

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

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

БОЛАТ КОНСТРУКЦИЯЛАРДЫ ЖОБАЛАУ 1-3 бөлімі. Қосылыстарды есептеу

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ Часть 1-3. Расчет соединений

НТҚ-03-01-8.1-2011
(ҚР ҚН EN 1993-1-3/2011 әзірленген)
НТП-03-01-8.1-2011
(к СН РК EN 1993-1-3/2011)

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
ЕНГІЗІЛДІ: | Қазақстан Республикасы Ұлттық экономика министрлігінің Құрылыс, тұрғын үй-коммуналдық шаруашылық істері және жер ресурстарын басқару комитетінің 2014 жылғы 29-желтоқсандағы № 156-НҚ бұйрығымен 2015 жылғы 1-шілдеден бастап |
| 4. ЕНГІЗІЛДІ: | Алғашқы рет |

ПРЕДИСЛОВИЕ

- | | |
|---|---|
| 1. РАЗРАБОТАН: | АО «КазНИИСА», ТОО «Астана Строй-Консалтинг» |
| 2. ПРИНЯТ И ВВЕДЕН
В ДЕЙСТВИЕ: | Управлением технического регулирования и нормирования Комитета по делам строительства, жилищно-коммунального хозяйства и управления земельными ресурсами Министерства национальной экономики Республики Казахстан |
| 3. ПРИНЯТ И ВВЕДЕН
В ДЕЙСТВИЕ: | Приказом Комитета по делам строительства, жилищно-коммунального хозяйства и управления земельными ресурсами Министерства Национальной экономики Республики Казахстан от 29.12.2014 № 156-НҚ с 1 июля 2015 года |
| 4. ВВЕДЕН: | Впервые |

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

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

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	VIII
1 ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ	1
1.1 Область применения	1
1.2 Нормативные ссылки	3
1.3 Условия применения	5
1.4 Различие между принципами и правилами применения	5
1.5 Термины и определения.....	5
1.6 Обозначения.....	5
1.7 Условные обозначения осей элементов	6
2 ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ	7
2.1 Условия применения	7
2.2 Общие требования.....	8
2.3 Приложенные силы и моменты.....	11
2.4 Несущая способность соединений.....	11
2.5 Расчетные предпосылки.....	12
2.6 Соединения, работающие на сдвиг, подверженные действию ударной, вибрационной и/или переменной нагрузок	12
2.7 Эксцентриситет в узлах	12
3 СОЕДИНЕНИЯ НА БОЛТАХ, ЗАКЛЕПКАХ И ШТИФТАХ.....	17
3.1 Болты, гайки и шайбы	17
3.1.1 Общие положения.....	17
3.1.2 Болты с предварительным натяжением	17
3.2 Заклепки	17
3.3 Фундаментные болты	18
3.4 Категории болтовых соединений.....	18
3.4.1 Соединения, работающие на сдвиг	18
3.4.2 Соединения, работающие на растяжение.....	21
3.5 Расположение отверстий для болтов и заклепок.....	21
3.6 Расчетная несущая способность одиночных крепежных деталей.....	25
3.6.1 Болты и заклепки	25
ПРИМЕР 1 Расчет болтового соединения двух металлических пластин внахлестку одним болтом.....	30
ПРИМЕР 2 Расчет болтового соединения между двумя металлическими пластинами с металлической прокладкой	34
3.6.2 Инъекционные болты	39
3.7 Группа крепежных деталей	42
ПРИМЕР 3 Расчет болтового соединения между двумя пластинами	42
3.8 Протяженные соединения.....	44
ПРИМЕР 4 Расчет болтового протяженного соединения	45
3.9 Фрикционные соединения на болтах классов прочности 8.8 и 10.9	49
3.9.1 Расчетная несущая способность на сдвиг поверхностей трения	49

3.9.2 Совместное действие растяжения и сдвига	50
3.9.3 Смешанные соединения.....	50
ПРИМЕР 5 Расчет болтового фрикционного соединения с предварительным натяжением.....	51
3.10 Учет отверстий для крепежных деталей.....	57
3.10.1 Общие положения	57
3.10.2 Расчет крайней зоны на вырыв материала (выкол).....	58
ПРИМЕР 6 Расчет крайней зоны элемента на вырыв материала при болтовом соединении.....	58
3.10.3 Одиночные уголки, прикрепляемые одной полкой, и другие несимметрично прикрепляемые элементы, работающие на растяжение.....	65
3.10.4 Соединительные уголки.....	66
ПРИМЕР 7 Расчет болтового соединения металлического равнополочного уголка, прикрепляемый одной полкой, к металлической пластине.....	67
ПРИМЕР 8 Расчет болтового соединения одиночного металлического равнополочного уголка, прикрепляемой одной полкой, к металлической фасонке.....	73
3.11 Усилия отрыва (эффект рычага)	74
3.12 Распределение усилий между крепежными деталями в предельном состоянии по несущей способности	75
ПРИМЕР 9 Расчет прочности крепления второстепенной балки к основной балке через вертикальную накладку.....	75
ПРИМЕР 10 Расчет болтового соединения балки к колонне посредством равнополочных уголков	84
3.13 Соединения на штифтах	88
3.13.1 Общие положения	88
3.13.2 Расчет штифтов.....	90
ПРИМЕР 11 Расчет штифтового соединения.....	91
4 СВАРНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ.....	96
4.1 Общие положения	96
4.2 Материалы для сварных соединений	102
4.3 Геометрические параметры и размеры	102
4.3.1 Типы сварных швов.....	102
4.3.2 Угловые сварные швы.....	102
4.3.3 Круговые угловые сварные швы.....	103
4.3.4 Стыковые сварные швы	104
4.3.5 Пробочные сварные швы	105
4.3.6 Сварные швы с конусным зазором	106
4.4 Сварка с применением стальной прокладки.....	106
4.5 Расчетная несущая способность угловых сварных швов.....	106
4.5.1 Длина сварных швов	106
4.5.2 Эффективная толщина сварного шва	107
4.5.3 Определение несущей способности угловых сварных швов	107
ПРИМЕР 12 Пример расчета сварного соединения между металлическими пластинами по направленному методу	109

