

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

---

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

**БОЛАТ КОНСТРУКЦИЯЛАРДЫ ЖОБАЛАУ**  
**1-11 бөлімі. Тот баспайтын болаттарға арналған**  
**қосымша ережелер**

---

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ**  
**Часть 1-11. Дополнительные правила для**  
**нержавеющей стали**

**ҚР НТҚ 03-01-4.1-2011**  
**(ҚР ҚН EN 1993-1-4/2011 әзірленген)**  
**НТП РК 03-01-4.1-2011**  
**(к СН РК EN 1993-1-4/2011)**

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, «Астана Строй-Консалтинг» ЖШС
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», ТОО «Астана Строй-Консалтинг»
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

<b>ВВЕДЕНИЕ.....</b>	<b>V</b>
<b>1 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ.....</b>	<b>1</b>
1.1 Область применения .....	1
1.2 Нормативные ссылки .....	3
1.3 Условия применения .....	4
1.4 Различия между принципами и правилами проектирования .....	4
1.5 Термины и определения.....	4
1.6 Обозначения.....	5
1.7 Условные обозначения осей элементов .....	5
<b>2 ТРЕБОВАНИЯ К МАТЕРИАЛАМ КОНСТРУКЦИИ И СОЕДИНЕНИЙ ИЗ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ .....</b>	<b>6</b>
2.1 Общие положения .....	6
2.2 Требования по физико-механическим свойствам нержавеющей стали и их расчетные значения.....	10
2.3 Нержавеющие стали, усиленные холодным формованием.....	12
2.4 Требования по пластичности.....	13
2.5 Требования по ударной вязкости .....	14
2.6 Требования к свойствам стали в направлении толщины проката .....	14
2.7 Требования к деталям соединения.....	15
2.8 Требования к допускам .....	17
<b>3 ДОЛГОВЕЧНОСТЬ.....</b>	<b>18</b>
3.1 Общие положения .....	18
3.2 Антикоррозийные мероприятия.....	18
3.3 Виды коррозии.....	22
3.4 Уровни риска.....	25
3.5 Конструктивные антикоррозионные мероприятия .....	26
<b>4 ПРЕДЕЛЬНОЕ СОСТОЯНИЕ ПО ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ПРИГОДНОСТИ ..</b>	<b>29</b>
4.1 Общие положения .....	29
4.2 Дополнительные положения по определению деформаций у конструкций и их элементов из нержавеющей стали .....	29
4.3 Моделирование поведения материала в расчетах методом конечных элементов ....	32
<b>5 КРИТИЧЕСКИЕ ПРЕДЕЛЬНЫЕ СОСТОЯНИЯ.....</b>	<b>34</b>
5.1 Общие положения .....	34
5.2 Определение характеристик поперечных сечений .....	35
ПРИМЕР 1 Проверка соответствия геометрических пропорций условиям Пункта	
5.2.1 СН РК EN 1993-1-4 .....	35
ПРИМЕР 2 Расчет по определению класса сечения прокатного профиля из нержавеющей стали .....	41
ПРИМЕР 3 Определение класса сечения центрально-сжатой сварной колонны .....	44
ПРИМЕР 4 Определение класса сечения сжато-изгибаемой сварной балки .....	45

ПРИМЕР 5 Определение класса сечения центрально сжатой балки с «гибкой» стенкой .....	46
ПРИМЕР 6 Определение класса сечения центрально сжатой круглой трубы .....	49
ПРИМЕР 7 Определение класса сечения центрально сжатого не равнополочного уголка .....	50
ПРИМЕР 8 Определение класса сечения центрально сжатого равнополочного уголка .....	51
5.3 Сопротивление поперечных сечений .....	51
ПРИМЕР 9 Расчет болтового узла.....	52
ПРИМЕР 10 Расчет болтового соединения между двумя пластинами из нержавеющей стали .....	58
5.4 Несущая способность элементов по устойчивости .....	65
ПРИМЕР 11 Расчет центрально-сжатой стойки трубчатого сечения. ....	68
ПРИМЕР 12 Расчет балки. ....	71
5.5 Несущая способность элементов постоянного сечения при совместном действии изгибающего момента и осевого сжатия .....	77
ПРИМЕР 13 Расчет внецентренно-сжатой сварной двутавровой стойки. ....	79
5.6 Несущая способность при действии поперечной силы .....	81
ПРИМЕР 14 Расчет поперечного ребра на сопротивление сдвигу. ....	85
5.7 Поперечные ребра жесткости .....	89
<b>6 ТРЕБОВАНИЯ К РАСЧЕТУ СОЕДИНЕНИЙ .....</b>	<b>92</b>
6.1 Общие положения .....	92
6.2 Дополнительные положения к СН РК EN 1993-1-3.....	92
6.3 Дополнительные положения к СН РК EN 1993-1-8.....	93
ПРИМЕР 15 Расчет сварных швов консоли колонны.....	95
<b>7 ТРЕБОВАНИЯ К ПРОЕКТИРОВАНИЮ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ.....</b>	<b>102</b>
<b>8 ТРЕБОВАНИЯ К УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ.....</b>	<b>103</b>
<b>9 ТРЕБОВАНИЯ К ПРОЕКТИРОВАНИЮ КОНСТРУКЦИЙ С УЧЕТОМ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОЖАРА.....</b>	<b>104</b>

## 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.

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

---

**БОЛАТ КОНСТРУКЦИЯЛАРДЫ ЖОБАЛАУ. 1-11 бөлімі.**

**Тот баспайтын болаттарға арналған қосымша ережелер**

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ. Часть 1-11. Дополнительные**  
**правила для нержавеющей стали**

---

Дата введения **2015-07-01**

**1 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ**

**1.1 Область применения**

**1.1.1 Общие сведения**

1.1.1.1 Комплекс нормативно-технических пособий к строительным нормам Республики Казахстан, идентичных Еврокоду 3 (далее НТП к СН РК EN 1993) – это перечень нормативных документов, в которых даны:

- а) рекомендации по основным положениям расчета и конструирования стальных конструкций по СН РК EN 1993;
- б) разъяснения ссылочной информации;
- в) численные примеры расчета;
- г) дополнительная справочная информация.

1.1.1.2 Основополагающими документами при разработке комплекса нормативно-технических пособий к СН РК EN 1993, помимо самих 20 частей СН РК EN 1993 «Проектирование стальных конструкций», являются:

- а) СН РК EN 1990 «Основы проектирования несущих конструкций»;
- б) СН РК EN 1991 «Воздействия на конструкции»;
- в) EN 1090 «Изготовление стальных и алюминиевых конструкций».

**1.1.2 Область применения нормативно-технических пособий к СН РК EN 1993**

1.1.2.1 НТП к СН РК EN 1993 применяется для расчета и конструирования стальных конструкций зданий и сооружений гражданского назначения, выполненного согласно СН РК EN 1993.

1.1.2.2 Положения НТП к СН РК EN 1993 охватывают только требования по несущей способности, эксплуатационной пригодности, долговечности и огнестойкости стальных конструкций. Другие требования не отражены в НТП к СН РК EN 1993.

1.1.2.3 НТП к СН РК EN 1993 необходимо использовать совместно со следующими нормативными документами:

- а) НТП к СН РК EN 1990;
- б) НТП к СН РК EN 1991;

**Издание официальное**

---

в) НТП к СН РК EN 1992 - СН РК EN 1999, в тех частях, которые непосредственно затрагивают расчет стальных конструкций или их элементов;

г) стандарты EN, ETAG, ETA и другие соответствующие стандарты на строительные изделия, относящиеся к стальным конструкциям.

1.1.2.4 Комплекс нормативно-технических пособий к СН РК EN состоит из 19 пособий:

- НТП к СН РК EN 1993-1 «Проектирование стальных конструкций. Общие правила» (12 пособий);

- НТП к СН РК EN 1993-2 «Проектирование стальных конструкций. Стальные мосты» (1 пособие);

- НТП к СН РК EN 1993-3 «Проектирование стальных конструкций. Стальные башни, мачты и дымовые трубы» (1 пособие);

- НТП к СН РК EN 1993-4 «Проектирование стальных конструкций. Стальные бункера, резервуары и трубопроводы» (3 пособия);

- НТП к СН РК EN 1993-5 «Проектирование стальных конструкций. Стальные шпунты» (1 пособие);

- НТП к СН РК EN 1993-6 «Проектирование стальных конструкций. Стальные подкрановые пути» (1 пособие).

1.1.2.5 В НТП к СН РК EN 1993-1 приведены общие рекомендации и указания по проектированию стальных конструкций, которые распространяются на НТП к СН РК EN 1993, имеющие отношение к специальным зданиям и сооружениям: НТП к СН РК EN 1993-2, НТП к СН РК EN 1993-3, НТП к СН РК EN 1993-4, НТП к СН РК EN 1993-5, НТП к СН РК EN 1993-6.

1.1.2.6 НТП к СН РК EN 1993-1 состоит из 12 пособий:

- НТП к СН РК EN 1993-1-1;

- НТП к СН РК EN 1993-1-2;

- НТП к СН РК EN 1993-1-3;

- НТП к СН РК EN 1993-1-4;

- НТП к СН РК EN 1993-1-5;

- НТП к СН РК EN 1993-1-6;

- НТП к СН РК EN 1993-1-7;

- НТП к СН РК EN 1993-1-8;

- НТП к СН РК EN 1993-1-9;

- НТП к СН РК EN 1993-1-10;

- НТП к СН РК EN 1993-1-11;

- НТП к СН РК EN 1993-1-12.

### **1.1.3 Область применения нормативно-технического пособия к СН РК EN 1993-1-4**

1.1.3.1 В настоящем пособии приведены дополнительные правила по проектированию конструкций и их элементов из аустенитной, аустенитно-ферритной и ферритной нержавеющей стали. Данные дополнительные правила расширяют и изменяют

общие правила проектирования, приведенные в СН РК EN 1993-1-1, СН РК EN 1993-1-3, СН РК EN 1993-1-5 и СН РК EN 1993-1-8, с учетом использования нержавеющей стали.

1.1.3.2 Настоящее пособие состоит из 9 разделов:

- Раздел 1: Общие положения;
- Раздел 2: Требования к материалам конструкции и соединений из нержавеющей стали;
- Раздел 3: Требования по обеспечению долговечности;
- Раздел 4: Предельное состояние эксплуатационной пригодности;
- Раздел 5: Критические предельные состояния;
- Раздел 6: Требования к расчету соединений;
- Раздел 7: Требования к проектированию конструкций на основе результатов испытаний;
- Раздел 8: Требования к усталостной прочности;
- Раздел 9: Требования к проектированию конструкций с учетом воздействия пожара.

1.1.3.3 Разделы с 1 по 9 настоящего пособия повторяют структуру норматива СН РК EN 1993. В них даются разъяснения по разделам и пунктам СН РК EN 1993-1-4. В настоящем пособии номера пунктов СН РК EN 1993 приведены в скобках.

1.1.3.3.1 Раздел 1 настоящего пособия содержит дополнительные указания к СН РК EN 1990.

1.1.3.3.2 В Разделе 2 рассмотрены свойства материалов конструкций из нержавеющей стали.

1.1.3.3.3 Требования по обеспечению соответствующей долговечности конструкций и их элементов из нержавеющей стали приведены в Разделе 3.

1.1.3.3.4 В Разделе 4 даны дополнительные положения по определению деформаций.

1.1.3.3.5 В Разделе 5 приведены дополнительные положения к расчету несущей способности поперечных сечений и элементов конструкций из нержавеющей стали.

1.1.3.3.6 В Разделе 6 даны дополнительные положения по расчету соединений.

1.1.3.3.7 В Разделе 7 приведены общие положения к проектированию конструкций из нержавеющей стали на основе результатов испытаний.

1.1.3.3.8 В Разделе 8 приведены общие положения к проектированию конструкций из нержавеющей стали с учетом усталостной прочности.

1.1.3.3.9 В Разделе 9 приведены общие положения к проектированию конструкций из нержавеющей стали с учетом воздействия пожара.

## **1.2 Нормативные ссылки**

1.2.1 В Настоящем пособии приведены ссылки на части СН РК EN 1990 - СН РК EN 1999 (основные ссылки):

- СН РК EN 1990;
- СН РК EN 1991;
- СН РК EN 1992;
- СН РК EN 1993;



- СН РК EN 1994;
- СН РК EN 1995;
- СН РК EN 1996;
- СН РК EN 1997;
- СН РК EN 1998;
- СН РК EN 1999.

1.2.2 В Настоящем пособии приведены ссылки на стандарты (вторичные ссылки):

- EN 1090;
- EN 508-3;
- EN ISO 3506 (в трёх частях);
- EN ISO 7089;
- EN ISO 7090;
- EN ISO 9445;
- EN 10029;
- EN 10052;
- EN 10088 (в трёх частях);
- EN 10162;
- EN 10219-2.

### **1.3 Условия применения**

При применении настоящего пособия необходимо учитывать общие требования СН РК EN 1990. Кроме того, все положения настоящего пособия предполагают, что изготовление и сборка стальных конструкций выполнены согласно EN 1090.

### **1.4 Различия между принципами и правилами проектирования**

1.4.1 Различия между принципами и правилами проектирования в настоящем пособии базируются на положениях СН РК EN 1990, где приведены различия между принципами и правилами проектирования конструкций.

1.4.2 Принципы - это такие требования, невыполнение которых не допустимо (если не указано другое).

1.4.3 Правила применения - общепринятые правила, дополняющие и поясняющие принципы.

### **1.5 Термины и определения**

1.5.1 В настоящем пособии используются термины и определения в соответствии:

- с Пунктом 1.5 СН РК EN 1990,
- с Пунктом 1.5(1) СН РК EN 1993-1-1,
- с Пунктом 1.3 СН РК EN 1993-1-3,
- с Пунктом 1.3 СН РК EN 1993-1-5
- с Пунктом 1.4 СН РК EN 1993-1-8,

которые необходимы при проектировании конструкций и их элементов из нержавеющей стали.

1.5.2 Термины и определения, касающиеся термообработки металлов - см. EN 10052.

## **1.6 Обозначения**

1.6.1 В настоящем пособии используются обозначения символов в соответствии:

- с Пунктом 1.6 СН РК EN 1990;
- с Пунктом 1.6 СН РК EN 1993-1-1;
- с Пунктом 1.4 СН РК EN 1993-1-3;
- с Пунктом 1.4 СН РК EN 1993-1-5;
- с Пунктом 1.5 СН РК EN 1993-1-8,

которые необходимы при расчете конструкций и их элементов из нержавеющей стали.

1.6.2 В дополнение к обозначению символов, перечисленных в Пункте 1.6.1 настоящего пособия, используются обозначения символов согласно Пункту 1.6 СН РК EN 1993-1-4.

## **1.7 Условные обозначения осей элементов**

В настоящем пособии используются аналогичное с СН РК EN 1993-1-1, СН РК EN 1993-1-3, СН РК EN 1993-1-5 и СН РК EN 1993-1-8 обозначение осей элемента.

# **2 ТРЕБОВАНИЯ К МАТЕРИАЛАМ КОНСТРУКЦИИ И СОЕДИНЕНИЙ ИЗ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ**

## **2.1 Общие положения**

2.1.1 Конструкционная нержавеющая сталь, используемая при проектировании стальных конструкций, должна отвечать;

- а) требованиям по физико-механическим свойствам;
- б) требованиям по пластичности;
- в) требованиям по ударной вязкости;
- г) требованиям по свойствам нержавеющей стали в направлении толщины проката;
- д) требованиям к деталям соединений;
- е) требованиям по допускам

2.1.2 Положения Раздела 2 настоящего пособия применяются только для проектирования конструкций и их элементов из аустенитной, аустенитно-ферритной и ферритной нержавеющей стали.

2.1.3 Аустенитная нержавеющая сталь – не магнитная сталь с содержанием хрома 15-20% и никеля 5-15% в зависимости от марки стали. Обладает хорошей формуетостью, пластичностью и коррозионной стойкостью. Отличается технологичностью и свариваемостью.

Ферритная нержавеющая сталь – сталь, сходная по свойствам с малоуглеродистой, но обладает более высокой коррозионной стойкостью благодаря содержанию хрома от 11% до 17%.

Аустенитно-ферритная сталь (дуплексная) – сталь с высоким содержанием хрома 18-22% и пониженным содержанием никеля 2-6% (для экономии).

Аустенитно-ферритная сталь по сравнению с аустенитной обладает более высокой прочностью с высокой стойкостью к коррозионному растрескиванию.

Химический состав нержавеющих сталей представлен в Таблице 3.1 настоящего пособия.

2.1.4 Все требования и рекомендации по проектированию конструкции и ее элементов из нержавеющей стали применяются для нержавеющих сталей с значением номинального предела текучести до 480 Н/мм<sup>2</sup> включительно.

2.1.5 Проектирование конструкций и ее элементов из нержавеющей стали с номинальным пределом текучести выше, чем значение 480 Н/мм<sup>2</sup> (нержавеющие стали, усиленные холодным формованием), возможно при условии, что все физико-механические характеристики определены соответствующими испытаниями согласно требованиям Приложения D СН РК EN 1990.

2.1.6 Положения по применению нержавеющей стали с номинальным пределом текучести выше, чем 480 Н/мм<sup>2</sup> (нержавеющие стали, усиленные холодным формованием), приведены в Пункте 2.3 настоящего пособия.

2.1.7 Номинальные значения физико-механических свойств нержавеющей стали, приведенные в данном Разделе 2 настоящего пособия, необходимо использовать при расчете как характеристические значения.

2.1.8 Другие физико-механические характеристики, не отраженные в Разделе 2 настоящего пособия, приведены в стандарте EN 10088.

### **2.1.9 Выбор соответствующей марки нержавеющей стали**

2.1.9.1 (А.4.1(1)) Выбор наиболее подходящей марки нержавеющей стали должен учитывать среду применения, технологию производства, возможность механической обработки материала, чистоту обработки поверхности и техническое обслуживание конструкции. Хотя нержавеющие стали имеют низкие требования по техническому обслуживанию, необходимо подробно рассмотреть проектирование для устойчивости к коррозии, где материал выбирается для использования в коррозионной среде.

2.1.9.2 (А.4.1(2)) Необходимо учитывать следующие риски на протяжении проектируемого срока эксплуатации:

- а) коррозионного растрескивания под напряжением;
- б) щелевой коррозии;
- в) гальванической коррозии;
- г) точечной коррозии;
- д) коррозионных пятен;
- е) потери толщины.

2.1.9.3 (А.4.1(3)) Выбор соответствующей марки нержавеющей стали необходимо разделить на несколько этапов.

В первую очередь необходимо характеризовать среду эксплуатации. Коррозионная агрессивность среды диктуется рядом переменных, таких как влажность, температура воздуха, присутствие химикатов и их концентрация, содержание кислорода и т. д. Коррозия не может произойти, если не присутствует влажность. Например, нагретые и вентилируемые здания могут быть классифицированы как сухие, и маловероятно, что коррозия произойдет в таких условиях. Риск конденсации выше в местах, таких как кухни и прачечные. Прибрежные районы очень коррозионно агрессивны из-за присутствия высоких концентраций ионов хлорида в воздухе, поэтому конструкции, подверженные морским брызгам особенно подвержены коррозионному разъеданию.

2.1.9.4 (А.4.1(4)) После характеристики общей окружающей среды необходимо принять во внимание воздействие непосредственного окружения на нержавеющую сталь (например, элементы и вещества, с которыми материал может вступить в контакт). Состояние поверхности, температура стали и ожидаемое рабочее напряжение также могут быть важными параметрами.

2.1.9.5 (А.4.1(5)) Затем необходимо уделить внимание рассмотрению механических характеристик и влияние типа нагрузки, включая рабочую нагрузку, циклы нагрузки, вибрации, сейсмические нагрузки и т. д. Возможно, потребуется просчитать влияние циклического нагрева и охлаждения. Также при окончательном выборе необходимо принимать во внимание простоту производства, доступность форм продукции, финишную обработку поверхности и расходы.

2.1.9.6 (А.4.1(6)) Оценка пригодности марок наилучшим образом производится с учетом опыта использования нержавеющих сталей в аналогичных применениях и средах. Таблица 2.2 дает руководство по выбору подходящих марок для атмосферных условий с точки зрения коррозии.

2.1.9.7 (А.4.1(7)) Помимо классификации нержавеющих сталей для атмосферных применений, как в Таблице 2.2, также необходимо проводить различие между:

- косметическим применением, при котором основное внимание при выборе материала уделяется поддержанию внешнего вида во время срока эксплуатации продукции (в этом случае необходимо различать между наружным и внутренним применением);
- конструктивными применениями, при которых механические характеристики требуют основного внимания.

2.1.9.8 (А.4.1(8)) В случае косметического применения необходимо принимать во внимание не только окружающую атмосферу, но также и расположение частей и возможность их естественной очистки погодными явлениями. Если части расположены под навесами (такими как крыши), их необходимо очищать чаще.

2.1.9.9 (А.4.1(9)) В случае конструктивного применения, для которого механические характеристики являются существенно важными, большинство атмосфер не оказывает ухудшающего воздействия на нержавеющие стали.

2.1.9.10 (А.4.1(10)) Некоторые нержавеющие стали пригодны для многих видов применения в бассейнах как внутри помещения, так и снаружи. Для элементов несущих нагрузку в атмосферах, содержащих хлориды, которые не могут регулярно очищаться (например, при поддержании потолков над плавательными бассейнами) должны использоваться марки нержавеющей стали по Таблице 2.1.

**Таблица 2.1 - Выбор марки нержавеющей стали**

Количество ионов хлорида в воде бассейна	Марка нержавеющей стали по EN 10088
≤ 250 мг/л ионов хлорида	1.4539, 1.4529, 1.4547, 1.4565
> 250 мг/л ионов хлорида	1.4529, 1.4547, 1.4565

2.1.9.11 (А.4.1(10) Примечание) Могут использоваться альтернативные марки, по которым была продемонстрирована эквивалентная сопротивляемость коррозионному растрескиванию под напряжением при таких атмосферах.

2.1.9.12 (А.4.1(11)) Необходимо получение рекомендаций эксперта для более специализированных применений, таких как нержавеющая сталь, контактирующая или погруженная в химикаты.

**Таблица 2.2 - Предлагаемые марки нержавеющей стали для атмосферного применения**

Марка стали по EN 10088	Типы окружающей среды и категория коррозии											
	Сельская			Городская			Промышленная			Морская		
	Низкая	Средняя	Высокая	Низкая	Средняя	Высокая	Низкая	Средняя	Высокая	Низкая	Средняя	Высокая
1.4003 1.4016	Y <sup>I</sup>	X	X	Y <sup>I</sup>	X	X	X	X	X	X	X	X
1.4301 1.4311 1.4541 1.4318	Y	Y	Y	Y	Y	(Y)	(Y)	(Y)	X	Y	(Y)	X
1.4362 1.4401 1.4404 1.4406 1.4571	O	O	O	O	Y	Y	Y	Y	(Y)	Y	Y	(Y)
1.4439 1.4462 1.4529 1.4539	O	O	O	O	O	O	O	O	Y	O	O	Y

**Таблица 2.2 - Предлагаемые марки нержавеющей стали для атмосферного применения (продолжение)**

Коррозионные условия:

- а) низкие: наименьшие коррозионные условия для такого типа окружающей среды (например, случаи с низкой влажностью и низкой температурой);
- б) средние: достаточно типичные для данного типа окружающей среды;
- в) высокие: коррозия, вероятно, будет выше, чем это типично для такого типа окружающей среды (например, увеличивается высокой влажностью, высокими атмосферными температурами или особенно агрессивными веществами, загрязняющими воздух).

Обозначения:

- а) О - избыточная спецификация с точки зрения коррозии.
- б) Y - вероятно наилучший выбор для сопротивления коррозии и ржавчине.
- в) Y<sup>1</sup> - только для внутреннего применения. Необходимо избегать использования ферритных нержавеющей сталей для косметических применений.
- г) X — вероятно будет подвержен обширной коррозии.
- д) (Y) — стоит рассмотреть, при условии, что предприняты необходимые меры предосторожности (т. е. предусмотреть относительно гладкую поверхность и затем проводить регулярную промывку).

## **2.2 Требования по физико-механическим свойствам нержавеющей стали и их расчетные значения**

2.2.1 В настоящем пособии для расчета конструкций и их элементов из нержавеющей стали приведены следующие расчетные значения физико-механических характеристик:

а) модуль упругости:

- для аустенитной стали всех марок, кроме марки 1.4539; 1.4529 и 1.4547:

$$E = 200000 \text{ Н/мм}^2;$$

- для аустенитной стали всех марки 1.4539; 1.4529 и 1.4547:

$$E = 195000 \text{ Н/мм}^2;$$

- для аустенитно-ферритной стали всех марок:

$$E = 200000 \text{ Н/мм}^2;$$

- для ферритной стали всех марок:

$$E = 220000 \text{ Н/мм}^2.$$

б) коэффициент Пуассона в упругой стадии равен:

$$\nu = 0,3;$$

в) модуль сдвига:

- для аустенитной стали всех марок, кроме марки 1.4539; 1.4529 и 1.4547, равен:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} = \frac{200000}{2(1 + 0,3)} = 76923 \text{ Н/мм}^2;$$

- для аустенитной стали всех марки 1.4539; 1.4529 и 1.4547, равен:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} = \frac{195000}{2(1 + 0,3)} = 75000 \text{ Н/мм}^2;$$

– для аустенитно-ферритной стали всех марок равен:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} = \frac{200000}{2(1 + 0,3)} = 76923 \text{ Н/мм}^2;$$

– для ферритной стали всех марок равен:

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} = \frac{220000}{2(1 + 0,3)} = 84615 \text{ Н/мм}^2.$$

2.2.2 Расчетные значения физико-механических свойств для нержавеющей стали в отпущенном состоянии могут быть определены на основании положений Пункта 4.3 настоящего пособия.

2.2.3 Расчетное значение секущего модуля упругости  $E_{s,i}$  при расчетах предельного состояния эксплуатационной пригодности определяется согласно требованию Пункта 4.2.8 настоящего пособия.

2.2.4 При проектировании конструкций и их элементов из нержавеющей стали номинальные значения предела текучести  $f_y$  и временного сопротивления  $f_u$  следует принимать как характеристические значения.

2.2.5 Номинальные значения предела текучести  $f_y$  и временного сопротивления  $f_u$  (независимо от направления прокатки) при расчете конструкций и их элементов из нержавеющей стали приведены в Таблице 2.3 настоящего пособия.

**Таблица 2.3 - Номинальные значения предела текучести  $f_y$  и временного сопротивления  $f_u$  для конструкционной нержавеющей стали по EN 10088 <sup>1)</sup>**

Тип нержавеющей стали	Марка	Форма продукции							
		Холоднокатаная полоса		Горячекатаная полоса		Горячекатаный лист		Болванки, пруты и заготовки	
		Номинальная толщина t							
		t ≤ 6 мм		t ≤ 12 мм		t ≤ 75 мм		t ≤ 250 мм	
		f <sub>y</sub>	f <sub>u</sub>	f <sub>y</sub>	f <sub>u</sub>	f <sub>y</sub>	f <sub>u</sub>	f <sub>y</sub>	f <sub>u</sub>
		Н/мм <sup>2</sup>	Н/мм <sup>2</sup>	Н/мм <sup>2</sup>	Н/мм <sup>2</sup>	Н/мм <sup>2</sup>	Н/мм <sup>2</sup>	Н/мм <sup>2</sup>	Н/мм <sup>2</sup>
Ферритная сталь	1.4003	280	450	280	450	250 <sup>3)</sup>	450 <sup>3)</sup>	260 <sup>4)</sup>	450 <sup>4)</sup>
	1.4016	260	450	240	450	240 <sup>3)</sup>	430 <sup>3)</sup>	240 <sup>4)</sup>	400 <sup>4)</sup>
	1.4512	210	380	210	380	—	—	—	—
Аустенитная сталь	1.4306	220	520	200	520	200	500	180	460
	1.4307							175	450
	1.4541							190	500
	1.4301	230	540	210	520	210	520		
	1.4401	240	530	200	530	220	520	200	500
	1.4404								
	1.4539							230	530

**Таблица 2.3 - Номинальные значения предела текучести  $f_y$  и временного сопротивления  $f_u$  для конструкционной нержавеющей стали по EN 10088<sup>1)</sup> (продолжение)**

	1.4571		540		540		200	500
	1.4432	240	550	220	550	220	520	
	1.4435							
	1.4311	290	550	270	550	270	550	550
	1.4406	300	580	280	580	280	580	580
	1.4439	290		270		270		
	1.4529	300	650	300	650	300	650	
	1.4547	320	650	300	650	300	650	300 650
	1.4318	350	650	330	650	330	630	— —
Аустенитная- ферритная сталь	1.4362	420	600	400	600	400	630	400 <sup>2)</sup> 600 <sup>2)</sup>
	1.4462	480	660	460	660	460	640	450 650

Номинальные значения  $f_y$  и  $f_u$ , приведенные в этой таблице, могут использоваться в проектировании без обращения специального внимания на анизотропный эффект или эффект механического упрочнения.

<sup>2)</sup>  $t \leq 160$  мм.

<sup>3)</sup>  $t \leq 25$  мм.

<sup>4)</sup>  $t \leq 100$  мм.

2.2.6 В Таблице 2.3 настоящего пособия не даны номинальные значения предела текучести  $f_y$  и временного сопротивления  $f_u$  для прокатных профилей замкнутого сечения. Но согласно Пункту 2.1.2(3) СН РК EN 1993-1-4, номинальные значения характеристик прочности  $f_y$  и  $f_u$  для прокатных профилей замкнутого сечения равны номинальным значениям характеристик прочности  $f_y$  и  $f_u$  исходного материала, из которого изготовлен прокатный профиль замкнутого сечения (холоднокатанная полоса, горячекатанная полоса, горячекатанный лист).

2.2.7 Значения предела текучести  $f_y$  для прокатных профилей замкнутого сечения, выше, чем  $480 \text{ Н/мм}^2$  полученные в результате усиления холодным формованием исходного материала, могут использоваться в расчетах при условии, что значения предела текучести  $f_y$  определены соответствующими испытаниями, согласно требованиям Приложения D СН РК EN 1990.

2.2.8 Значения характеристик прочности  $f_y$  и  $f_u$  у нержавеющей сталей, усиленные холодным формованием, не должны зависеть от направления прокатки или протягивания.



## 2.3 Нержавеющие стали, усиленные холодным формованием

### 2.3.1 Общие положения

2.3.1.1 (Б.1(1)) В данном Пункте 2.3 настоящего пособия изложены правила для использования нержавеющей стали в упроченном холодной обработкой состоянии или холодной прокаткой, либо за счет процесса производства конструкционного элемента или комбинацией того и другого.

2.3.1.2 (Б.1(2)) Правила применимы, только если характеристики поддерживаются во время производства и изготовления конструкции, а также во время расчетного срока эксплуатации конструкции. Сварка или тепловая обработка продукции не должна проводиться, если только не будет подтверждено испытаниями (в соответствии с Приложением D СН РК EN 1990), что выполнение конструкции не ухудшит физико-механические характеристики.

### 2.3.2 Упрочение при холодной прокатке

2.3.2.1 (Б.2(1)) Для материала, поставляемого в состоянии, упроченном холодной прокаткой согласно EN 10088, могут быть приняты увеличенные номинальные значения предела текучести  $f_y$  и временного сопротивления  $f_u$ . Предельное напряжение, указанное в EN 10088, может быть взято как нормативная прочность - см. Таблицу 2.4. Предел текучести в Таблице 2.4 может использоваться как нормативная при условии, что он гарантируется производителем.

2.3.2.2 (Б.2(2)) Правила проектирования, указанные в настоящем пособии применимы к материалу до марки С700 и СР350. Для более высоких марок, проектирование должно быть основано на результатах испытаний согласно Приложению D СН РК EN 1990, за исключением того, что сопротивление поперечного сечения без местной или общей потери устойчивости может быть рассчитано согласно Разделу 5 настоящего пособия для поперечного сечения классов 1, 2 и 3.

**Таблица 2.4 - Номинальные значения для предела текучести  $f_y$  и временного сопротивления  $f_u$  для упроченной холодной прокаткой конструкционной нержавеющей стали по EN 10088**

Тип нержавеющей стали	0,2 % уровень запаса прочности в состоянии холодной прокатки	$f_y$ , Н/мм <sup>2</sup>	Уровень предела прочности на растяжение в состоянии холодной прокатки	$f_u$ , Н/мм <sup>2</sup>
Аустенитные стали	СР350	350	С700	700
	СР500	500	С850	850
	СР700	700	С1000	1000

### 2.3.3 Упрочение при изготовлении

2.3.3.1 (Б.3(1)) Упрочение во время изготовления элементов конструкций может быть использовано в проектировании, при условии, что влияние упрочения было подтверждено полномасштабными испытаниями в соответствии с Приложением D СН РК EN 1990.

2.3.3.2 (Б.3(2)) Для проектирования соединений, которые не являются частью полномасштабных испытаний, должны использоваться номинальные значения прочности.

### 2.4 Требования по пластичности

2.4.1 При проектировании конструкций и их элементов из нержавеющей стали необходимо учитывать пластичность. Требования по пластичности для малоуглеродистых сталей применены к нержавеющей сталям.

2.4.2 Расчет конструкций и их элементов из нержавеющей сталей должен выполняться для тех марок сталей, которые представлены в Таблице 2.1 настоящего пособия или соответствующие данным маркам, которые отвечают всем требованиям по пластичности Раздела 2 Настоящего пособия.

2.4.3 При проектировании конструкций и их элементов из нержавеющей стали согласно положениям настоящего пособия в целях обеспечения надежности, сталь должна обладать следующими значениями:

а) отношение значения временного сопротивления  $f_u$  к значению предела текучести  $f_y$  должно быть больше чем 1,1:

$$\frac{f_u}{f_y} > 1,1;$$

б) отношение значения предельной деформации  $\varepsilon_u$  к упругой деформации  $\varepsilon_y$  должно быть больше 15,0:

$$\frac{\varepsilon_u}{\varepsilon_y} > 15,0;$$

в) относительное удлинение стального образца не менее 15% при первоначальной длине образца  $5,65\sqrt{A_0}$  (где  $A_0$  – начальная площадь поперечного сечения стального образца).

### 2.5 Требования по ударной вязкости

2.5.1 При проектировании конструкций и их элементов из нержавеющей стали необходимо учитывать свойства нержавеющей стали при отрицательных значениях температуры эксплуатации для исключения возможности хрупкого разрушения.

2.5.2 Хрупкость стали – свойство стали разрушаться при относительно небольшой (преимущественно упругой) деформации под действием напряжений, средний уровень которых ниже предела текучести стали.

2.5.3 Склонность материала к хрупкому разрушению обычно оценивается показателем ударной вязкости. Показатель ударной вязкости в настоящем пособии определяется лабораторными испытаниями по методу Шарпи (см. EN 10045).

Таким образом, сталь должна иметь достаточную ударную вязкость, чтобы исключить хрупкое разрушение растянутых элементов при самой низкой температуре эксплуатации в течение проектного срока эксплуатации.

Значение самой низкой температуры в настоящем пособии не приводится, она приводится в Национальном Приложении к СН РК EN 1991-1-4.

2.5.4 При значениях температуры эксплуатации выше, чем минус 40°C, можно считать, что элементы конструкции из аустенитной и аустенитно-ферритной нержавеющей стали не подвержены риску хрупкого разрушения.

2.5.5 Аустенитная нержавеющая сталь при значениях температуры эксплуатации ниже, чем минус 40°C, также может быть не подвержена риску хрупкого разрушения, но с учетом всех требований для конкретного случая.

2.5.6 Использование ферритной нержавеющей стали при отрицательных температурах эксплуатации должно быть подтверждено соответствующими испытаний результатами и последующим расчетом по СН РК EN 1993-1-10.

## **2.6 Требования к свойствам стали в направлении толщины проката**

2.6.1 Выбор нержавеющей стали по свойствам в направлении толщины проката осуществляется для недопущения растрескивания в элементах конструкций из нержавеющей стали.

2.6.2 Выбор соответствующей марки нержавеющей стали должен осуществляться на основании требований СН РК EN 1993-1-10.

2.6.3 Растрескивание элементов конструкций из нержавеющей стали может произойти по следующим причинам:

а) чрезмерные воздействие и расположение растягивающих усилий в направлении толщины проката;

б) усадка расплавленного металла в сварном соединении;

в) высокая концентрация серы.

