минимальное расстояние до края;

m — расстояние от кромки сварки до центра болта.

F — нагрузка, обобщенная сила;

F_u — предельная нагрузка, предельная обобщенная сила;

v — обобщенная деформация;

v_u — деформация, соответствующая предельной обобщенной силе;

$f_{v,haz}$ — характеристическое сопротивление сдвигу адгезионного соединения;

τ — среднее касательное напряжение в слое адгезионного вещества;

γ_{Ma} — частный коэффициент для адгезионного соединения.

БИБЛИОГРАФИЯ

1. СН РК EN 1999-1-1:2007+A1:2009/2011 «Проектирование алюминиевых конструкций. Часть 1-1. Общие правила» с национальным приложением. 2011.
2. СН РК EN 1990:2002+A1:2005/2011 «Основы строительного проектирования» с национальным приложением. 2011.
3. TALAT Lectures 2301. Design of Members. Local Buckling. Example 3.1: Deflection of class 4 cross section. European Aluminium Association. 1999.
4. TALAT Lectures 2301. Design of Members. Axial Force. Example 5.1: Axial force resistance of square hollow section. European Aluminium Association. 1999.
5. TALAT Lectures 2301. Design of Members. Axial Force. Example 5.2: Axial force resistance of symmetric hollow extrusion. European Aluminium Association. 1999.
6. TALAT Lectures 2301. Design of Members. Axial Force. Example 5.5: Axial force resistance of laced column. European Aluminium Association. 1999.
7. TALAT Lectures 2301. Design of Members. Axial Force. Example 5.6: Axial force resistance of orthotropic plate. Open or closed stiffeners. European Aluminium Association. 1999.
8. TALAT Lectures 2301. Design of Members. Shear Force. Example 6.1 – 6.6: Shear resistance of webs without and with stiffeners. European Aluminium Association. 1999.
9. TALAT Lectures 2301. Design of Members. Shear Force. Example 6.7: Shear force resistance of orthotropic plate. Open or closed stiffeners. European Aluminium Association. 1999.
10. TALAT Lectures 2301. Design of Members. Shear Force Example 6.8: Shear force resistance of orthotropic double-skin plate. European Aluminium Association. 1999.
11. TALAT Lectures 2301. Design of Members. Concentrated Load. Example 7.1: Concentrated force. European Aluminium Association. 1999.
12. TALAT Lectures 2301. Design of Members. Torsion. Example 8.2: Torsion constants for hollow cross section. European Aluminium Association. 1999.
13. TALAT Lectures 2301. Design of Members. Axial force and bending moment. Example 9.1: Tension force and bending moment. European Aluminium Association. 1999.
14. TALAT Lectures 2301. Design of Members. Axial force and bending moment. Example 9.2: Beam-column with rectangular hollow section. European Aluminium Association. 1999.
15. TALAT Lectures 2710. Static Design Example. European Aluminium Association. 1999.

УДК МКС

КПВЭД*

Ключевые слова: алюминиевые конструкции, расчет элементов алюминиевых конструкций, листовые алюминиевые конструкции, составные алюминиевые балки, соединения алюминиевых конструкций

ҚР НТҚ 09-01-1.1-2011

НТП РК 09-01-1.1-2011

Ресми басылым

**ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҰЛТТЫҚ ЭКОНОМИКА МИНИСТРЛІГІНІҢ
ҚҰРЫЛЫС, ТҰРҒЫН ҮЙ-КОММУНАЛДЫҚ ШАРУАШЫЛЫҚ ІСТЕРІ ЖӘНЕ
ЖЕР РЕСУРСТАРЫН БАСҚАРУ КОМИТЕТІ**

**ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫНЫҢ
НОРМАТИВТІК-ТЕХНИКАЛЫҚ ҚҰРАЛЫ**

**ҚР НТҚ 09-01-1.1-2011
АЛЮМИНИЙ КОНСТРУКЦИЯЛАРДЫ ЖОБАЛАУ.
1-БӨЛІМ. ЖАЛПЫ ЕРЕЖЕЛЕР**

Басылымға жауаптылар: «ҚазҚСҒЗИ» АҚ

050046, Алматы қаласы, Солодовников көшесі, 21

Тел./факс: +7 (727) 392-76-16 – қабылдау бөлмесі

Издание официальное

**КОМИТЕТ ПО ДЕЛАМ СТРОИТЕЛЬСТВА, ЖИЛИЩНО-КОММУНАЛЬНОГО
ХОЗЯЙСТВА И УПРАВЛЕНИЯ ЗЕМЕЛЬНЫМИ РЕСУРСАМИ МИНИСТЕРСТВА
НАЦИОНАЛЬНОЙ ЭКОНОМИКИ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН**

**НОРМАТИВНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ПОСОБИЕ
Республики Казахстан**

**НТП РК 09-01-1.1-2011
ПРОЕКТИРОВАНИЕ АЛЮМИНИЕВЫХ КОНСТРУКЦИЙ.
ЧАСТЬ 1. ОБЩИЕ ПРАВИЛА**

Ответственные за выпуск: АО «КазНИИСА»

050046, г. Алматы, ул. Солодовникова, 21

Тел./факс: +7 (727) 392-76-16 – приемная