ПРИМЕР 13 Пример расчета сварного соединения металлической пластины к полке двутавра по направленному методу	113
ПРИМЕР 14 Пример расчета сварного соединения равнополочного уголка к металлической колонне по упрощенному методу	117
4.6 Расчетная несущая способность круговых угловых сварных швов	119
4.7 Расчетная несущая способность стыковых сварных швов.....	119
4.7.1 Стыковые сварные швы с полным проваром.....	119
4.7.2 Стыковые сварные швы с неполным проваром.....	119
4.7.3 Стыковые сварные швы в соединениях в тавр	120
4.8 Расчетная несущая способность пробочных сварных швов	120
4.9 Распределение усилий.....	121
ПРИМЕР 15. Пример расчета сварного прерывистого соединения между двумя металлическими пластинами	121
4.10 Крепление к полкам, не подкрепленным поперечными ребрами жесткости.....	125
ПРИМЕР 16. Пример расчета сварного соединения квадратной трубы к полке двутавра, которая не подкреплена поперечными ребрами жесткости.....	126
4.11 Протяженные соединения.....	129
ПРИМЕР 17. Пример расчета сварного протяжного соединения между двумя металлическими пластинами	130
4.12 Угловые и односторонние стыковые сварные швы с неполным проваром, подверженные внецентренному нагружению.....	133
4.13 Уголки, прикрепляемые одной полкой	133
4.14 Сварка в холоднодеформированных зонах.....	135
5 АНАЛИЗ, КЛАССИФИКАЦИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ	136
5.1 Статический расчет	136
5.1.1 Общие положения.....	136
5.1.2 Упругий расчет	136
5.1.3 Жестко-пластический расчет.....	137
5.1.4 Упруго-пластический расчет	138
5.1.5 Статический расчет ферм.....	138
5.2 Классификация узлов	141
5.2.1 Общие положения.....	141
5.2.2 Классификация по жесткости	141
5.2.3 Классификация по прочности.....	143
5.3 Моделирование сопряжения балки с колонной	144
ПРИМЕР 18 Расчет определения несущей способности полужесткого узла.....	148
6 УЗЛЫ СОПРЯЖЕНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ ДВУТАВРОВ	157
6.1 Общие положения	157
6.1.1 Основные положения	157
6.1.2 Конструктивные свойства.....	157
6.1.3 Основные компоненты узла.....	161
6.2 Расчетная несущая способность.....	165
6.2.1 Внутренние усилия	165
6.2.2 Поперечные силы.....	165

6.2.3 Изгибающие моменты.....	167
6.2.4 Эквивалентный Т-образный элемент, работающий на растяжение	168
6.2.5 Эквивалентный Т-образный элемент, работающий на сжатие.....	173
6.2.6 Расчетная несущая способность основных компонентов.....	175
6.2.7 Расчетная несущая способность сопряжений балки с колонной и стыковых соединений.....	200
6.2.8 Расчетная несущая способность баз колонн с опорными плитами	206
6.3 Вращательная жесткость	211
6.3.1 Базовая модель	211
6.3.2 Коэффициенты жесткости для основных компонентов узлов	218
6.3.3 Узлы с опорными фланцами, прикрепляемые двумя и более рядами растянутых болтов	218
6.3.4 Базы колонн.....	221
6.4 Вращательная способность	222
6.4.1 Общие положения	222
6.4.2 Болтовые узловые соединения	223
6.4.3 Сварные узловые соединения.....	224
ПРИМЕР 19. Расчет по определению толщины опорной металлической плиты размерами 440×440 мм под колонну из прокатного профиля НЕВ 260	224
7 УЗЛЫ СОПРЯЖЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ЗАМКНУТОГО ПРОФИЛЯ	228
7.1 Общие положения	228
7.1.1 Область применения.....	228
7.1.2 Условия применения	230
7.2 Расчет.....	233
7.2.1 Общие положения	233
7.2.2 Виды отказа узлов сопряжения элементов замкнутого профиля	236
7.3 Сварные швы	240
7.3.1 Расчетная несущая способность.....	240
7.4 Сварные узлы сопряжения элементов из круглых труб	241
7.4.1 Общие положения	241
7.4.2 Плоские узлы	241
7.4.3 Пространственные узлы.....	249
ПРИМЕР 20. Расчет Т-образного узла сопряжения элементов из круглых труб	250
ПРИМЕР 21. Расчет К-образного узла сопряжения элементов из круглых труб	255
7.5 Сварные узлы сопряжения стержней решетки из круглых или прямоугольных труб с поясами из прямоугольных труб.....	260
7.5.1 Общие положения	260
7.5.2 Плоские узлы	261
7.5.3 Пространственные узлы.....	276
ПРИМЕР 22. Расчет Т-образного узла сопряжения стержней решетки из квадратных труб с поясами из квадратных труб	277
ПРИМЕР 23. Расчет К-образного узла сопряжения стержней решетки из квадратных труб с поясами из квадратных труб	285
7.6 Сварные узлы сопряжения стержней решетки из круглых или	

прямоугольных труб с поясом из двутавров	293
ПРИМЕР 24. Расчет Т-образного узла сопряжения стержней решетки из круглых труб с поясами из двутавров.....	298
7.7 Сварные узлы сопряжения стержней решетки из круглых или прямоугольных труб с поясами из швеллера	304
ПРИМЕР 25. Расчет К-образного узла сопряжения стержней решетки из круглых труб с поясами из швеллера.....	307
Приложение А (<i>информационное</i>) Справочная информация по расположению отверстий в прокатных профилях.....	315
Приложение Б (<i>информационное</i>) Вспомогательные таблицы для расчета болтовых соединений.....	325
Приложение В (<i>информационное</i>) Значения понижающего коэффициента χ для соответствующих кривых потери устойчивости	328
Приложение Г (<i>информационное</i>) Вспомогательные таблицы классов сечений	333

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. 1-3 БӨЛІМІ. ҚОСЫЛЫСТАРДЫ
ЕСЕПТЕУ

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СТАЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ. ЧАСТЬ 1-3. РАСЧЕТ
СОЕДИНЕНИЙ

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

1.2.1.1 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;

НТП-03-01-8.1-2011

б) НТП к СН РК EN 1991;

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, 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-технических пособий к СН РК EN 1993-1-8

1.1.3.1 В настоящем пособии изложены методы расчета и конструирования соединений (болтовых, сварных, заклепочных), подверженных действию статических нагрузок для сталей марок 1235; 1275; 1355 и 1460.

1.1.3.2 Настоящее пособие состоит из 7 разделов:

Раздел 1: Общие положения;

Раздел 2: Основные положения по проектированию;

Раздел 3: Соединения на болтах, заклепках штифтах;

Раздел 4: Сварные соединения;

Раздел 5: Анализ, классификация и моделирование;

Раздел 6: Узлы сопряжения конструктивных элементов из двутавров;

Раздел 7: Узлы сопряжения элементов замкнутого профиля.

1.1.3.3 Разделы с 1 по 10 настоящего пособия повторяют структуру норматива СН РК EN 1993.

В них даются разъяснения по разделам и пунктам СН РК EN 1993-1-8. В настоящем пособии номера пунктов к СН РК EN 1993 приведены в скобках.