2.6.4 Восприимчивость нержавеющей стали к растрескиванию необходимо определять согласно указаниям стандарта EN 10164 на основании показателя пластичности – «Z – величины».

2.6.5 Особое внимание по критерию растрескивания следует уделять:

а) Т – образным, крестообразным и угловым сварным соединениям;

б) сварным швам с полным проваром;

в) стыкам балки с колонной и листам фланцевых соединений, подверженных действию растяжения.

## 2.7 Требования к деталям соединения

### 2.7.1 Болтовые соединения

#### 2.7.1.1 Общие положения

2.7.1.1.1 (2.2.1(1)) Болты и гайки из нержавеющей стали должны соответствовать EN ISO 3506 (в трех частях). Шайбы должны быть из нержавеющей стали и должны соответствовать EN ISO 7089 или EN ISO 7090, по обстоятельствам. Сопротивление коррозии болтов должно быть равным или большим, чем сопротивление коррозии основного материала.

2.7.1.1.2 (А.4.2 (1)) Для материала болтов по EN ISO 3506-1:

- а) А2 является эквивалентом с точки зрения сопротивления коррозии для 1.4301;
- б) А3 является эквивалентом с точки зрения сопротивления коррозии для 1.4541;
- в) А4 является эквивалентом с точки зрения сопротивления коррозии для 1.4401 и 1.4404;
- г) А5 является эквивалентом с точки зрения сопротивления коррозии для 1.4571.

Марка А1 имеет низкое сопротивление коррозии и не должна использоваться для болтов.

2.7.1.1.3 (А.4.2(2)) В случае марок стали 1.4439, 1.4539, 1.4529 и 1.4462, болты из одной из этих сталей должны использоваться для достижения такой же устойчивости к коррозии.

2.7.1.1.4 (А.4.2(3)) Необходимо с осторожностью подходить к рассмотрению вопроса использования легко обрабатываемой нержавеющей стали для крепежа. Добавка серы в составе этих сталей (таких как аустенитная марка 1.4305) может сделать их более подверженными коррозии, особенно в промышленной и морской среде.

2.7.1.1.5 (2.2.1(2)) Номинальные значения предела текучести  $f_{yb}$  и временного сопротивления  $f_{ub}$  для болтов из нержавеющей стали - см. Таблицу 2.5 настоящего пособия.

2.7.1.1.6 (2.2.1(3)) До выпуска соответствующего европейского стандарта, указанные характеристики в Таблице 2.5 должны проверяться лабораторными испытаниями, с отбором образцов от каждой партии крепежных элементов.

**Таблица 2.5 - Номинальные значения предела текучести  $f_{yb}$  и временного сопротивления растяжению  $f_{ub}$  для болтов из нержавеющей стали**

Группы материалов	Категория материала по EN ISO 3506	Диапазон размеров	Предел текучести $f_{yb}$ , Н/мм <sup>2</sup>	Предел прочности на растяжение $f_{ub}$ , Н/мм <sup>2</sup>
Аустенитные и аустенитно-ферритные	50	≤ М 39	210	500
	70	≤ М 24	450	700
	80	≤ М 24	600	800

### **2.7.1.2 Болты с предварительным натягом**

2.7.1.2.1 (2.2.2 ПРИМЕЧАНИЕ) Высокопрочные болты, изготовленные из нержавеющей стали, не должны использоваться как болты с предварительным натягом, предназначенные для специального сопротивления скольжению, если только их приемлемость для конкретного применения не продемонстрирована результатами испытаний.

### **2.7.3 Другие типы механического крепежа**

2.7.3.1 (2.2.3(1)) Требования по выбору материала и физико-механических характеристик для других типов механического крепежа приведены в СН РК EN 1993-1-3.

### **2.7.4 Сварные соединения**

2.7.4.1 (2.3(1)) Общие требования по выбору материала и физико-механических характеристик для сварных соединений приведены в СН РК EN 1993-1-8.

2.7.4.2 (2.3(2)) В дополнение к требованиям СН РК EN 1993-1-8: сварочные электроды должны быть способны обеспечить сварной шов с сопротивлением коррозии, который будет адекватным рабочей среде, при условии, что используется правильная процедура сварки.

2.7.4.3 (2.3(3)) Сварочные электроды могут считаться пригодными, если сопротивление коррозии наплавленного металла и металла сварочного шва не меньше, чем у того материала, который сваривается.

2.7.4.4 (2.3(3) Примечание) Рекомендуются профессиональная консультация по выбору процедуры сварки для соединения нержавеющей сталей.

## **2.8 Требования по допускам**

2.8.1 В настоящем пособии термин «допуск» определяется как разница между крайними (наименьшими и наибольшими) предельными значениями соответствующих параметров (например, масса, размер). Величина допуска определяется на основании технологических возможностей производства и/или требований к изделию.

2.8.2 Согласно EN 1090-2, геометрические допуски для стальных конструкций могут классифицироваться как:

- а) существенные;
- б) функциональные.

2.8.3 Величина допуска, которую необходимо учитывать при проектировании стальных конструкций, зависит от многих факторов, но основной фактор – класс исполнения: EXC1, EXC2, EXC3 и EXC4 (см. стандарт EN 1090-1).

2.8.4 (2.1.6(1)) Допуски по размерам и массе прокатных заготовок, прокатных профилей и листов из нержавеющей стали должны соответствовать стандартам на продукцию, если только не заданы более жесткие допуски.

2.8.5 (2.1.6(1) Примечание) Информация по допускам по толщине холоднокатаной нержавеющей стали - см. EN ISO 9445:2006, а для листов - см. EN 10029.

2.8.6 Допуски для отдельных частей сварных профилей должны соответствовать требованиям EN 1090-2.

2.8.7 При проектировании конструкций и их элементов из нержавеющей стали следует использовать номинальные значения размеров как расчетные значения, кроме тех случаев, когда расчетное значение толщины полосы из нержавеющей стали необходимо определять в соответствии с Пунктом 3.2.4(3) СН РК EN 1993-1-3.

### **3 ДОЛГОВЕЧНОСТЬ**

#### **3.1 Общие положения**

3.1.1 Долговечность – способность стальной конструкции или её элемента сохранять свою работоспособность на протяжении всего расчетного срока эксплуатации при соответствующем уровне технического обслуживания.

3.1.2 Данный раздел настоящего пособия дополняет основные положения СН РК EN 1993-1-1 по обеспечению долговечности конструкций и их элементов из нержавеющей стали.

3.1.3 Обеспечение долговечности конструкций и их элементов из нержавеющей стали базируется на положениях Пункта 2.4 СН РК EN 1990.

3.1.4 Требования Раздела 4 СН РК EN 1993-1-1 по обеспечению долговечности распространяются на нержавеющую сталь.

3.1.5 Основными факторами, влияющими на долговечность конструкции или её элемента из нержавеющей стали, являются:

- а) коррозия;
- б) механический износ;
- в) усталостная нагрузка.

3.1.6 Элементы конструкции из нержавеющей стали восприимчивы к коррозии, механическому износу и усталостному разрушению необходимо проектировать с учетом следующих требований:

- а) должен быть обеспечен доступ для текущего осмотра и технического обслуживания;
- в) должна быть обеспечена возможность осмотра, ремонта и замены поврежденного элемента конструкции.

3.1.7 Когда конструкции здания не подвергнуты соответствующим циклическим нагрузкам, не стоит рассмотреть влияние сопротивления усталости на долговечность.

## 3.2 Антикоррозийные мероприятия

### 3.2.1 Общие положения

3.2.1.1 (3(2)) Соответствующая марка нержавеющей стали должна быть выбрана в соответствии с требуемой устойчивостью к коррозии для среды, в которой будут использоваться элементы конструкции.

3.2.1.2 Расчетный срок эксплуатации конструкции из нержавеющей стали определяется следующими факторами:

- а) выбором материала для конструкции и соединений;
- б) условиями окружающей среды;
- в) процессом проектирования;
- г) процессом производства;
- д) методом монтажа.

3.2.1.3 Процесс коррозии в нержавеющей стали и все аспекты, связанные с коррозией, необходимо учитывать при выборе марки стали и при дальнейшем проектировании.

3.2.1.4 Стойкость к коррозии у нержавеющей стали обусловлена образованием кислородной (оксидной) пленки от воздействия сухого воздуха. Данная оксидная пленка содержит большее количество хрома, стабильна, не пориста и плотно прилегает к поверхности стали. Оксидная пленка при внешнем механическом воздействии (царапины, порезы) способна к самовосстановлению в присутствии воздуха или окисляющей среды. Оксидная пленка также имеет высокую стойкость к химическим воздействиям. Толщина оксидной пленки около  $5 \times 10^{-6}$  мм, она предотвращает реакцию нержавеющей стали с атмосферой. По этим причинам оксидную пленку, которая образовывается на поверхности элементов из нержавеющей стали, называют «пассивной пленкой».

3.2.1.5 Защитные свойства пассивной пленки зависят от:

- а) химического состава нержавеющей стали (см. Таблицу 3.1);
- б) способа и качества обработки поверхности элементов из нержавеющей стали (см. Таблицу 3.2);
- в) окружающей среды (с точки зрения коррозионного воздействия).

Стабильность пассивной пленки увеличивается по мере увеличения содержания хрома. В состав нержавеющих сталей, которые используются в строительстве, кроме хрома, входят никель и молибден с целью увеличения стойкости стали к коррозии. Химический состав нержавеющих сталей приведен в Таблице 3.1 настоящего пособия.

Таблица 3.1 – Химический состав нержавеющей стали по EN 10088

Обозначение состава нержавеющей стали по стандарту EN 10088-3	Структура нержавеющей стали	Максимальное содержание в стали углерода, %	Содержание в стали хрома, %	Содержание в стали никеля, %	Содержание в стали молибдена, %	Наличие других элементов
1.4003	ферритная	0,03	10,5-12,5	0,3-1,0	-	-
1.4301	аустенитная	0,07	17,0-19,5	8,0-10,5	-	-
1.4306		0,03	18,0-20,0	10,0-12,0	-	-
1.4311		0,03	17,0-19,5	8,5-11,5	-	азот
1.4401		0,07	16,5-18,5	10,0-13,0	2,0-2,5	-
1.4404		0,03	16,5-18,5	10,0-13,0	2,0-2,5	-
1.4571		0,08	16,5-18,5	10,5-13,5	2,0-2,5	титан
1.4429		0,03	16,5-18,5	11,0-14,0	2,5-3,0	азот
1.4462	аустенитно-ферритная	0,03	21,0-23,0	4,5-6,5	2,5-3,5	азот
1.4501		0,03	24,0-26,0	6,8-8,0	3,0-4,0	азот + медь + вольфрам
1.4529	аустенитная	0,02	19,0-21,0	24,0-26,0	6,0-7,0	азот + медь



Таблица 3.2 – Виды чистовой обработки поверхностей сталей по EN 10088-2

Обозначение по EN 10088-2	Описание
1U	горячекатаная, без термообработки, с окалиной
1C	горячекатаная, термообработанная, с окалиной
1E	горячекатаная, термообработанная
1D	горячекатаная, термообработанная
1Q	горячекатаная, закаленная, травленая, без окалины
2H	холоднокатаная, упрочненная
2C	холоднокатаная, термообработанная, с окалиной
2D	холоднокатаная, термообработанная, травленая
2B	холоднокатаная, термообработанная, травленая, дрессированная
2R	холоднокатаная, свежий отжиг и дрессировка (зеркальная)
2E	холоднокатаная, термообработанная, травленая, с механически удаленной окалиной
2E	с рисунком на одной стороне
2W	рифленая
2J	холодная абразивная шлифовка с частотой 80-120 ед.
2J	холоднокатаная абразивная шлифовка с чистотой 150-400 ед.
2J	шлифовка с частотой 150-240 ед.

3.2.1.6 Процесс образования пассивной пленки на поверхности элементов из нержавеющей стали необходимо учитывать при проектировании конструкций из нержавеющей стали на этапе первоначального выбора материала и условий окружающей среды, так как любые условия, которые предотвращают образование пассивной пленки или вызывают разрушения пассивной пленки, снижают стойкость стали к коррозии.

3.2.1.7 Выбор марки нержавеющей стали должен соответствовать условиям применения, с учетом воздействия окружающей среды. Каждая марка стали имеет свой химический состав (см. Таблицу 3.1), который напрямую влияет на стойкость к коррозии.

3.2.1.8 Причины, по которым у элемента конструкции из нержавеющей стали может быть снижена стойкость к коррозии:

- а) неправильная оценка воздействий окружающей среды;
- б) воздействия неожиданных условий (например, загрязнение ионами хлорида);
- в) наступление состояния, не предусмотренное при проектировании.

3.2.1.9 Необходимо уделять большое внимание внешнему виду элементов конструкции из нержавеющей стали в период эксплуатации зданий или сооружений.

3.2.1.10 Изменение вида поверхности (изменение цвета или появление пятен) элементов конструкций из нержавеющей стали должно быть минимально, чтобы при неблагоприятных обстоятельствах не создавалось опасность возникновения микрокоррозии поверхности элементов конструкций.

3.2.1.11 (3(3)) Требования к поверхности горячекатаных листов приведены в стандарте EN 10163.

3.2.1.12 (3(4)) В проектной документации может быть приведен необходимый режим очистки поверхности для поддержания внешнего вида, соответствующего требованиям по обеспечению долговечности, описанного в настоящем пособии.

### **3.3 Виды коррозии**

#### **3.3.1 Точечная коррозия**

3.3.1.1 (А.2.1(1)) Точечная коррозия — это локализованная форма коррозии, которая может возникнуть в результате воздействия специфических внешних условий, наиболее заметная при воздействии сред, содержащих ионы хлорида. Точечная коррозия возникает из-за того, что ионы хлорида проникают через пассивную пленку в слабых местах. Так образуется локальный элемент, с областью проникновения в качестве анода и окружающей пассивной пленкой как катодом. Поскольку площадь анода мала, а площадь катода велика, плотность тока становится очень высокой, также, как и скорость коррозии на поверхности анода.

3.3.1.2 (А.2.1(2)) В большинстве конструкционных применений поверхностная точечная коррозия вероятно будет незначительной и приемлемой, поскольку уменьшение сечения компонента будет пренебрежимо малым. Однако, корродированные продукты могут испортить архитектурные характеристики. Менее мягкий взгляд на точечную коррозию должен быть принят для использования, например, в желобах, трубах и загрязненных конструкциях. Если есть известная опасность, необходимо выбрать подходящую марку нержавеющей стали, обычно она будет иметь более высокий состав сплава, содержащий молибденовые добавки.

#### **3.3.2 Щелевая коррозия**

3.3.2.1 (А.2.2(1)) Щелевая коррозия — это локализованная форма воздействия, которая вызвана дифференциалом в уровнях кислорода между щелью и подверженной воздействию области. Она, вероятно, не будет проблемой, за исключением неподвижных

растворов, где может возникнуть скопление хлоридов. Серьезность щелевой коррозии в большой степени зависит от геометрии щели, чем более узкая и глубокая щель, тем более интенсивная коррозия.

3.3.2.2 (А.2.2(2)) Щели обычно образуются между гайками и шайбами или вокруг резьбы шурупа или стержнем болта. Щели также могут образовываться в сварных швах, которые не проникают и под осадком на поверхности стали. В принципе точечная и щелевая коррозии являются аналогичными явлениями, но воздействие начинается более легко в щели, чем на свободной поверхности.

### **3.3.3 Биметаллическая коррозия**

3.3.3.1 (А.2.3(1)) Биметаллическая коррозия склонна к возникновению, когда различные металлы находятся в электрическом контакте в любом электролите, включая дождевую воду, конденсат и т. д. Если между ними двумя течет электрический ток, менее благородный металл (анод) корродирует с большей скоростью, чем это бы происходило, если бы металлы не были в контакте.

3.3.3.2 (А.2.3(2)) Скорость коррозии также зависит от относительной площади контакта металлов, температуры и состава электролита. В частности, чем больше площадь катода по отношению к аноду, тем больше скорость разъедания. Вероятно, возникновение негативных соотношений для крепежа и в соединениях.

3.3.3.3 (А.2.3(3)) Необходимо избегать использования болтов из углеродистой стали в элементах из нержавеющей стали, поскольку соотношение площади нержавеющей стали к углеродистой стали большое, болты будут подвергнуты агрессивному разъеданию. Наоборот, скорость разъедания элемента углеродистой стали болтом из нержавеющей стали значительно ниже. Обычно помогает применение предшествующего опыта в аналогичных средах, поскольку различные металлы могут часто быть соединены безопасно, без негативных эффектов в условиях эпизодической конденсации или влажности, особенно когда проводимость электролита низкая.

3.3.3.4 (А.2.3(4)) Предсказание таких результатов является сложным, поскольку скорость коррозии определяется рядом сложных вопросов. Использование таблицы потенциалов игнорирует присутствие на поверхности оксидных пленок, влияние соотношения площадей и различия в химическом составе электролита. В результате неосведомленное применение этих таблиц может дать ошибочные результаты. Поэтому они должны использоваться с осторожностью и только для первоначальной оценки.

3.3.3.5 (А.2.3(5)) Аустенитные нержавеющие стали часто образуют катод в биметаллической паре, и поэтому они не страдают от коррозии. Исключением из этого правила является пара с медью, чего в целом следует избегать, за исключением мягких условий. Контакт между аустенитной нержавеющей сталью и алюминием или цинком может в результате привести к дополнительной коррозии последнего из двух металлов. Маловероятно, что это будет иметь важное конструкционное значение, но появляющаяся в результате серо-белая пыль может быть признана неприглядной.

3.3.3.6 (А.2.3(6)) Биметаллическая коррозия может быть предотвращена при исключении воды из детали (например, покраской или изолированием соединения) или,

что предпочтительнее, электрической изоляцией металлов друг от друга (например, покраской контактных поверхностей различных металлов). Изоляция вокруг соединений на болтах может быть достигнута за счет непроводящих пластиковых или резиновых прокладок и нейлоновых или тефлоновых шайб и вкладок. Такая система требует времени для организации ее на месте. Более того, обычно не является практичным обеспечение необходимого уровня проверки на месте, чтобы убедиться, что все шайбы и рукава были установлены надлежащим образом.

### **3.3.4 Коррозионное растрескивание под напряжением**

3.3.4.1 (А.2.4(1)) Развитие коррозионного растрескивания под напряжением требует одновременного присутствия растягивающего напряжения и специфических факторов окружающей среды, которые маловероятны в обычных атмосферах в зданиях. Напряжения не обязательно должны быть очень высокими в отношении предела текучести материала. Они могут быть вызваны нагрузкой или остаточным напряжением от процессов производства, такие как сварки и формование. Необходимо быть осторожными при использовании элементов из нержавеющей стали, содержащих высокое остаточное напряжение (такие как вызванное холодной обработкой), в окружающей среде богатой хлоридом, такие как бассейны, морские или приморские конструкции, включая морские платформы.

3.3.4.2 (А.2.4(2)) Вероятность коррозионного растрескивания под напряжением увеличивается с увеличением растягивающего напряжения и с увеличением температуры. В аустенитных хромово-никелевых нержавеющей сталях никель является элементом сплава, который наиболее существенно снижает чувствительность к коррозионному растрескиванию под напряжением.

### **3.3.5 Общая коррозия**

3.3.5.1 (А.2.5(1)) Общая коррозия значительно менее сильная у нержавеющей сталей, чем у других сталей.

3.3.5.2 (А.2.5(2)) Данная форма коррозии не является проблемой для марок нержавеющей стали, обычно используемых в обычных строительных применениях. Возможно указание на таблицы в литературе производителя, в качестве альтернативы необходимо получить рекомендации инженерного специалиста по коррозии, в частности, если нержавеющая сталь будет контактировать с другими химикатами.

### **3.3.6 Межзерновая коррозия и коррозия сварного шва**

3.3.6.1 (А.2.6(1)) Когда аустенитные стали подвергаются длительному нагреву в диапазоне от 450°C до 850°C, углерод в стали рассеивается к границам зерна и осаждают карбид хрома. Это убирает хром из микроструктуры и дает меньший уровень содержания хрома рядом с границами зерна. Стали в таком состоянии называются «чувствительными».

3.3.6.2 (А.2.6(2)) Границы зерна становятся подверженными преференциальному разъеданию при последующем воздействии коррозионной среды. Такой феномен известен как «коррозия сварного шва», когда он происходит в зоне теплового воздействия сварного изделия.

3.3.6.3 (А.2.6(3)) Существует три способа, чтобы избежать межзерновой коррозии:

- а) использовать сталь, имеющую низкое содержание углерода;
- б) использовать сталь, стабилизированную титаном или ниобием, поскольку эти элементы преференциально комбинируются с углеродом для образования стабильных соединений, таким образом, уменьшая риск формирования карбида хрома;
- в) использовать тепловую обработку, однако этот метод редко используется на практике.

3.3.6.4 (А.2.6(4)) Марки с низким содержанием углерода (около 0,03 %) не страдают от межзерновой коррозии сварного шва, после выполнения надлежащим образом сварочных процедур.

### **3.4 Уровни риска**

3.4.1 (А.3(1)) Уровни риска зависят от материалов, конфигурации и условий окружающей среды. Может быть проведено следующее различие между тремя уровнями риска:

а) Первый уровень риска. Только косметическое поверхностное коррозионное разъедание (микроточечная коррозия) происходит в течение 50-летнего проектируемого срока эксплуатации. Ремонт не является необходимым для конструкционной целостности, но может потребоваться для поддержания безупречного внешнего вида. Большинство стандартных нержавеющей сталей отвечают этому требованию для легких и умеренно агрессивных атмосферных коррозионных условий.

б) Второй уровень риска. Риск точечной коррозии или щелевого коррозионного разъедания, вызывающий потерю сечения или проникновение, что может потребовать проверки или ремонта по причинам конструкционного отказа или отказа вследствие загрязнения в течение 50-летнего проектируемого срока эксплуатации. Это касается воздействия атмосфер, включающих химически загрязненные атмосферы от морских до тяжелых промышленных сред, или тех, которые находятся в зданиях, связанных с определенными процессами и операциями.

в) Третий уровень риска. Риск, связанный с локализованным коррозионным разъеданием агрессивными веществами (например, осадками хлорангидридов или жидкий цинк), что может вызвать потерю конструкционной целостности за счет локализованного механизма растрескивания (например, коррозионное растрескивание под напряжением или межзерновая коррозия). Срок эксплуатации и частота проверок определяются комбинацией выбора материалов и жесткостью, и вероятностью воздействия агрессивных веществ. Это важно при воздействии специфических сред, такие как те, которые характерны для определенных закрытых бассейнов, где могут собираться агрессивные осадки с высоким содержанием хлоридов. Это также применимо, если существует риск огня в конструкциях, содержащих гальванизированные или покрытые цинком

металлические компоненты. В случае пожара, жидкий цинк не должен иметь возможность упасть на нержавеющую сталь.

3.4.2 (А.3(2)) Хотя общее руководство по выбору материалов может быть дано для уровней риска 1 и 2, в случае уровня риска 3 очень важно получить рекомендацию эксперта.

### 3.5 Конструктивные антикоррозионные мероприятия

3.5.1 (3(5)) Стойкость к коррозии у большинства марок нержавеющих сталей не снижается при «мягких» атмосферных воздействиях. Однако, необходимы рекомендации экспертов, если нержавеющая сталь предположительно будет подвергаться воздействию окружающей среды, содержащей химикаты, включая атмосферы, связанные с определенными промышленными процессами, в зданиях с бассейнами, с морской водой и соляными брызгами от дорог для борьбы с гололедом и тому подобное.

3.5.1 (А.5(1)) Наиболее важным шагом для предотвращения проблем с коррозией является выбор соответствующей марки нержавеющей стали с подходящими процессами производства для определенной среды. Однако, даже после указания определенной стали, необходима тщательная детализация для того чтобы достичь полного потенциального сопротивления коррозии.

3.5.2 (А.5(2)) На Рисунке 3.1, некоторые мероприятия могут не давать наилучших деталей для конструкционной надежности, а другие мероприятия не предназначены для применения во всех средах. В частности, многие мероприятия не потребуются в средах с низкой коррозионной активностью или там, где проводятся регулярное техническое обслуживание.

3.5.3 (А.5(3)) Необходимо достичь баланса между использованием сварки и применением болтов для гарантии оптимального сопротивления коррозии с минимальной сварочной деформацией. Необходимо выполнить следующие проектные мероприятия:

- а) избегать скопления грязи (см. Рисунок 3.1), за счет:
  - ориентируя угловые и канальные профили для минимизации вероятности задержки грязи;
  - предусматривания дренажных отверстий, гарантируя, что они достаточного размера для предотвращения засорения;
  - избегания горизонтальных поверхностей;
  - указав небольшой уклон накладных ребер жесткости, которые обычно располагаются в горизонтальной плоскости;
  - использования трубчатого и сортового проката (запечатать трубы сухим газом или воздухом, там, где существует риск образования вредных конденсатов);
  - предусмотрев отделку шлифованием ( $R_a \leq 0,5 \mu\text{м}$  для внешних применений будет являться подходящим значением).
- б) избегать щелей (см. Рисунок 3.1), за счет:
  - использования сварных соединений, а не болтовых соединений;
  - использования герметизирующих сварных швов или мастик;
  - предпочтительно ошкуривать или профилировать сварные швы;

- предотвращение биозагрязнения (хлорирование воды может привести к образованию точечной ржавчины).

в) уменьшить вероятность коррозионного растрескивания под напряжением в тех специфических средах, где это может происходить, за счет:

- минимизации напряжения, возникающего в процессе производства путем осторожного выбора последовательности сварки;

- дробеструйной обработки (нельзя использовать железные или стальные дробины).

г) сварные швы всегда должны очищаться для восстановления устойчивости к коррозии;

д) уменьшить вероятность точечной коррозии за счет:

- устранения сварных брызг;

- очистки щеткой из нержавеющей стали провода или протравливания нержавеющей стали для устранения нежелательных продуктов сварки (необходимо избегать применения сильно окисляющих реагентов, содержащих хлорид, таких как хлорид железа; вместо этого должна использоваться протравливающая ванна или протравливающая паста, содержащие смесь азотной кислоты и фтористоводородной кислоты; после протравливания необходимо провести тщательную промывку водой);

- недопущения подхвата частиц углеродистой стали (например, используйте площадь цеха и инструмент, которые предназначены для нержавеющей стали);

- соответствующего режима технического обслуживания.

е) уменьшить вероятность биметаллической коррозии за счет:

- электрической изоляции;

- использование покраски надлежащим образом;

- минимизации периодов влажности.

ж) уменьшить вероятность коррозионного разъедания жидким цинком для того чтобы предотвратить спонтанное возникновение хрупкости.

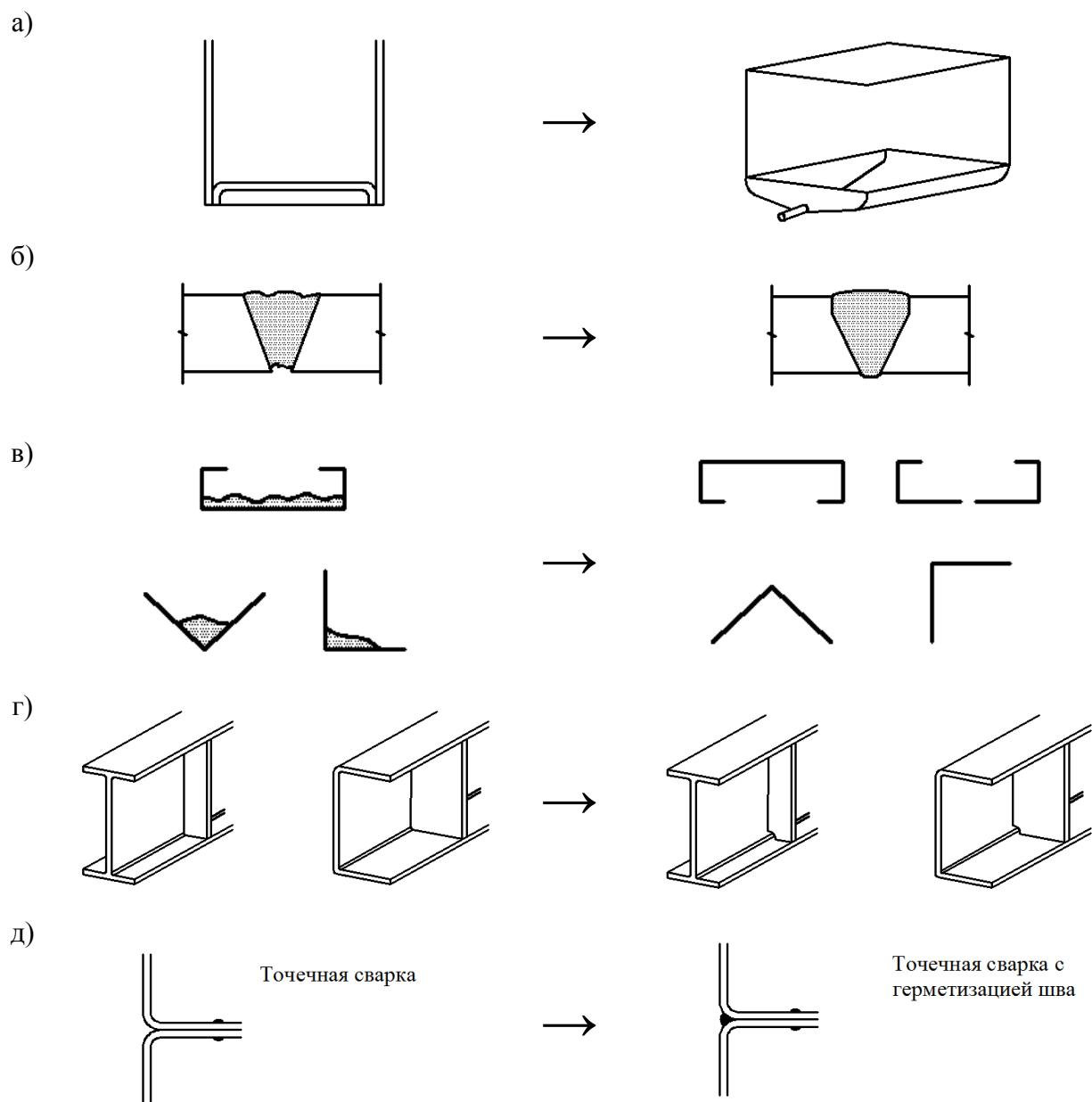


Рисунок 3.1 - Конструктивные антикоррозийные детали

#### 4 ПРЕДЕЛЬНЫЕ СОСТОЯНИЯ ПО ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ ПРИГОДНОСТИ

##### 4.1 Общие положения

4.1.1 Данный раздел настоящего пособия посвящен требованиям к расчету конструкций и их элементов из нержавеющей стали по критериям эксплуатационной пригодности.

4.1.2 Предельное состояние эксплуатационной пригодности - это такое состояние, при превышении которого не выполняются установленные условия эксплуатации конструкции или сооружения.



4.1.3 Расчет эксплуатационной пригодности конструкций и их элементов из нержавеющей стали следует выполнять на основании положений Пункта 3.4 СН РК EN 1990 и Раздела 7 СН РК EN 1993-1-1 с учетом дополнительных положений Пункта 4.2 СН РК EN 1993-1-4.

4.1.4 Расчет по проверке предельного состояния эксплуатационной пригодности следует выполнять, пользуясь требованиями эксплуатационной пригодности, касающимися:

- а) горизонтальных и вертикальных деформаций;
- б) вибраций;
- в) возможных повреждений.

4.1.5 Требования по эксплуатационной пригодности определяются для каждого конкретного проекта. Однако, согласно Национальному Приложению НП. 2.21 СН РК EN 1993-1-1, предельные значения деформаций и вибраций могут быть применены по соответствующим нормативам, действующим на территории Республики Казахстан на момент проектирования.

## **4.2 Дополнительные положения по определению деформаций у конструкций и их элементов из нержавеющей стали**

4.2.1 При определении деформаций у конструкций и их элементов из нержавеющей стали необходимо учитывать:

- а) влияние нелинейного поведения нержавеющей стали в напряженном состоянии
- б) эффективные геометрические характеристики поперечных сечений класса 4.

4.2.2 Согласно положениям Пункта 3.4 СН РК EN 1990, расчет по предельным состояниям эксплуатационной пригодности необходимо правильно выбрать соответствующее сочетание воздействий для выбранных расчетных ситуаций:

- а) когда необходимо определить деформации при постоянном и/или переменном воздействии.
- б) когда необходимо принять во внимание продолжительную деформацию от усадки, ползучести и релаксации нержавеющей стали.
- в) когда необходимо учитывать внешний вид конструкций, неприятные физические ощущения и функциональность машинного оборудования.

4.2.3 Определение эффективных<sup>Р</sup> геометрических характеристик поперечных сечений класса 4 может быть определено с большой степенью безопасности по указаниям Пункта 5.4.1 настоящего пособия.

При определении эффективных<sup>Р</sup> геометрических характеристик поперечных сечений класса 4 по указаниям Пункта 4.4 СН РК EN 1993-1-5 будут получены более точные результаты.

4.2.4 В расчетах, где необходимо учитывать эффекты сдвигового запаздывания, рекомендуется использовать эффективную<sup>С</sup> площадь поперечного сечения и эффективную<sup>С</sup> ширину, определенные по указаниям Пункта 3.2 СН РК EN 1993-1-5.

4.2.5 Определение деформаций конструкций и их элементов из нержавеющей стали необходимо выполнять с использованием среднего модуля упругости  $E_{s,ser}$ . Значение

среднего модуля упругости  $E_{s,ser}$  должно соответствовать напряженному состоянию рассчитываемого элемента для выбранной комбинаций нагрузок и ориентации направления прокатки. Если ориентация прокатки неизвестно или не может быть определено, то необходимо использовать значение для модуля упругости продольного направления прокатки.

4.2.6 Значение среднего модуля упругости  $E_{s,ser}$  может быть определено методом конечных элементов (см. Приложение С СН РК EN 1993-1-5), где нелинейное поведение нержавеющей стали под нагрузкой должно быть задано по указаниям Пункта 4.3 настоящего пособия.

4.2.7 Значение среднего модуля упругости  $E_{s,ser}$  может быть определено по формуле:

$$E_{s,ser} = \frac{E_{s,1} + E_{s,2}}{2}; \quad (4.1)$$

где  $E_{s,1}$  – секущий модуль упругости, соответствующий напряжению  $\delta_{1,Ed,ser}$  в растянутом поясе;

$E_{s,2}$  – секущий модуль упругости, соответствующий напряжению  $\delta_{2,Ed,ser}$  в сжатом поясе.

4.2.8 Значение  $E_{s,1}$  и  $E_{s,2}$  зависят от величины соответствующего расчетного напряжения  $\delta_{1,Ed,ser}$  и  $\delta_{2,Ed,ser}$  и направления прокатки. Определить значения секущего модуля упругости  $E_{s,1}$  и  $E_{s,2}$  можно по формулам:

а) в растянутом поясе:

$$E_{s,1} = \frac{E}{1 + 0,002 \cdot \frac{E}{\delta_{1,Ed,ser}} \cdot \left( \frac{\delta_{1,Ed,ser}}{f_y} \right)^n}; \quad (4.2)$$

б) в сжатом поясе:

$$E_{s,1} = \frac{E}{1 + 0,002 \cdot \frac{E}{\delta_{2,Ed,ser}} \cdot \left( \frac{\delta_{2,Ed,ser}}{f_y} \right)^n};$$

где  $E$  – расчетное значение модуля упругости, соответствующее марке нержавеющей стали;

$\delta_{1,Ed,ser}$  – расчетное эксплуатационное напряжение при растяжении;

$\delta_{2,Ed,ser}$  – расчетное эксплуатационное напряжение при сжатии;

$n$  – коэффициент, значение которого зависит от направления прокатки, определяемый по Таблице 4.1 настоящего пособия.

Таблица 4.1 - Значения коэффициента  $n$ 

Марка стали	Значение коэффициента $n$	
	Продольное направление	Перпендикулярное направление
1.4003	7	11
1.4016	6	14
1.4512	9	16
1.4301 1.4306 1.4307 1.4318 1.4541	6	8
1.4401 1.4404 1.4432 1.4435 1.4539 1.4571	7	9
1.4462 1.4362	5	5

4.2.9 При определении деформации допускается принять значение среднего модуля упругости  $E_{s,ser}$  (соответствующего максимальным значениям напряжений  $\delta_{1,Ed,ser}$  и  $\delta_{2,Ed,ser}$ ) без учета изменения значения по длине элемента.