1.1.3.3.1 Раздел 1 содержит общие положения расчета соединений;

1.1.3.3.2 В Разделе 2 приведены правила проектирования соединений, работающих на сдвиг, подверженные действию статических, ударных, вибрационных и переменных нагрузок;

1.1.3.3.3 В Разделе 3 даны требования к материалам, используемым при устройстве соединений, особенности расчета и конструирования болтовых и заключенных штифтовых соединений;

1.1.3.3.4 Расчету сварных соединений посвящен Раздел 4, в котором рассмотрены требования к материалам и даны положения по расчету и конструированию различных типов соединений;

1.1.3.3.5 Расчет узлов соединения балки с колонной, включая классификацию узлов и способы их расчета и моделирования представлены в Разделе 5;

1.1.3.3.6 Раздел 6 содержит особенности проектирования узлов с применением двутавровых профилей;

1.1.3.3.7 Проектированию узлов с применением замкнутых профилей рассмотрено в Разделе 7.

1.2. Нормативные ссылки

1.2.1. В настоящем пособии 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):

HTП-03-01-8.1-2011

- EN 10025-1;
- EN 10025-2;
- EN 10025-3;
- EN 10025-4;
- EN 10025-5;
- EN 10025-6;
- EN 10034:1993;
- EN 10051:1991;
- EN 10055:1995;
- EN 10056-1:1995;
- EN 10056-2:1993;
- EN 10164:1993;
- EN 10164:1993;
- EN 10219-2:1997;
- EN 10210-1:1994;
- EN 10210-2:1997;
- EN 14399-1:2002;
- EN 14399-2:2002;
- EN 14399-3:2002;
- EN 14399-4:2002;
- EN 14399-5:2002;
- EN 14399-6:2002;
- EN ISO 898-1:1999;
- EN 20898-2:1993;
- EN ISO 2320:1997;
- EN ISO 4014:2000;
- EN ISO 4016:2000;
- EN ISO 4017:2000;
- EN ISO 4018:2000;
- EN ISO 4032:2000;
- EN ISO 4033:2000;
- EN ISO 7042:1997;
- EN ISO 7719:1997;
- ISO 286-2:1988;
- ISO 1891:1979;
- EN ISO 7089:2000;
- EN ISO 10513:1997;
- EN 12345:1998;
- EN ISO 14555:1998;
- EN ISO 13918:1998;
- EN 288-3:1992;
- EN 1090-2;
- EN ISO 5817:2003.

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 1993-1-5,

которые необходимы для расчета и конструирования соединений элементов стальных конструкций.

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 1993-1-5,

которые необходимы для расчета и конструирования соединений элементов стальных конструкций.

1.6.2 В дополнение к обозначению символов, перечисленных в Пункте 1.6.1. настоящего пособия, используются символы согласно Пункту 1.6 СН РК EN 1993-1-8.

1.7 Условные обозначения осей элементов

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

2 ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПО ПРОЕКТИРОВАНИЮ

2.1 Условия применения

Методы расчета, приведенные в настоящей части СН РК EN 1993, применяются при условии соответствия строительного стандарта ссылочным стандартам, приведенным в Пункте 1.2 настоящего пособия, и применения строительных материалов и изделий, указанных в СН РК EN 1993. Для проектирования стальных конструкций и их соединений рекомендуется использовать ниже приведенные марки сталей с соответствующими физико-механическими характеристиками.

Таблица 2.1 - Номинальные значения предела текучести f_y и временного сопротивления на растяжение f_u горячекатаной конструкционной стали

Стандарт и марка стали	Номинальная толщина элемент t , мм			
	$t \leq 40$		$40 < t \leq 80$	
	f_y , Н/мм ²	f_u , Н/мм ²	f_y , Н/мм ²	f_u , Н/мм ²
EN 10025-2				
S 235	235	360	215	360
S 275	275	430	255	410
S 355	355	510	335	470
S 450	440	550	410	550
EN 10025-3				
S 275 N/NL	275	390	255	370
S 355 N/NL	355	490	335	470
S 420 N/NL	420	520	390	520
S 460 N/NL	460	540	430	540
EN 10025-4				
S 275 M/ML	275	370	255	360
S 355 M/ML	355	470	335	450
S 420 M/ML	420	520	390	500
S 46 M/ML	460	540	430	530
EN 10025-5				
S 235 W	235	360	215	340
S 355 W	355	510	335	490
EN 10025-6				
S 460 Q/QL/QL1	460	570	440	550
EN 10210-1				
S 235 H	235	360	215	340
S 275 H	275	430	255	410
S 355 H	355	510	335	490
S 275 NH/NLH	275	390	255	370
S 355 NH/NLH	355	490	335	470
S 420 NH/NHL	420	540	390	520
S 460 NH/NLH	460	560	430	550

Таблица 2.1 - Номинальные значения предела текучести f_y и временного сопротивления на растяжение f_u горячекатаной конструкционной стали
(продолжение)

Стандарт и марка стали	Номинальная толщина элемента t , мм			
	$t \leq 40$		$40 < t \leq 80$	
	f_y , Н/мм ²	f_u , Н/мм ²	f_y , Н/мм ²	f_u , Н/мм ²
EN 10219-1				
S 235 H	235	360		
S 275 H	275	430		
S 355 H	355	510		
S 275 NH/NLH	275	370		
S 355 NH/NLH	355	470		
S 460 NH/NLH	460	550		
S 275 MH/MLH	275	360		
S 355 MH/MLH	355	470		
S 420 MH/MLH	420	500		
S 460 MH MLH	460	530		
* При выполнении расчетов номинальные значения параметров свойств материалов, приведенные в данной таблице, следует принимать как нормативные. Для других марок сталей см. Национальное Приложение. или соответствующие технические условия на материалы и изделия.				

2.2 Общие требования

2.2.1 Расчетная несущая способность всех соединений должна удовлетворять всем основным требованиям, приведенным в Пунктах 2.2.2-2.2.6 настоящего пособия.

2.2.2 Несущую конструкцию следует проектировать и строить таким образом, чтобы она в процессе строительства и в течение проектного срока эксплуатации с необходимой надежностью и экономичностью выдерживала возможные воздействия и влияния и сохраняла требуемые эксплуатационные показатели.