4.2.10 В расчетах по определению деформаций у конструкций и их элементов из нержавеющей стали марок 1.4301, 1.4401 и 1.4462 рекомендуется использовать Таблицу 4.2 настоящего пособия.

**Таблица 4.2 - Значение среднего модуля упругости  $E_{s,ser}$  для различных уровней напряжения расчетного эксплуатационного напряжения (кН/мм<sup>2</sup>)**

Отношение расчетного эксплуатационного напряжения к пределу прочности $\frac{\delta_{i,Ed,ser}}{f_y}$ , где i - 1 или 2	Марка нержавеющей стали				
	1.4301		1.4401		1.4462
	Продольное направление	Поперечное направление	Продольное направление	Поперечное направление	Любое направление
0.00	200	200	200	200	200
0.20	200	200	200	200	200
0.25	200	200	200	200	199
0.30	199	200	200	200	199
0.35	199	200	199	200	197
0.40	198	200	199	200	196
0.42	197	199	198	200	195
0.44	196	199	197	199	194
0.46	195	199	197	199	193
0.48	193	198	196	199	191
0.50	192	198	194	199	190
0.52	190	197	193	198	188
0.54	188	196	191	197	186
0.56	185	195	189	197	184
0.58	183	194	187	195	182
0.60	179	192	184	194	180
0.62	176	190	181	192	177
0.64	172	187	178	190	175
0.66	168	184	174	188	172
0.68	163	181	170	185	169
0.70	158	177	165	181	165
0.72	152	172	160	177	162
0.74	147	167	154	172	159
0.76	141	161	148	166	155

#### 4.3 Моделирование поведения материала в расчетах методом конечных элементов

##### 4.3.1 Характеристики материалов

4.3.1.1 (B.2(1)) Характеристики материала  $E$ ,  $f_y$  и  $f_u$  для расчетов методом конечных элементов должны браться как характеристические значения. Правила проектирования методом конечных элементов приведены в Приложении С EN 1993-1-5.

4.3.1.2 (В.2(2)) В зависимости от требуемой точности и максимального достигаемого напряжения, могут быть использованы следующие подходы к моделированию поведения материала:

а) кривая напряжение-удлинение с деформационным упрочением рассчитываемым следующим образом:

$$\varepsilon = \begin{cases} \frac{\sigma}{E} + 0,002 \left( \frac{\sigma}{f_y} \right)^n, & \text{но } \sigma \leq f_y; \\ 0,002 + \frac{f_y}{E} + \frac{\sigma - f_y}{E_y} + \varepsilon_u \left( \frac{\sigma - f_y}{f_u - f_y} \right)^m, & \text{но } f_y < \sigma \leq f_u; \end{cases} \quad (4.3)$$

где  $n$  - коэффициент, определяемый как:

$$n = \frac{\ln(20)}{\ln(f_y/R_{p0,01})},$$

в котором  $R_{p0,01}$  - это 0,01 % напряжение при испытании. Значение  $n$  может быть взято из Таблицы 4.1 настоящего пособия или может быть рассчитано по измеренным характеристикам;

$E_y$  - касательный модуль кривой напряжение-удлинение при пределе текучести, определяемый как:

$$E_y = \frac{E}{1 + 0,002 \times n \times \frac{E}{f_y}};$$

$\varepsilon_u$  - предельное напряжение, соответствующее предельной прочности  $f_u$ , где может быть получено из приближенной формулы:

$$\varepsilon_u = 1 - \frac{f_y}{f_u}, \text{ но } \varepsilon_u \leq A;$$

где  $A$  - удлинение после разрушения, определенное в EN 10088;

$m$  - коэффициент, который может быть определен как:

$$m = 1 + 3,5 \times \frac{f_y}{f_u}.$$

б) кривая напряжение-удлинение, рассчитанная как в Пункте 4.3.1.2,а) выше по измеренным характеристикам;

в) действительная кривая зависимости деформаций от напряжений, рассчитанная по технической кривой напряжение-удлинение, измеренной следующим образом:

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{true}} &= \sigma \times (1 + \varepsilon) \\ \varepsilon_{\text{true}} &= \ln(1 + \varepsilon) \end{aligned} \quad (4.4)$$

## 5 КРИТИЧЕСКИЕ ПРЕДЕЛЬНЫЕ СОСТОЯНИЯ

### 5.1 Общие положения

5.1.1 Данный раздел пособия посвящен дополнительным положениям расчета критического предельного состояния конструкций и их элементов из нержавеющей стали, которые расширяют и дополняют положения СН РК EN 1993-1-1, СН РК EN 1993-1-3 и СН РК EN 1993-1-5.

5.1.2 (5.1(1)) Условия, изложенные в Разделах 5 и 6 СН РК EN 1993-1-1, должны применяться к нержавеющей сталям, за исключением того, где они изменяются или заменяются специальными условиями, приведенными в Разделе 5 настоящего пособия.

5.1.3 Расчетные значения несущей способности для конкретного расчетного случая определяется по Формуле (2.1) СН РК EN 1993-1-1. Применение частных коэффициентов безопасности и их рекомендованные значения по Национальному Приложению к СН РК EN 1993-1-4 приведены в Таблице 5.1.

**Таблица 5.1 - Частные коэффициенты безопасности**

Область применения	Обозначение	Величина
Сопротивление поперечных сечений избыточной деформации, включая локальный изгиб	$\gamma_{M0}$	1,10
Сопротивление элементов неустойчивости, оцениваемой проверкой элементов	$\gamma_{M1}$	1,10
Сопротивление разрушению поперечных сечений в напряжении	$\gamma_{M2}$	1,25
Сопротивление болтов, заклепок, сварных швов, штифтов и листов при нагрузке	$\gamma_{M2}$	1,25

5.1.4 Общий расчет в пластической стадии конструкций и их элементов из нержавеющей стали для определения внутренних усилий использовать нельзя, кроме тех случаев, когда результаты общих расчетов пластической стадии соответствуют результатам испытаний, выполненных в соответствии с Приложением D СН РК EN 1990.

5.1.5 (5.1(5)) В расчетных случаях, где элементы могут подвергаться значительной деформации, необходимо учитывать потенциал для увеличения прочности, полученный за счет характеристик механического упрочения аустенитной нержавеющей стали. В расчетных случаях, где механическое упрочение увеличивает воздействие, которым должны сопротивляться элементы, соединения должны проектироваться так, чтобы соответствовать увеличению сопротивления элемента, особенно там, где требуется расчет предельной нагрузки.

## 5.2 Определение характеристик поперечных сечений

### 5.2.1 Максимальное отношение ширины к толщине

5.2.1.1 При расчете поперечных сечений тонкостенных элементов из нержавеющей стали применены требования СН РК EN 1993-1-3, за исключением того, что отношение ширины или высоты к толщине не должно превышать 400, т.е.  $b/t = h/t \leq 400$ .

В СН РК EN 1993-1-3 предельное значение отношения ширины или высоты к толщине не должно превышать 500 (см. Таблицу 5.1 СН РК EN 1993-1-3).

5.2.1.2 В случаях, когда недопустимо искажение внешнего вида тонкостенного элемента при эксплуатации, предельное значение отношения ширины или высоты к толщине не должно превышать 75, т.е.  $b/t = h/t \leq 75$ .

#### **ПРИМЕР 1 Проверка соответствия геометрических пропорций условиям Пункта 5.2.1 СН РК EN 1993-1-4**

Исходные данные: требуется проверить условия Пункта 5.2.1 СН РК EN 1993-1-4 по максимальному отношению ширины к толщине частей поперечного сечения для холодноформованного элемента из нержавеющей стали марки 1.4301.

Размеры сечения по внешнему обмеру (см. Рисунок 1):

- полная высота:  $h_g = 150$  мм;
- полная ширина верхней полки:  $b_{g1} = 60$  мм;
- полная ширина нижней полки:  $b_{g2} = 55$  мм;
- полная ширина боковых отгибов:  $c_g = 15$  мм;
- внутренний радиусгиба:  $r = 3$  мм;
- номинальная толщина:  $t = 2,0$  мм;

#### **2 Проверка соответствия геометрических пропорций условиям Пункта 5.2.1 СН РК EN 1993-1-4**

Согласно требованиям Пункта 5.2.1(1) СН РК EN 1993-1-4, расчет максимального отношения ширины к толщине  $b/t$  и  $h/t$  частей поперечного сечения (стенка, полка) может выполняться по указаниям СН РК EN 1993-1-3, за исключением того, что общие отношения ширины к толщине  $b/t$  и  $h/t$  не должны превышать 400:

- если визуальное искажение плоских элементов поперечного сечения приемлемо:

$$\frac{b}{t} = \frac{b_{g1}}{t} = \frac{60}{2,0} = 30,0 < 400 \text{ (условие выполняется);}$$

$$\frac{h}{t} = \frac{h_g}{t} = \frac{150}{2,0} = 75,0 < 400 \text{ (условие выполняется);}$$

$$\frac{c}{t} = \frac{c_g}{t} = \frac{15}{2,0} = 7,5 < 50 \text{ (условие выполняется);}$$

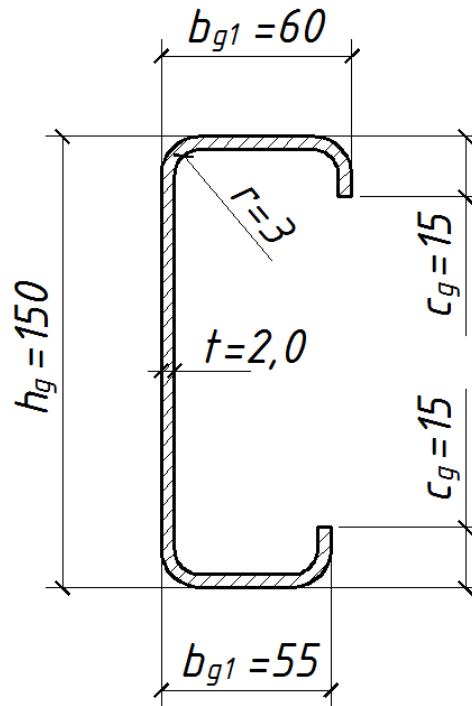


Рисунок 1 – Внешние размеры сечения профиля

- если визуальное искажение плоских элементов поперечного сечения неприемлемо (см. Пункт 5.2.1(2) СН РК EN 1993-1-4):

$$\frac{b}{t} = \frac{b_{g1}}{t} = \frac{60}{2,0} = 30,0 < 75 \text{ (условие выполняется);}$$

Кроме того, для обеспечения достаточной жесткости и предупреждения потери устойчивости самого краевого элемента жесткости, его размер должен соответствовать условию Формулы (5.2а) СН РК EN 1993-1-3:

$$\frac{c_g}{b_{g1}} = \frac{15}{60} = 0,25;$$

$$0,2 \leq 0,25 \leq 0,6 \text{ (условие выполняется);}$$

$$\frac{c_g}{b_{g2}} = \frac{15}{55} = 0,27;$$

$$0,2 \leq 0,27 \leq 0,6 \text{ (условие выполняется).}$$

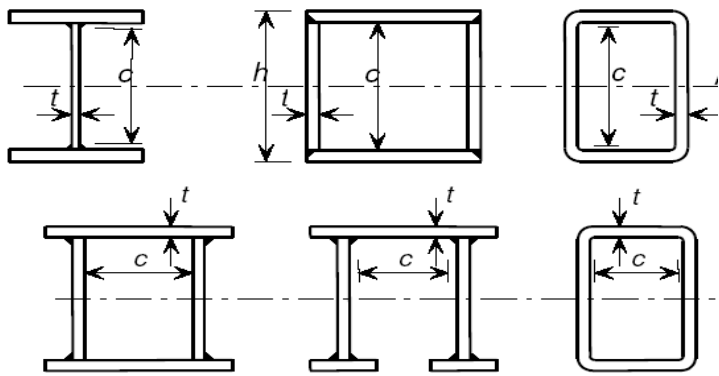
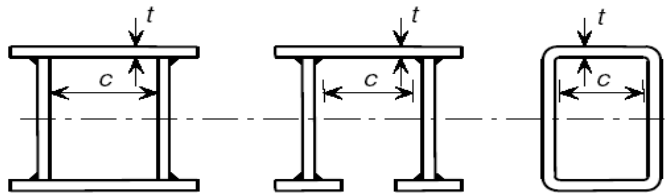
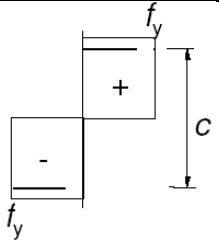
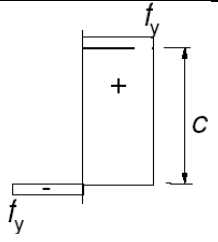
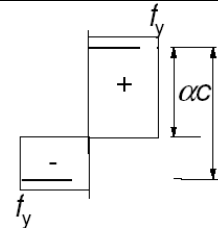
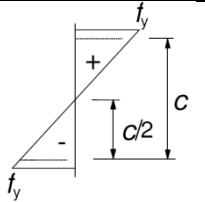
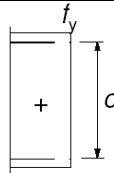
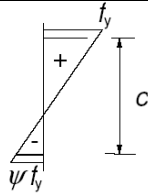
Таким образом, данный тонкостенный элемент из нержавеющей стали соответствует требованиям Пункта 5.2.1 СН РК EN 1993-1-4.

## 5.2.2 Классификация поперечных сечений

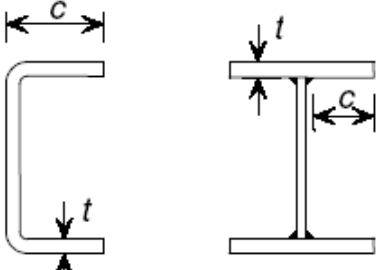
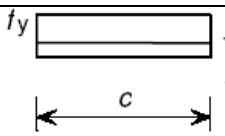
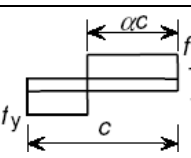
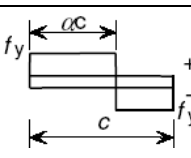
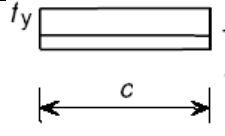
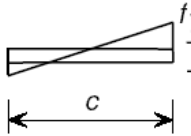
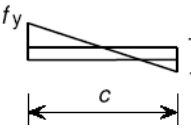
5.2.2.1 Поперечные сечения элементов из нержавеющей стали в расчетных ситуациях, когда поперечные сечения подвержены сжимающим напряжениям, необходимо классифицировать.



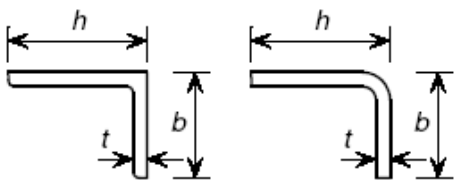
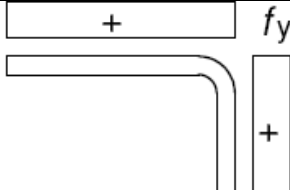
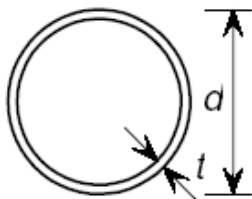
Таблица 5.2 - Максимальное отношение ширины к толщине для сжатых частей

Внутренние части, работающие на сжатие				
				Ось изгиба
				Ось изгиба
Распределение напряжения в частях (сжатие положительное)				
1	$c/t \leq 56,0\varepsilon$	$c/t \leq 25,7\varepsilon$	где $\alpha > 0,5$ : $c/t \leq \frac{308\varepsilon}{13\alpha - 1}$ где $\alpha \leq 0,5$ : $c/t \leq \frac{28\varepsilon}{\alpha}$	
2	$c/t \leq 58,2\varepsilon$	$c/t \leq 26,7\varepsilon$	где $\alpha > 0,5$ : $c/t \leq \frac{320\varepsilon}{13\alpha - 1}$ где $\alpha \leq 0,5$ : $c/t \leq \frac{29,1\varepsilon}{\alpha}$	
Распределение напряжения в частях (сжатие положительное)				
3	$c/t \leq 74,8\varepsilon$	$c/t \leq 30,7\varepsilon$	$c/t \leq 15,3e\sqrt{k_\sigma}$ для $k_\sigma$ см EN 1993-1-5	
$\varepsilon = \left[ \frac{235}{f_y} \cdot \frac{E}{210\,000} \right]^{0,5}$	Марка	1.4301	1.4401	1.4462
	$f_y$ , Н/мм <sup>2</sup>	210	220	460
	$\varepsilon$	1,03	1,01	0,698
Примечание — Для полых профилей с может быть консервативно принято как $(h - 2t)$ или $(b - 2t)$				

**Таблица 5.2 - Максимальное отношение ширины к толщине для сжатых частей**  
(продолжение)

Выступающие фланцы					
					
Класс	Тип профиля	Часть, подверженная сжатию	Часть, подверженная изгибу и сжатию		
			Сжимаемая кромка	Растягиваемая кромка	
Распределение напряжения в частях (сжатие положительное)					
1	Деформированный вхолостую	$c/t \leq 10\varepsilon$	$c/t \leq \frac{10\varepsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{10\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$	
	Сварной	$c/t \leq 9\varepsilon$	$c/t \leq \frac{9\varepsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{9\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$	
2	Деформированный вхолостую	$c/t \leq 10,4\varepsilon$	$c/t \leq \frac{10,4\varepsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{10,4\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$	
	Сварной	$c/t \leq 9,4\varepsilon$	$c/t \leq \frac{9,4\varepsilon}{\alpha}$	$c/t \leq \frac{9,4\varepsilon}{\alpha\sqrt{\alpha}}$	
Распределение напряжения в частях (сжатие положительное)					
3	Деформированный вхолостую	$c/t \leq 11,9\varepsilon$	$c/t \leq 18,1\varepsilon\sqrt{k_\sigma}$ для $k_\sigma$ см. EN 1993-1-5		
	Сварной	$c/t \leq 11\varepsilon$	$c/t \leq 16,7\varepsilon\sqrt{k_\sigma}$ для $k_\sigma$ см. EN 1993-1-5		
$\varepsilon = \left[ \frac{235}{f_y} \frac{E}{210\,000} \right]^{0,5}$		Марка	1.4301	1.4401	1.4462
		$f_y$ , Н/мм <sup>2</sup>	210	220	460
		$\varepsilon$	1,03	1,01	0,698

**Таблица 5.2 - Максимальное отношение ширины к толщине для сжатых частей**  
(продолжение)

Также обратитесь к «выступающим фланцам» (см. лист 2 из 3)	<div>Углы</div> 		Не применимо к углам в продолжительном контакте с другими компонентами		
Класс	Профили, подверженные сжатию				
Распределение напряжения в частях (сжатие положительное)					
3	$h/t \leq 11,9\varepsilon; \frac{b+h}{2t} \leq 9,1\varepsilon$				
<div>Трубчатые секции</div> 					
Класс	Профили, подверженные изгибу до 240 CHS		Профили, подверженные сжатию		
1	$d/t \leq 50\varepsilon^2$		$d/t \leq 50\varepsilon^2$		
2	$d/t \leq 70\varepsilon^2$		$d/t \leq 70\varepsilon^2$		
3	$d/t \leq 280\varepsilon^2$ Примечание — Для $d > 240\text{мм}$ и $d/t > 280\varepsilon^2$ см. EN 1993-1-6		$d/t \leq 90\varepsilon^2$ Примечание — Для $d/t > 90\varepsilon^2$ см. EN 1993-1-6		
$\varepsilon = \left[ \frac{235}{f_y} \frac{E}{210\,000} \right]^{0,5}$	Марка	1.4301	1.4401	1.4462	
	$f_y$ , Н/мм <sup>2</sup>	210	220	460	
	$\varepsilon$	1,03	1,01	0,698	

5.2.2.2 Классификация поперечных сечений необходима для определения условных границ, при достижении которых, несущая и вращательная способности поперечных сечений ограничена местной потерей устойчивости.

5.2.2.3 Всего классов поперечных сечений – четыре класса (см. Пункт 5.5.2(1) СН РК EN 1993-1-1)).

5.2.2.4 (5.2.2(1)) Элементы поперечного сечения, работающие на сжатие, должны классифицироваться как класс 1, 2 или 3 в зависимости от пределов, указанных в Таблице

5.2 настоящего пособия. Те элементы, работающие на сжатие, которые не отвечают критерию для класса 3, должны классифицироваться как элементы класса 4.

5.2.2.5 Поперечные сечения классифицируются по наивысшему (наименее благополучному) классу его сжатых частей.

### 5.2.3 Эффективные геометрические характеристики поперечных сечений

#### 5.2.3.1 Поперечные сечения класса 4

5.2.3.1.1 При расчетах несущей способности поперечных сечений класса 4 необходимо применять эффективные<sup>Р</sup> геометрические характеристики, которые учитывают потерю местной устойчивости сечения.

5.2.3.1.2 Определение эффективных<sup>Р</sup> геометрических характеристик поперечных сечений класса 4 необходимо выполнять по указаниям Пунктов 4.4 (1) ÷ 4.4 (5) СН РК EN 1993-1-5, за исключением того, что понижающий коэффициент  $\rho$  определяется по следующим формулам:

а) деформированные вхолостую или сварные внутренние элементы:

$$\rho = \frac{0,772}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,125}{\bar{\lambda}_p^2}, \text{ но } \leq 1 \quad (5.1)$$

б) деформированные вхолостую выступающие элементы:

$$\rho = \frac{1,0}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,231}{\bar{\lambda}_p^2}, \text{ но } \leq 1 \quad (5.2)$$

в) сварные выступающие элементы:

$$\rho = \frac{1,0}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,242}{\bar{\lambda}_p^2}, \text{ но } \leq 1 \quad (5.3)$$

где  $\bar{\lambda}_p$  - это гибкость элемента, определяемая как:

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\frac{\bar{b}}{t}}{28,4 \times \varepsilon \times \sqrt{k_\sigma}}$$

здесь  $t$  - соответствующая толщина;

$k_\sigma$  - коэффициент изгиба, соответствующий отношению напряжения  $\psi$  и пограничных условий из Таблицы 4.1 или Таблицы 4.2 в СН РК EN 1993-1-5, по принадлежности;

$\bar{b}$  - соответствующая ширина, определяемая по рисункам из Таблицы 5.2 настоящего пособия.

#### 5.2.4 Учет эффектов сдвигового запаздывания

5.2.4.1 При расчетах несущей способности поперечных сечений, где наблюдается эффект сдвигового запаздывания (например, относительно тонкие пояса протяженных

(многопролетных) двутавровых сварных балок) необходимо применять эффективные<sup>s</sup> геометрические характеристики.

5.2.4.2 Определение эффективных<sup>s</sup> геометрических характеристик поперечных сечений, подверженных эффекту сдвигового запаздывания, необходимо выполнять по указаниям Пункта 3.3 СН РК EN 1993-1-5.

#### ПРИМЕР 2 Расчет по определению класса сечения прокатного профиля из нержавеющей стали

Исходные данные: определить класс сечения сжатого элемента, подверженного действию центрально-сжимающей силы  $N_{Ed} = 900 \text{ кН}$ . Элемент выполнен из прокатной квадратной трубы  $150 \times 150 \times 6.3$ . Сталь марки 1.4301 с номинальным пределом текучести стали  $f_y = 210 \text{ Н/мм}^2$  и с модулем упругости  $E = 200000 \text{ кН/мм}^2$ .

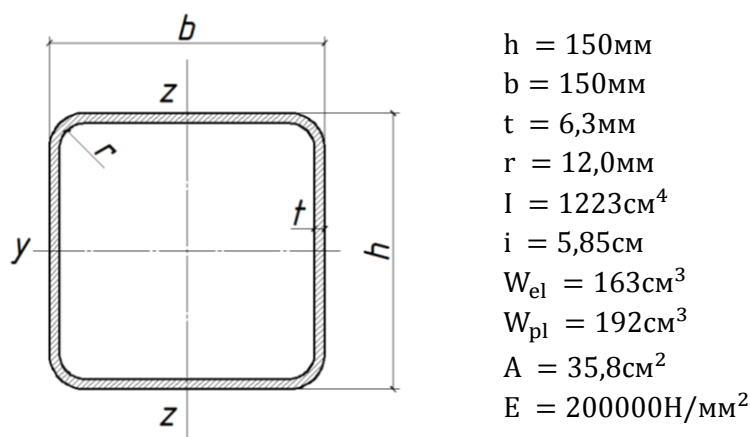


Рисунок 1 - Геометрические характеристики балки

#### 2 Определение класса сечения

##### 2.1 Общее

Для определения прочности элементов металлического каркаса проектировщику необходимо знать, во-первых, поведение и характеристику сечений, а во-вторых, поведение и характеристику всего здания.

Пункты 5.5 и 6.2 СН РК EN 1993-1-1 дают разъяснения по сечениям при расчете. Как в упругой стадии, так и пластичной, прочность и вращательная способность сечения ограничены эффектами местной устойчивости. СН РК EN 1993-1-1 учитывает влияние местной устойчивости на разные типы сечений и делит их на четыре класса (см. Пункт 5.5 СН РК EN 1993-1-1). Расчет прочности сечений необходимо вести согласно Пункту 6.2 СН РК EN 1993-1-1, но с учетом дополнительных требований Пункта 5.2 и Таблицы 5.2 СН РК EN 1993-1-4.

СН РК EN 1993-1-4 все сечения делит на четыре класса: класс 1, класс 2, класс 3, класс 4. Разделение сечений по классам основано на различиях:

- в марке стали;
- в отношениях ширины к толщине отдельных частей сечения элемента (стенка, полка, свес);
- в видах нагрузки элемента (изгиб, центральное сжатие, изгиб со сжатием).

Элемент необходимо классифицировать непосредственно под заданный вид нагрузки (изгиб, центральное сжатие, изгиб со сжатием). Но для упрощения при изгибе со сжатием любой элемент

можно считать как центрально сжатый и, если сечение элемента классифицируется к 1 или 2 классу, то классификация прекращается и принимается согласно результатам расчета. Но если сечение классифицируется к 3 или 4 классу, то необходимо пересчитать под заданный вид нагрузки, т.е. под изгиб со сжатием.

Для классификации при совместном действии сжатия и изгиба необходимо просчитать  $\alpha$  и  $\psi$ , параметры  $\alpha$  (отношение сжатой части сечения к общей ширине элемента) и  $\psi$  (отношение краевых напряжений сечения) зависят от положения нейтральной оси сечения (см. Таблицу 5.2 СН РК EN 1993-1-4):

$$\alpha = \frac{1}{c} \left( \frac{h}{2} + \frac{1}{2} \frac{N_{Ed}}{t_w f_y} - (t_f - r) \right) \leq 1$$

$$\psi = \frac{\sigma_{top}}{\sigma_{bottom}}$$

Согласно СН РК EN 1993-1-1, поперечные сечения класса 1 – те, в которых может образоваться пластический шарнир с вращательной способностью, требуемой для пластического расчета и достигаемой без снижения несущей способности.

Поперечные сечения класса 2 – те, в которых могут развиваться пластические деформации, но в которых ограничена вращательная способность вследствие потери местной устойчивости.

Поперечные сечения класса 3 – те, в которых напряжение в крайних сжатых волокнах стального элемента при упругом распределении напряжений может достигнуть предела текучести, но потеря местной устойчивости препятствует развитию пластических деформаций.

Поперечные сечения класса 4 – те, в которых потеря местной устойчивости наступает до достижения предела текучести в одной или более зонах поперечного сечения.

Связь между изгибающим моментом и вращением указана на Рисунке 2.

Из графика видно, что сечения класса 1 (сечения с высокой вращательной способностью) способны воспринимать и сохранять прочность в пластической стадии. Сечения класса 2 (сечения с ограниченной вращательной способностью) имеют меньшую вращательную способность, но также способны сохранять прочность в пластической стадии.

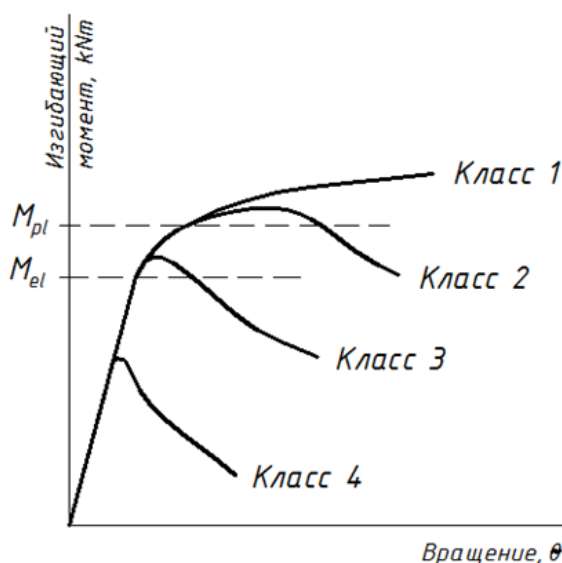


Рисунок 2 – Связь между вращательной способностью и изгибающим моментом

Эффекты потери местной устойчивости обуславливают меньшую прочность сечений 3 класса (потеря местной устойчивости ограничивает достижения полного пластического момента). Сечения данного класса сохраняют прочность лишь в пределах эластичной стадии. Сечения класса 4 теряют свои первоначальные характеристики, не достигнув пределов эластичной стадии.

Следовательно, для дальнейшего расчета, для сечений 1, 2 и 3 классов можно использовать геометрические характеристики (площадь сечения, момент инерции и др.) данные по сортаменту. Для сечений 4 класса необходимо вычислять эффективные геометрические характеристики.

При определении класса сечения элемента необходимо каждую часть сечения определять отдельно (например, двутавр: отдельно свес, отдельно стенку). Окончательно классифицировать сечение необходимо по наименее благоприятной части сечения (см. Пункт 5.5.2(6) СН РК EN 1993-1-1). Например, если свес двутавра по расчету будет сечением первого класса, а стенка – сечением второго класса, то общее сечение двутавра должно быть классифицировано как сечение второго класса.

Также необходимо учитывать исключения, описанные в Пункте 5.5.1 СН РК EN 1993-1-1.

## 2.2 Стенка квадратной трубы

Коэффициент, зависящий от предела текучести стали (см. Таблицу 5.2 СН РК EN 1993-1-4):

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y} \cdot \frac{E}{210000}} = \sqrt{\frac{235}{210} \cdot \frac{200000}{210000}} = 1,03$$

Отношение высоты стенки к толщине стенки:

$$\frac{c}{t} = \frac{h - 2t}{t} = \frac{150 - 2 \cdot 6,3}{6,3} = \frac{137,4}{6,3} = 21,8$$

Условие по Таблице 5.2 СН РК EN 1993-1-4:

$$\frac{c}{t} \leq 25,7\varepsilon$$

$$25,7\varepsilon = 25,7 \cdot 1,03 = 26,5$$

Проверка условия:

$$20,8 < 26,5$$

Следовательно, стенка квадратной трубы из нержавеющей стали – класса 1.

## 2.3 Полка квадратной трубы

Отношение длины полки к толщине полки:

$$\frac{c}{t} = \frac{h - 2t}{t} = \frac{150 - 2 \cdot 6,3}{6,3} = \frac{137,4}{6,3} = 21,8$$

Условие по Таблице 5.2 СН РК EN 1993-1-4:

$$\frac{c}{t} \leq 25,7\varepsilon$$

$$25,7\varepsilon = 25,7 \cdot 1,03 = 26,5$$

Проверка условия:

$$21,8 < 26,5$$

Следовательно, полка квадратной трубы – класса 1.

Сечение квадратной трубы из нержавеющей стали будет классифицировать как поперечное сечения класса 1.

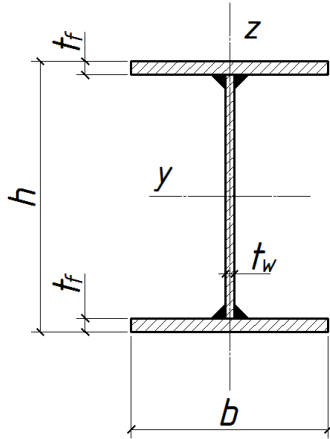
## ПРИМЕР 3 Определение класса сечения центрально-сжатой сварной колонны

Исходные данные: определить класс сечения сварного двутаврового элемента из нержавеющей стали, подверженного действию центрально-сжимающей силы  $N_{Ed} = 700 \text{ кН}$ . Сталь

марки 1.4401 с номинальным пределом текучести стали  $f_y = 220 \text{ Н/мм}^2$  и с модулем упругости  $E = 200000 \text{ кН/мм}^2$ .

## 2 Определение класса сечения

### 2.1 Стенка сварного двутавра



- высота  $h = 270,0 \text{ мм}$
- ширина  $b = 200,0 \text{ мм}$
- толщина стенки  $t_w = 10,0 \text{ мм}$
- толщина полки  $t_f = 15,0 \text{ мм}$
- катет шва  $k = 5,0 \text{ мм}$
- высота стенки  $d = 134,0 \text{ мм}$

**Рисунок 1 - Геометрические характеристики сварного двутавра из нержавеющей стали**

Коэффициент, зависящий от предела текучести стали (см. Таблицу 5.2 СН РК EN 1993-1-4):

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y} \cdot \frac{E}{210000}} = \sqrt{\frac{235}{220} \cdot \frac{200000}{210000}} = 1,01$$

Отношение высоты стенки к толщине стенки:

$$\frac{c}{t} = \frac{d}{t_w} = \frac{h - 2t_f - 2k}{t_w} = \frac{270 - 2 \cdot 15 - 2 \cdot 5}{10} = \frac{230}{10} = 23,0$$

Условие по Таблице 5.2 СН РК EN 1993-1-4:

$$\frac{c}{t} \leq 25,7\varepsilon$$

$$25,7\varepsilon = 25,7 \cdot 1,01 \approx 26,0$$

Проверка условия:

$$23,0 < 26,0$$

Следовательно, стенка сварного двутавра – класса 1.

### 2.2 Полка сварного двутавра

Отношение длины полки к толщине полки:

$$\frac{c}{t} = \frac{(b - t_w - 2k)/2}{t_f} = \frac{(200 - 10 - 2 \cdot 5)/2}{15} = 6,0$$

Условие по Таблице 5.2 СН РК EN 1993-1-4:

$$\frac{c}{t} \leq 9,0\varepsilon$$

$$9,0\varepsilon = 9,0 \cdot 1,01 \approx 9,1$$

Проверка условия:

$$6,0 < 9,1$$

Следовательно, полка сварного двутавра – класса 1.

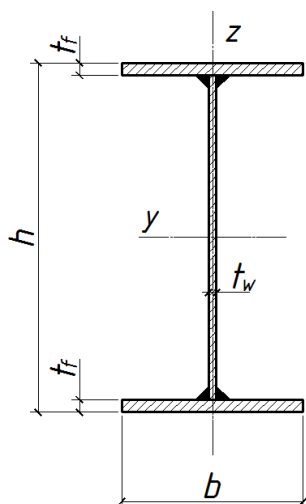
Сечение сварного двутавра из нержавеющей стали марки 1.4401 будет классифицировать как поперечное сечения класса 1.



**ПРИМЕР 4 Определение класса сечения сжато-изгибаемой сварной балки**

Исходные данные: определить класс сечения сжато-изгибаемого элемента ( $N_{Ed} = 100 \text{ кН}$  и  $M_{Ed} = 100 \text{ кНм}$ ).

Сталь марки 1.4401 с номинальным пределом текучести стали  $f_y = 220 \text{ Н/мм}^2$  и с модулем упругости  $E = 200000 \text{ кН/мм}^2$ .



- высота  $h = 500,0 \text{ мм}$
- ширина  $b = 200,0 \text{ мм}$
- толщина стенки  $t_w = 10,0 \text{ мм}$
- толщина полки  $t_f = 15,0 \text{ мм}$
- катет шва  $k = 7,0 \text{ мм}$

**Рисунок 1 - Геометрические характеристики сварного двутавра из нержавеющей стали**

## 2 Определение класса сечения

### 2.1 Стенка сечения

Класс поперечного сечения элемента, подверженного совместному действию сжатия и изгиба, определяется по эпюре нормальных напряжений в сечении. Но для упрощения процедуры определения класса сечения для сжато-изгибаемых элементов можно использовать условия определения класса сжатого элемента. Если сечение классифицируется как сечение класса 1 или 2, то результат классификации можно принять без учета эпюры нормальных напряжений. Но если сечение классифицируется как сечение класса 3 или 4, то требуется построить эпюру нормальных напряжений и уже на основании ее проводить более точное определение класса поперечного сечения сжато-изгибаемого элемента.