2.2.3 Основные требования должны быть выполнены путем расчета по методу предельных состояний с использованием частных коэффициентов безопасности:

1) γ_f - частный коэффициент безопасности для воздействия, учитывающий возможность неблагоприятного отклонения воздействия по отношению к характерным значениям (см Пункт 6.3.1 настоящего пособия);

2) γ_{sd} - частный коэффициент безопасности для учета погрешностей (см. Пункт 6.3.2 настоящего пособия):

- в расчетной модели влияний;
- в расчетной модели воздействий;

3) γ_F - частный коэффициент безопасности для воздействий с учетом погрешностей модели и отклонений величин (см. Пункт 6.3.2 настоящего пособия);

4) γ_{Rd} - частный коэффициент безопасности для учета погрешности модели сопротивления, включая геометрические отклонения (см. Пункт 6.3.5 настоящего пособия);

5) η - коэффициент перерасчета для показателей образца и определяющих показателей элемента конструкции, который в среднем учитывает влияние (см. Пункт 6.3.3 настоящего пособия): эффектов объема и масштаба; влажности и температуры; других основных параметров;

6) γ_m - частный коэффициент безопасности для показателя строительного материала или изделия, который включает следующее (см. Пункт 6.3.3 настоящего пособия):

- возможность неблагоприятных отклонений показателя строительного материала или изделия от нормативного значения;

- рассеяние коэффициента перерасчета η ;

7) γ_M - частный коэффициент безопасности для показателя строительного элемента с учетом погрешностей модели и отклонений величин (см. Пункт 6.3.5 настоящего пособия).

2.2.4 При выполнении статического расчета с целью определения усилий наружки и сочетания нагрузок должны быть определены в соответствии требованиям приведенных в СН РК EN 1991.

2.2.5 Должны быть учтены следующие воздействия на несущие конструкции:

- 1) удельный вес - постоянные и временные нагрузки на здания;
- 2) общие воздействия - воздействия для определения огнестойкости;
- 3) общие воздействия - снеговые нагрузки;
- 4) общие воздействия - ветровые воздействия;
- 5) общие воздействия - температурные воздействия;
- 6) общие воздействия - воздействия при производстве строительных работ;
- 7) общие воздействия - особые воздействия;
- 8) транспортные нагрузки на мосты;
- 9) воздействия, вызванные кранами и механическим оборудованием;
- 10) бункеры и резервуары;
- 11) сочетания нагрузок, приведенных в СН РК EN 1991;

2.2.6 Частные коэффициенты безопасности γ_m для соединений приведены в Таблице

2.2.

Таблица 2.2 - Частные коэффициенты безопасности для соединений

Несущая способность элементов и поперечных сечений	γ_{M0}, γ_{M1} и γ_{M2} , см. СН РК EN 1993-1-1	Рекомендуемы е значения
Несущая способность болтов	γ_{M2}	$\gamma_{M2} = 1,25$
Несущая способность заклепок		
Несущая способность штифтов		
Несущая способность сварных швов		
Несущая способность пластин на смятие		
Несущая способность на сдвиг контактных поверхностей:		
- в предельном состоянии по несущей способности (категория С)	γ_{M3}	$\gamma_{M3} = 1,25$
- в предельном состоянии по эксплуатационной пригодности (категория В)	$\gamma_{M3,ser}$	$\gamma_{M3,ser} = 1,1$
Несущая способность инъекционных болтов на смятие	γ_{M4}	$\gamma_{M4} = 1,0$
Несущая способность узлов ферм из замкнутых профилей	γ_{M5}	$\gamma_{M5} = 1,0$
Несущая способность штифтов в предельном состоянии по эксплуатационной пригодности	$\gamma_{M6,ser}$	$\gamma_{M6,ser} = 1,0$
Предварительное натяжение высокопрочных болтов	γ_{M7}	$\gamma_{M7} = 1,1$
Несущая способность бетонных элементов	γ_c , см. СН РК EN 1992	

ПРИМЕЧАНИЕ 1 Численные значения коэффициентов безопасности γ_M могут быть определены в Национальном Приложении.

ПРИМЕЧАНИЕ 2 Частный коэффициент безопасности γ_{M0} при определении несущей способности поперечных сечений по прочности независимо от класса; γ_{M1} - частный коэффициент безопасности при определении несущей способности элемента по устойчивости; γ_{M2} - частный коэффициент безопасности при определении несущей способности поперечных сечений с использованием временного сопротивления стали; γ_c - частный коэффициент безопасности для бетона.

2.2.7 При расчете железобетонных конструкций и изделий частные коэффициенты для материалов используемые при определение несущей способности приведены в Таблице 2.3

Таблица 2.3 - Частные коэффициенты для материалов для предельных состояний по несущей способности

Расчетная ситуация	γ_c для бетона
Постоянная и переходная	1,5
Особая	1,2

2.2.8 При расчете соединений подверженные усталостным нагрузкам, должны удовлетворять также принципам изложенным в СН РК EN 1993-1-9, где представляются методы для оценки сопротивления усталости элементов конструкций, соединений и узлов, подвергающихся действию переменных нагрузок, которые основываются на испытаниях на усталость крупноразмерных образцов, с учетом влияния конструктивных и структурных дефектов, связанных с производством и изготовлением конструкций (например, влияние допусков и остаточных напряжений при сварке).

2.2.9 Методы оценки, приведенные в данной части, применимы ко всем маркам строительных сталей и нержавеющей сталей, за исключением специально отмеченных в таблицах категорий элементов; данная часть относится только к материалам, соответствующим требованиям прочности

2.2.10 Элементы конструкций должны быть запроектированы с расчетом на такое сопротивление усталости, чтобы их эксплуатация была надежной с требуемой вероятностью в течение всей проектной долговечности усталостные воздействия определяются в соответствии с требованиями оценки сопротивления усталости. Они отличаются от воздействий для контроля предельного состояния по потере несущей способности и предельного состояния по пригодности к эксплуатации

2.3 Приложенные силы и моменты

Силы и моменты, приложенные к соединениям в предельном состоянии по несущей способности, следует определять согласно принципам СН РК EN 1993-1-1

2.4 Несущая способность соединений

2.4.1 Несущую способность соединения следует определять, исходя из несущих способностей его основных компонентов.

2.4.2 При расчете соединений можно применять линейно-упругий или упруго-пластический расчет.

2.4.3 Если для восприятия усилия среза используются крепежные детали различной жесткости, то расчетная нагрузка должна быть воспринята крепежными деталями наибольшей жесткости. Исключение из этого правила расчета приведено в Пункте 3.9.3 настоящего пособия.

2.5 Расчетные предпосылки

2.5.1 Соединения следует рассчитывать на основе реалистичной предпосылки о распределении внутренних сил и моментов. Для определения распределения внутренних усилий используются следующие предпосылки:

- 1) внутренние силы и моменты, принимаемые при расчете, находятся в равновесии с силами и моментами, приложенными к соединению;
- 2) каждый элемент соединения обладает достаточной несущей способностью для восприятия внутренних сил и моментов;
- 3) деформации, соответствующие принятому распределению, не превышают предельные деформации крепежных деталей или сварных швов и соединяемых деталей;
- 4) допускаемое распределение внутренних усилий должно быть реалистичным по отношению к погонным жесткостям в пределах соединения;
- 5) деформации, допускаемые в любой расчетной модели при упруго-пластическом расчете, основаны на вращениях жесткого тела и/или на физически возможных деформациях в плоскости;
- 6) каждая используемая модель согласуется с оценкой результатов испытаний (см. СН РК EN 1990).

2.5.2 Правила применения, приведенные в настоящей части, выполняют условия Пункта 2.5(а) настоящего пособия.

2.6 Соединения, работающие на сдвиг, подверженные действию ударной, вибрационной и/или переменной нагрузок

2.6.1 Если соединение, работающее на сдвиг, подвержено ударному воздействию или значительной вибрации, следует использовать один из следующих способов соединения:

- 1) сварка;
- 2) болты с запорным устройством;
- 3) болты с предварительным натяжением;
- 4) инъекционные болты;
- 5) другие типы болтов, которые эффективно препятствуют сдвигу соединенных частей;
- 6) заклепки.

2.6.2 Если в соединении не допускается сдвиг контактных поверхностей (при действии переменной нагрузки или по любой другой причине), следует применять болты с предварительным натяжением в соединениях категории В или С (см. Пункт 3.4 настоящего пособия), призонные болты (см. Пункт 3.6.1 настоящего пособия), заклепки или сварку.

2.6.3 Для ветровых связей и/или связей, обеспечивающих устойчивость в соединениях категории А (см. Пункт 3.4 настоящего пособия) допускается применение болтов.

2.7 Эксцентриситет в узлах

2.7.1 При наличии эксцентриситета в узле, соединения и элементы следует рассчитывать на действие результирующих моментов и сил, за исключением особых типов конструкций, для которых показано, что в этом нет необходимости, см. Пункт 5.1.5 настоящего пособия.

2.7.2 При соединении уголков или тавров одним или двумя рядами болтов следует учитывать любой возможный эксцентриситет, как показано в Пункт 2.7(а) настоящего пособия.

Эксцентриситеты в плоскости или из плоскости следует определять, исходя из положения центральной оси элемента и рисок в плоскости соединения (см. Рисунок 2.1). Для растянутого одиночного уголка, прикрепляемого одной полкой болтами, можно использовать упрощенный метод расчета, приведенный в Пункте 3.10.3 настоящего пособия.

2.7.3 При решетках из одиночных уголков и если ветви обеспечивают соответствующее заземление концов элементов решетки, а концевые соединения стержней обеспечивают соответствующее жесткое крепление (по крайней мере, два болта в болтовом соединении), то эксцентриситетом можно пренебречь и стержни решетки рассчитываются как сжатые элементы. Эффективная условная гибкость $\bar{\lambda}_{\text{eff}}$ может быть определена следующим образом:

- 1) $\bar{\lambda}_{\text{eff},v} = 0,35 + 0,7\bar{\lambda}_v$ - при проверке устойчивости относительно оси $v - v$;
- 2) $\bar{\lambda}_{\text{eff},y} = 0,50 + 0,7\bar{\lambda}_y$ - при проверке устойчивости относительно оси $y - y$;
- 3) $\bar{\lambda}_{\text{eff},z} = 0,50 + 0,7\bar{\lambda}_z$ - при проверке устойчивости относительно оси $z - z$,

где $\bar{\lambda}$ определена в Пункте 6.3.1.2 настоящего пособия. Численные значения понижающего коэффициента χ для соответствующей условной гибкости $\bar{\lambda}$ можно определить по графику на Рисунке 6.4

2.7.4 При центральном сжатии элементов значение χ в зависимости от условной гибкости $\bar{\lambda}$ следует определять по соответствующей кривой потери устойчивости по формуле:

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \quad - \text{при } \chi \leq 1,0,$$

$$\text{где } \Phi = 0,5 \cdot [1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2];$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{Af_y}{N_{\text{cr}}}} \quad - \text{для поперечных сечений классов 1, 2 и 3;}$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{\text{eff}} f_y}{N_{\text{cr}}}} \quad - \text{для поперечных сечений класса 4,}$$

здесь α - коэффициент, учитывающий начальные несовершенства;

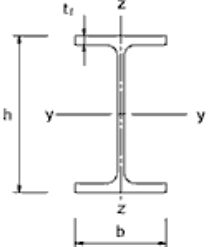
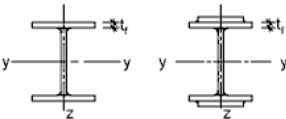

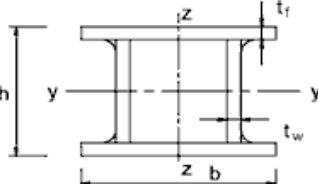
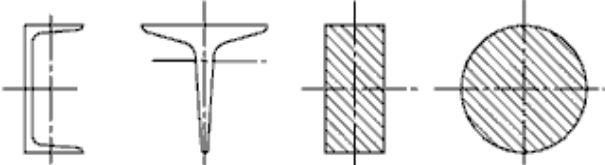

N_{cr} - критическая сила для соответствующей формы потери устойчивости в упругой стадии, зависящая от характеристик поперечного сечения брутто.

Коэффициент α , соответствующий определенной кривой потери устойчивости, принимается по Таблицам 2.4 и 2.5.

Таблица 2.4 - Коэффициент, учитывающий начальные несовершенства для кривых потери устойчивости при центральном сжатии

Кривая потери устойчивости	a ₀	a	b	c	d
Коэффициент α	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76

Таблица 2.5 - Выбор кривой потери устойчивости

Поперечные сечения		Пределы		Потеря устойчивости относительно оси	Кривая потери устойчивости	
					S235 S275 S355 S420	S460
Прокатные сечения		$h/b > 1,2$	$t_f \leq 40$ мм	y – y z – z	a b	a_0 a_0
			$40 \text{ мм} < t_f \leq 100$ мм	y – y z – z	b c	a a
		$h/b \leq 1,2$	$t_f \leq 100$ мм	y – y z – z	b c	a a
			$t_f > 100$ мм	y – y z – z	d d	c c
Сварные двутавровые сечения		$t_f \leq 40$ мм		y – y z – z	b c	b c
Замкнутые сечения		Горячедеформированные		Все	a	a_0
		Холоднодеформированные		Все	c	c
Сварные коробчатые сечения		В целом (в общем случае) (кроме перечисленных ниже)		Все	b	b
		С толщиной сварных швов: $a > 0,5t_f$ $b/t_f < 30$ $h/t_w < 30$		Все	c	C
Швеллеры, тавры и сплошные сечения				Все	c	c
Уголки				Все	b	B

2.7.5 Численные значения понижающего коэффициента χ для соответствующей условной гибкости $\bar{\lambda}$ можно определить по графику на Рисунке 2.1. При гибкости $\bar{\lambda} \leq 0,2$ или при $\frac{N_{Ed}}{N_{cr}} \leq 0,04$ потерей устойчивости можно пренебречь и проверять поперечное сечение только на прочность.