Коэффициент, зависящий от предела текучести стали (см. Таблицу 5.2 СН РК EN 1993-1-4):

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y} \cdot \frac{E}{210000}} = \sqrt{\frac{235}{220} \cdot \frac{200000}{210000}} = 1,01$$

Отношение высоты стенки к толщине стенки:

$$\frac{c}{t} = \frac{d}{t_w} = \frac{h - 2t_f - 2k}{t_w} = \frac{500 - 2 \cdot 15 - 2 \cdot 7}{10} = \frac{456}{10} = 45,6$$

Условие по Таблице 5.2 СН РК EN 1993-1-4:

$$\frac{c}{t} \leq 30,7\varepsilon$$

$$30,7\varepsilon = 30,7 \cdot 1,01 = 31,0$$

Проверка условия:

$$45,6 > 31,0$$

Стенка сварного двутавра – стенка класса 4 (по упрощенному методу). Следовательно, необходимо выполнить более точную процедуру определения класса сечения по эпюре нормальных напряжений:

$$d_N = \frac{N_{Ed}}{t_w f_y} = \frac{170000}{10 \cdot 220} = 77,27$$

$$\alpha = \frac{d + d_N}{2d_w} = \frac{456 + 77,27}{2 \cdot 456} = 0,58 > 0,5$$

Условие по Таблице 5.2 СН РК EN 1993-1-4:

$$\frac{308\varepsilon}{13\alpha - 1} = \frac{308 \cdot 1,01}{13 \cdot 0,58 - 1} = 47,13$$

$$\frac{c}{t} = \frac{d}{t_w} = 45,6$$

Проверка условия:

$$45,6 < 47,27$$

Стенка сварного двутавра – сечение класса 1.

2.2 Полка сварного двутавра

Отношение длины полки к толщине полки:

$$\frac{c}{t} = \frac{(b - t_w - 2k)/2}{t_f} = \frac{(200 - 10 - 2 \cdot 7)/2}{15} = \frac{88}{15} = 5,8$$

Условие по Таблице 5.2 СН РК EN 1993-1-4:

$$\frac{c}{t} \leq 9\varepsilon$$

$$9\varepsilon = 9 \cdot 1,01 \approx 9,1$$

Проверка условия:

$$5,8 < 9,1$$

Полка сварного двутавра – класса 1.

Следовательно, сечение сварного двутавра из нержавеющей стали марки 1.4401 будет классифицировать как поперечное сечения класса 1.

### ПРИМЕР 5 Определение класса сечения центрально сжатой балки с «гибкой» стенкой

Исходные данные: определить класс сечения сварного двутаврового элемента из нержавеющей стали, подверженного действию центрально-сжимающей силы  $N_{Ed} = 520$  кН. Сталь марки 1.4401 с номинальным пределом текучести стали  $f_y = 220$  Н/мм<sup>2</sup> и с модулем упругости  $E = 200\,000$  кН/мм<sup>2</sup>.

#### 2 Определение класса сечения

##### 2.1 Стенка сварного двутавра

Коэффициент, зависящий от предела текучести стали (см. Таблицу 5.2 СН РК EN 1993-1-4):

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y} \cdot \frac{E}{210000}} = \sqrt{\frac{235}{220} \cdot \frac{200000}{210000}} = 1,01$$

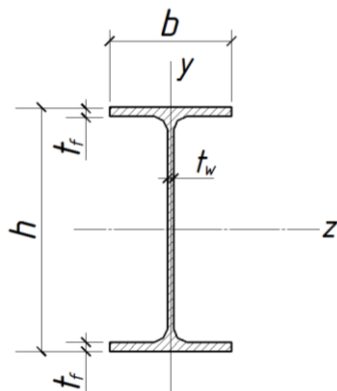
Отношение высоты стенки к толщине стенки:

$$\frac{c}{t} = \frac{h - 2t_f - 2k}{t_w} = \frac{600 - 2 \cdot 20 - 2 \cdot 7}{12} = 45,5$$

Условие по Таблице 5.2 СН РК EN 1993-1-4:

$$\frac{c}{t} \leq 30,7\varepsilon$$

$$30,7 \varepsilon = 30,7 \cdot 1,01 = 31,0$$



- высота  $h = 600$  мм;
- ширина  $b = 220$  мм;
- толщина стенки  $t_w = 12$  мм;
- толщина полки  $t_f = 20$  мм;
- катет шва  $k = 7,0$  мм;

**Рисунок 1 – Геометрические характеристики сварного двутавра из нержавеющей стали**

Проверка условия:

$$\frac{c}{t} = 45,5 > 30,7\varepsilon = 31,0$$

Следовательно, стенка сварного двутавра – класс 4.

## 2.2 Полка сварного двутавра

Отношение длины полки к толщине полки:

$$\frac{c}{t} = \frac{(b - t_w - 2k)/2}{t_f} = \frac{(220 - 12 - 2 \cdot 7)/2}{20} = 4,85$$

Условие по Таблице 5.2 СН РК EN 1993-1-4:

$$\frac{c}{t} \leq 9,0\varepsilon$$

$$9,0 \varepsilon = 9,0 \cdot 1,01 \approx 9,1$$

Проверка условия:

$$\frac{c}{t} = 4,85 < 9,0\varepsilon = 9,1$$

Следовательно, полка сварного двутавра - класса 1.

Сечение сварного двутавра из нержавеющей стали марки 1.4401 будет квалифицироваться по наименее «благоприятной» части сечения, т.е по классу стенки. Таким образом, поперечное сечение – класса 4.

## 2.3 Определение эффективных<sup>Р</sup> характеристик сечения сварного двутавра из нержавеющей стали

Согласно Пункту 5.2.3(1) СН РК EN 1993-1-4 определение эффективных<sup>Р</sup> характеристик сечения класса 4 выполняется по СН РК EN 1993-1-5, но с учетом дополнительных требований для нержавеющей стали.

Эффективные<sup>Р</sup> характеристики необходимы для расчета сечения сварной балки на прочность и устойчивость только в упругой стадии.

Расчет сечений класса 4 прочности и устойчивости предполагает, что воздействия воспринимаются только эффективной<sup>Р</sup> частью сечения. То есть неэффективная часть сечения, в которой возможна потеря местной устойчивости, не участвует в расчетах (см. Рисунок 2).

В данном примере (сечение сварного двутавра) сечением 4 класса является стенка двутавра. Согласно Таблице 4.1 СН РК EN 1993-1-5, стенка двутавра – равномерно сжатая пластина с двухсторонним закреплением по краям. Таким образом:

$$\delta_1 = \delta_2 = \text{const};$$

$$\psi = \frac{\delta_2}{\delta_1} = 1,0;$$

$$k_\delta = 4,0;$$

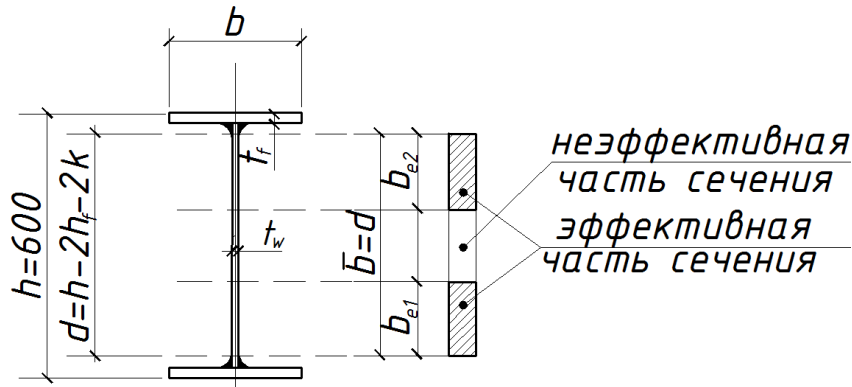


Рисунок 2 – Эффективные<sup>Р</sup> части сечения

Кроме того, по Таблице 4.1 СН РК EN 1993-1-5 для  $\psi = 1$  эффективная длина стенки сварного двутавра определяется по формуле:

$$b_{\text{eff}} = \rho \cdot \bar{b}$$

где  $\bar{b}$  – чистая длина стенки, равная:

$$\bar{b} = d = h - 2t_f - 2k = 600 - 2 \cdot 20 - 2 \cdot 7 = 546 \text{ мм}$$

$\rho$  – понижающий коэффициент при потере устойчивости пластины, определенный по Формуле (5.1) СН РК EN 1993-1-4 с учетом дополнительных требований для нержавеющей стали:

$$\rho = \frac{0,772}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,125}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{0,772}{\frac{\bar{b}}{t_w}} - \frac{0,125}{\left(\frac{\bar{b}}{t_w}\right)^2} = \frac{0,772}{\frac{546}{12}} - \frac{0,125}{\left(\frac{546}{12}\right)^2} = \frac{0,772}{45,5} - \frac{0,125}{2070,25} = 0,0169 - 0,00006 = 0,01684$$

$$\rho = \frac{0,772}{\frac{546}{12}} - \frac{0,125}{\left(\frac{546}{12}\right)^2} = \frac{0,772}{1,58} - \frac{0,125}{1,58^2} = 0,488 - 0,05 = 0,44$$

$$\rho = 0,44 < 1,0$$

Таким образом, эффективная длина стенки равна:

$$b_{\text{eff}} = \rho \cdot \bar{b} = 0,44 \cdot 546 = 239,1 \text{ мм}$$

По Таблице 4.1 СН РК EN 1993-1-5:

$$b_{e1} = b_{e2} = \frac{b_{\text{eff}}}{2} = \frac{239,1}{2} = 119,55 \text{ мм}$$

Значит,

$$A_{\text{eff}} = 2 \cdot b \cdot t_f + b_{e1} \cdot t_w + b_{e2} \cdot t_w = 2 \cdot 220 \cdot 20 + 2 \cdot 12 \cdot 119,55$$

$$A_{\text{eff}} = 8800 + 2869,3 = 11669,3 \text{ мм}^2$$

Следовательно, данное сечение сварного двутавра из нержавеющей стали класса 4 обладает эффективной площадью  $A_{\text{eff}} = 11669,3 \text{ мм}^2$ .

В дальнейших расчетах на прочность и устойчивость должна использоваться данная площадь эффективного сечения (расчеты только в упругой стадии).

#### ПРИМЕР 6 Определение класса сечения центрально сжатой круглой трубы

Исходные данные: определить класс сечения сжатого элемента. Сжатый элемент - стальная круглая труба размерами 240×10 мм.

Сталь марки 1.4301 с номинальным пределом текучести стали  $f_y = 210 \text{ Н/мм}^2$  и с модулем упругости  $E = 200000 \text{ кН/мм}^2$ .

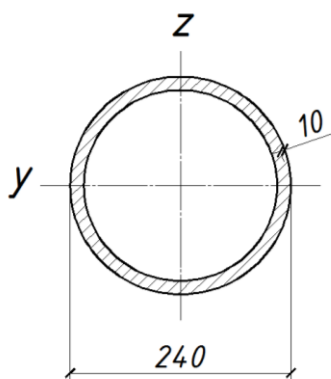


Рисунок 1 - Геометрические характеристики круглой трубы 240×10

#### 2 Определение класса сечения

Коэффициент, зависящий от предела текучести стали (см. Таблицу 5.2 СН РК EN 1993-1-4):

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y} \cdot \frac{E}{210000}} = \sqrt{\frac{235}{210} \cdot \frac{200000}{210000}} = 1,03$$

Отношение диаметра трубы к ее толщине:

$$d/t = 240/10 = 24,0$$

Условие по Таблице 5.2 СН РК EN 1993-1-4:

$$d/t \leq 50\varepsilon^2$$

Значит,

$$50\varepsilon^2 = 50 \cdot 1,03^2 = 53,04$$

Проверка условия:

$$24,0 < 53,04$$

Следовательно, сечение трубы из нержавеющей стали – сечение класса 1

#### ПРИМЕР 7 Определение класса сечения центрально сжатого не равнополочного уголка

Исходные данные: определить класс сечения прокатного не равнополочного уголка L70×50×5 из нержавеющей стали, подверженного действию центрального сжатия.

Сталь марки 1.4401 с номинальным пределом текучести стали  $f_y = 220 \text{ Н/мм}^2$  и с модулем упругости  $E = 200000 \text{ кН/мм}^2$ .

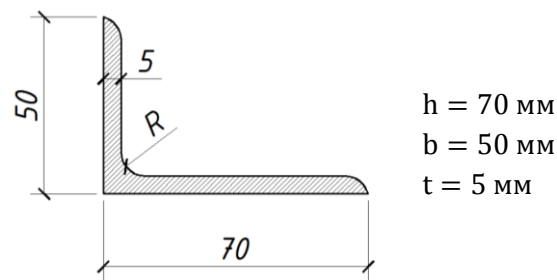


Рисунок 1 - Геометрические характеристики

## 2 Определение класса сечения

Коэффициент, зависящий от предела текучести стали (см. Таблицу 5.2 СН РК EN 1993-1-4):

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y} \cdot \frac{E}{210000}} = \sqrt{\frac{235}{220} \cdot \frac{200000}{210000}} = 1,01$$

Отношение толщины к толщине сжатых частей не равнополочного уголка:

$$\frac{b+h}{2t} = \frac{70+50}{2 \cdot 5} = 12,0$$

Условие по Таблице 5.2 СН РК EN 1993-1-4:

$$\frac{b+h}{2t} \leq 9,1\varepsilon$$

Проверка условия:

$$9,1\varepsilon = 9,1 \cdot 1,01 = 9,2$$

$$12,0 > 9,2$$

Следовательно, сечение прокатного не равнополочного уголка L70×50×5 из нержавеющей стали марки 1.4401 не удовлетворяет условиям для класса 3. Значит, будет классифицировать поперечное сечения уголка как сечение класса 4.

**ПРИМЕР 8 Определение класса сечения центрально сжатого равнополочного уголка**

Исходные данные: определить класс сечения прокатного равнополочного уголка L70×70×5 из нержавеющей стали, подверженного действию центрального сжатия.

Сталь марки 1.4401 с номинальным пределом текучести стали  $f_y = 220 \text{ Н/мм}^2$  и с модулем упругости  $E = 200000 \text{ кН/мм}^2$ .

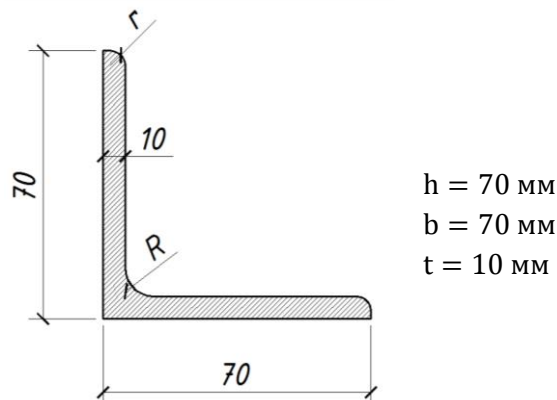


Рисунок 1 - Геометрические характеристики

## 2 Определение класса сечения

Коэффициент, зависящий от предела текучести стали (см. Таблицу 5.2 СН РК EN 1993-1-4):

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y} \cdot \frac{E}{210000}} = \sqrt{\frac{235}{220} \cdot \frac{200000}{210000}} = 1,01$$

Отношение толщины к толщине сжатых частей не равнополочного уголка:

$$\frac{h}{t} = \frac{70}{5} = 14,0$$

Условие по Таблице 5.2 СН РК EN 1993-1-4:

$$\frac{h}{t} \leq 11,9\varepsilon$$

Проверка условия:

$$11,9\varepsilon = 11,9 \cdot 1,01 = 12,0$$

$$12,0 < 14,0$$

Следовательно, сечение прокатного равнополочного уголка L70×70×5 из нержавеющей стали марки 1.4401 удовлетворяет условиям для класса 3. Значит, будет классифицировать поперечное сечения уголка как сечение класса 3.

## 5.3 Сопротивление поперечных сечений

### 5.3.1 Сопротивление растяжению на отверстиях для болтов

5.3.1.1 (5.3.1(1)) Сопротивление растяжению поперечного сечения должно браться как меньшее из: сопротивление пластической деформации поперечного сечения брутто  $N_{pl,Rd}$  и предел прочности  $N_{u,Rd}$  поперечного сечения нетто.

5.3.1.2 (5.3.1(2)) Сопротивление пластической деформации поперечного сечения брутто должно определяться с использованием:

$$N_{pl,Rd} = \frac{A_g \times f_y}{\gamma_{M0}} \quad (5.4)$$

5.3.1.3 (5.3.1(3)) Предел прочности поперечного сечения нетто должен определяться из:

$$N_{u,Rd} = \frac{k_r \times A_{net} \times f_u}{\gamma_{M0}} \quad (5.5)$$

где  $k_r = [1 + 3r(d_0/u - 0,3)]$ , но  $k_r < 1,0$ ;

$r = [\text{число болтов на поперечном сечении}]/[\text{общее число болтов в соединении}]$ ;

$u = 2e_2$ , но  $u \leq p_2$ ,

при  $A_{net}$  - площадь поперечного сечения нетто;

$d_0$  - номинальный диаметр отверстия для болта;

$e_2$  - краевое расстояние от центра отверстия для болта до прилегающей кромки в направлении, перпендикулярном направлению передачи нагрузки;

$p_2$  - расстояние от центра до центра между отверстиями для болтов в направлении, перпендикулярном направлению передачи нагрузки.

**ПРИМЕР 9 Расчет болтового узла**

Исходные данные: равнополочный уголок 110х10, нагруженный растягивающим усилием, закреплен на пластине толщиной  $t = 10$  мм. Материал обоих элементов – нержавеющая сталь марки 1.4401. Уголок крепится к пластине при помощи 8-ми болтов диаметром 16 мм класса 50, изготовленных из аустенитной стали, расположенных в шахматном порядке. Схема соединения приведена на Рисунке 1. Нужно определить расчетную несущую способность соединения.

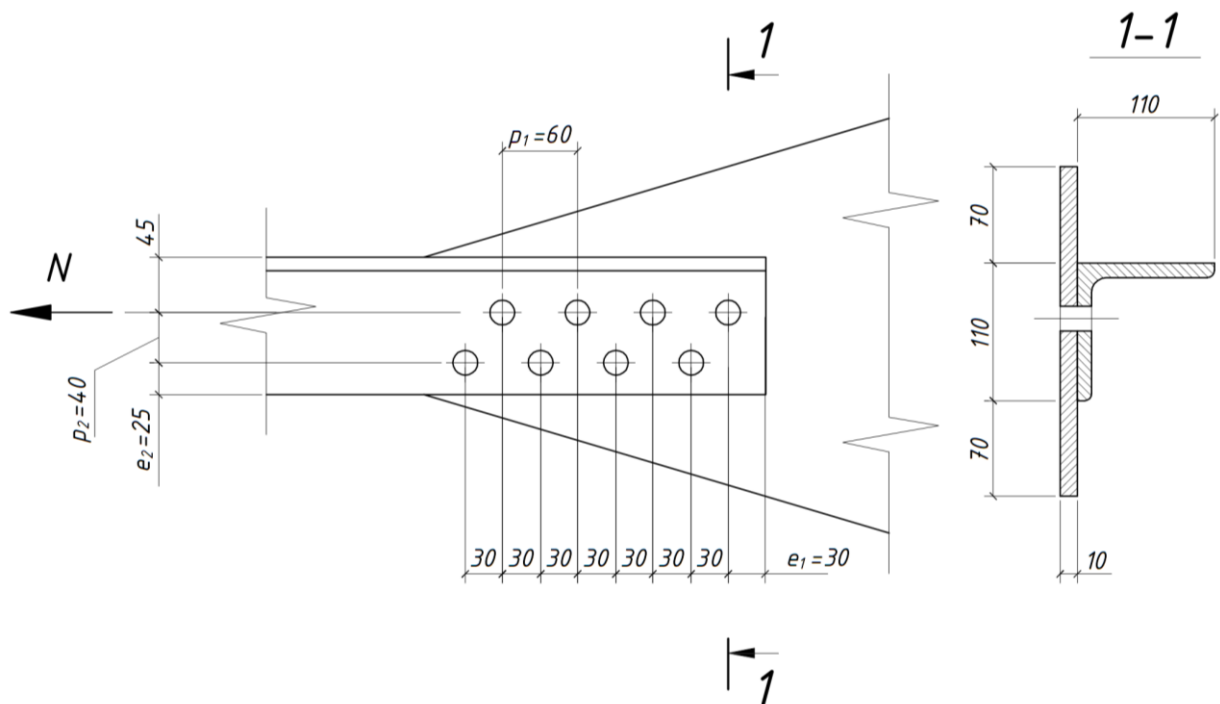
Соединение относится к категории «А» (согласно п. 3.4.1 СН РК EN 1993-1-8) – срезное соединение. Расчетное усилие сдвига не должно превышать несущей способности на срез и на смятие.

**2 Характеристики материалов**

Уголок и пластина изготовлены из стали марки 1.4401: предел текучести (0,2 % напряжение при испытании) составляет  $220 \text{ Н/мм}^2$ , а временное сопротивление растяжению равно  $530 \text{ Н/мм}^2$  (см. Таблицу 2.3).

Материал болтов относится к классу 50.

Предел текучести стали болтов  $f_{yb}$  принимается равным  $210 \text{ Н/мм}^2$ , временное сопротивление растяжению  $f_{ub} = 500 \text{ Н/мм}^2$  (по Таблице 2.5).



**Рисунок 1 - Схема болтового соединения**

**3 Частные коэффициенты безопасности**

Частные коэффициенты безопасности для сечения брутто:  $\gamma_{M0} = \gamma_{M1} = 1,1$ ;

Частный коэффициент безопасности для сечения нетто:  $\gamma_{M2} = 1,25$ ;

Частный коэффициент безопасности для болтов:  $\gamma_{M2} = 1,25$ .

**4 Расположение и размер отверстий**

Для болтов М16 размер отверстия  $d_0 = 18$  мм.



Расстояние до края уголка в продольном направлении  $e_1 = 30$  мм. Расстояние до грани пера уголка  $e_2 = 25$  мм. Значения  $e_1$  и  $e_2 < 4t+40 = 80$  мм, а также  $e_1$  и  $e_2 > 1,2d_0 = 1,2 \times 18 = 21,6$  мм (согласно Таблице 3 СН РК EN 1993-1-8).

Расстояние между осями болтов:

- для болтов одного ряда:  $p_1 = 60$  мм  $> 2,2d_0 = 39,6$  мм;

- между болтами соседних рядов:  $\sqrt{40^2 + 35^2} = 53,2$  мм  $> 2,4d_0 = 43,2$  мм;

- соответственно, расстояние между рядами может быть принято  $p_2 = 40$  мм  $> 1,2d_0 = 21,6$  мм.

При сжимающей нагрузке, величины  $e_2$  и  $p_1$  должны удовлетворять условия локальной устойчивости для крайних элементов и внутренних частей соответственно. Проверка должна производиться как для уголка, так и для пластины.

#### 5 Сопротивление растяжению поперечного сечения уголка

Согласно Пункту 5.3.1.1 расчетное усилие разрыва определяется как меньшее из сопротивления пластической деформации поперечного сечения брутто  $N_{pl,Rd}$  и предела прочности  $N_{u,Rd}$  поперечного сечения нетто.

Площадь сечения брутто уголка составляет  $A_g = 2118$  мм<sup>2</sup>;

Расчетное сопротивление пластической деформации поперечного сечения брутто определяется по Формуле (5.4):

$$N_{pl,Rd} = \frac{A_g \times f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{2118 \times 220}{1,1 \times 10^3} = 423,6 \text{ кН}$$

Предел прочности поперечного сечения нетто определяется по Формуле (5.5):

$$N_{u,Rd} = \frac{k_r \times A_{net} \times f_u}{\gamma_{M0}} = \frac{1 \times 1814,25 \times 520}{1,25 \times 10^3} = 754,7 \text{ кН}$$

где

$$k_r = \left( 1 + 3r \left( \frac{d_0}{u} - 0,3 \right) \right), \text{ но } k_r \leq 1;$$

$$r = \frac{2}{8} = 0,25;$$

$$u = 2e_2 = 2 \times 25 = 50 \text{ мм, но } u \leq p_2 = 40 \text{ мм} \rightarrow u = 40 \text{ мм}$$

$$k_r = \left( 1 + 3 \times 0,25 \times \left( \frac{18}{40} - 0,3 \right) \right) = 1,1125 \rightarrow k_r = 1.$$

#### 6 Сопротивление растяжению одиночного уголка, закрепленного одной полкой

Для шахматного расположения болтов площадь сечения нетто должна приниматься как меньшее из следующего:

- полная площадь за исключением отверстия одного ряда:

$$A_{net} = A_g - t \times d_0 = 2118 - 10 \times 18 = 1938 \text{ мм}^2;$$

- площадь сечения, проходящего через отверстия всех рядов (см. Рисунок 2):

$$A_{net} = A_g - t \left( n \times d - \sum \frac{s^2}{4p} \right) = 2118 - 10 \left( (2 \times 18) - \frac{30^2}{4 \times 40} \right) = 1814,25 \text{ мм}^2,$$

где  $n = 2$  – количество отверстий под болты;

$s = 30$  мм – расстояние между осями болтов соседних рядов;

$p = 40$  мм – расстояние между рядами.

Соответственно,  $A_{net} = 1814,25$  мм<sup>2</sup>.

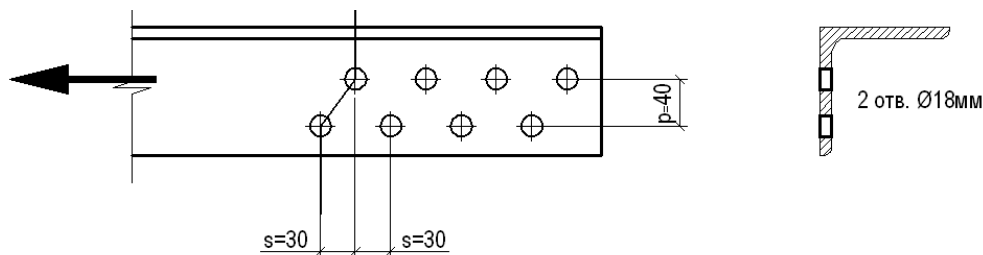


Рисунок 2 - Площадь сечения нетто

Согласно Пункту 3.10.3(2) СН РК EN 1993-1-8, растянутые элементы из одиночных уголков, прикрепляемые одной полкой рядом болтов, можно рассматривать как нагруженные без эксцентриситета по эффективному сечению нетто, для которого несущую способность следует определять по Формуле (3.13) СН РК EN 1993-1-8.

Значение понижающего коэффициента, которое не попадает в заданные интервалы Таблицы 3.8 EN 1993-1-8, определяют интерполяцией. В данном примере  $\beta_3 = 0,57$ .

Расчетное граничное сопротивление сечения уголка нетто по Формуле (3.13) СН РК EN 1993-1-8:

$$N_{u,Rd} = \frac{\beta_3 A_{net} f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{0,57 \times 1814,25 \times 520}{1,25 \times 10^3} = 430,2 \text{ кН.}$$

#### 7 Расчетное сопротивление уголка отрыву через группу отверстий

Для данного расчета применяются формулы не из СН РК EN 1993-1-1, а из СН РК EN 1993-1-8, так как в последнем подробно рассмотрены уголки.

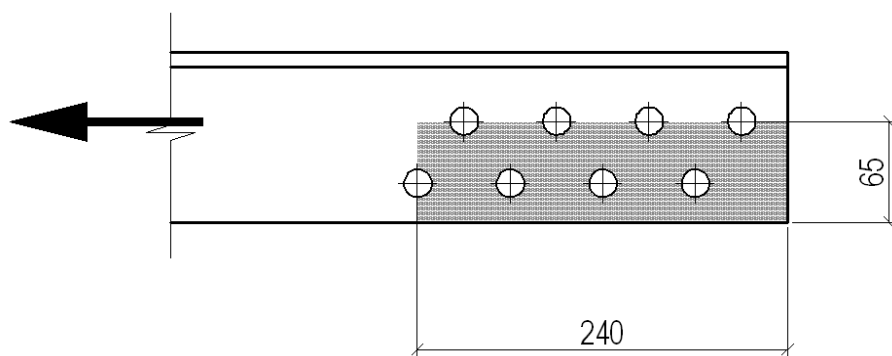


Рисунок 3 - Схема зоны отрыва материала уголка

Расчетное сопротивление отрыву, принимая соединение как шахматное (см. Рисунок 3), определяется по Формуле (3.10) СН РК EN 1993-1-8:

$$V_{eff,2,Rd} = \frac{0,5 \times f_u \times A_{nt}}{\gamma_{M2}} + \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{f_y A_{nv}}{\gamma_{M2}} =$$

$$= \frac{0,5 \times 520 \times (65 - 18) \times 10}{1,25 \times 10^{-3}} + \frac{220 \times (240 - 4 \times 18) \times 10}{\sqrt{3} \times 1,1 \times 10^{-3}} = 97,8 + 194 = 291,8 \text{ кН}$$

где  $A_{nt}$  – площадь сечения нетто растянутой зоны,  
 $A_{nv}$  – площадь сечения нетто сдвигаемой зоны.

Расчетное сопротивление отрыву, принимая расположение отверстий соседних рядов без смещения относительно друг друга:

$$V_{\text{eff},2,\text{Rd}} = \frac{0,5 \times f_u \times A_{\text{nt}}}{\gamma_{\text{M2}}} + \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{f_y A_{\text{nv}}}{\gamma_{\text{M2}}} =$$

$$= \frac{0,5 \times 520 \times (65 - 18 - 9) \times 10}{1,25 \times 10^{-3}} + \frac{220 \times (240 - 3 \times 18 - 9) \times 10}{\sqrt{3} \times 1,1 \times 10^{-3}} = 79 + 204 = 283 \text{ кН.}$$

#### 8 Расчетное сопротивление полного сечения пластины

Площадь сечения брутто пластины на уровне оси крайнего болта:

$$A_g = 10 \times (110 + 70 + 70) = 2500 \text{ мм}^2.$$

Расчетное сопротивление при пластичной работе, по Формуле (5.4):

$$N_{\text{pl,Rd}} = \frac{A_g \times f_y}{\gamma_{\text{M0}}} = \frac{2500 \times 220}{1,1 \times 10^3} = 500 \text{ кН.}$$

#### 9 Расчетное сопротивление сечения пластины нетто

Площадь сечения нетто пластины на уровне оси крайнего болта (где приложенные усилия – максимальны), проходящего через одно отверстие, расположенное асимметрично в элементе шириной:

$$b = 110 + 70 + 70 = 250 \text{ мм};$$

$$A_{\text{net}} = A_g - d_0 t = 2500 - 18 \times 10 = 2320 \text{ мм}^2.$$

Площадь сечения нетто пластины на уровне оси крайнего болта, проходящего через два отверстия, расположенных в шахматном порядке, при  $s = 30 \text{ мм}$  и  $p = 40 \text{ мм}$ :

$$A_{\text{net}} = A_g - 2d_0 \times t + \frac{s^2 \times t}{4p} =$$

$$= 2500 - 2 \times 18 \times 10 + \frac{30^2 \times 10}{4 \times 40} = 2500 - 360 + 56,25 = 2196,25 \text{ мм}^2.$$

Соответственно,  $A_{\text{net}} = 2196,25 \text{ мм}^2$ .

Расчетное граничное сопротивление сечения нетто пластины у края уголка определяется по Формуле (5.5):

$$N_{\text{u,Rd}} = \frac{k_r \times A_{\text{net}} \times f_u}{\gamma_{\text{M0}}},$$

где  $k_r$  – понижающий коэффициент,

$$k_r = [1 + 3r(d_0/u - 0,3)], \text{ но } k_r < 1,0;$$

здесь  $u = 2e_2 \leq p_2$ , следовательно  $u = 40 \text{ мм}$ .

Тогда,

$$k_r = \left[ 1 + 2 \times \frac{2}{8} \times \left( \frac{18}{40} - 0,3 \right) \right] = 1,11 > 1,0;$$

Принимается  $k_r = 1,0$ .

Значит,

$$N_{\text{u,Rd}} = \frac{k_r \times A_{\text{net}} \times f_u}{\gamma_{\text{M0}}} = \frac{1,0 \times 2196,25 \times 520}{1,25 \times 10^3} = 913,64 \text{ кН}$$

Рекомендуется также проверять сопротивление сечений нетто на промежуточных сечениях пластины.

Сечение на уровне оси первого отверстия под болт у края пластины:

$$A_{\text{net}} = A_g - d_0 t = 127,5 \times 10 - 18 \times 10 = 1095 \text{ мм}^2.$$

Данное сечение должно быть способным передавать нагрузку от одного болта.

Расчетное граничное сопротивление сечения, Формула (5.5):

$$N_{u,Rd} = \frac{k_r \times A_{net} \times f_u}{\gamma_{M0}} = \frac{1,0 \times 1095 \times 520}{1,25 \times 10^3} = 455,52 \text{ кН.}$$

Очевидно, что нет необходимости проверять какие-либо еще сечения пластины, так как приложенная к ней нагрузка не может превышать расчетное сопротивление уголка, которое является меньшим полученного выше значения.

10 Расчетное сопротивление сечения фасонки при отрыве через группу отверстий

Расчетное сопротивление отрыву, принимая соединение как шахматное (см. Рисунок 4), определяется по Формуле (3.9) СН РК EN1993-1-8 как для случая передачи сдвигающего усилия без эксцентриситета:

$$\begin{aligned} V_{eff,1,Rd} &= \frac{f_u A_{nt}}{\gamma_{M2}} + \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{f_y A_{nv}}{\gamma_{M2}} = \\ &= \frac{520 \times (40 - 9) \times 10}{1,25 \cdot 10^3} + \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{220 \times (240 - 4 \times 18 + 240 - 3 \times 18 - 9) \times 10}{1,1 \cdot 10^3} \\ &= 129 + 398,4 = 527,4 \text{ кН} \end{aligned}$$

Расчетное сопротивление отрыву, принимая расположение отверстий соседних рядов без смещения относительно друг друга, определяется по Формуле (3.9) СН РК EN1993-1-8):

$$\begin{aligned} V_{eff,1,Rd} &= \frac{f_u A_{nt}}{\gamma_{M2}} + \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{f_y A_{nv}}{\gamma_{M2}} = \\ &= \frac{520 \times (40 - 2 \times 9) \times 10}{1,25 \cdot 10^3} + \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{220 \times (2 \times 240 - 6 \times 18 - 2 \times 9) \times 10}{1,1 \cdot 10^3} \\ &= 91,5 + 408,8 = 500,3 \text{ кН} \end{aligned}$$

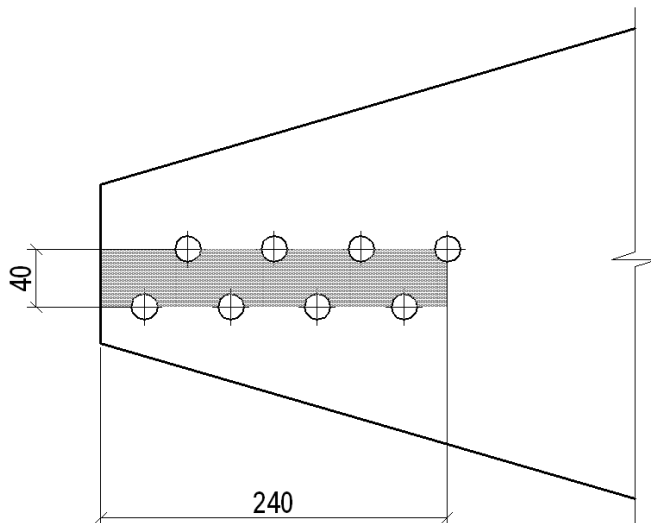


Рисунок 4 - Схема зоны вырыва фасонки

11 Расчетное сопротивление срезу болтов

Болты срезаются по одной плоскости. Плоскость среза проходит через нарезную часть болта, поэтому  $\alpha = 0,5$  (см. Пункт 6.2 настоящего пособия). Площадь сечения болта М16:

$$A_s = 157 \text{ мм}^2.$$

Расчетное сопротивление болта М16 класса 50 с площадью сечения  $A_s = 157 \text{ мм}^2$ , по Формуле (6.2) настоящего пособия:

$$F_{v,Rd} = \frac{\alpha \times f_{ub} \times A}{\gamma_{M2}} = \frac{0,5 \times 500 \times 157}{1,25 \times 10^3} = 31,4 \text{ кН.}$$

Расчетное сопротивление группы болтов при срезе:

$$n_b \times F_{v,Rd} = 8 \times 31,4 = 251,2 \text{ кН.}$$

## 12 Расчетная несущая способность соединения при смятии

Расчетная несущая способность при смятии для части болта M16 толщиной 10 мм, при расстояниях до края элемента  $e_1 = 30$  мм, до кромки уголка  $e_2 = 25$  мм ( $> 1,2d_0 = 21,6$  мм), и между болтами  $p_1 = 60$  мм и  $p_2 = 40$  мм, согласно Таблице 3.4 СН РК EN 1993-1-8:

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \times \alpha_b \times f_{u,red} \times d \times t}{\gamma_{M2}}.$$

Для предотвращения существенного увеличения отверстий под болты в процессе эксплуатации, в расчете используется приведенная расчетная прочность  $f_{u,red}$ , определяемая по Формуле (6.1):

$$\begin{aligned} f_{u,red} &= 0,5 \times f_y + 0,6 \times f_u, \quad \text{но } f_{u,red} \leq f_u; \\ f_{u,red} &= 0,5 \times 220 + 0,6 \times 520 = 422 \text{ Н/мм}^2 \leq f_u. \end{aligned}$$

Коэффициент  $\alpha_b$  для крайнего болта при  $e_1 = 30$  мм и  $p_1 = 60$  мм, согласно Таблицы 3.4 СН РК EN 1993-1-8, принимается как меньшее среди значений  $\alpha_d, f_{ub}/f_u$  и 1,0:

$$\begin{aligned} \alpha_d &= \frac{e_1}{3d_0} = \frac{30}{3 \times 18} = 0,556; \\ f_{ub}/f_u &= 500/422 = 1,18. \end{aligned}$$

Следовательно,

$$\alpha_d = 0,556.$$

Коэффициент  $k_1$  для крайнего болта принимается как:

$$\begin{aligned} k_1 &= \min\left(2,8 \times \frac{e_2}{d_0} - 1,7; 2,5\right). \\ k_1 &= \min\left(2,8 \times \frac{25}{18} - 1,7; 2,5\right) = \min(2,2; 2,5) = 2,2. \end{aligned}$$

Болт не будет являться причиной истощения несущей способности, так как

$$f_{ub}/f_u = 500/422 = 1,18 > 1,0.$$

Расчетная несущая способность для крайнего болта:

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \times \alpha_b \times f_{u,red} \times d \times t}{\gamma_{M2}} = \frac{2,2 \times 0,556 \times 422 \times 16 \times 10}{1,25 \times 10^3} = 67,7 \text{ кН.}$$

Расчетная несущая способность соединения на смятие:  $n_b F_{b,Rd} = 8 \times 67,0 = 536$  кН.