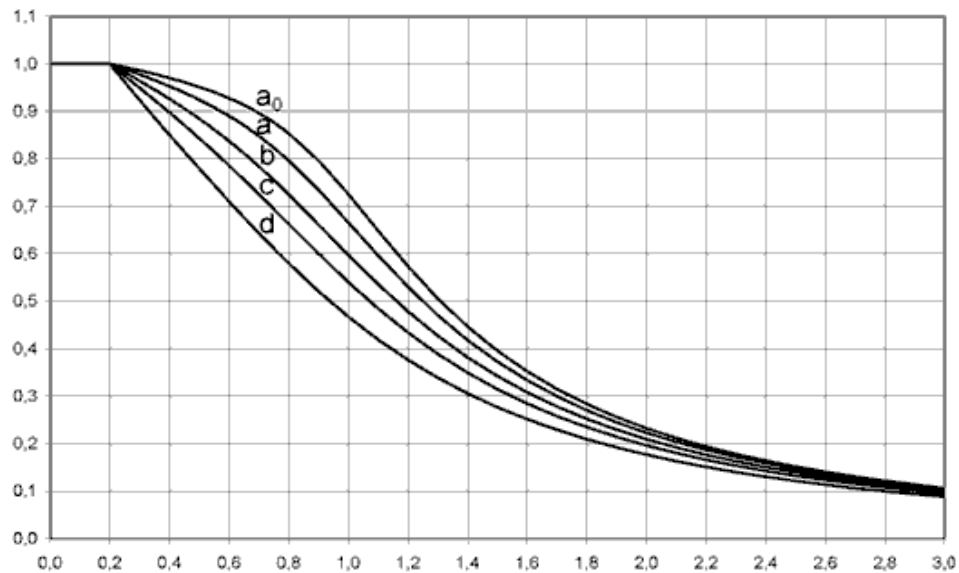


Рисунок 2.1 - Кривые потери устойчивости

ПРИМЕЧАНИЕ Влияние эксцентриситета на уголки, используемые в качестве сжатых элементов решетки, рассмотрено в Пункте ВВ 1.2 (Приложение ВВ) СН РК EN 1993-1-1.

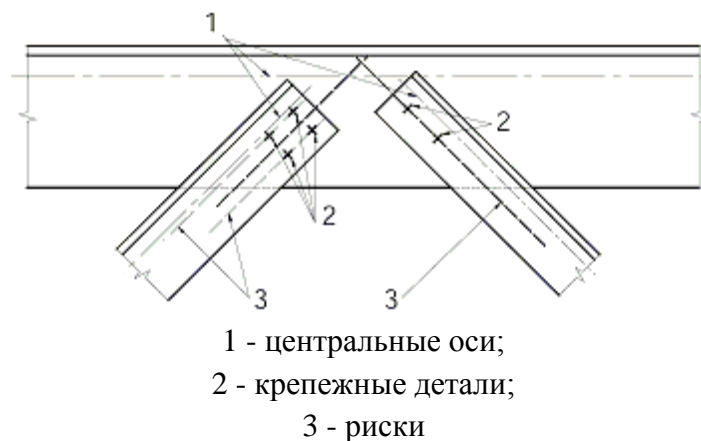


Рисунок 2.2 - Риски

3 СОЕДИНЕНИЯ НА БОЛТАХ, ЗАКЛЕПКАХ ИЛИ ШТИФТАХ

3.1 Болты, гайки и шайбы

3.1.1 Общие положения

3.1.1.1 Болты, гайки и шайбы должны соответствовать приведенным в ссылочных стандартах группы 4 (см. Пункт 1.2.4 настоящего пособия)

3.1.1.2 Правила, приведенные в настоящем пособии, действительны для болтов классов прочности, приведенных в Таблице 3.1.

3.1.1.3 Значения предела текучести f_{yb} и временного сопротивления на растяжение f_{ub} для болтов классов прочности 4.6, 4.8, 5.6, 5.8, 6.8, 8.8 и 10.9 приведены в Таблице 3.1. Эти значения следует принимать в качестве характеристических значений при выполнении расчетов.

Таблица 3.1 - Номинальные значения предела текучести f_{yb} и временного сопротивления на растяжение f_{ub} болтов

Класс прочности	4.6	4.8	5.6	5.8	6.8	8.8	10.9
f_{yb} , Н/мм ²	240	320	300	400	480	640	900
f_{ub} , Н/мм ²	400	400	500	500	600	800	1000

ПРИМЕЧАНИЕ В Национальном Приложении могут быть исключены некоторые классы прочности болтов.

3.1.2 Болты с предварительным натяжением

В качестве болтов с предварительным натяжением могут использоваться только болты классов прочности 8.8 и 10.9, соответствующие требованиям ссылочных стандартов группы 4 для высокопрочных болтов с контролируемым предварительным натяжением (см. 1.2.4) и требованиям ссылочных стандартов группы 7 (см. Пункт 1.2.7 настоящего пособия).

3.2 Заклепки

Физические свойства материалов, размеры и допуски для стальных заклепок должны отвечать требованиям ссылочных стандартов группы 6 (см. Пункт 1.2.6 настоящего пособия).

3.3 Фундаментные болты

Для фундаментных болтов могут быть использованы следующие материалы:

а) стали марок по ссылочным стандартам группы 1 (см. Пункт 1.2.1 настоящего пособия);

б) стали марок по ссылочным стандартам группы 4 (см. Пункт 1.2.4 настоящего пособия);

в) стали марок, применяемых для предварительно напряженных арматурных стержней по EN 10080:2005 Арматурная сталь для бетона. Свариваемая арматурная сталь. Общие положения при условии, что номинальное значение предела текучести не превышает 640 Н/мм² при работе фундаментных болтов на срез и 900 Н/мм² - в остальных случаях.

3.4 Категории болтовых соединений

3.4.1 Соединения, работающие на сдвиг

Болтовые соединения, работающие на сдвиг, следует рассчитывать, как одно из следующих категорий:

а) Категория А: срезное соединение.

В данной категории следует применять болты классов прочности 4.6–10.9. Предварительное натяжение и особые условия для контактных поверхностей не требуются. Расчетное усилие сдвига не должно превышать несущей способности на срез, определяемой по Пункту 3.6 настоящего пособия, и на смятие, определяемой по Пунктам 3.6 и 3.7 настоящего пособия;

б) Категория В: фрикционное соединение в предельном состоянии по эксплуатационной пригодности. В данной категории следует применять болты с предварительным натяжением согласно Пункту 3.1.2 настоящего пособия. В предельном состоянии по эксплуатационной пригодности не должно быть деформаций сдвига между контактными поверхностями. Расчетное усилие сдвига в предельном состоянии по эксплуатационной пригодности не должно превышать расчетной несущей способности на сдвиг контактных поверхностей, определенной по Пункту 3.9 настоящего пособия. Расчетное усилие сдвига в предельном состоянии по несущей способности не должно превышать расчетной несущей способности на срез, определенной по Пункту 3.6 настоящего пособия, и на смятие, определенной по Пункту 3.6 и 3.7 настоящего пособия;

в) Категория С: фрикционное соединение в предельном состоянии по несущей способности.