Значит, характером разрушения всех болтов в соединении будет срез.

## 13 Расчетное сопротивление соединения при наступлении предельного состояния

Наименьшее расчетное сопротивление узла определено при срезе болтов. Расчетное сопротивление узла при срезе болтов соединяемого уголка составляет:

$$N_{Rd} = n_b \times F_{v,Rd} = 251,2 \text{ кН.}$$

## ПРИМЕР 10 Расчет болтового соединения между двумя пластинами из нержавеющей стали

Исходные данные: выполнить расчет болтового соединения подверженного действию среза (см. Рисунок 1). Болтовое соединение представляет собой группу из 8 болтов M24 класса

прочности 80 (см. EN ISO 3506), которые крепят внахлест две пластины из нержавеющей стали между собой (сталь марки 1.4301).

## 2 Определение основных параметров соединения

### 2.1 Геометрические характеристики болта

Диаметр болта:

$$d = 24 \text{ мм.}$$

Диаметр отверстия под болт:

$$d_0 = 26 \text{ мм.}$$

Площадь поперечного сечения болта нетто:

$$A_s = 353 \text{ мм}^2.$$

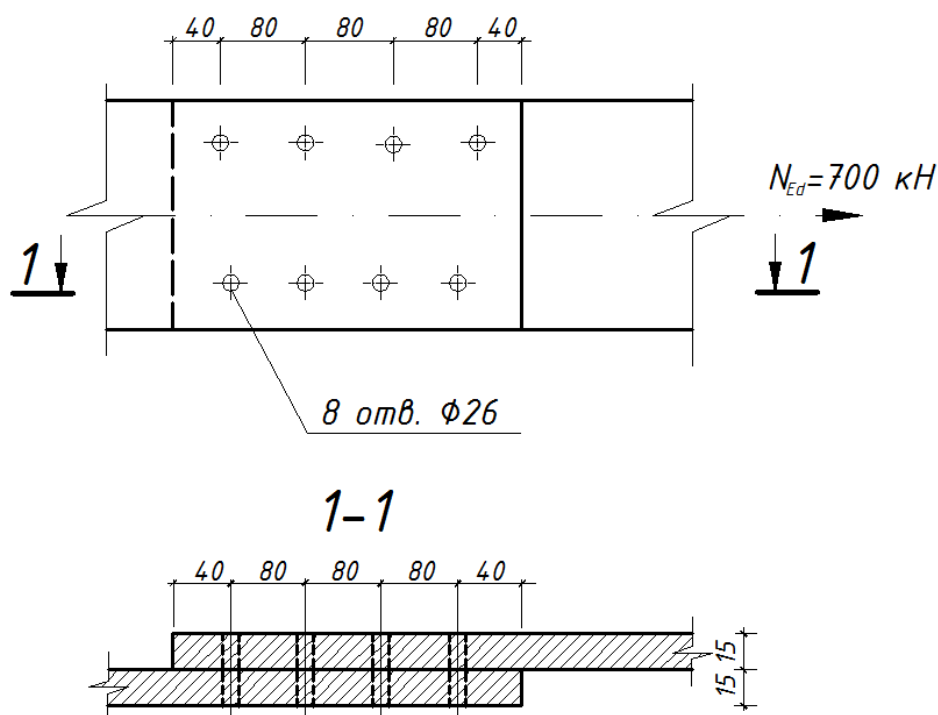


Рисунок 1 – Схема болтового соединения

### 2.2 Механические характеристики болта

Механические характеристики болтов категории материала 80 по EN ISO 3506 должны приниматься по характеристикам болтов класса прочности 8.8 (см. Пункт C2(2) СН РК EN1993-1-4).

Таким образом, номинальный предел текучести  $f_{yb} = 600 \text{ Н/мм}^2$ . Временное сопротивление на растяжение  $f_{ub} = 800 \text{ Н/мм}^2$  (см. Таблицу 2.2 СН РК EN 1993-1-4).

### 2.3 Расстояние между отверстиями

При расчете болтовых соединений необходимо выполнять проверку по минимальным/максимальным расстояниям между отверстиями под болты вдоль и поперек направления усилия, действующее на болтовое соединение (см. Рисунок 2).

В Таблице 3.3 СН РК EN 1993-1-8 приведены требования по расстояниям между отверстиями под болты. Так как в Разделе 6 СН РК EN 1993-1-4 не приведены дополнительные

условия относительно отверстий под болты для нержавеющей стали, то необходимо проверить только условия по Таблице 3.3 СН РК EN 1993-1-8.

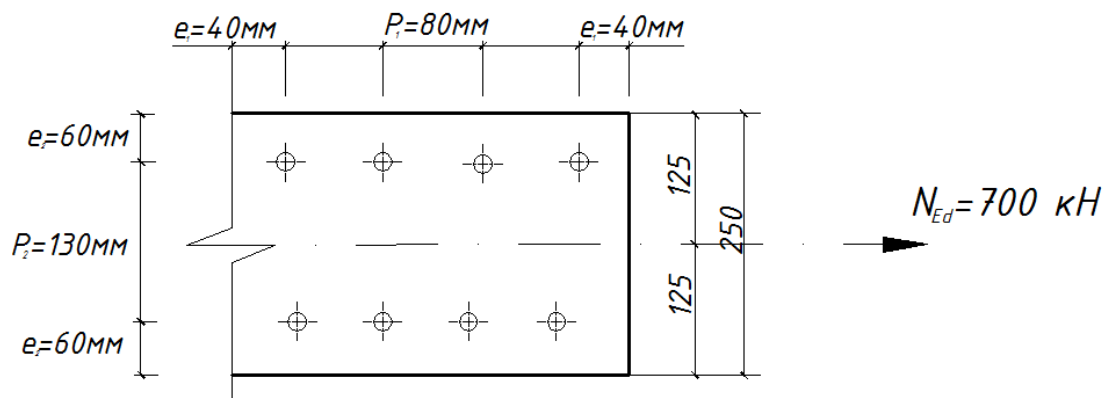


Рисунок 2

Расстояние до края вдоль усилия  $e_1 = 40\text{ мм}$ . По Таблице 3.3 СН РК EN 1993-1-8 размер величины  $e_1$  должен быть в границах от  $1,2d_0 = 1,2 \cdot 26 = 31,2\text{ мм}$  до  $8t = 8 \cdot 15 = 120\text{ мм}$  или  $125\text{ мм}$ .

То есть:

$$e_1 = 40\text{ мм} > 1,2d_0 = 1,2 \cdot 26 = 31,2\text{ мм};$$

$$e_1 = 40\text{ мм} < \max[8t = 8 \cdot 15 = 120\text{ мм}; 125\text{ мм}] = 125\text{ мм}.$$

Расстояние до края поперек усилия  $e_2 = 60\text{ мм}$ . По Таблице 3.3 размер величины  $e_2$  должен быть в границах от  $1,2d_0 = 1,2 \cdot 26 = 31,2\text{ мм}$  до  $8t = 8 \cdot 15 = 120\text{ мм}$  или  $125\text{ мм}$ .

То есть:

$$e_2 = 60\text{ мм} > 1,2d_0 = 1,2 \cdot 26 = 31,2\text{ мм};$$

$$e_2 = 60\text{ мм} < \max[8t = 8 \cdot 15 = 120\text{ мм}; 125\text{ мм}] = 125\text{ мм}.$$

Шаг  $p_1 = 80\text{ мм}$  (расстояние между болтами вдоль усилия). По Таблице 3.3 размер величины  $p_1$  должен быть в границах от  $2,2d_0 = 2,2 \cdot 26 = 57,2\text{ мм}$  до  $14t = 14 \cdot 15 = 210\text{ мм}$  или  $200\text{ мм}$ .

То есть:

$$p_1 = 80\text{ мм} > 2,2d_0 = 2,2 \cdot 26 = 57,2\text{ мм};$$

$$p_1 = 80\text{ мм} < \min[14t = 14 \cdot 15 = 210\text{ мм}; 200\text{ мм}] = 200\text{ мм}.$$

Дорожка  $p_2 = 130\text{ мм}$  (расстояние между болтами поперек усилия). По Таблице 3.3 СН РК EN 1993-1-8 размер величины  $p_2$  должен быть в границах от  $2,4d_0 = 2,4 \cdot 26 = 62,4\text{ мм}$  до  $14t = 14 \cdot 15 = 210\text{ мм}$  или  $200\text{ мм}$ .

То есть:

$$p_2 = 130\text{ мм} > 2,4d_0 = 2,4 \cdot 26 = 62,4\text{ мм};$$

$$p_2 = 130\text{ мм} < \min[14t = 14 \cdot 15 = 210\text{ мм}; 200\text{ мм}] = 200\text{ мм}.$$

### 3 Несущая способность болтового соединения

#### 3.1 Несущая способность болтового соединения на срез

Данное болтовое соединение относится к категории А (см. Пункт 3.4.1(1)а СН РК EN 1993-1-8), то есть соединение срезное. Таким образом, расчетная несущая способность болтового соединения на срез определяется по Формуле (6.2) СН РК EN 1993-1-4:

Расчетная несущая способность одного болта на срез

$$F_{V,Rd} = \frac{\alpha f_{ub} A}{\gamma_{M2}};$$

где  $\alpha_v$  – параметр, согласно Пункту 6.2(3) СН РК EN 1993-1-4 равный:

$$\alpha = 0,6;$$

$\gamma_{M2}$  - частный коэффициент безопасности, равный (см. НП.2.3 СН РК EN 1993-1-4):

$$\gamma_{M2} = 1,25;$$

$f_{ub}$  – временное сопротивление на растяжение болта, определяемое по Таблице 2.5 СН РК EN 1993-1-4:

$$f_{ub} = 800 \text{ Н/мм}^2$$

A - площадь сечения болта нетто, равная:

$$A = A_s = 353 \text{ мм}^2.$$

Таким образом, расчетная несущая способность одного болта на срез одной плоскостью будет равна:

$$F_{V,Rd} = \frac{\alpha f_{ub} A}{\gamma_{M2}} = \frac{0,6 \cdot 800 \cdot 353}{1,25} \cdot 10^{-3} = 135 \text{ кН}$$

Поперечная сила на один болт:

$$F_{V,Ed} = \frac{N_{Ed}}{n} = \frac{700}{8} = 87,5 \text{ кН}$$

Условие прочности

$$\frac{F_{V,Ed}}{F_{V,Rd}} \leq 1,0$$

Значит,

$$\frac{F_{V,Ed}}{F_{V,Rd}} = \frac{87,5}{135} = 0,65 < 1,0$$

Условие выполняется.

### 3.2 Несущая способность болтового соединения на смятие

Разрушение болтового соединения происходит не только на срез, но и на смятие.

Так как в СН РК EN 1993-1-4 не дается дополнительных требований по расчету болтового соединения на смятие, то необходимо выполнить условия СН РК EN 1993-1-8.

Расчетная несущая способность одного болта на смятие (см. Таблицу 3.4 СН РК EN 1993-1-8) с учетом требований Пункта 6.2(1) СН РК EN 1993-1-4:

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \alpha_b f_{u,red} d t}{\gamma_{M2}};$$

где  $\gamma_{M2}$  - частный коэффициент безопасности, равный (см. НП.2.3 СН РК EN 1993-1-4):

$$\gamma_{M2} = 1,25;$$

$f_u$  - номинальное значение временного сопротивления на растяжение соединяемых элементов (см. Таблицу 2.1 СН РК 1993-1-4) при толщине пластины  $t=15$  мм и с учетом требований Пункта 6.2 (1) равное:

$$\begin{aligned} f_{u,red} &= 0,5 f_y + 0,6 f_u = 0,5 \cdot 210 + 0,6 \cdot 500 \\ f_{u,red} &= 405 \text{ Н/мм}^2 < f_u = 500 \text{ Н/мм}^2 \end{aligned}$$



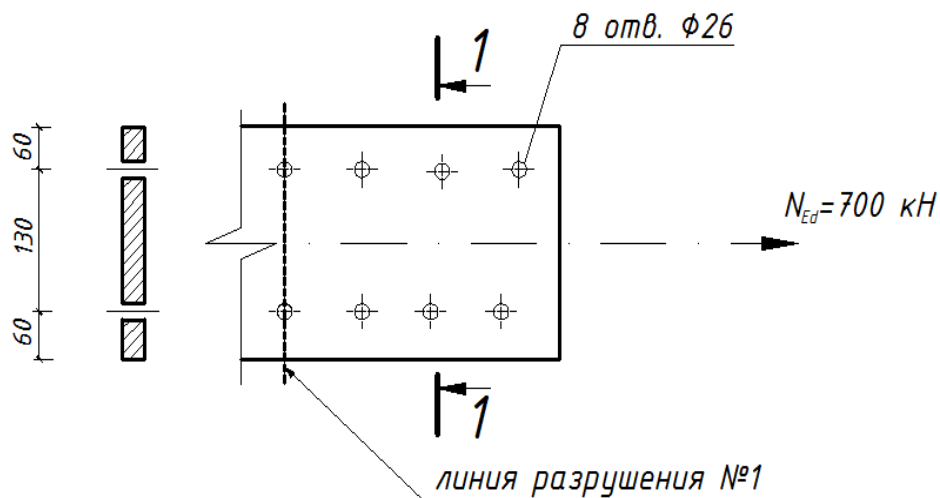


Рисунок 3 - Разрушение по ослабленному сечению

$\alpha_b$  - параметр, равный наименьшему значению из трех величин  $\alpha_d$ ,  $\frac{f_{ub}}{f_u}$  и 1,0:

$$\alpha_b = \min \left[ \alpha_d; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1,0 \right]$$

для крайних болтов, см. Таблицу 3,4 СН РК EN 1993-1-8

$$\alpha_d = \frac{e_1}{3d_0} = \frac{40}{3 \cdot 26} = 0,51$$

для средних болтов, см. Таблицу 3,4 СН РК EN 1993-1-8

$$\alpha_d = \frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4} = \frac{80}{3 \cdot 26} - \frac{1}{4}$$

$$\alpha_d = 0,78$$

$$\frac{f_{ub}}{f_u} = \frac{800}{405} = 1,97$$

значит,

$$\alpha_b = \min \left[ \alpha_d; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1,0 \right] = \min[0,51; 0,78; 1,97; 1,0] = 0,51$$

$k_1$  - параметр, равный наименьшему значению из трех величин  $2,8 \frac{e_2}{d_0} - 1,7$  (для крайних болтов),

$1,4 \frac{p_2}{d_0} - 1,7$  (для средних болтов) и 2,5:

$$k_1 = \min \left( 2,8 \frac{e_2}{d_0} - 1,7; 1,4 \frac{p_2}{d_0} - 1,7; 2,5 \right)$$

для крайних болтов

$$2,8 \frac{e_2}{d_0} - 1,7 = 2,8 \cdot \frac{60}{26} - 1,7 = 4,8$$

для средних болтов

$$1,4 \frac{p_2}{d_0} - 1,7 = 1,4 \cdot \frac{130}{26} - 1,7 = 5,3$$

значит,

$$k_1 = \min(4,8; 5,3; 2,5) = 2,5;$$

$d$  - диаметр болта, равный:

$$d = 24 \text{ мм};$$

t - толщина пластины, равная

$$t = 15 \text{ мм.}$$

Таким образом, расчетная несущая способность одного болта на смятие равна:

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \alpha f_{u,red} dt}{\gamma_{M2}} = \frac{2,5 \cdot 0,51 \cdot 405 \cdot 24 \cdot 15}{1,25} \cdot 10^{-3} = 148,7 \text{ кН.}$$

Поперечная сила на один болт:

$$F_{V,Ed} = \frac{N_{Ed}}{n} = \frac{700}{8} = 87,5 \text{ кН}$$

Условие прочности:

$$\frac{F_{V,Ed}}{F_{V,Rd}} \leq 1,0$$

Значит,

$$\frac{F_{V,Ed}}{F_{V,Rd}} = \frac{87,5}{148,7} = 0,59 < 1,0$$

Условие выполняется.

#### 4 Расчет сопротивления поперечного сечения соединительной планки

##### 4.1 Разрушение соединительной планки по ослабленному поперечному сечению

При расчете элемента для сечений с отверстиями для болтов расчетное значение несущей способности на растяжение следует принимать наименьшим из  $N_{pl,Rd}$ ,  $N_{u,Rd}$ , (см. Пункт 5.3.1(1) СН РК EN 1993-1-4), то есть  $N_{t,Rd} = \min[N_{pl,Rd}; N_{u,Rd}]$ .

Условие прочности (см. Формула (6.5) СН РК EN 1993-1-1):

$$\frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} \leq 1,0$$

Частные коэффициенты безопасности (НП.2.3 СН РК EN 1993-1-4):

$$\gamma_{M0} = 1,0$$

$$\gamma_{M2} = 1,25$$

Расчетное значение несущей способности поперечного сечения брутто в пластической стадии (Формула (5.4) СН РК EN 1993-1-4):

$$N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$$

Значит,

$$N_{pl,Rd} = \frac{250 \cdot 15 \cdot 210}{1,0} \cdot 10^{-3} = 787,5 \text{ кН}$$

Расчетное значение несущей способности поперечного сечения нетто в пластической стадии при наличии отверстий для болтов (Формула (5.5) с учетом требований Пункта 6.2 (1) СН РК EN 1993-1-4):

$$N_{u,Rd} = \frac{k_r A_{net} \cdot f_{u,red}}{\gamma_{M2}}$$

$k_r$  – параметр, определяемый по Пункту 5.3.1(3) СН РК EN 1993-1-4:

$$k_r = \left( 1 + 3 r \left( \frac{d_0}{u} - 0,3 \right) \right)$$

$$k_r = \left( 1 + 3 \frac{2}{8} \left( \frac{26}{2 \cdot 60} - 0,3 \right) \right) = 0,94$$

Значит,

$$N_{u,Rd} = \frac{0,94 \cdot (250 \cdot 15 - 2 \cdot 26 \cdot 15) \cdot 405}{1,25} = 995,9 \text{ кН}$$

$$N_{t,Rd} = \min[N_{pl,Rd}; N_{u,Rd}] = \min[787,5; 995,9] = 787,5 \text{ кН}$$

Проверка условия:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} = \frac{700}{787,5} = 0,89 < 1,0$$

Условие выполняется.

#### 4.2 Разрушение соединительной планки с вырывом средней части

Вырыв материала крайней зоны происходит вследствие сдвига ряда или группы болтов вдоль поверхности сдвига группы отверстий, сопровождаемого ее разрывом от действия растягивающих усилий по линии отверстий (см. Пункт 3.10.2(1) СН РК EN 1993-1-8).

Согласно Пункту 3.10.2(2) СН РК EN 1993-1-8, при передаче сдвигающего усилия на симметричную группу болтов без эксцентриситета расчетная несущая способность при вырыве материала крайней зоны определяется по Формуле (3.9) СН РК EN 1993-1-8:

$$V_{eff,1,Rd} = \frac{f_u A_{nt}}{\gamma_{M2}} + \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{f_y A_{nv}}{\gamma_{M2}}$$

где  $A_{nt}$  – площадь сечения нетто растянутой зоны определяется минимальным значением из 2 величин:  $(p_2 - d_0)t_w$  и  $2(e_2 - 0,5d_0)t_w$ .

То есть:

$$A_{nt} = \min[(p_2 - d_0)t_w; 2(e_2 - 0,5d_0)t_w]$$

$$A_{nt} = \min[(130 - 26) \cdot 15; 2 \cdot 15(60 - 0,5 \cdot 26)]$$

$$A_{nt} = \min[1560; 1410] = 1410 \text{ мм}^2$$

$A_{nv}$  – площадь сечения нетто сдвигаемой зоны, определяется по формуле:

$$A_{nv} = 2(3p_1 + e_1 - 2,5d_0)t_w$$

$$A_{nv} = 2 \cdot 15(3 \cdot 80 + 40 - 2,5 \cdot 26) = 6450 \text{ мм}^2$$

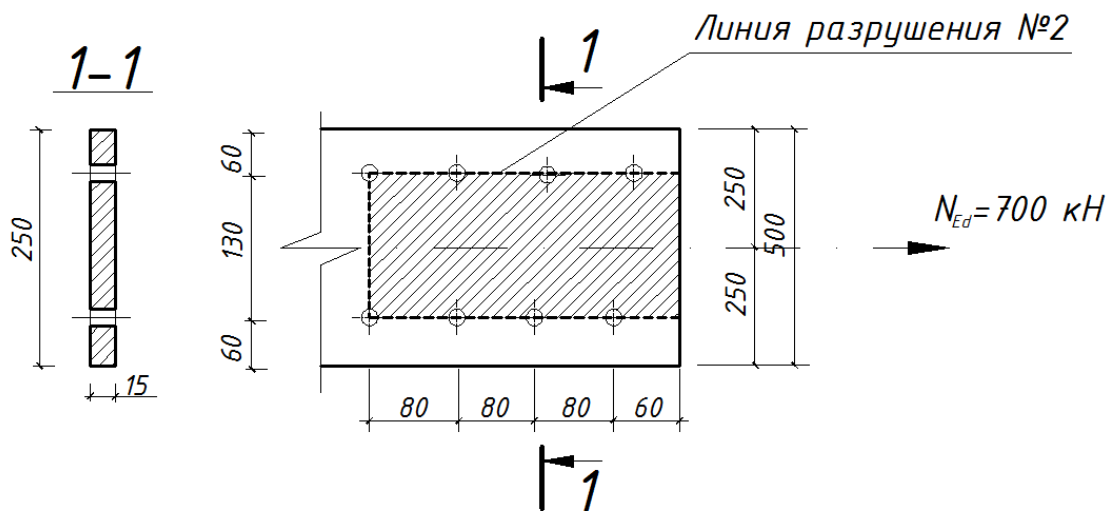


Рисунок 4 – Отрыв средней части

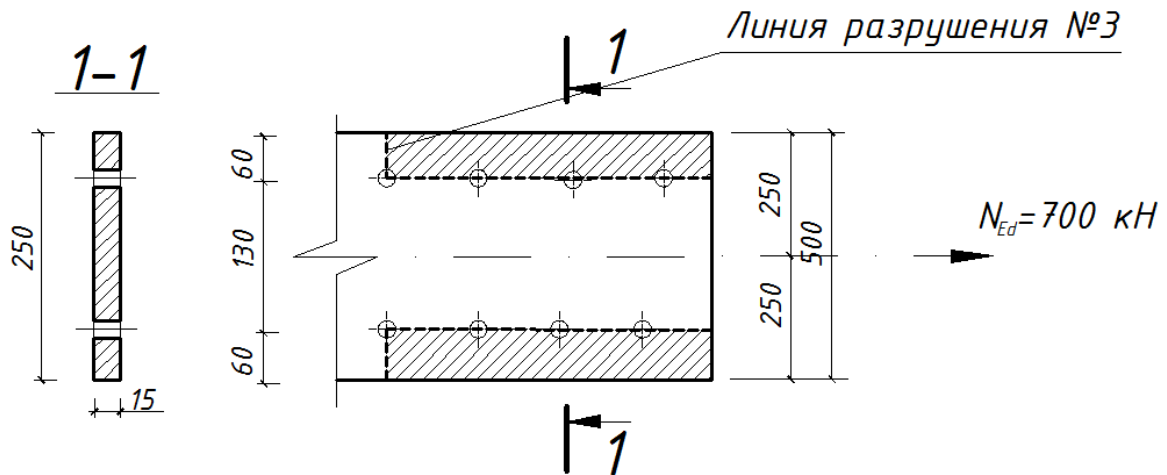


Рисунок 5 – Отрыв крайних частей

Значит,

$$V_{\text{eff},1,\text{Rd}} = \frac{f_u \times A_{\text{nt}}}{\gamma_{\text{M2}}} + \frac{1}{\sqrt{3}} \times \frac{f_y \times A_{\text{nv}}}{\gamma_{\text{M2}}} = \frac{530 \times 1410}{1,25 \times 10^3} + \frac{1}{\sqrt{3}} \times \frac{210 \times 6450}{1,0 \times 10^3} = 1379 \text{ кН}$$

Таким образом,

$$V_{\text{eff},1,\text{Rd}} = 1379 \text{ кН} > N_{\text{Ed}} = 700 \text{ кН}.$$

Условие выполняется.

## 5.4 Несущая способность элементов по устойчивости

### 5.4.1 Общие положения

5.4.1.1 (5.4.1(1)) Условия для всех форм потери устойчивости по принадлежности, должны применяться к нержавеющей стали за исключением того, как добавлено или изменено в Пунктах 5.4.2 или 5.4.3 настоящего пособия.

5.4.1.2 В общем случае, сжатый элемент следует проверять на устойчивость по Формуле (6.46) СН РК EN 1993-1-1:

$$\frac{N_{\text{Ed}}}{N_{\text{b,Rd}}} \leq 1,0;$$

где  $N_{\text{Ed}}$  – расчетное значение сжимающей силы;

$N_{\text{b,Rd}}$  – расчетное значение несущей способности сжатого элемента по устойчивости.

5.4.1.3 Для элементов несимметричных сечений класса 4 следует учитывать дополнительный момент  $\Delta M_{\text{Ed}}$ , вызванный эксцентриситетом центральной оси эффективного сечения, см. также Пункт 6.2.2.5.4 СН РК EN 1993-1-1, а совместное действие осевой силы и момента следует принимать по Пунктам 6.3.4 или 6.3.3. СН РК EN 1993-1-1.

5.4.1.4 Расчетное значение несущей способности сжатого элемента по устойчивости следует принимать по Формулам (6.47) и (6.48) СН РК EN 1993-1-1:

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi \times A \times f_y}{\gamma_{M1}} - \text{для поперечных сечений классов 1, 2 и 3;}$$

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi \times A_{eff} \times f_y}{\gamma_{M1}} - \text{для поперечных сечений класса 4,}$$

где  $\chi$  – понижающий коэффициент для соответствующей кривой потери устойчивости.

**ПРИМЕЧАНИЕ** Для определения несущей способности элемента по устойчивости с переменным поперечным сечением по длине или при неравномерном сжатии можно выполнять расчет по теории второго порядка в соответствии с Пунктом 5.3.4.2 СН РК EN 1993-1-1. При потере устойчивости из плоскости действия момента  $\Delta M_{Ed}$  см. также Пункт 6.3.4 СН РК EN 1993-1-1.

5.4.1.5 При определении  $A$  и  $A_{eff}$  отверстия на концах колонн учитывать не следует.

5.4.1.6 (5.4(2)) Действия должны подставляться в формулы в СН РК EN 1993-1-1 как абсолютные значения.

**ПРИМЕЧАНИЕ** Коэффициент  $\chi_{min}$  – это наименьшее из значений  $\chi_y$ ,  $\chi_z$ ,  $\chi_T$  и  $\chi_{TF}$ , где  $\chi_y$ ,  $\chi_z$ , рассчитываются на основании изгибного выпучивания, а  $\chi_T$  рассчитывается на основании крутильной, а  $\chi_{TF}$  рассчитывается на основании крутильно-изгибной потери устойчивости.

## 5.4.2 Элементы постоянного сечения при действии центрально-сжимающей силы

### 5.4.2.1 Кривые потери устойчивости

5.4.2.1.1 (5.4.2.1(1)) Для центрального сжатия в элементах, значение  $\chi$  для соответствующей гибкости  $\bar{\lambda}$  должно определяться из соответствующей кривой продольного изгиба в соответствии с:

$$\chi_y = \frac{1}{\phi + \sqrt{\phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \leq 1,0; \quad (5.6)$$

$$\phi = 0,5 \times \alpha \times (\bar{\lambda} - \bar{\lambda}_0) + \bar{\lambda}^2; \quad (5.7)$$

где 
$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \times f_y}{N_{cr}}} - \text{для классов 1, 2 и 3 поперечного сечения;} \quad (5.8)$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff} \times f_y}{N_{cr}}} - \text{для класса 4 поперечного сечения;} \quad (5.9)$$

$\alpha$  – коэффициент несовершенства;

$N_{cr}$  – упругая критическая сила для соответствующего типа потери устойчивости на основании характеристик поперечного сечения брутто;

$\bar{\lambda}_0$  – предельная гибкость.

5.4.2.1.2 (5.4.2.1(2)) Значения  $\alpha$  и  $\bar{\lambda}_0$ , соответствующие соответствующей кривой потери устойчивости должны быть получены из Таблицы 5.3. Кривые потери

устойчивости в Таблице 5.3 не применимы к пустотелым профилям, которые отпускаются после производства.

**Таблица 5.3 – Значения  $\alpha$  и  $\bar{\lambda}_0$  для плоской, крутильной и изгибно-крутильной формы потери устойчивости**

Форма потери устойчивости	Тип элемента	$\alpha$	$\bar{\lambda}_0$
Плоская форма	Деформированные вхолдную открытого сечения	0,49	0,40
	Пустотелого сечения (сварные и бесшовные)	0,49	0,40
	Сварные открытого сечения (основные оси)	0,49	0,20
	Сварные открытого сечения (малые оси)	0,76	0,20
Крутильная и изгибно-крутильная	Все элементы	0,34	0,20

5.4.2.1.3 (5.4.2.1(3)) Для гибкости  $\bar{\lambda} \leq \bar{\lambda}_0$  или для  $N_{Ed}/N_{cr} \leq \bar{\lambda}_0^2$  влияние изгиба может быть проигнорировано, и применяются только проверки поперечного сечения.

5.4.2.1.4 Условная гибкость  $\bar{\lambda}$  равна по Формулам (6.50) и (6.51) СН РК EN 1993-1-1:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \times f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i} \times \frac{1}{\lambda_1} \quad - \text{ для поперечных сечений классов 1, 2 и 3;}$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff} \times f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i} \times \frac{\sqrt{\frac{A_{eff}}{A}}}{\lambda_1} \quad - \text{ для класса 4 поперечного сечения;}$$

где  $L_{cr}$  – расчетная длина;

$i$  – радиус инерции поперечного сечения брутто относительно соответствующей оси;

$$\lambda_1 = \pi \times \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 93,3\varepsilon,$$

$$\text{здесь } \varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}}, (f_y \text{ в Н/мм}^2).$$

**ПРИМЕЧАНИЕ** При потере устойчивости элементов строительных конструкций зданий в упругой стадии см. Приложение ВВ СН РК EN 1993-1-1.

5.4.2.1.5 Для элементов с сечением открытого типа следует учитывать возможность того, что несущая способность элемента по крутильной или изгибно-крутильной форме потери устойчивости может оказаться меньше несущей способности плоской формы потери устойчивости.

5.4.2.1.6 Условную гибкость  $\bar{\lambda}_T$  при крутильной или изгибно-крутильной форме

потери устойчивости следует принимать равной по Формулам (6.52) и (6.53) СН РК EN 1993-1-1:

$$\bar{\lambda}_T = \sqrt{\frac{A \times f_y}{N_{cr}}} - \text{ для классов 1, 2 и 3 поперечного сечения;}$$

$$\bar{\lambda}_T = \sqrt{\frac{A_{eff} \times f_y}{N_{cr}}} - \text{ для класса 4 поперечного сечения;}$$

где  $N_{cr} = N_{cr,TF}$  – при  $N_{cr} < N_{cr,T}$ ;

здесь  $N_{cr,TF}$  – критическая сила потери устойчивости в упругой стадии по изгибно-крутильной форме;

$N_{cr,T}$  – критическая сила потери устойчивости в упругой стадии по крутильной форме.

### ПРИМЕР 11 Расчет центрально-сжатой стойки трубчатого сечения

Исходные данные: промежуточная колонна многоэтажного здания выполнена в виде круглой полый трубы 177,8×5 из стали марки 1.4401. Условия опирания концов – шарниры, высота  $l = 3,5$  м (см. Рисунок 2).

Постоянные и временные нагрузки создают расчетное вертикальное сжимающее усилие, эквивалентное  $N_{ed} = 300$  кН.

Геометрические характеристики сечения:  $d = 177,8$  мм;  $t = 5$  мм;  $A = 27,1$  см<sup>2</sup>;  $I = 1014$  см<sup>4</sup>;  $W_{el} = 114,1$  см<sup>3</sup>.

Характеристики материала колонны:  $f_y = 220$  Н/мм<sup>2</sup>;  $E = 200000$  Н/мм<sup>2</sup>;  $G = 76900$  Н/мм<sup>2</sup> (см. Таблицу 2.3).

2 Классификация сечения, элемента работающего на сжатие

Классификацию сечения проводим согласно Таблице 5.2 настоящего пособия.

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{220} \cdot \frac{200000}{210000}} = 1.017.$$

$$\text{Для сжатой стойки: } \frac{d}{t} = \frac{177.8}{5} = 35,6.$$

Для элементов класса 1,  $\frac{d}{t} \leq 50\varepsilon^2$ , потому рассматриваемая колонна относится к Классу 1.