В данной категории следует применять болты с предварительным натяжением согласно Пункту 3.1.2 настоящего пособия. В предельном состоянии по несущей способности не должно быть деформаций сдвига между контактными поверхностями. Расчетное усилие сдвига в предельном состоянии по несущей способности не должно превышать расчетной несущей способности на сдвиг контактных поверхностей, определенной по Пункту 3.9 настоящего пособия, а также расчетной несущей способности на срез и на смятие, определенной по Пункту 3.6 и 3.7 настоящего пособия. Кроме того, при соединении растянутых элементов, следует проверять расчетную несущую способность поперечного сечения нетто $N_{net,Rd}$ в пластической стадии в месте расположения болтовых отверстий (см. Пункт 6.2 СН РК EN 1993-1-1) в предельном состоянии по несущей способности, где расчетное значение растягивающей силы N_{Ed} в

каждом поперечном сечении должно удовлетворять условию:

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

В соединениях категории С (см. Пункт СН РК EN 1993-1-8, 3.4.1(1)), расчетное значение несущей способности при растяжении $N_{t,Rd}$ для поперечного сечения нетто при наличии отверстий для болтов следует принимать равным $N_{net,Rd}$ по формуле:

$$N_{net,Rd} = \frac{A_{net} f_y}{\gamma_{M0}}.$$

где: A_{net} - площадь поперечного сечения нетто;
 f_y - предел текучести;
 γ_{M0} - частный коэффициент безопасности при определении несущей способности поперечных сечений по прочности независимо от класса.

Проверки для данных категорий соединений сведены в Таблицу 3.2.

Таблица 3.2 - Категории болтовых соединений

Категория	Критерий	Примечание
Соединения, работающие на сдвиг		
А Срезное соединение	$F_{v,Ed} \leq F_{v,Rd}$ $F_{v,Ed} \leq F_{b,Rd}$	Предварительное натяжение не требуется. Могут использоваться болты классов 4.6–10.9
В Фрикционное соединение в предельном состоянии по эксплуатационной пригодности	$F_{v,Ed,ser} \leq F_{s,Rd,ser}$ $F_{v,Ed} \leq F_{v,Rd}$ $F_{v,Ed} \leq F_{b,Rd}$	Следует применять болты класса 8.8 или 10.9 с предварительным натяжением. Несущая способность на сдвиг контактных поверхностей в предельном состоянии по эксплуатационной пригодности определяется по Пункту 3.9 настоящего пособия.
С Фрикционное соединение в предельном состоянии по несущей способности	$F_{v,Ed} \leq F_{s,Rd}$ $F_{v,Ed} \leq F_{b,Rd}$ $F_{v,Ed} \leq N_{net,Rd}$	Следует применять болты класса 8.8 или 10.9 с предварительным натяжением. Несущая способность на сдвиг контактных поверхностей в предельном состоянии по несущей способности определяется по Пункту 3.9 настоящего пособия. $N_{net,Rd}$ - см. Пункт 3.4.1(в) настоящего пособия.
Соединения, работающие на растяжение		

Таблица 3.2 - Категории болтовых соединений (продолжение)

D Соединение без предварительного натяжения болтов	$F_{t,Ed} \leq F_{t,Rd}$ $F_{t,Ed} \leq B_{p,Rd}$	Предварительное натяжение не требуется. Могут использоваться болты классов 4.6–10.9. $B_{p,Rd}$ определяется по Таблице 3.4
E Соединение с предварительным натяжением болтов	$F_{t,Ed} \leq F_{t,Rd}$ $F_{t,Ed} \leq B_{p,Rd}$	Следует применять болты класса 8.8 или 10.9 с предварительным натяжением. $B_{p,Rd}$ определяется по Таблице 3.4
ПРИМЕЧАНИЕ Расчетное растягивающее усилие $F_{t,Ed}$ должно включать возможное усилие отрыва вследствие эффекта рычага, см. Пункт 3.11 настоящего пособия. Болты, подверженные усилию сдвига совместно с растягивающим усилием, должны также удовлетворять условиям, приведенным в Таблице 3.4.		

ПРИМЕЧАНИЕ Если предварительное натяжение не используется при расчетах несущей способности на сдвиг контактных поверхностей, но требуется при изготовлении или как показатель качества (например, для повышения долговечности), то значение усилия предварительного натяжения может быть определено в Национальном Приложении.

3.4.2 Соединения, работающие на растяжение

Болтовые соединения, работающие на растяжение, следует рассчитывать, как одну из следующих категорий:

а) категория D: соединение без предварительного натяжения болтов.

В данной категории следует применять болты классов прочности 4.6–10.9.

Предварительное натяжение не требуется. Соединения данной категории не следует применять при частом воздействии переменной растягивающей нагрузки. Однако они могут применяться в соединениях, воспринимающих осевые усилия от ветровых нагрузок.

б) категория E: соединение с предварительным натяжением болтов.

В данной категории следует применять болты классов прочности 8.8–10.9 с контролируемым предварительным натяжением в соответствии со ссылочными стандартами группы 7 (см. 1.2.7).