3 Сопротивление равномерному сжатию поперечного сечения

Расчетное значение несущей способности поперечного сечения при равномерном сжатии для сечений Класа 1 определяется по Формуле (6.10) СН РК EN 1993-1-1:

$$N_{c,Rd} = A_g f_y / \gamma_{M0} = \frac{27.1 \times 220 \times 10^{-1}}{1.1} = 542 \text{ кН.}$$

4 Сопротивление изгибной потере устойчивости

Значение сжимающего усилия, при котором произойдет потеря устойчивости колонны, определяется по Формуле (6.47) СН РК EN 1993-1-1:

$$N_{b,Rd} = \chi A f_y / \gamma_{M1}.$$

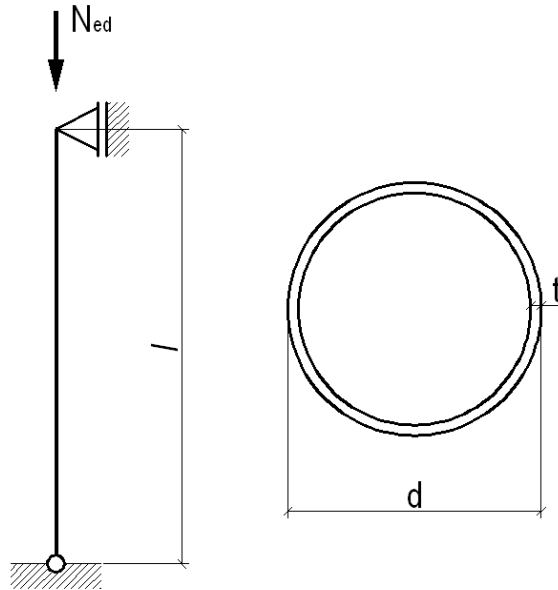


Рисунок 2 – Расчетная схема колонны

Для центрального сжатия значение  $\chi$  для соответствующей безразмерной гибкости  $\bar{\lambda}$  определяется из соответствующей кривой продольного изгиба согласно Формуле (5.6):

$$\chi = \frac{1}{\varphi + \sqrt{\varphi^2 - \bar{\lambda}^2}} \leq 1,$$

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

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{Af_y}{N_{cr}}}.$$

Критическая нагрузка потери устойчивости при упругой работе:

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_{cr}^2} = \frac{\pi^2 \times 200000 \times 1014 \times 10^4}{(3,50 \times 10^3)^2} \times 10^{-3} = 1633.9 \text{ кН.}$$

Гибкость при плоской форме потери устойчивости:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{27.1 \times 10^2 \times 220}{1633,9 \times 10^3}} = 0,6.$$

Используется коэффициенты  $\alpha=0,49$  и  $\bar{\lambda}_0 = 0,4$ , (см. Таблицу 5.3 для пустотелых сечений):

$$\varphi = 0,5 \left( 1 + 0,49(0,6 - 0,4) + 0,6^2 \right) = 0,729;$$

$$\chi = \frac{1}{0,729 + \sqrt{0,729^2 - 0,6^2}} = 0,875 < 1;$$

$$N_{b,Rd} = 0,875 \times 27,1 \times 220 \times 10^{-1} / 1,1 = 474.25 \text{ кН.}$$

К колонне приложено усилие  $N_{ed} = 300 \text{ кН} < N_{b,Rd} = 474,25 \text{ кН}$ . Соответственно, элемент имеет достаточную прочность и устойчивость.



### 5.4.3 Элементы постоянного сечения при действии изгибающего момента

5.4.3.1 Элемент, изгибаемый относительно главной оси и не раскрепленный из плоскости действия изгибающего момента, следует проверять на устойчивость плоской формы потери устойчивости по Формуле (6.54) СН РК EN 1993-1-1:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1,0,$$

где  $M_{Ed}$  – расчетное значение изгибающего момента;

$M_{b,Rd}$  – расчетное значение несущей способности изгибаемого элемента по устойчивости плоской формы изгиба.

5.4.3.2 Балки с достаточным раскреплением сжатой полки не теряют устойчивости плоской формы потери устойчивости. Кроме того, балки определенного типа поперечного сечения, такого как квадратные или круглые замкнутые сечения из листового проката постоянной толщины, сварные круглые трубы или прямоугольные коробчатые сечения, также не подвержены потере устойчивости плоской формы.

5.4.3.3 Расчетное значение несущей способности по устойчивости плоской формы для балок, не раскрепленных из плоскости действия изгибающего момента, следует принимать равным по Формуле (6.55) СН РК EN 1993-1-1:

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} W_y \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M1}},$$

где  $W_y$  – соответствующий момент сопротивления сечения, принимаемый следующим образом:

а)  $W_y = W_{pl,y}$  – для поперечных сечений классов 1 и 2;

б)  $W_y = W_{el,y}$  – для поперечных сечений класса 3;

в)  $W_y = W_{eff,y}$  – для поперечных сечений класса 4;

$\chi_{LT}$  – понижающий коэффициент при потере устойчивости плоской формы изгиба.

**ПРИМЕЧАНИЕ 1** Для определения несущей способности элемента по устойчивости балок переменного сечения можно выполнять расчет по теории второго порядка в соответствии с Пунктом 5.4.3.5 СН РК EN 1993-1-1. При потере устойчивости из плоскости см. также Пункт 6.3.4. СН РК EN 1993-1-1.

**ПРИМЕЧАНИЕ 2** Проверку устойчивости элементов строительных конструкций зданий см. также Приложение В СН РК EN 1993-1-1.

5.4.3.4 При определении  $W_y$  отверстия на конце балки учитывать не следует.

5.4.3.5 В расчете по теории второго порядка, учитывающего потерю устойчивости плоской формы изгиба элемента, отклонения можно принимать равными  $ke_{0,d}$ , где  $e_{0,d}$  — эквивалентное начальное изгибное отклонение в плоскости наименьшей жесткости рассматриваемого профиля. В общем случае дополнительное закручивающее отклонение учитывать не следует.

**ПРИМЕЧАНИЕ** Значение  $k$  принимается в соответствии с Национальным Приложением. Рекомендуемое значение  $k = 0,5$ .

### 5.4.3.6 Кривые для продольно-крутильной формы потери устойчивости

5.4.3.6.1 (5.4.3.1(1)) Для изгибных элементов постоянного поперечного сечения значение  $\chi_{LT}$  для соответствующей гибкости  $\bar{\lambda}_{LT}$  должно определяться из:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}} \leq 1 \quad (5.10)$$

в котором

$$\phi_{LT} = 0,5 \left( 1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - 0,4) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right) \quad (5.11)$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y f_y}{M_{cr}}} \quad (5.12)$$

$\alpha_{LT}$  – коэффициент несовершенства, равный:

$\alpha_{LT} = 0,34$  для деформированных в холодную профилей и пустотелого сечения (сварных и бесшовных);

$\alpha_{LT} = 0,76$  для сварных открытого сечения и других профилей, по которым нет данных по испытаниям;

$M_{cr}$  – критический момент упругости для продольно-крутильной формы потери устойчивости.

5.4.3.6.2 (5.4.3.1(2)) Для гибкости  $\bar{\lambda}_{LT} \leq 0,4$  или для  $\frac{M_{Ed}}{M_{cr}} \leq 0,16$  продольно-крутильная форма потери устойчивости может быть проигнорирована, и применяются только проверки поперечного сечения.

#### ПРИМЕР 12 Расчет балки

Исходные данные: необходимо произвести расчет балки опирания лестничного марша. Балка изготовлена из холодногнутого одинарного С-образного профиля размерами 200×75 мм, толщиной 5 мм. Лестничный марш опирается на балку между точками А и С, обеспечивая раскрепление верхней полки данной части балки. Между точками В и С верхняя полка не раскреплена. Пролет элемента составляет 4,2 метра.

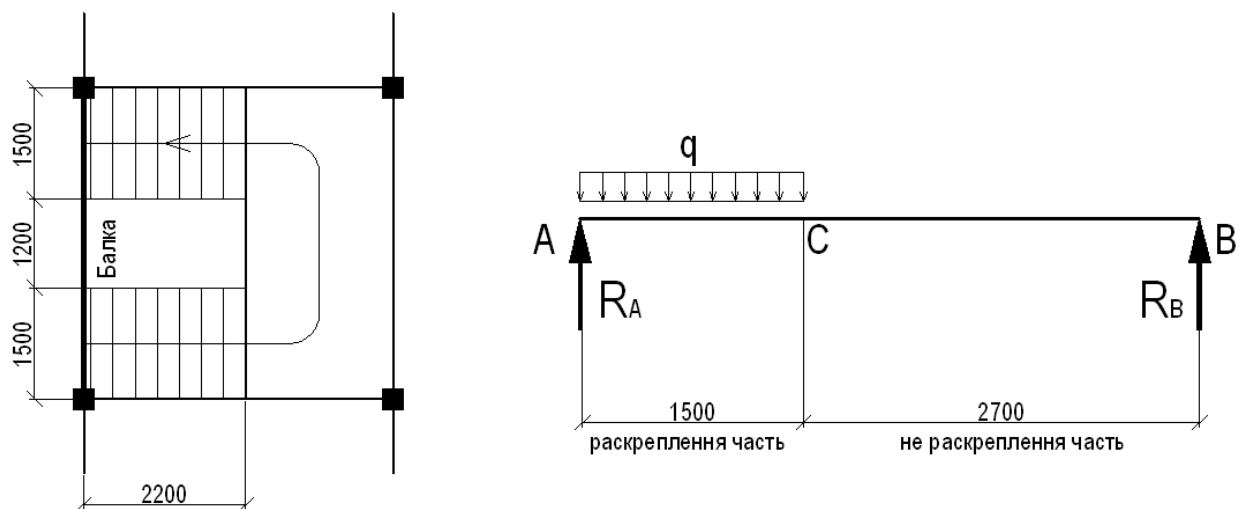


Рисунок 1 – Схема расположения балки и ее расчетная схема

## 2 Сбор нагрузок

Балка воспринимает нагрузки от одного лестничного марша:

Постоянные нагрузки (G): собственный вес лестничного марша –  $1,0 \text{ кН/м}^2 = (1,0 \times 2,2) = 2,2 \text{ кН/м}$ ;

собственный вес балки –  $0,13 \text{ кН/м}$ ;

Временные нагрузки (Q): нагрузка на лестничный марш –  $4 \text{ кН/м}^2 = (4,0 \times 2,2) = 8,8 \text{ кН/м}$ .

Расчетная комбинация нагрузок (расчет по предельным состояниям), согласно Формуле (6.10) EN 1990:

$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i \geq 2} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

Так как в данном примере присутствует только одна переменная нагрузка ( $Q_{k,i}$ ), то последняя слагаемая уравнения не учитывается. По Таблице A.1.2 EN 1990  $\gamma_{G,j} = 1,35$ ,  $\gamma_{Q,1} = 1,5$ .

Постоянные нагрузки:

- собственный вес лестничного марша:  $1,35 \times 2,2 = 2,97 \text{ кН/м}$ ;

- собственный вес балки:  $1,35 \times 0,13 = 0,17 \text{ кН/м}$ ;

Временные нагрузки:

- нагрузка на лестничный марш:  $1,5 \times 8,8 = 13,2 \text{ кН/м}$ .

Геометрические характеристики сечения:  $I_y = 9,456 \times 10^6 \text{ мм}^4$ ;  $I_z = 0,850 \times 10^6 \text{ мм}^4$ ;  $I_w = 5085 \times 10^6 \text{ мм}^4$ ;  $I_t = 1,372 \times 10^4 \text{ мм}^4$ ;  $W_{el,y} = 94,56 \times 10^3 \text{ мм}^3$ ;  $W_{pl,y} = 112,9 \times 10^3 \text{ мм}^3$ ;  $A_g = 1650 \text{ мм}^2$ .

Характеристики материала элемента: сталь марки 1.4401,  $f_y = 220 \text{ Н/мм}^2$ ;  $E = 200000 \text{ Н/мм}^2$ ;  $G = 76900 \text{ Н/мм}^2$  (по Таблице 2.3).

Частные коэффициенты безопасности приняты равными  $\gamma_{M0} = \gamma_{M1} = 1,1$ .

## 3 Анализ конструктивной схемы

Опорные реакции:

$$\begin{aligned} R_A + R_B &= (2,97 + 13,2) \times 1,5 + 0,17 \times 4,2 = 24,97 \text{ кН}; \\ R_B &= \frac{1,5 \times 16,17 \times 0,75 + 0,17 \times 4,2 \times (4,2/2)}{4,2} = 4,69 \text{ кН}; \\ \Rightarrow R_A &= 24,97 - 4,69 = 20,28 \text{ кН}. \end{aligned}$$

Максимальный изгибающий момент возникает на расстоянии  $1,5 \left( 1 - \frac{1,5}{2 \times 4,2} \right) = 1,23 \text{ м}$  от точки А.

$$M_{\max} = 20,28 \times 1,23 - 16,17 \times \frac{1,23^2}{2} - 0,17 \times \frac{1,23^2}{2} = 12,58 \text{ кНм}.$$

Максимальные поперечный усилия возникают в точке А.

$$F_{sd} = 20,28 \text{ кН}.$$

## 4 Классификация сечения

Классификацию сечения проводим согласно Таблицы 5.2.

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{220} \cdot \frac{200000}{210000}} = 1,017.$$

Принимаем с запасом  $c = h - 2t = 200 - 10 = 190$  для стенки.

Для изгибаемой стенки:  $\frac{c}{t} = \frac{190}{5} = 38$ .

Согласно Таблице 5.2 для элементов Класа 1  $\frac{c}{t} \leq 56\varepsilon$ , поэтому рассматриваемая стенка сечения балки относится к Класу 1.

Для сжатой полки:  $\frac{c}{t} = \frac{75}{5} = 15$ .

Для элементов Класа 3,  $\frac{c}{t} \leq 11,9\epsilon = 12,1$ , потому полка относится к Класу 4.

Следовательно, все сечение относится к Класу 4.

### 5 Эффективные характеристики сечения

Определение понижающего коэффициента  $\rho$  для холодноформованных внешних элементов по Формуле 5.2:

$$\rho = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,231}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1,$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4\epsilon\sqrt{k_\sigma}}, \text{ где } \bar{b} = c = 75 \text{ мм (согласно Пункту 5.2.3.1.2)}$$

Принимая распределение напряжений в сжатой полке равномерным:

$$\psi = \frac{\sigma_1}{\sigma_2} = 1 \Rightarrow k_\sigma = 0,43 \text{ (согласно Таблице 4.2 СН РК EN1993-1-5);}$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{75/5}{28,4 \times 1,017 \times \sqrt{0,43}} = 0,792;$$

$$\rho = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,231}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{1}{0,792} - \frac{0,231}{0,792^2} = 0,894;$$

$$c_{\text{eff}} = 0,894 \times 75 = 67,05 \text{ мм}$$

$$A_{\text{eff}} = A_g - (1-\rho)ct = 1650 - (1-0,894) \times 75 \times 5 = 1610 \text{ мм}^2$$

Определение смещения положения нейтральной оси сечения (в сторону растянутой полки):

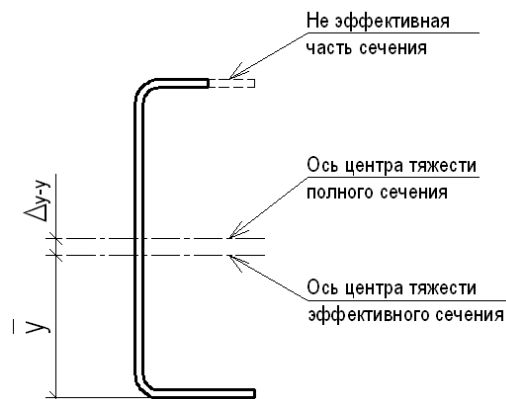


Рисунок 2 – Схема эффективного поперечного сечения балки

$$\bar{y} = \frac{A_g \times \frac{h}{2} - (1-\rho)ct \times (h - \frac{t}{2})}{A_{\text{eff}}} = \frac{1650 \times \frac{200}{2} - (1-0,894) \times 75 \times 5 \times (200 - \frac{5}{2})}{1610} = 97,6 \text{ мм};$$

$$\Delta_{y-y} = \frac{h}{2} - \bar{y} = \frac{200}{2} - 97,6 = 2,4 \text{ мм}.$$

Определение эффективных момента инерции и момента сопротивления сечения:

$$I_{\text{eff},y} = I_y - \frac{(1-\rho)ct^3}{12} - (1-\rho)ct\left(\frac{h}{2} - \frac{t}{2}\right)^2 - A_{\text{eff}}\Delta_{y-y}^2 =$$

$$= 9,456 \times 10^6 - \frac{(1-0,894) \times 75 \times 5^3}{12} - (1-0,894) \times 75 \times 5 \times (100-2,5)^2 - 1610 \times 2,4^2 = 9,07 \times 10^6 \text{ мм}^4;$$

$$W_{\text{eff},y} = \frac{I_{\text{eff},y}}{\frac{h}{2} + \Delta_{y-y}} = \frac{9,07 \times 10^6}{\frac{200}{2} + 2,4} = 88,57 \times 10^3 \text{ мм}^3;$$

Сдвиговое запаздывание: данный эффект может игнорироваться для краевых элементов при:

$$b_0 \leq L_e / 50 \text{ (см. Пункт 3.1(1) СН РК EN 1993-1-5),}$$

где  $L_e = 4200$  мм – расстояние между нулевыми точками эпюры моментов.

$$b_0 = 75 \leq L_e / 50 = 4200 / 50 = 84 \text{ мм} < 4200 \text{ мм}$$

Следовательно, эффект сдвигового запаздывания может не учитываться.

Искривление полки, согласно Формуле (5.3a) СН РК EN 1993-1-3:

$$u = \frac{2\sigma_a^2 b_s^4}{E t^2 z},$$

где  $\sigma_a = 220$  Н/мм<sup>2</sup> (максимально возможное значение) – средние напряжения по длине полки;

$b_s = 75 - 5 = 70$  мм (согласно Рисунку 5.3 СН РК EN 1993-1-3);

$z$  – расстояние от рассматриваемой полки до нейтральной оси,

$$z = 100 - 2,5 = 97,5 \text{ мм};$$

$$u = \frac{2 \times 220^2 \times 70^4}{200000^2 \times 5^2 \times 97,5} = 0,024 \text{ мм}.$$

Искривление полки может игнорироваться при  $u < 0,05 \times 200 = 10$  мм (согласно Пункту 5.4.1 СН РК EN 1993-1-3), следовательно, данный эффект может не приниматься во внимание.

#### 6 Несущая способность при изгибе

Для элемента Класа 4 расчетное значение несущей способности на изгиб относительно одной из главных осей поперечного сечения определяется по Формуле (6.15) СН РК EN 1993-1-1:

$$M_{c,Rd} = W_{\text{eff},min} f_y / \gamma_{M0},$$

$$M_{c,Rd} = \frac{88,57 \times 10^3 \times 220}{1,1 \times 10^6} = 17,7 \text{ кНм}.$$

Расчетный максимальный изгибающий момент составляет 12,58 кНм, следовательно, сечение удовлетворяет условию прочности при изгибе.

#### 7 Несущая способность при действии поперечного усилия

Расчетное значение несущей способности на сдвиг в пластической стадии равно

$$V_{pl,Rd} = A_v (f_y / \sqrt{3}) / \gamma_{M0}, \text{ (согласно Формуле (6.18) СН РК EN 1993-1-1),}$$

где  $A_v$  – площадь сдвига.

$$A_v = h \times t = 200 \times 5 = 1000 \text{ мм}^2,$$

$$V_{pl,Rd} = \frac{1000 \times 220}{\sqrt{3} \times 1,1 \times 1000} = 115,5 \text{ кН}.$$

Расчетное максимальное поперечное усилие составляет 20,28 кН, следовательно, сечение удовлетворяет условию прочности при действии поперечного усилия.

Проверка на сопротивление потере устойчивости при сдвиге.

Принимаем  $h_w = h - 2t = 200 - 10 = 190$  мм.

Устойчивость стенки при сдвиге для не подкрепленных листов может не проверяться согласно Пункта 5.6.5 настоящего пособия при:

$$\frac{h_w}{t} \geq \frac{52\varepsilon}{\eta} = \frac{52 \cdot \varepsilon}{1.2} = 43,3\varepsilon,$$

где  $\eta=1,20$ , согласно НП.2.5 Национального Приложения СН РК EN 1993-1-4.

Так как  $\frac{h_w}{t} = \frac{190}{5} = 38 < 43,2\varepsilon$ , то стенка не нуждается в проверке на сопротивление потере устойчивости при действии поперечного усилия.

#### 8 Сопротивление потере устойчивости плоской формы изгиба

Сжатая полка балки – не раскреплена, между точками В и С. Необходимо проверить данный участок на возможность потери им устойчивости из плоскости действия изгибающего момента по Формуле (6.55) СН РК EN 1993-1-1:

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} W_{eff,y} f_y / \gamma_{M1} - \text{для сечений класса 4,}$$

$$W_{eff} = 88,57 \times 10^3 \text{ мм}^3;$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\varphi_{LT} + [\varphi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2]^{0,5}} \leq 1, \text{ согласно Формуле (5.10) СН РК EN 1993-1-1;}$$

$$\varphi_{LT} = 0,5 \left( 1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - 0,4) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right), \text{ согласно Формуле (5.11) СН РК EN 1993-1-1;}$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y f_y}{M_{cr}}}, \text{ согласно Формуле (5.12) СН РК EN 1993-1-1}$$

Определение граничного момента потери устойчивости плоской формы изгиба при упругой работе, по следующему выражению:

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 E I_z}{(k_z L)^2} \left( \left[ \left( \frac{k_z}{k_w} \right)^2 \frac{I_w}{I_z} + \frac{(k_z L)^2 G I_t}{\pi^2 E I_z} + (C_2 z_g - C_3 z_j)^2 \right]^{1/2} - (C_2 z_g - C_3 z_j) \right).$$

Балка шарнирно оперта в точке С и жестко защемлена в точке В. Принимая к расчету наиболее невыгодный вариант,  $k_z = k_w = 1,0$ .

$C_1, C_2$  и  $C_3$  зависят от условий закрепления и распределения изгибающих нагрузок.

Для данного типа эпюры моментов,  $\psi = 0, \Rightarrow C_1 = 1,77; C_2 = 0; C_3 = 1,00$ .

$z_j = 0$  для сечения с одинаковыми полками.

$$M_{cr} = 1,77 \times \frac{\pi^2 \times 200000 \times 0,850 \times 10^6}{(1,00 \times 2700)^2} \times \left( \left[ \left( \frac{1,00}{1,00} \right)^2 \frac{5085 \times 10^6}{0,850 \times 10^6} + \frac{(1,00 \times 2700)^2 \times 76900 \times 1,327 \times 10^4}{\pi^2 \times 200000 \times 0,850 \times 10^6} \right]^{1/2} \right);$$

$$M_{cr} = 41,9 \text{ кН}$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{88,57 \times 10^3 \times 220}{41,9 \times 10^6}} = 0,68.$$

Принимается коэффициент  $\alpha_{LT} = 0,34$ , как для холодноформованных элементов (см. Пункт 5.4.3.6.1 настоящего пособия),

$$\varphi_{LT} = 0,5 \left( 1 + 0,34(0,68 - 0,4) + 0,68^2 \right) = 0,779,$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{0,779 + [0,779^2 - 0,68^2]^{0,5}} = 0,863,$$

$$M_{b,Rd} = 0,863 \times 88,57 \times 10^3 \times 220 \times 10^{-6} / 1,1 = 15,3 \text{ кНм.}$$

Из эпюры моментов, максимальный изгибающий момент в нераскрепленной части балки составляет 12,0 кНм, следовательно, элемент обладает достаточной устойчивостью по плоской форме изгиба.

#### 9 Прогибы

Расчетная комбинация нагрузок (расчет по предельным состояниям второй группы):

$$\sum_{j \geq 1} G_{k,j} + Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \psi_{0,i} Q_{k,i}, \text{ по Формуле (6.14b) СН РК EN 1990.}$$

Так как в данном примере присутствует только одна переменная нагрузка ( $Q_{k,i}$ ), то последняя слагаемая уравнения не учитывается.

Для определения прогибов используется секущий (средний) модуль упругости, поэтому необходимо вычислить максимальные напряжения при действии характеристичных постоянных и временных (нагрузок без учета коэффициентов надежности). Средний модуль упругости, согласно Формуле (4.1):

$$E_s = \left( \frac{E_{s1} + E_{s2}}{2} \right),$$

$$E_{s,i} = \frac{E}{1 + 0,002 \frac{E}{\sigma_{i,Ed,ser}} \left( \frac{\sigma_{i,Ed,ser}}{f_y} \right)^n}, i=1, 2;$$

При анализе конструктивной схемы были определены следующие значения:

- максимальный изгибающий момент при действии постоянных нагрузок = 1,90 кНм;
- максимальный изгибающий момент при действии временных нагрузок = 6,68 кНм;
- общий изгибающий момент при характеристичных значениях нагрузок = 1,90 кНм.

Так как сечение относится к Классу 4, для определения максимальных напряжений в элементе используется значение эффективного момента сопротивления  $W_{eff}$ . Принимаем (с запасом), что напряжения в сжатой и растянутой полках приблизительно равны, т.е.  $E_{s1} = E_{s2}$ .

Для вычисления значения среднего модуля упругости используется коэффициент  $n = 7,0$  (для нержавеющей стали марки 1.4401, в продольном направлении, по Таблице. 4.1).

Расчетное напряжение при расчете по граничному состоянию II группы:

$$\sigma_{i,Ed,ser} = \frac{M_{max}}{W_{eff,y}} = \frac{8,58 \times 10^6}{88,57 \times 10^3} = 96,9 \text{ Н/мм}^2$$

$$E_{s,i} = \frac{200000}{1 + 0,002 \times \frac{200000}{96,9} \times \left( \frac{96,9}{220} \right)^7} = 197392 \text{ Н/мм}^2$$

Максимальные перемещения от действия полной нагрузки возникают на расстоянии примерно 1,9 метра от опоры А. Прогиб на расстоянии  $x$  от опоры А от действия полной нагрузки, превышающем длину  $a$  от опоры А, определяется следующей Формулой:

$$\text{при } x \geq a, \quad \delta = \frac{q_{пост} a L^4}{24 a E_s I} n^2 [2m^3 - 6m^2 + m(4+n^2) - n^2],$$

где  $m = x / L$ ,  $n = a / L$ . при  $x = 1,9 \text{ м}$ ,  $a = 1,5 \text{ м}$ :  $m = 1,9 / 4,2 = 0,452$ ,  $n = 1,5 / 4,2 = 0,357$ .

Полная нагрузка (постоянная + переменная характеристичная нагрузка)  $q_{полн} = 11,0 \text{ кН/м}$ .  
Постоянная нагрузка  $q_{пост} = 0,128 \text{ кНм}$ .

Прогиб балки на расстоянии 1,9 м от опоры А при действии полной нагрузки:

$$\delta_1 = \frac{11000 \times 1,5 \times 4200^4}{24 \times 1500 \times 197392 \times 9,06 \times 10^6} \times \\ \times 0,357^2 \left[ 2 \times 0,452^3 - 6 \times 0,452^2 + 0,452 \times (4 + 0,357^2) - 0,357^2 \right] = 7,09 \text{ мм.}$$

Прогиб балки посредине пролета от собственного веса:

$$\delta_2 = \frac{5}{384} \times \frac{(q_{\text{лино}} \times L)^3}{E_s I} = \frac{5}{384} \times \frac{(0,128 \times 10^3 \times 4,2) \times 4200^3}{197392 \times 9,06 \times 10^6} = 0,29 \text{ мм.}$$

Общий прогиб  $\delta \approx \delta_1 + \delta_2 = 7,09 + 0,29 = 7,38 \text{ мм.}$

Граничный прогиб  $\delta_{\text{lim}} = \frac{1}{250} L = \frac{4200}{250} = 16,8 \text{ мм} > 7,38 \text{ мм.}$  Следовательно, прогиб не превышает допустимого значения. Элемент имеет достаточную прочность, жесткость и устойчивость.

## 5.5 Несущая способность элементов постоянного сечения при совместном действии изгибающего момента и осевого сжатия

5.5.1 (5.5(1)) Элементы, которые подвергаются совместному действию изгибающего момента и центрально-сжимающей силы должны удовлетворять следующему:

а) Центрально - сжимающая сила и изгибающий момент со смещением относительно основной оси

Для предотвращения преждевременной потери устойчивости относительно основной оси:

$$\frac{N_{\text{Ed}}}{(N_{\text{b,Rd}})_{\text{min}}} + k_y \left( \frac{M_{\text{y,Ed}} + N_{\text{Ed}} e_{\text{Ny}}}{\beta_{\text{w,y}} W_{\text{pl,y}} f_y / \gamma_{\text{M1}}} \right) \leq 1 \quad (5.13)$$

Для предотвращения преждевременной потери устойчивости относительно малой оси (для элементов, подвергающихся продольно-крутильной форме потери устойчивости):

$$\frac{N_{\text{Ed}}}{(N_{\text{b,Rd}})_{\text{min}}} + k_{\text{LT}} \left( \frac{M_{\text{y,Ed}} + N_{\text{Ed}} e_{\text{Ny}}}{M_{\text{b,Rd}}} \right) \leq 1 \quad (5.14)$$

б) Центрально – сжимающая сила и изгибающий момент со смещением относительно малой оси

Для предотвращения преждевременной потери устойчивости относительно малой оси:

$$\frac{N_{\text{Ed}}}{(N_{\text{b,Rd}})_{\text{min}}} + k_z \left( \frac{M_{\text{z,Ed}} + N_{\text{Ed}} e_{\text{Nz}}}{\beta_{\text{w,z}} W_{\text{pl,z}} f_y / \gamma_{\text{M1}}} \right) \leq 1 \quad (5.15)$$

в) Центрально – сжимающая сила и двухосный изгибающий момент

Все элементы должны удовлетворять:

$$\frac{N_{\text{Ed}}}{(N_{\text{b,Rd}})_{\text{min}}} + k_y \left( \frac{M_{\text{y,Ed}} + N_{\text{Ed}} e_{\text{Ny}}}{\beta_{\text{w,y}} W_{\text{pl,y}} f_y / \gamma_{\text{M1}}} \right) + k_z \left( \frac{M_{\text{z,Ed}} + N_{\text{Ed}} e_{\text{Nz}}}{\beta_{\text{w,z}} W_{\text{pl,z}} f_y / \gamma_{\text{M1}}} \right) \leq 1 \quad (5.16)$$

5.5.2 (5.5(1)) Элементы, потенциально подверженные продольно – крутильной форме потери устойчивости, также должны удовлетворять:



$$\frac{N_{Ed}}{(N_{b,Rd})_{\min 1}} + k_{LT} \left( \frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} e_{Ny}}{M_{b,Rd}} \right) + k_z \left( \frac{M_{z,Ed} + N_{Ed} e_{Nz}}{\beta_{w,z} W_{pl,z} f_y / \gamma_{M1}} \right) \leq 1 \quad (5.17)$$

В указанных выше выражениях:

$e_{Ny}$  и  $e_{Nz}$  – смещение в нейтральной оси, когда поперечное сечение подвергается равномерному сжатию;

$N_{Ed}$ ,  $M_{y,Ed}$ ,  $M_{z,Ed}$  – расчетные значения силы сжатия и максимальные моменты относительно соответственно y-y и z-z оси вдоль элемента

$(N_{b,Rd})_{\min}$  – наименьшее значение  $N_{b,Rd}$  для следующих способов изгиба: изгибного вокруг оси y, изгибного вокруг оси z, скручивающего и изгибно-крутильного изгиба;

$(N_{b,Rd})_{\min 1}$  – наименьшее значение  $N_{b,Rd}$  для следующих способов изгиба: изгибного вокруг оси z, скручивающего и изгибно-крутильного изгиба;

$\beta_{w,y}$  и  $\beta_{w,z}$  – значения  $\beta_w$ , определенные для осей y и z соответственно,

где  $\beta_w = 1,0$  – для класса 1 или 2 поперечных сечений;

$\beta_w = W_{el}/W_{pl}$  – для класса 3 поперечных сечений;

$\beta_w = W_{eff}/W_{pl}$  – для класса 4 поперечных сечений.

$W_{pl,y}$  и  $W_{pl,z}$  – модули пластичности для осей y и z соответственно;

$M_{b,Rd}$  – сопротивление продольному с кручением изгибу;

$k_y$ ,  $k_z$ ,  $k_{LT}$  – коэффициенты взаимодействия.

ПРИМЕЧАНИЕ 1 В Национальном Приложении могут быть определены  $k_y$ ,  $k_z$ ,  $k_{LT}$ .

Рекомендуются следующие значения:

$$k_y = 1,0 + 2(\bar{\lambda}_y - 0,5) \frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd,y}} \quad \text{но} \quad 1,2 \leq k_y \leq 1,2 + 2 \frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd,y}}$$

$$k_z = 1,0 + 2(\bar{\lambda}_z - 0,5) \frac{N_{Ed}}{(N_{b,Rd})_{\min 1}} \quad \text{но} \quad 1,2 \leq k_z \leq 1,2 + 2 \frac{N_{Ed}}{(N_{b,Rd})_{\min 1}}$$

$$k_{LT} = 1,0.$$

ПРИМЕЧАНИЕ 2 В Национальном Приложении могут быть приведены другие коэффициенты взаимодействия в качестве альтернативы уравнениям 5.13–5.17.

### ПРИМЕР 13 Расчет внецентренно-сжатой сварной двутавровой стойки

Исходные данные: необходимо проверить прочность и устойчивость внецентренно-сжатой колонны из сварного двутавра, шарнирно опертой по обоим концам. Элемент закреплен от потери устойчивости в плоскости меньшей жесткости. Высота колонны равняется 3,8 метрам. Элемент загружен единичной вертикальной нагрузкой с эксцентриситетом  $e = 200$  мм.

Постоянные и временные нагрузки создают расчетное вертикальное сжимающее усилие, эквивалентное  $N_{ed} = 130$  кН.

Максимальный изгибающий момент создан на верхнем крае колонны:  $M_{y,\max,Ed} = 130 \times 0,2 = 26$  кНм.

Сечение элемента – двусимметричный сварной двутавр 200×200 из стали марки 1.4401 толщиной 5 мм.

Геометрические характеристики сечения:  $b = 200$  мм;  $h_w = 188$  мм;  $a = 3$  мм (высота сварного шва);  $A_g = 35,3$  см<sup>2</sup>;  $t_f = 6$  мм;  $t_w = 6$  мм;  $I_y = 2591,1$  см<sup>4</sup>;  $i_y = 8,6$  см;  $W_{el,y} = 259,1$  см<sup>3</sup>;  $W_{pl,y} = 285,8$  см<sup>3</sup>.

Характеристики материала колонны:  $f_y = 220$  Н/мм<sup>2</sup>;  $E = 200000$  Н/мм<sup>2</sup>;  $G = 76900$  Н/мм<sup>2</sup> (см. Таблицу 2.1).

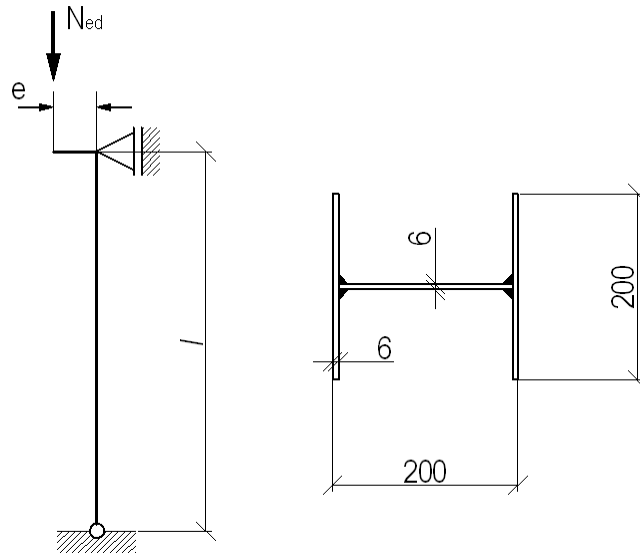


Рисунок 1 – Расчетная схема колонны и схема ее поперечного сечения

## 2 Классификация сечения

Классификацию сечения проводим согласно Таблице 5.2.

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{220} \cdot \frac{200000}{210000}} = 1.017.$$

Для сжатой стенки:  $\frac{c}{t} = \frac{188 - 3 - 3}{6} = 30,3$ , (см. Таблицу 5.2).

Для элементов Класа 3,  $\frac{c}{t} \leq 30,7\varepsilon$ , потому элемент относится к Класу 3 (как минимум).

Для сжатого свеса полки:  $\frac{c}{t} = \frac{200/2 - 6/2 - 3}{6} = 15,7$ , (см. Таблицу 5.2).

Для элементов Класа 3,  $\frac{c}{t} \leq 11,0\varepsilon$ , потому свес полки относится к Класу 4.

Следовательно, сечение относится к Класу 4.

## 3 Эффективные характеристики сечения

Определение понижающего коэффициента  $\rho$  для внешних элементов:

$$\rho = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,242}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1, \text{ (согласно Формуле (5.3)),}$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4\varepsilon\sqrt{k_\sigma}}, \text{ где } \bar{b} = c = 94 \text{ мм (по Пункту 5.2.3.1.2),}$$

Принимая распределение напряжений в сжатой полке равномерным,

$$\psi = \frac{\sigma_1}{\sigma_2} = 1 \text{ (см. Таблицу 4.2 СН РК EN 1993-1-5),}$$

$$\Rightarrow k_{\sigma} = 0,43 ;$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{94 / 6}{28,4 \times 1,017 \times \sqrt{0,43}} = 0,827 ;$$

$$\rho = \frac{1}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,242}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{1}{0,827} - \frac{0,242}{0,827^2} = 0,855 ;$$

$$b_{\text{eff}} = 0,855 \times 94 = 80,4 \text{ мм.}$$

Эффективное сечение для случая сжатия:

$$A_{\text{eff}} = A_g - 4 \times (1 - \rho)ct = 35,3 - 4 \times (1 - 0,855) \times 94 \times 6 \times 10^{-2} = 32,03 \text{ см}^2$$

Эффективное сечение для случая только изгиба относительно главной оси:

$$A_{\text{eff}} = A_g - 2 \times (1 - \rho)ct = 35,3 - 2 \times (1 - 0,855) \times 94 \times 6 \times 10^{-2} = 33,66 \text{ см}^2$$

Определение смещения положения нейтральной оси сечения (в сторону растянутой полки):

$$\bar{z}' = \frac{2 \times (1 - \rho)ct \times (h_w + t_f) / 2}{A_{\text{eff}}} = \frac{2 \times (1 - 0,855) \times 94 \times 6 \times (188 + 6) / 2}{33,66 \times 10^2} = 4,71 \text{ мм.}$$

Определение эффективных характеристик сечения относительно сильной оси:

$$I_{y,\text{eff}} = I_y - 2 \times (1 - \rho)ct \times \left[ \frac{t^2}{12} + \frac{(h_w + t_f)^2}{4} \right] - \bar{z}'^2 A_{\text{eff}} =$$

$$= 2591,1 - 2 \times (1 - 0,855) \times 94 \times 6 \times \left[ \frac{6^2}{12} + \frac{(188 + 6)^2}{4} \right] \times 10^{-4} - (4,71)^2 \times 33,66 \times 10^{-2} = 2429,7 \text{ мм}^4;$$

$$W_{y,\text{eff}} = \frac{I_{y,\text{eff}}}{h_w / 2 + t_f + \bar{z}'} = \frac{2429,7}{18,8 / 2 + 0,6 + 0,471} = 232,0 \text{ мм}^3.$$

4 Сопротивление изгибной потере устойчивости относительно сильной оси

Значение сжимающего усилия, при котором произойдет потеря устойчивости колонны (для сечения Класа 4), определяется по Формуле (6.48) СН РК EN 1993-1-1:

$$N_{b,Rd} = \chi A_{\text{eff}} f_y / \gamma_{M1},$$

$A_{\text{eff}} = 32,03 \text{ см}^2$  – эффективная площадь для сечения Класа 4, подверженного только сжатию.

Для осевого сжатия значение  $\chi$  для соответствующей безразмерной гибкости  $\bar{\lambda}$  определяется из соответствующей кривой продольного изгиба согласно (5.6):

$$\chi = \frac{1}{\varphi + \sqrt{\varphi^2 - \bar{\lambda}^2}} \leq 1,$$

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

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A f_y}{N_{cr}}}.$$

Критическая нагрузка потери устойчивости при упругой работе:

$$N_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{L_{cr}^2} = \frac{\pi^2 \times 200000 \times 2591,1 \times 10^4}{(350 \times 10^2)^2} \times 10^{-3} = 4175,2 \text{ кН.}$$

Гибкость при изгибной потере устойчивости:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{32,03 \times 10^2 \times 220}{4175,2 \times 10^3}} = 0,410.$$

Используется коэффициенты  $\alpha=0,49$  и  $\bar{\lambda}_0 = 0,2$ , (см. Таблицу 5.3, для основных осей сварных открытых сечений):

$$\varphi = 0,5(1 + 0,49(0,410 - 0,2) + 0,410^2) = 0,636,$$

$$\chi = \frac{1}{0,636 + \sqrt{0,636^2 - 0,410^2}} = 0,891 < 1,$$

$$N_{b,y,Rd} = 0,891 \times 32,03 \times 10^2 \times 220 \times 10^{-3} / 1,1 = 570,8 \text{ кН}.$$

5 Сопротивление осевому сжатию и изгибу относительно главной оси

$$\frac{N_{Ed}}{(N_{b,Rd})_{min}} + k_y \frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} e_{N_y}}{\beta_{W,y} W_{pl,y} f_y / \gamma_{M1}} \leq 1, \text{ (см. Формулу (5.13));}$$

$$\beta_{W,y} = W_{eff} / W_{pl,y} = 232,0 / 285,8 = 0,812 - \text{для сечений Класа 4;}$$

$$e_{N,y} = 0, \text{ так как сечение – симметричное;}$$

$$k_y = 1,0 + 2(\bar{\lambda}_y - 0,5) \frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd,y}} = 1,0 + 2(0,410 - 0,5) \frac{130,0}{570,8} = 0,96,$$

$$\text{но } 1,2 \leq k_y \leq 1,2 + \frac{2N_{Ed}}{N_{b,Rd,y}} = 1,2 + \frac{2 \times 130}{570,8} = 1,66 \Rightarrow k_y = 1,2;$$

$$\frac{130,0}{570,8} + 1,2 \frac{26,0 \times 10^6}{0,812 \times 285,8 \times 10^3 \times 220 / 1,1} = 0,9 \leq 1,$$

Соответственно, элемент имеет достаточную прочность и устойчивость.

## 5.6 Несущая способность при действии поперечной силы

5.6.1 (5.6(1)) Расчетная несущая способность при действии поперечной силы  $V_{c,Rd}$  должно быть принято как меньшее из:

а) сопротивление потере устойчивости при сдвиге  $V_{b,Rd}$  согласно 5.6.2 с изменениями 5.6.9 и 5.6.10;

б) упругое (пластическое) сопротивление сдвигу  $V_{pl,Rd}$  согласно 5.6.3.

5.6.2 Для стенок без элементов жесткости и с элементами жесткости расчетное значение несущей способности на срез определяется по Формуле (5.1) СН РК EN 1993-1-5:

$$V_{b,Rd} = V_{bw,Rd} + V_{bf,Rd} \leq \frac{\eta f_{yw} h_w t}{\sqrt{3} \gamma_{M1}},$$

где  $V_{bw,Rd} = \frac{\chi_w f_{yw} h_w t}{\sqrt{3} \gamma_{M1}}$  – составляющая несущей способности стенки.

Составляющая несущей способности поясов определяется согласно Пункту 5.4 СН РК EN 1993-1-5.

5.6.3 При отсутствии кручения расчетное значение несущей способности при действии поперечной силы в пластической стадии определяется по Формуле (6.18) СН РК EN 1993-1-1:

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v \cdot (f_y / \sqrt{3})}{\gamma_{M0}},$$

где  $A_v$  – площадь сдвига.

5.6.4 Площадь сдвига  $A_v$  может приниматься следующим образом:

а) для прокатных двутавровых сечений, нагрузка параллельна стенке

$$A - 2bt_f + (t_w + 2r)t_f, \text{ но не менее } \eta h_w t_w;$$

б) для прокатных швеллерных сечений, нагрузка параллельна стенке

$$A - 2bt_f + (t_w + r)t_f;$$

в) для прокатных тавровых сечений, нагрузка параллельна стенке

$$0,9 \cdot (A - bt_f);$$

г) для сварных двутавровых и коробчатых сечений, нагрузка параллельна стенке

$$\eta \sum (h_w t_w);$$

д) для сварных двутавровых и коробчатых сечений, нагрузка параллельна полкам

$$A - \sum (h_w t_w);$$

е) для прямоугольных замкнутых сечений из листового проката постоянной толщины:

– нагрузка параллельна высоте сечения

$$Ah/(b + h);$$

– нагрузка параллельна ширине сечения

$$Ab/(b + h);$$

ж) для круглых замкнутых сечений из листового проката и труб постоянной толщины

$$2A/\pi,$$

где  $A$  – площадь поперечного сечения;

$b$  – ширина сечения;

$h$  – высота сечения;

$h_w$  – высота стенки;

$r$  – радиус сопряжения полки со стенкой;

$t_f$  – толщина полки;

$t_w$  – толщина стенки (если толщина стенки не постоянна, то  $t_w$  следует принимать равной минимальной толщине);

$t_w$  – см. СН РК EN 1993-1-5.

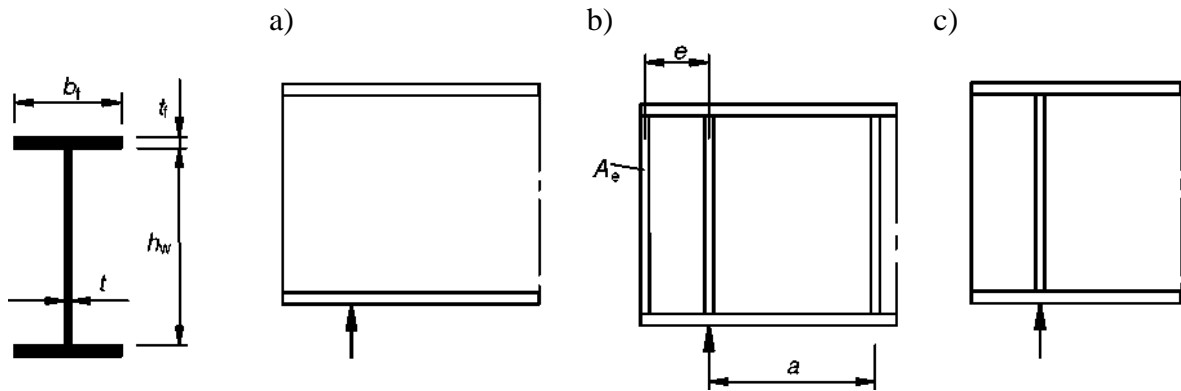
ПРИМЕЧАНИЕ Значение  $t_w$  с достаточной степенью надежности можно принимать равным 1,0.

5.6.5 (5.6(2)) Листы с  $h_w/t$  больше чем  $\frac{52}{\eta} \varepsilon$  для неукрепленных тонких листов или

$\frac{23}{\eta} \varepsilon \sqrt{k_\tau}$  для укрепленных тонких листов должны проверяться на сопротивление потере

устойчивости при сдвиге и должны быть обеспечены ребрами жесткости на опорах,

где  $h_w$  – чистая глубина захвата между фланцами, см. Рисунок 5.1;



**Рисунок 5.1 - Конструктивные решения опорных частей балок:**  
 а) без элементов жесткости на опоре; б) с жесткой опорной частью;  
 в) с гибкой опорной частью

$\varepsilon$  определено в Таблице 5.3;

$k_\tau$  определено в Пункте 5.3 СН РК EN 1993-1-5.

#### 5.6.6 Коэффициенты, учитывающие потерю устойчивости при сдвиге

5.6.6.1 Для пластин с жесткой опорной частью с поперечными элементами жесткости и без продольных элементов жесткости или с более чем двумя продольными элементами жесткости коэффициент  $k_\tau$ , учитывающий потерю устойчивости при сдвиге, может быть определен по Формулам (А.5) СН РК EN 1993-1-5:

$$k_\tau = 5,34 + 4,00 \cdot (h_w/a)^2 + k_{\tau sl} \quad \text{для } a/h_w \geq 1;$$

$$k_\tau = 4,00 + 5,34 \cdot (h_w/a)^2 + k_{\tau sl} \quad \text{для } a/h_w < 1,$$

$$\text{где } k_{\tau sl} = 9 \cdot \left( \frac{h_w}{a} \right)^2 \cdot \sqrt[4]{\left( \frac{I_{sl}}{t^3 h_w} \right)^3} > \frac{2,1}{t} \cdot \sqrt[3]{\frac{I_{sl}}{h_w}};$$

$a$  – расстояние между поперечными элементами жесткости (см. Рисунок 5.3 СН РК EN 1993-1-5);

$I_{sl}$  – момент инерции продольного элемента жесткости относительно оси  $z-z$  (см. Рисунок 5.3 (b) СН РК EN 1993-1-5). Для стенок с двумя или более продольными элементами жесткости, независимо от их расположения,  $I_{sl}$  является суммой значений жесткости всех отдельных элементов жесткости.

ПРИМЕЧАНИЕ Формула (А.5) СН РК EN 1993-1-5 не распространяется на гибкие опорные участки с поперечными элементами жесткости.

5.6.6.2 Формулу (А.5) СН РК EN 1993-1-5 допускается также применять для пластин с одним или двумя продольными элементами жесткости, если для отношения  $\alpha = \frac{a}{h_w}$  справедливо  $\alpha \geq 3$ . Для пластин с одним или двумя продольными элементами жесткости

при  $\alpha < 3$  значение коэффициента  $k_\tau$ , учитывающего потерю устойчивости при сдвиге, допускается определять по Формуле (А.6) СН РК EN 1993-1-5:

$$k_\tau = 4,1 + \frac{6,3 + 0,18 \cdot \frac{I_{sl}}{t^3 h_w}}{\alpha^2} + 2,2 \cdot \sqrt[3]{\frac{I_{sl}}{t^3 h_w}}.$$

ПРИМЕЧАНИЕ В Национальном Приложении может быть определено  $\eta$ . Рекомендуется значение  $\eta=1,20$ .

5.6.6.3 (5.6 (3)) Для тонких листов с поперечными ребрами жесткости на опорах и для тонких листов либо с промежуточными поперечными, либо с продольными ребрами жесткости или и теми и другими, коэффициент  $\chi_w$  для добавления к сопротивлению потере устойчивости при сдвиге тонкого листа должно быть получено следующим образом:

$$\chi_w = \eta \quad \text{для} \quad \bar{\lambda}_w \leq \frac{0,6}{\eta} \quad (5.18)$$

$$\chi_w = 0,11 + \frac{0,64}{\bar{\lambda}_w} - \frac{0,05}{\bar{\lambda}_w^2} \quad \text{для} \quad \bar{\lambda}_w > \frac{0,6}{\eta} \quad (5.19)$$

где  $\bar{\lambda}_w$  дано в Пунктах 5.3.3 и 5.3.5 EN 1993-1-5.

5.6.6.4 (5.6(4)) Если сопротивление фланцев не полностью используется при противостоянии изгибающему моменту, т. е.  $M_{Ed} < M_{f,Rd}$ , тогда коэффициент  $\chi_f$  представляющий вклад от фланцев, может быть включен в сопротивление потере устойчивости при сдвиге.  $\chi_f$  дано в Пункте 5.4.1 EN 1993-1-5, но с  $c$ , указанным ниже:

$$c = \left[ 0,17 + \frac{3,5 b_f t_f^2 f_{yf}}{t_w h_w^2 f_{yw}} \right] a \quad \text{и} \quad \frac{c}{a} \leq 0,65 \quad (5.20)$$

#### ПРИМЕР 14 Расчет поперечного ребра на сопротивление сдвигу

Исходные данные: на расчетной схеме (см. Рисунок 1) задана составная двутавровая балка со сплошной стенкой. Верхняя стенка балки раскреплена из плоскости действия нагрузки.

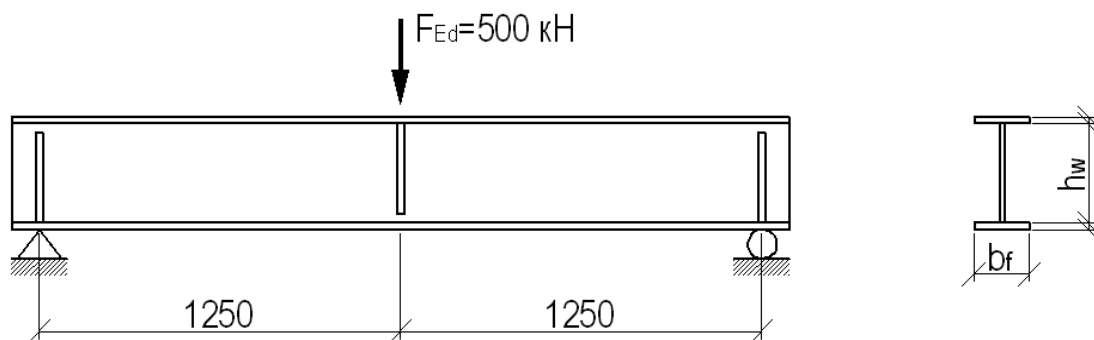


Рисунок 1 – Расчетная схема балки

Геометрические размеры сечения: полки  $12 \times 200 \text{ мм}^2$ ; стенка  $4 \times 500 \text{ мм}^2$ ; ребра жесткости  $12 \times 98 \text{ мм}^2$ ; высота сварного шва 4 мм.

Характеристики материала элемента: сталь марки 1.4462,  $f_y = 460 \text{ Н/мм}^2$ ;  $E = 200000 \text{ Н/мм}^2$ .

Частные коэффициенты безопасности приняты равными  $\gamma_{M0} = \gamma_{M1} = 1,1$ .

Максимальные изгибающие и поперечные нагрузки:

$$V_{Ed} = \frac{F_{Ed}}{2} = \frac{500}{2} = 250 \text{ кН}$$

$$M_{Ed} = \frac{F_{Ed}L}{4} = \frac{500 \times 2,5}{4} = 312,5 \text{ кН}$$

## 2 Классификация сечения

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = \sqrt{\frac{235}{460}} = 0,698,$$

Для изгибаемой стенки:  $\frac{c}{t_e} = \frac{500 - 2 \times \sqrt{2} \times 4}{4 \times 0,698} = 175 > 74,8$ , поэтому стенка относится к Классу

4.

Для сжатой полки:  $\frac{c}{t_e} = \frac{200 - 4 - 2 \times \sqrt{2} \times 4}{2 \times 12 \times 0,698} = 11,0 \leq 11,0$ , поэтому полка относится к Классу 3.

Сечение в целом относится к Классу 4.

## 3 Сопротивление сдвигу

Для стенок балок, подкрепленных вертикальными ребрами жесткости, согласно п. 5.5.6, необходимо выполнять проверку устойчивости при действии поперечной силы при:

$$h_w / t_w \geq \frac{23}{\eta} \varepsilon \sqrt{k_\tau},$$

где  $h_w$  – чистая глубина захвата между фланцами, см. Рисунок 5.1 СН РК EN 1993-1-5;  
 $\eta = 1,2$  – рекомендованное значение.

Коэффициент  $k_\tau$ , учитывающий потерю устойчивости при сдвиге, может быть определен по Формуле (A.5) СН РК EN 1993-1-5:

$$a / h_w = 1250 / 500 > 1, \text{ отсюда}$$

$$k_\tau = 5,34 + 4 \left( \frac{h_w}{a} \right)^2 = 5,34 + 4 \left( \frac{500}{1250} \right)^2 = 5,98.$$

$$h_w / t_w = \frac{500}{4} = 125 \geq \frac{23}{1,2} 0,698 \sqrt{5,98} = 32,7.$$

Следовательно, в данном случае необходимо проверять устойчивость при действии поперечных усилий, которая определяется (см. СН РК EN 1993-1-5 Формулы (5.1) и (5.2)) как:

$$V_{b,Rd} = V_{bw,Rd} + V_{bf,Rd} \leq \frac{\eta f_{yw} h_w t_w}{\sqrt{3} \gamma_{M1}} = \frac{1,2 \times 460 \times 500 \times 4}{\sqrt{3} \times 1,1} = 579,47 \text{ кН},$$

$$V_{bw,Rd} = \frac{\chi_w f_{yw} h_w t_w}{\sqrt{3} \gamma_{M1}},$$

$$\chi_w = \eta = 1,2 \text{ при } \bar{\lambda}_w \leq 0,60 / \eta = 0,5,$$

$$\chi_w = 0,11 + \frac{0,64}{\bar{\lambda}_w} - \frac{0,05}{\bar{\lambda}_w^2} \text{ при } \bar{\lambda}_w > 0,60 / \eta = 0,5,$$

Условная гибкость  $\bar{\lambda}_w$  стенки для опор с поперечными элементами жесткости и



промежуточными поперечными или продольными элементами жесткости или с теми и другими при их одновременной установке определяется по Формуле (5.6) СН РК EN 1993-1-5:

$$\bar{\lambda}_w = \left( \frac{h_w}{37,4 t_w \varepsilon \sqrt{k_\tau}} \right),$$

$$\bar{\lambda}_w = \left( \frac{500}{37,4 \times 4 \times 0,698 \times \sqrt{5,98}} \right) = 1,958 > 0,60 / \eta = 0,5.$$

Отсюда, распределение напряжений в стенке выражается в виде:

$$\chi_w = 0,11 + \frac{0,64}{1,958} - \frac{0,05}{1,958^2} = 0,424 ;$$

$$V_{bw,Rd} = \frac{\chi_w f_{yw} h_w t_w}{\sqrt{3} \gamma_{M1}} = \frac{0,424 \times 460 \times 500 \times 4}{\sqrt{3} \times 1,1} = 204,74 \text{ кН}.$$

Положительное влияние полки может учитываться, если они не полностью задействованы в восприятии изгибающего момента. Сопротивление изгибу сечения, состоящего исключительно из полки, определяется согласно по Формуле:

$$M_{f,Rd} = A_f \cdot (h_w + t_f) \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 12 \times 200 \times \frac{460}{1,1} \times (500 + 12) = 513,86 \text{ кН};$$

Так как  $M_{f,Rd} > M_{Ed} = 312,5 \text{ кНм}$ , то полки могут участвовать в работе сечения на сопротивление потере устойчивости от действия поперечных усилий.

$$V_{bf,Rd} = \frac{b_f t_f^2 f_{yf}}{c \gamma_{M1}} \left[ 1 - \left[ \frac{M_{Ed}}{M_{f,Rd}} \right]^2 \right], \text{ согласно (5.8) СН РК EN 1993-1-5;}$$

$$c = a \left[ 0,17 + \frac{3,5 b_f t_f^2 f_{yf}}{t_f h_f^2 f_{yf}} \right], \text{ но } \frac{c}{a} \leq 0,65, \text{ согласно (5.20)}$$

$$c = 1250 \times \left[ 0,17 + \frac{3,5 \times 200 \times 12^2 \times 460}{4 \times 500^2 \times 460} \right] = 338 \text{ мм} < 0,65 \times 1250 = 812 \text{ мм};$$

$$V_{bf,Rd} = \frac{200 \times 12^2 \times 460}{338 \times 1,1} \times \left[ 1 - \left[ \frac{312,5}{513,86} \right]^2 \right] = 22,45 \text{ кН};$$

$$V_{b,Rd} = V_{bw,Rd} + V_{bf,Rd} = 204,74 + 22,45 = 227,19 \text{ кН} \leq 579,47 \text{ кН}.$$

#### 4 Поперечные ребра

Поперечные ребра, согласно Пункту 5.7, необходимо проверять на разрушение и изгибную потерю устойчивости с использованием коэффициентов  $\alpha = 0,49$  и  $\bar{\lambda}_0 = 0,2$ . В таком случае используется эффективное сечение, состоящее из ребер и частей стенки. к расчету принимается часть стенки шириной  $11 t_{w, \text{пз}}$ , поэтому сечение относится к Классу 3.

Момент инерции промежуточных поперечных элементов жесткости вместе с эффективной частью стенки  $I_{st}$  должен соответствовать минимальным значениям Формулы (9.6) СН РК EN 1993-1-5:

$$a/h_w = 1250/500 = 2,5 \geq \sqrt{2},$$

поэтому момент инерции промежуточного ребра жесткости должен удовлетворять условию:

$$I_{st} \geq 0,75 h_w t_w^3 = 0,75 \times 500 \times 4^3 = 24000 \text{ мм}^4;$$

$$I_{st} = 2 \times \frac{(11 \times 0,698 \times 4) \times 4^3}{12} + \frac{12 \times 200^3}{12} = 8,00 \times 10^6 \text{ мм}^4 > 24000 \text{ мм}^4 - \text{условие выполняется}.$$

Прочность (сопротивление разрушению) определяется по Формуле (6.10) СН РК EN 1993-1-1:

$$N_{c,Rd} = A_s f_y / \gamma_{M0};$$

$$A_s = (12 \times 200 + 11 \times 0,698 \times 4 \times 2) = 2461,42 \text{ мм}^2;$$

$$N_{c,Rd} = 2461,42 \times 460 / 1,1 = 1029,32 \text{ кН}.$$

Сопротивление потере устойчивости промежуточных ребер определяется по Формуле (6.47) СН РК EN 1993-1-1:

$$N_{b,Rd} = \chi A_s f_y / \gamma_{M1};$$

По Формуле (5.6)

$$\chi = \frac{1}{\varphi + [\varphi^2 - \bar{\lambda}^2]^{0,5}} \leq 1,$$

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

По формуле (5.8)

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A f_{yw}}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i} \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{f_{yw}}{E}},$$

Согласно Пункту.5.7.6.3:

$$L_{cr} = 0,75 h_w = 0,75 \times 500 = 375 \text{ мм},$$

$$\bar{\lambda} = \frac{375}{\sqrt{\frac{8 \times 10^6}{2461,42}}} \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{460 \times 1}{200000}} = 0,100;$$

$$\varphi = 0,5(1 + 0,49 \times (0,100 - 0,2) + 0,100^2) = 0,481;$$

$$\chi = \frac{1}{0,481 + [0,481^2 - 0,100^2]^{0,5}} = 1,05 > 1 \Rightarrow \chi = 1,0.$$

Так как  $N_{b,Rd} = N_{c,Rd} > N_{Ed}$ , несущая способность поперечных ребер - достаточна.

## 5 Взаимодействие поперечных усилий с изгибающим моментом

Если участие сечения в сопротивлении действию поперечных усилий, выражающееся коэффициентом  $\bar{\eta}_3$ , превышает 0,5, работа сечения при совместном действии изгибающего момента и поперечных усилий должна проверяться, согласно Формуле (7.1) СН РК EN 1993-1-5.

$$\bar{\eta}_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{bw,Rd}};$$

$\bar{\eta}_3 = \frac{250}{204,74} = 1,221 > 0,5$ , потому взаимодействие должно учитываться:

Согласно (7.1) СН РК EN 1993-1-5

$$\bar{\eta}_1 + \left(1 - \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}}\right) (2\bar{\eta}_3 - 1)^2 \leq 1,0 \text{ для } \bar{\eta}_1 \geq \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}},$$

где

$$\bar{\eta}_1 = \frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}}.$$

Определение эффективных характеристик сечения. Полки элемента относятся к Классу 3 и потому являются полностью эффективными. Высота же стенки должна быть уменьшена на коэффициент  $\rho$  для сварных стенок:

$$\rho = \frac{0,772}{\bar{\lambda}_p} - \frac{0,125}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1,$$

$$\lambda_p = \frac{\bar{b}/t}{28,4\epsilon\sqrt{k_\sigma}}, \text{ где } \bar{b} = d = 500 - 2 \times 4 \times \sqrt{2} = 488,68 \text{ мм}.$$

Принимая распределение напряжений в стенке симметричным и линейным, согласно Таблице 4.1 СН РК EN 1993-1-5:

$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = -1; \Rightarrow k_\sigma = 23,9;$$

$$\bar{\lambda}_p = \frac{488,68 / 4}{28,4 \times 0,698 \times \sqrt{23,9}} = 1,26;$$

$$\rho = \frac{0,772}{1,26} - \frac{0,125}{1,26^2} = 0,534 < 1;$$

$$b_{\text{eff}} = \rho b_c = \rho \bar{b} / (1 - \psi) = 0,534 \times 488,68 / (1 - (-1)) = 130,48 \text{ мм},$$

$$b_{e1} = 0,4b_{\text{eff}} = 0,4 \times 130,48 = 52,19 \text{ мм},$$

$$b_{e2} = 0,6b_{\text{eff}} = 0,6 \times 130,48 = 78,29 \text{ мм}.$$

Эксцентриситет  $e_i$  принят положительным в направлении вниз от центра массы верхней полки.

$$A_{\text{eff}} = \sum_i A_i = b_f t_f \times 2 + b_{e1} t_w + b_{e2} t_w + (h_w / 2) t_w = 6321,92 \text{ мм}^2;$$

$$e_{\text{eff}} = \frac{1}{A_{\text{eff}}} \sum_i A_i e_i = \frac{1}{A_{\text{eff}}} [b_f t_f (0) + b_f t_f (h_w + t_f)] + \\ + [b_{e1} t_w (0,5(b_{e1} + t_f)) + b_{e2} t_w (0,5(h_w + t_f) - b_{e2} / 2) + (h_w / 2) t_w (0,75h_w + 0,5t_f)] = 266,44 \text{ мм};$$

$$I_{\text{eff}} = \sum_i I_i + \sum_i A_i (e_{\text{eff}} - e_i)^2 = 2 \times \frac{b_f t_f^3}{12} + \frac{t_w b_{e1}^3}{12} + \frac{t_w b_{e2}^3}{12} + \\ + \frac{t_w (h_w / 2)^3}{12} + b_f t_f (e_{\text{eff}} - 0)^2 + b_f t_f [e_{\text{eff}} - (h_w + t_f)]^2 + b_{e1} t_w [e_{\text{eff}} - 0,5(b_{e1} + t_f)]^2 + \\ + b_{e2} t_w [e_{\text{eff}} - 0,5(h_w + t_f + b_{e2})]^2 + (h_w / 2) t_w [e_{\text{eff}} - (0,75h_w + 0,5t_f)]^2 = 3,459 \times 10^8 \text{ мм}^4;$$

$$\bar{\eta}_1 = \frac{M_{\text{Ed}}}{M_{\text{pl,Rd}}};$$

$$M_{\text{f,Rd}} = 513,86 \text{ кНм (см. п. 3)};$$

$M_{\text{pl,Rd}}$  – сопротивление сечения при пластичной работе;

$$M_{\text{pl,Rd}} = M_{\text{f,Rd}} + \frac{t_w h_w^2 f_y}{4\gamma_{\text{M0}}} = 513,86 + \frac{4 \times 500^2 \times 460}{4 \times 1,1 \times 10^6} = 618,40 \text{ кНм}.$$

6 Оценка условий работы элемента

$$M_{\text{Ed}} = 312,5 \text{ кНм, потому:}$$

$$\bar{\eta}_1 = \frac{312,5}{618,40} = 0,51 \leq 1,0 \Rightarrow \text{Условие выполняется.}$$

Проверка взаимодействия усилий:

$$\bar{\eta}_1 + \left(1 - \frac{M_{\text{f,Rd}}}{M_{\text{pl,Rd}}}\right) (2\bar{\eta}_3 - 1)^2 = 0,51 + \left(1 - \frac{513,86}{618,40}\right) ((2 \times 1,221) - 1)^2 = 0,862 < 1,0.$$

Из этого следует, что при заданных условиях сопротивление составной балки сдвигу, изгибу, а также их сочетанию является достаточным.

## 5.7 Поперечные ребра жесткости

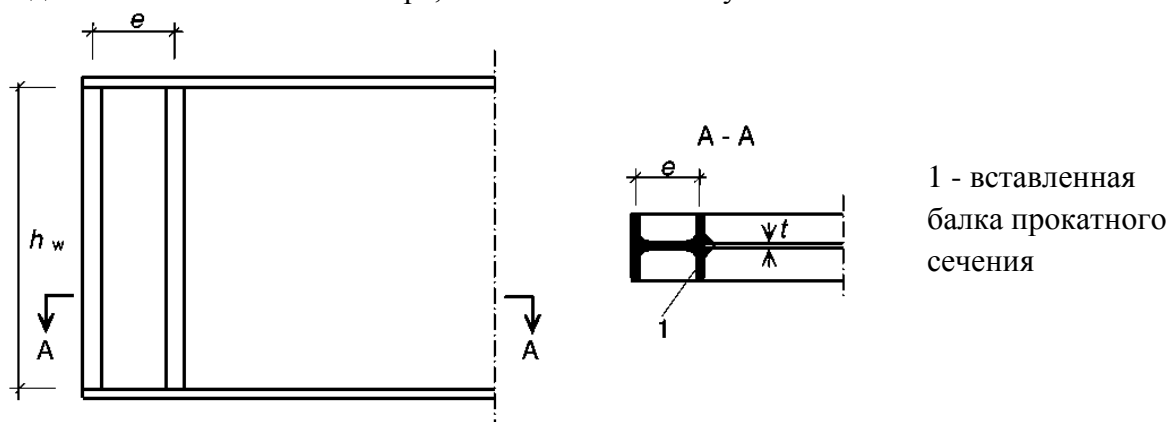
5.7.1 (5.7(1)) Условия в 9.3 EN 1993-1-5 применимы с дополнениями согласно 5.7.1.3 и 5.7.1.4.

### 5.7.2 Жесткие опорные участки

5.7.2.1 Жесткая опорная часть балки (см. Рисунок 5.3) служит в качестве элемента жесткости, воспринимающего реакцию опоры (см. Пункт 9.4 СН РК EN1993-1-5), и рассчитывается как короткая балка, воспринимающая продольные напряжения в плоскости стенки.

ПРИМЕЧАНИЕ В СН РК EN 1993-2 содержатся указания по влиянию эксцентриситета от смещения опор.

5.7.2.2 Жесткая опорная часть балки состоит из двух поперечных элементов жесткости, расположенных с двух сторон, которые на опоре образуют пояса короткой балки длиной  $h_w$  (см. Рисунок 5.2(b)). Полоса стенки между указанными выше поперечными элементами жесткости образует стенку этой балки. Альтернативно жесткая опорная часть балки может быть выполнена из балки прокатного сечения, которая соединяется со стенкой на опоре, как показано на Рисунке 5.2.



**Рисунок 5.2 - Конструкция опорной части балки с использованием прокатных профилей**

5.7.2.3 Минимальная площадь поперечного сечения каждого из обоих элементов жесткости должна быть не менее  $4h_w t^2/e$ , где  $e$  — расстояние между центрами тяжести элементов жесткости,  $e > 0,1h_w$  (см. Рисунок 5.2(b)). Если опорная часть выполнена из прокатного профиля, то момент сопротивления относительно оси, перпендикулярной стенке балки, должен быть не менее  $4h_w t^2$ .

5.7.2.4 В качестве альтернативы конец балки может иметь один единственный двухсторонний элемент жесткости при условии, что еще один поперечный элемент жесткости находится настолько близко к опоре, что отсек может воспринимать максимальное сдвигающее усилие, возникающее при расчете гибких опорных частей.

### 5.7.3 Элементы жесткости гибкой опорной части

В гибких опорных частях могут применяться простые двухсторонние элементы жесткости, как показано на Рисунке 5.2(с). Они работают как элементы опоры, воспринимающие опорную реакцию балок (см. Пункт 9.4 СН РК EN 1993-1-5).

#### 5.7.4 Промежуточные поперечные элементы жесткости

5.7.4.1. Промежуточные поперечные элементы жесткости, которые применяются в качестве жесткой опоры крайней панели стенки, должны быть рассчитаны на прочность и жесткость.

5.7.4.2 Когда применяются гибкие промежуточные поперечные элементы жесткости, их жесткость должна быть учтена при расчете с  $k_r$  по Пункту 5.3.5 СН РК EN 1993-1-5.

5.7.4.3 Момент инерции площади промежуточных жестких поперечных элементов жесткости вместе с эффективной частью стенки  $I_{st}$  должен соответствовать следующим минимальным значениям согласно Формуле (9.6) СН РК EN 1993-1-5:

$$\begin{aligned} \text{для } a/h_w < \sqrt{2} \quad I_{st} &\geq 1,5h_w^3 t^3 / a^2; \\ \text{для } a/h_w &\geq \sqrt{2} \quad I_{st} \geq 0,75h_w t^3. \end{aligned}$$

ПРИМЕЧАНИЕ Промежуточные жесткие поперечные элементы жесткости должны быть рассчитаны на осевую силу, равную  $\left( V_{Ed} - \frac{1}{\bar{\lambda}_w^2} \cdot f_{yw} h_w t / (\sqrt{3} \gamma_{M1}) \right)$  согласно Пункту 9.2.1.3 СН РК EN 1993-1-5. В случае переменной поперечной силы производят проверку на расстоянии  $0,5h_w$  от края панели с максимальной поперечной силой.

### 5.7.5 Продольные элементы жесткости

Если продольные элементы жесткости учитываются при расчете на прочность, то они также должны быть проверены на действие нормальных напряжений.

### 5.7.6 Сварные швы

5.7.6.1 Сварные швы приварки стенки к поясу короткой балки допускается рассчитывать для номинального значения сдвигающего усилия  $V_{Ed}/h_w$ , если  $V_{Ed}$  не превышает значения  $\chi_w f_{yw} h_w t / (\sqrt{3} \gamma_{M1})$ . При больших значениях  $V_{Ed}$  сварные швы между поясом короткой балки жесткой опоры и стенкой балки необходимо рассчитывать на сдвигающее усилие, равное  $\eta f_{yw} t / (\sqrt{3} \gamma_{M1})$ .

5.7.6.2 Во всех остальных случаях сварные швы должны быть рассчитаны на поперечную силу, действующую вдоль и поперек сварных швов, с учетом их работы в упругой и упруго-пластической стадии и с учетом эффекта 2-го порядка.

5.7.6.3 (5.7(2)) Сопротивление ребра жесткости изгибу  $N_{b,Rd}$  вне плоскости должно определяться по 5.4.2 с использованием  $\alpha = 0,49$  и  $\bar{\lambda}_0 = 0,2$ . Длина зоны продольного изгиба 1 ребра жесткости должна подходить для условий удержания, но не менее  $0,75h_w$ ,

где оба конца зафиксированы сбоку. Более высокое значение  $l$  должно использоваться для условий, которые предусматривают меньшее закрепление концов. Если ребро жесткости вырезку на нагруженном конце, его сопротивление поперечного сечения должно проверяться на нагруженном конце с учетом рабочей площади.

5.7.6.4 (5.7(3)) Для проверки изгиба эффективная площадь поперечного сечения ребра жесткости должна включать само ребро жесткости, плюс ширину тонкого листа в  $11\epsilon t_w$  с каждой стороны от ребра жесткости. На концах элемента (или отверстий в тонком листе) дополняющая ширина, которая должна приниматься во внимание, должна быть либо  $11\epsilon t_w$ , либо существующая ширина, в зависимости от того, что меньше.

## 6 ТРЕБОВАНИЯ К РАСЧЕТУ СОЕДИНЕНИЙ

### 6.1 Общие положения

6.1.1 Данный раздел настоящего пособия посвящен дополнительным положениям по расчету соединений конструкций и их элементов из нержавеющей стали, которые расширяют и дополняют положения по расчету соединений в СН РК EN 1993-1-3 и СН РК EN 1993-1-8 (см. Пункт 6.2 и 6.3 настоящего пособия).

6.1.2 Положения Раздела 6 настоящего пособия предполагают, что изготовление и сборка конструкций и их элементов из нержавеющей стали выполнены согласно EN 1090-2.

6.1.3 При расчете соединений необходимо, кроме расчета на прочность, выполнить мероприятия по поддержанию оптимальной стойкости элементов соединения к коррозии (антикоррозийные мероприятия).

6.1.4 Выполнение антикоррозийных мероприятий, в первую очередь, необходимы у соединений, которые могут увлажняться от действия погодных условий, брызг, погружения, конденсации и др.

6.1.5 (A.6.1(2)) Это особенно важно для соединений, которые могут стать влажными от погоды, брызг, погружения, конденсации или по другим причинам. Необходимо предусмотреть возможность избегания или уменьшения проблем, связанных с коррозией, за счет расположения соединений вдали от источника влажности. В качестве альтернативы, может быть, возможно устранить источник влажности, например, в случае конденсации, соответствующей вентиляцией или гарантировав, что температура окружающей среды в конструкции лежит выше температуры конденсации.

6.1.6 (A.6.1(3)) Если не целесообразно предотвращать увлажнение соединения, включающего как углеродистую сталь, так и нержавеющую сталь, необходимо продумать предотвращение электрохимической коррозии.

6.1.7 (A.6.1(4)) Влияние нагрузок и коррозии в рабочих условиях должно определяться и регистрироваться настолько полно и точно, насколько это возможно.

## **6.2 Дополнительные положения к СН РК EN 1993-1-3**

6.2.1 (6.1(2)) Расчет соединений для листов нержавеющей стали с использованием самонарезных винтов должно быть в соответствии с СН РК EN 1993-1-3, за исключением того, что сила извлечения должна определяться испытанием.

6.2.2 (6.1(2) Примечание 1) Способность шурупа к сверлению и образованию нарезки в нержавеющей стали должна быть подтверждена испытаниями, если только нет достаточных свидетельств.

6.2.3 (6.1(2) Примечание 2) Формулы для определения силы извлечения на основе результатов испытания (см. Приложение D СН РК EN 1990 и Раздел 7 настоящего пособия) не приведены в Национальном приложении.

## **6.3 Дополнительные положения к СН РК EN 1993-1-8**

### **6.3.1 Болтовое соединение**

6.3.1.1 (А.6.2 (1)) Необходимо избегать использования болтов из углеродистой стали с конструктивными элементами из нержавеющей стали. В соединениях на болтах, в отношении которых ожидается, что они будут подвержены определенной степени коррозии, необходимо предусмотреть электрическую изоляцию углеродистой стали от элементов из нержавеющей стали. Это обычно влечет за собой использование неметаллических изолирующих прокладок и возможно вкладышей. Подходящий тип детали показан на Рисунке 6.1. Материал, образующий изоляцию, должен быть достаточно надежным для предотвращения контакта при работе между углеродистой сталью и нержавеющей сталью.

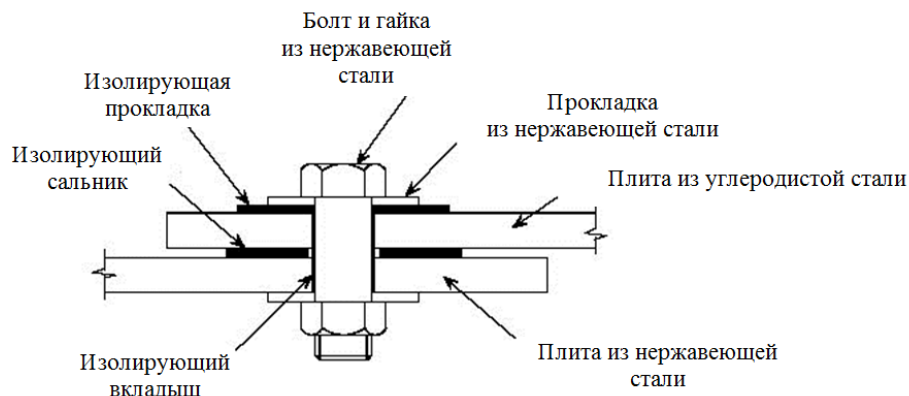
6.3.1.2 (А.6.2(2)) Для избегания щелевой коррозии в соединениях на болтах необходимо с осторожностью подходить к выбору соответствующих материалов для заданной среды.

6.3.1.3 (А.6.2(3)) Болты должны сопротивляться коррозии, по крайней мере, достаточно долго в рабочих условиях как соединенные части.

6.3.1.4 (А.6.2 (4)) Все соединения на болтах должны быть шлифованными, без каких-либо зазоров между соединенными частями.

6.3.1.5 (А.6.2(5)) За исключение соединений, включающих углеродистую и нержавеющую стали, необходимо избегать промежуточных уровней, которые должны передавать нагрузку в соединении.

6.3.1.6 (А.6.2(6)) Должны использоваться прокладки большего диаметра, чем для углеродистой стали.



**Рисунок 6.1 - Избегание электрохимической коррозии при соединении различных материалов**

6.3.1.7 Несущую способность болтовых соединений, определяемую по указаниям Пункта 3.6 СН РК EN 1993-1-8, необходимо рассчитывать с использованием приведенного значения временного сопротивления нержавеющей стали  $f_{u,red}$  (вместо значения временного сопротивления нержавеющей стали  $f_u$ ).

Приведенное значение  $f_{u,red}$  для нержавеющей стали определяется по формуле:

$$f_{u,red} = 0,5 \cdot f_y + 0,6 \cdot f_u, \quad \text{но } f_{u,red} \leq f_u \quad (6.1)$$

6.3.1.8 При расчете соединений на срез категории материала 50, 70 и 80, нержавеющие болты, изготовленные по EN ISO 3506, должны приниматься как марки болтов 4.6, 5.6 и 8.8 из малоуглеродистой стали соответственно.

6.3.1.9 Определение несущей способности на срез  $F_{v,Rd}$  болта из нержавеющей стали выполняется по формуле из Таблицы 3.4 СН РК EN 1993-1-8, но с учетом того, что параметр  $\alpha$  не зависит от марки болта, а определяется в зависимости от расположения плоскости среза:

$$f_{u,Rd} = \frac{\alpha \cdot f_{ub} \cdot A}{\gamma_{M2}}, \quad (6.2)$$

где  $f_{ub}$  - временное сопротивление болта, определяемое по Таблице 2.5 настоящего пособия;

$A$  - площадь поперечного сечения нарезной или не нарезной части болта

$\alpha$  - параметр, зависящий от расположения плоскости среза: при расчете, когда плоскость среза проходит через ненарезную часть болта, то  $\alpha = 0,6$ ; а в случае, когда - через нарезную часть болта, то  $\alpha = 0,5$ .

### 6.3.2 Сварное соединение

6.3.2.1 (А.6.3(1)) Для сварных соединений, включающих углеродистую и нержавеющие стали, обычно рекомендуется, чтобы любая наносимая на углеродистую сталь система краски выступала за сварной шов и охватывала некоторую площадь нержавеющей стали, если соединение потенциально подвержено коррозии.



6.3.2.2 (А.6.3(2)) Характеристики основного металла могут измениться из-за сварки, что может уменьшить сопротивление коррозии. Это явление известно, как коррозия сварного шва. Циклы нагрева и охлаждения, связанные со сваркой, влияют на микроструктуру всех нержавеющих сталей, но некоторые марки подвержены влиянию больше, чем другие. Это особенно важно для аустенитно-ферритных материалов. Соответственно, очень важно, чтобы применялись подходящие процедуры сварки и расходные материалы, и чтобы сварка проводилась сварщиками, имеющими необходимую квалификацию.

6.3.2.3 (А.6.3(3)) Односторонние частичного проникновения стыковочные сварные швы не должны использоваться в сильно загрязненных средах или в агрессивных морских средах. Прерывистые сварные швы не должны использоваться там, где вероятно возникновение щелевой коррозии.

6.3.2.4 При определении расчетной несущей способности углового сварного шва, определяемой:

а) направленным методом по Формуле (4.1) СН РК EN 1993-1-8;

б) или упрощенным методом по Формулам (4.2), (4.3) и (4.4) СН РК EN 1993-1-8, необходимо поправочный коэффициент  $\beta_w$  брать равным 1,0 для всех марок нержавеющей стали, если только меньшее значение поправочного коэффициента  $\beta_w$  не доказано результатами испытаний, выполненных согласно Приложению D СН РК EN 1990 и Разделу 7 настоящего пособия.

#### ПРИМЕР 15 Расчет сварных швов консоли колонны

Исходные данные: конфигурация соединения и схема нагружения приведена на Рисунке 1. Необходимо обратить внимание, что нагрузка воспринимается двумя идентичными плоскими угловыми сварными швами постоянного катета, величину которого нужно определить. Все швы являют собой прямоугольные треугольники с равными катетами.

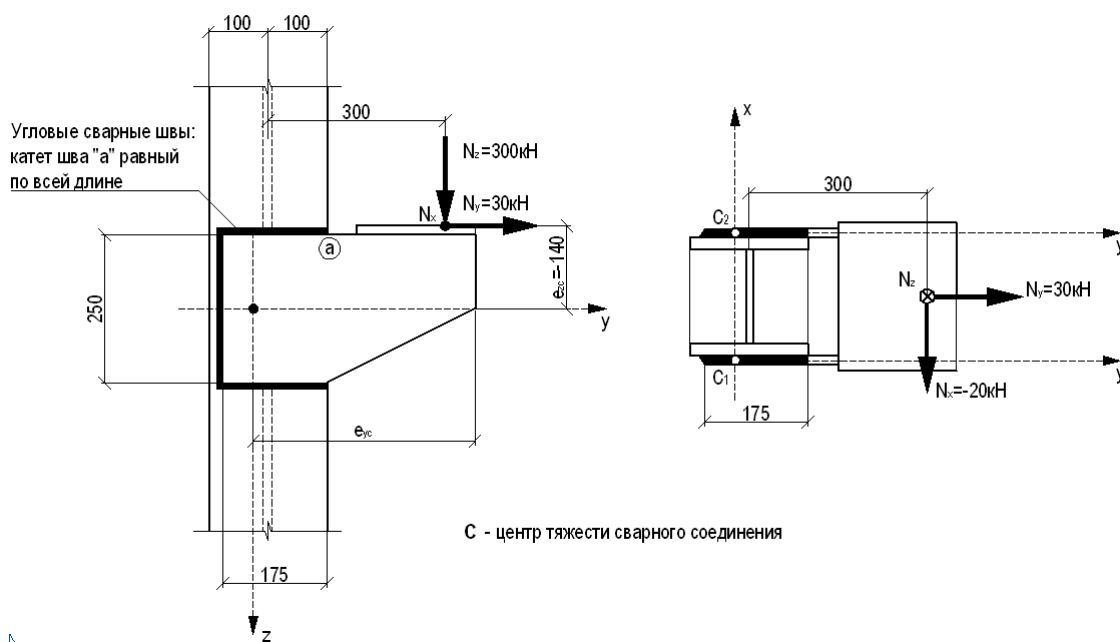


Рисунок 1 – Расчетная схема сварного узла

Характеристики материала элемента: сталь марки 1.4401,  $f_y = 220 \text{ Н/мм}^2$ ;  $f_u = 520 \text{ Н/мм}^2$ ;  $E = 200000 \text{ Н/мм}^2$ ,  $G = 76900 \text{ Н/мм}^2$ . Принимается, что предел текучести и временное сопротивление на растяжение сварного шва превышает соответствующие значения для основного металла (см. Пункт 4.2(2) СН РК EN 1993-1-8).

Частный коэффициент безопасности для сварки  $\gamma_{M2} = 1,25$  (см. Таблицу 5.1); коэффициент корреляции  $\beta_w = 1,0$  (см. Пункт 6.3); необходимость учета понижающего коэффициента для учета длины сварного шва будет определена.

## 2 Предпосылки расчета

Для расчета прямоугольных сварных швов с одинаковыми катетами, нагруженных описанным выше способом применяются расчет в упругой стадии. Данный метод ведет к определению сопротивления сварного соединения нагрузкам с запасом (см. Пункт 2.5 СН РК EN 1993-1-8).

Координаты точек ( $x_c$ ,  $y_c$ ,  $z_c$ ) сварного соединения принимаются по правую сторону относительно центра масс сварного шва (в данном примере соединение располагается в плоскости  $y$ - $z$ , потому что координата  $x_c$  везде равна 0).

Главное предназначение расчета в упругой стадии – определение расчетных усилий в наиболее нагруженных точках или в точках, часто именуемых «критическими». Для проверки сварных соединений, в качестве критических точек могут использоваться наиболее удаленные от центра масс сварного шва точки.

Векторы приложенных усилий, их эксцентриситеты и результирующие моменты, которые действуют на сварное соединение общего вида с центром масс в точке  $C$ , выражаются:

– приложенные усилия:

$$\overline{N_{w,Ed}} = [N_{x,Ed}, N_{y,Ed}, N_{z,Ed}];$$

– эксцентриситет приложения усилий:

$$\overline{e_N} = [e_{xc}, e_{yc}, e_{zc}];$$

( $e_{xc}$ ,  $e_{yc}$ ,  $e_{zc}$ ) – координаты точки приложения вектора сил  $\overline{N_{w,Ed}}$ ;

– приложенные моменты сил:

$$M_{xc,Ed} = e_{yc} N_{z,Ed} - e_{zc} N_{y,Ed};$$

$$M_{yc,Ed} = e_{zc} N_{x,Ed} - e_{xc} N_{z,Ed};$$

$$M_{zc,Ed} = e_{xc} N_{y,Ed} - e_{yc} N_{x,Ed}.$$

Анализ работы в упругой стадии соединения при общем случае нагружения приводит к выявлению следующих составляющих усилий на единицу длины сварного шва в точке с координатами ( $e_{xc}$ ,  $e_{yc}$ ,  $e_{zc}$ ) (величина катета шва обозначена как « $a$ »):

$$F_{wx,Ed} = a \left[ \frac{N_{x,Ed}}{A_w} + \frac{z_c M_{yc,Ed}}{I_{yc}} - \frac{y_c M_{zc,Ed}}{I_{zc}} \right];$$

$$F_{wy,Ed} = a \left[ \frac{N_{y,Ed}}{A_w} + \frac{x_c M_{zc,Ed}}{I_{zc}} - \frac{z_c M_{xc,Ed}}{I_{xc}} \right];$$

$$F_{wz,Ed} = a \left[ \frac{N_{z,Ed}}{A_w} + \frac{y_c M_{xc,Ed}}{I_{xc}} - \frac{x_c M_{yc,Ed}}{I_{yc}} \right].$$

В предыдущих уравнениях, рабочая площадь и моменты инерции относительно главных осей сечения шва:

$A_w = \int a dl = \sum a_i l_i$  – для прямых участков длиной  $l_i$  с высотой катета  $a_i$ ;

$$I_{xc} = \int a (y_c^2 + z_c^2) dl;$$

$$I_{yc} = \int a (x_c^2 + z_c^2) dl;$$

$$I_{zc} = \int a (x_c^2 + y_c^2) dl.$$

Так как высота катета «а» – постоянная по всей длине шва, справедливым является:

$$\frac{A_w}{a} = \int dl = \sum l_i.$$

Так как  $x_c = 0$ ,

$$\frac{I_{zc}}{a} = \int (y_c^2) dl, \quad \frac{I_{yc}}{a} = \int (z_c^2) dl, \quad \frac{I_{xc}}{a} = \int (y_c^2 + z_c^2) dl = \frac{I_{yc}}{a} + \frac{I_{zc}}{a}.$$

### 3 Методы расчета

Необходимо определить минимальный катет сварного шва в критических точках. Для этого можно использовать два разных алгоритма.

Первый, более простой и дающий высокие запасы, подход основывается на расчетной прочности сварного шва на срез. Расчетное срезающее усилие на единицы длины шва в любой точке соединения определяется как векторная сумма реакций на единицу длины от действия всех сил и моментов, приложенных к сварному соединению. Это расчетное срезающее усилие среза на единицу длины не должно превышать расчетное сопротивление на единицу длины, определяемое как произведение расчетной прочности на срез на высоту катета шва. Данный метод не учитывает расположение шва в плоскости относительно направления действия результирующего усилия на единицу длины, приложенного к соединению.

Второй подход основан на сравнении базовой расчетной прочности наиболее слабой части с расчетными напряжениями в шве, определенными по формуле фон Мизеса. Данный подход является наиболее точным, так как позволяет учитывать расположение шва в плоскости относительно направления действия результирующего усилия на единицу длины, приложенного к соединению.

### 4 Упрощенный расчет прочности сварного шва на срез

Проверка расчетного сопротивления сварного шва выполняется по Пункту 4.5.3.3 СН РК EN 1993-1-8:

$$F_{w,Ed} = \sqrt{F_{wx,Ed}^2 + F_{wy,Ed}^2 + F_{wz,Rd}^2} \leq F_{w,Rd} = a f_{vw,d} = a \left( \frac{f_u / \sqrt{3}}{\beta_w \gamma_{M2}} \right)$$

где  $f_{vw,d}$  – расчетная прочность шва на срез;

$F_{w,Rd}$  – расчетное сопротивление срезу сварного шва катетом  $a$ .

Коэффициент  $\beta_w$  для нержавеющей стали принимается равным 1,0 (см. Пункт 6.3).

Когда расчет предполагает определение необходимой высоты шва, данное уравнение принимает вид:

$$a \geq \frac{F_{w,Ed}}{f_{vw,d}}.$$

### 5 Базовая расчетная прочность

В данном методе расчета необходимо сравнить напряжения в сварном шве по фон Мизесу с базовой прочностью материала сварного шва. В общем случае для этого требуется определить напряжения  $\sigma_{\perp}$ ,  $\tau_{\perp}$ ,  $\tau_{\parallel}$  в шве. Таким образом, учитывается расположение шва в плоскости относительно направления действия результирующего усилия на единицу длины, приложенного к соединению. Расчет выполняется по Формуле (4.1) СН РК EN 1993-1-8:

$$\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2) \leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}};$$

где  $\sigma_{\perp}$  - нормальное напряжение, перпендикулярное сечению сварного шва;

$\tau_{\perp}$  - касательное напряжение (в плоскости сечения сварного шва), перпендикулярное продольной оси сварного шва;

$\tau_{\parallel}$  - касательное напряжение (в плоскости сечения сварного шва), параллельное продольной оси сварного шва.

Также, необходимо проверить отдельно нормальные напряжения:

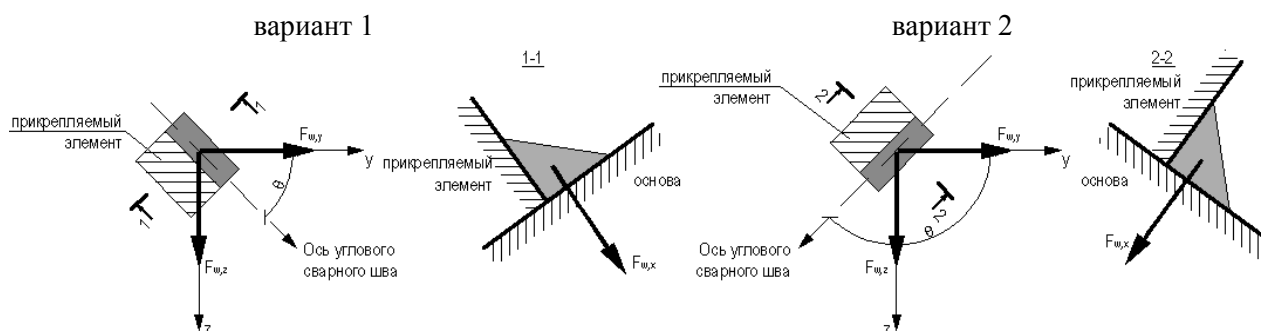
$$\sigma_{\perp} \leq \frac{0,9f_u}{\gamma_{M2}}.$$

В данном случае, для шва прямоугольного сечения с одинаковыми катетами, расположенного в одной плоскости, последняя проверка не является определяющей. Однако может быть таковой при сварном шве с неполным проваром со скошенными кромками.

Вместо расчета напряжений в шве, следующее уравнение может использоваться для расчета плоских (yOz) соединений прямоугольными швами с одинаковыми катетами:

$$2F_{w,x,Ed}^2 + 2F_{w,y,Ed}^2 + 2F_{w,z,Ed}^2 + F_{w,y,Ed}^2 \cos^2 \theta + F_{w,z,Ed}^2 \sin^2 \theta - 2F_{w,x,Ed} F_{w,y,Ed} \sin \theta + 2F_{w,x,Ed} F_{w,z,Ed} \cos \theta + \\ + 2F_{w,y,Ed} F_{w,z,Ed} \sin \theta \cos \theta \leq \left( a \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}} \right)^2,$$

где  $\theta$  – угол между y-y и осью шва, см. Рисунок 2.



**Рисунок 2 – Направление компонентов усилий в сварных швах**

Расчет по определению компонентов усилий в критических точках шва приведен ниже.

6 Расчет по упрощенному методу (по прочности сварного шва на срез)

Расчетная прочность на срез в упрощенном методе определяется по Формуле (4.4) СН РК EN 1993-1-8:

$$f_{vw,d} = \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2} \sqrt{3}} = \frac{520}{1,0 \times 1,25 \times \sqrt{3}} \approx 240 \text{ Н / мм}^2.$$

Величина результирующего усилия, приложенного к единице длины соединения с высотой катета в 1 мм:

$$F_{w,Ed} = \sqrt{F_{wx,Ed}^2 + F_{wy,Ed}^2 + F_{wz,Ed}^2} = \sqrt{243^2 + 747^2 + 966^2} = 1245 \text{ Н/мм}.$$

Тогда необходимая высота катета будет равна:

$$a = \frac{F_{w,Ed}}{f_{vw,d}} = \frac{1245}{240} \approx 5,1 \text{ мм}.$$

7 Расчет сварного шва по методу базовой расчетной прочности

Базовая расчетная прочность материала шва определяется по Формуле (4.1) СН РК EN 1993-1-8,:

$$\frac{0,9f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{0,9 \times 520}{1,25} = 374,4 \text{ Н/мм}^2,$$

где  $f_u$  – граница прочности на растяжение наиболее слабой из соединяемых деталей.

В точке (а), где угол  $\theta$  равен  $0^\circ$ , расчетное проверочное уравнение принимает вид:

$$2F_{wx,Ed}^2 + 3F_{wy,Ed}^2 + 2F_{wz,Ed}^2 + F_{wx,Ed}F_{wz,Ed} \leq \left( a \frac{f_u}{\gamma_{Mw}} \right)^2.$$

Тогда необходимая высота катета:

$$a \geq \frac{\sqrt{2 \times (-243)^2 + 3 \times (747)^2 + 2 \times (966)^2 + 2 \times (-243) \times (966)}}{374,4} = 4,77 \text{ мм}.$$

Принимается высота шва 5 мм и считается, что шов имеет полную высоту по всей длине.

Понижающий коэффициент необходим для расчета соединений внахлест при длине углового шва более 150а. Данный коэффициент кажется менее значимым для рассматриваемого типа соединений. И все-таки, в качестве меры предосторожности, рассматривая полную длину сварного шва и высоту катета 5 мм, получаем:

$$\beta_{LW,1} = 1,2 - 0,2L_j / (150a) = 1,2 - 0,2(600) / (150 \times 5) = 1,04;$$

принимается  $\beta_{LW,1} = 1,0$  согласно Формуле (4.9) СН РК EN 1993-1-8, то есть, понижающий коэффициент использовать не нужно.

8 Вычисление компонентов усилий в критических точках шва

В конструкции предусмотрено два идентичных соединения по обе стороны колонны, воспринимающие приложенные усилия. Только одно из них необходимо проверить. Оно расположено в плоскости  $уОz$ .

Площадь сечения шва, положение его центра масс и критических точек.

Площадь шва (сечение сопротивления) каждого из соединений, выполненных из прямолинейных сегментов длиной  $L_i$  с постоянной высотой катета,  $a$ , на каждый 1 мм высоты катета:

$$\frac{A_w}{a} = \frac{a \int ds}{a} = \frac{\sum A_{w,i}}{a} = \frac{\sum aL_{w,i}}{a} = \sum L_i = (2 \times 175 + 250) = 600 \text{ мм}^2 / \text{м}.$$

Расстояние от центра тяжести от вертикальной грани (параллельной оси  $z-z$ ) соединения с постоянным катетом в достой  $a$ :

$$\bar{y} = \frac{\sum \bar{y}_i (A_{w,i} / a)}{\sum A_{w,i} / a} = \frac{\sum \bar{y}_i L_i}{L_i} = \frac{2 \times (87,5 \times 175) + (0 \times 250)}{600} \approx 51 \text{ мм}.$$

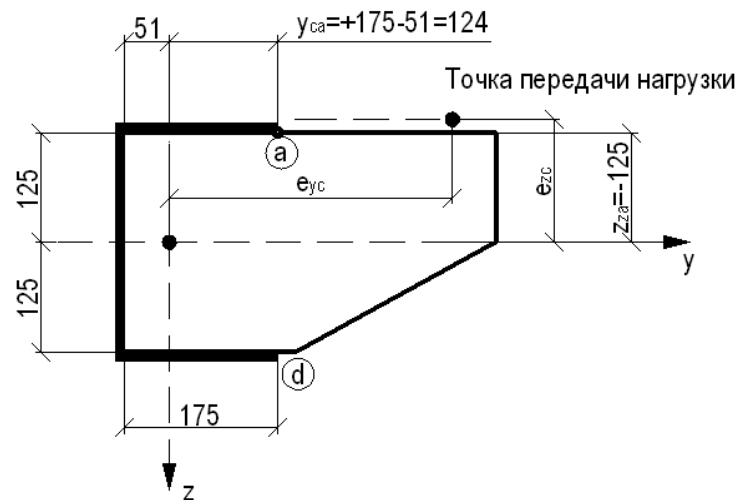


Рисунок 3 - Схема расположения критических точек

Координаты критической точки соединения, точки (a), относительно главных осей, проходящих через центр тяжести (C):

$$y_{ca} = +(175 - 51) = +124 \text{ мм}, \quad z_{ca} = -125 \text{ мм}.$$

В качестве критической точки может также быть выбрана точка (d), для которой:

$$y_{cd} = +(175 - 51) = +124 \text{ мм}, \quad z_{cd} = +125 \text{ мм}.$$

Однако, для данного нагружения очевидно, что точка (a) – наиболее критическая.

Моменты инерции рабочей площади соединения. Для каждого из соединений, на 1 мм высоты катета:

$$\frac{I_{yc}}{a} = \int z_c^2 ds = 2 \times 175 \times 125^2 + 250^3 / 12 = 6,77 \times 10^6 \text{ мм}^4 / \text{мм};$$

$$\frac{I_{zc}}{a} = \int y_c^2 ds = 250 \times 51^2 + 2 \times 175^3 / 12 + 2 \times 175 \times (87,5 - 51)^2 = 210 \text{ мм}^4 / \text{мм}.$$

Для «кручения», момент инерции относительно соответствующей оси:

$$I_{xc} = a \int r_c^2 ds = a \int y_c^2 ds + a \int z_c^2 ds = I_{zc} + I_{yc},$$

$$\text{тогда } \frac{I_{xc}}{a} = (6,77 + 2,01) \times 10^6 = 8,78 \times 10^6 \text{ мм}^4 / \text{мм}.$$

Приложенные силы и моменты.

Принято, что сосредоточенные усилия и моменты приложены равномерно к обоим соединениям. Компоненты, приложенных осевых и срезающих усилий:

$$N_{x,Ed} = -\frac{20}{2} = -10 \text{ кН}; \quad N_{y,Ed} = +\frac{30}{2} = +15 \text{ кН}; \quad N_{z,Ed} = +\frac{300}{2} = +150 \text{ кН}.$$

Приложенные моменты вычисляются по компонентам сосредоточенных усилий и их эксцентриситетам. Эксцентриситеты, т.е. координаты точки приложения эффективной нагрузки:

$$e_{xc} = 0, \text{ так как нагрузка приложена в плоскости } yOz \text{ соединения;}$$

$$e_{yc} = (300 - 100 + 175 - 51) = +324 \text{ мм};$$

$$e_{zc} = -140 \text{ мм}.$$

Приложенные моменты на единицу высоты катета составляют:

$$M_{xc,Ed} = e_{yc} N_{z,Ed} - e_{zc} N_{y,Ed} = (+324) \times (+150) - (-140) \times (+15) = +50,7 \text{ кНм};$$

$$M_{yc,Ed} = e_{zc} N_{x,Ed} - e_{xc} N_{z,Ed} = (-140) \times (-10) - (0) \times (+150) = +1,4 \text{ кНм};$$

$$M_{zc,Ed} = e_{xc} N_{y,Ed} - e_{yc} N_{x,Ed} = (0) \times (+15) - (+324) \times (-10) = +3,24 \text{ кНм}.$$

Компоненты усилий в критических точках сварного шва. Для соединения, лежащего в плоскости  $uOz$ , компоненты усилий на единицу длины шва в точке (а) составляют:

$$F_{wx,Ed} = \frac{N_{x,Ed}}{A_w / a} + \frac{z_{ca} M_{yc,Ed}}{I_{yc} / a} - \frac{y_{ca} M_{zc,Ed}}{I_{zc} / a};$$

$$F_{wy,Ed} = \frac{N_{y,Ed}}{A_w / a} - \frac{z_{ca} M_{xc,Ed}}{I_{xc} / a};$$

$$F_{wz,Ed} = \frac{N_{z,Ed}}{A_w / a} + \frac{y_{ca} M_{xc,Ed}}{I_{xc} / a}.$$

Вклад сосредоточенных усилий в нагружение сварного шва определяется как:

$$F_{w,x}^{N_x} = \frac{N_{x,Ed}}{A_w / a} = \frac{-10}{600} = -0,017 \text{ кН / мм};$$

$$F_{w,y}^{N_y} = \frac{N_{y,Ed}}{A_w / a} = \frac{+15}{600} = +0,025 \text{ кН / мм};$$

$$F_{w,z}^{N_z} = \frac{N_{z,Ed}}{A_w / a} = \frac{+150}{600} = +0,25 \text{ кН / мм}.$$

Различные вклады моментных нагрузок в нагружение единицы длины сварного шва определяется как:

$$F_{w,y}^{M_{xc}} = -M_{xc,Ed} \frac{z_{c,a}}{(I_{xc} / a)} = -50,7 \times 10^6 \times \frac{(-125)}{8,78 \times 10^6} = +722 \text{ Н / мм};$$

$$F_{w,z}^{M_{xc}} = +M_{xc,Ed} \frac{y_{c,a}}{(I_{xc} / a)} = +50,7 \times 10^6 \times \frac{(+124)}{8,78 \times 10^6} = +716 \text{ Н / мм};$$

$$F_{w,x}^{M_{yc}} = +M_{yc,Ed} \frac{z_{c,a}}{(I_{yc} / a)} = +1,41 \times 10^6 \times \frac{(-125)}{6,77 \times 10^6} = -26 \text{ Н / мм};$$

$$F_{w,x}^{M_{zc}} = -M_{zc,Ed} \frac{y_{c,a}}{(I_{zc} / a)} = -3,24 \times 10^6 \times \frac{(+124)}{2,01 \times 10^6} = -200 \text{ Н / мм}.$$

Сочетание вкладов различных усилий в нагружение шва в критической точке (а):

$$F_{wx,Ed} = F_{w,x}^{N_x} + F_{w,x}^{M_{yc}} + F_{w,x}^{M_{zc}} = -17 - 26 - 200 = -243 \text{ Н / мм};$$

$$F_{wy,Ed} = F_{w,y}^{N_y} + F_{w,y}^{M_{xc}} = +25 + 722 = +747 \text{ Н / мм};$$

$$F_{wz,Ed} = F_{w,z}^{N_z} + F_{w,z}^{M_{xc}} = +250 + 716 = +966 \text{ Н / мм}.$$

Данные результирующие компоненты усилий на единицу длины представлены для сварного шва с высотой катета 1 мм по всей эффективной длине шва.

## **7 ТРЕБОВАНИЯ К ПРОЕКТИРОВАНИЮ КОНСТРУКЦИЙ НА ОСНОВЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИСПЫТАНИЙ**

7.1 Проектирование конструкций и их элементов из нержавеющей стали на основе результатов испытаний рекомендуется выполнять в соответствии с указаниями, приведенными:

- а) в Разделе 5.2 СН РК EN 1990;
- б) в Приложении D СН РК EN 1990;
- в) в Разделе 9 СН РК EN 1993-1-3;
- г) в Приложении A СН РК EN 1993-1-3.

7.2 (7(2)) Прототипы для испытаний должны производиться аналогичным образом, что и компоненты конечной продукции, так, чтобы они отражали тот же уровень механического упрочения.

7.3 (7(3)) Поскольку марки нержавеющей стали могут демонстрировать анизотропию, образцы должны готовиться из плиты или листа той же ориентации (т. е. перпендикулярно или параллельно направлению прокатки) что и конечная конструкция. Если конечная ориентация неизвестна или не может быть гарантирована, испытания должны быть проведены для обеих ориентаций, и должен быть принят наименее благоприятный результат.

## **8 ТРЕБОВАНИЯ К УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ**

При определении усталостной прочности конструкций и соединений (сварные, болтовые и др.) из нержавеющей стали необходимо учитывать требования СН РК EN 1993-1-9.

## **9 ТРЕБОВАНИЯ К ПРОЕКТИРОВАНИЮ КОНСТРУКЦИЙ С УЧЕТОМ ВОЗДЕЙСТВИЯ ПОЖАРА**

При проектировании конструкций с учетом воздействия пожара необходимо учитывать требования СН РК EN 1993-1-2 и использовать характеристики материалов при повышенных температурах, приведенные в Приложении C СН РК EN 1993-1-2.



---

УДК

МКС КПВЭД\*

**Ключевые слова:** Усталостная прочность конструкций, проектирование стальных конструкций, нержавеющая сталь, испытания, расчет и конструирование

---

*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 03-01-4.1-2011  
БОЛАТ КОНСТРУКЦИЯЛАРДЫ ЖОБАЛАУ  
1-11 бөлімі. Тот баспайтын болаттарға арналған қосымша 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 03-01-4.1-2011  
ПРОЕКТИРОВАНИЕ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ  
Часть 1-11. Дополнительные правила для нержавеющей стали**

Ответственные за выпуск: АО «КазНИИСА»

050046, г. Алматы, ул. Солодовникова, 21  
Тел./факс: +7 (727) 392-76-16 – приемная