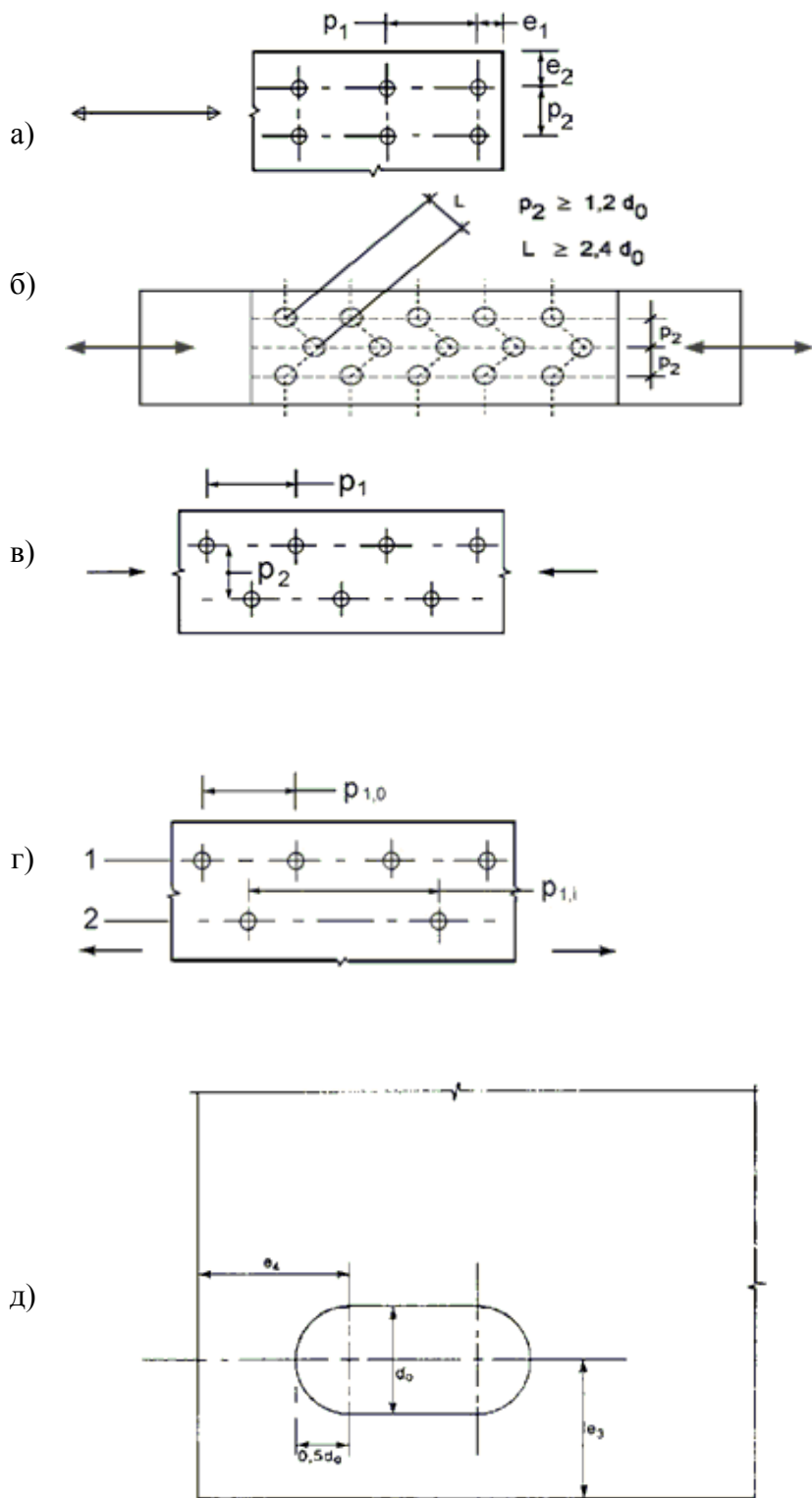
Проверки для данных категорий соединений сведены в таблицу 3.2

3.5 Расположение отверстий для болтов и заклепок

3.5.1 Минимальные и максимальные значения шага, расстояний до края элемента вдоль и поперек усилия для болтов и заклепок приведены в Таблице 3.3.

**Таблица 3.3 - Минимальные и максимальные значения шага,
расстояний до края элемента**

Расстояние или шаг, см. Рисунок 3.1	Минимальное значение	Максимальное значение ^{1),2),3)}		
		Конструкции, изготовленные из сталей соответствующих EN 10025, кроме сталей соответствующих EN 10025-5		Конструкции, изготовленные из сталей соответствующих EN 10025-5
		Сталь подвержена влиянию атмосферной или другой коррозии	Сталь не подвержена влиянию атмосферной или другой коррозии	Используемая сталь
Расстояние до края вдоль усилия e_1	$1,2d_0$	$4t + 40$ мм		Наибольшее из $8t$ или 125 мм
Расстояние до края поперек усилия e_2	$1,2d_0$	$4t + 40$ мм		Наибольшее из $8t$ или 125 мм
Расстояние для овальных отверстий e_3	$1,5d_0^{4)}$			
Расстояние для овальных отверстий e_4	$1,5d_0^{4)}$			
Шаг $p_1^{5)}$	$2,2d_0$	Наименьшее из $14t$ или 200 мм	Наименьшее из $14t$ или 200 мм	Наименьшее из $14t_{min}$ или 175 мм
Шаг $p_{1,0}$		Наименьшее из $14t$ или 200 мм		
Шаг $p_{1,i}$		Наименьшее из $28t$ или 400 мм		
Дорожка p_2	$2,4d_0$	Наименьшее из $14t$ или 200 мм	Наименьшее из $14t$ или 200 мм	Наименьшее из $14t_{min}$ или 175 мм
¹⁾ Максимальные значения шага, расстояний до края и кромки элемента не ограничены, кроме случаев: - для сжатых элементов во избежание местной потери устойчивости и коррозии незащищенных элементов; - для растянутых элементов, не защищенных от коррозии, во избежание ее возникновения. ²⁾ Несущую способность по местной устойчивости сжатых пластин на участках между крепежными деталями следует определять по СН РК EN 1993-1-1.				



Обозначения
расстояний при
рядовом расположении
отверстий

Обозначения
расстояний при
расположении
отверстий в шахматном
порядке

Расположение
отверстий в шахматном
порядке
в сжатых элементах
 $p_1 \leq 14t$ и ≤ 200 мм;
 $p_2 \leq 14t$ и ≤ 200 мм

Расположение
отверстий в шахматном
порядке
в растянутых
элементах:
 $p_{1,0} \leq 14t$ и ≤ 200 мм;
 $p_{1,i} \leq 28t$ и ≤ 400 мм;
1 - крайний ряд;
2 - средний ряд

Расстояния до края
элемента для овальных
отверстий

Рисунок 3.1 - Обозначения расстояний между отверстиями,
расстояний до края элемента

3.5.2 Минимальные и максимальные значения шага, расстояний до края элемента вдоль и поперек усилия для конструкций, подверженных усталостным нагрузкам, должны быть определены с учетом влияния размеров поперечного сечения, связанное с толщиной

или другими конструктивными особенностями детали, необходимо учитывать, как указано в Таблице 3.4 настоящего пособия, при этом предел выносливости определяется по формуле:


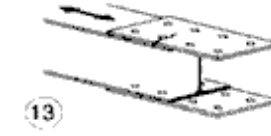
$$\Delta\sigma_{C,red} = k_s \cdot \Delta\sigma_C.$$

Таблица 3.4 - Плоские элементы и механические соединения

№	Элемент конструкции	Описание	Требования	
112		8) Симметричное соединение с двойными накладками, с высокопрочными болтами с предварительным натяжением	8) $\Delta\sigma$ вычисляется по сечению брутто	Для болтовых соединений (элементы 8) – 13)) в целом
		8) Симметричное соединение с двойными накладками, инъекционными ⁵⁾ болтами с предварительным натяжением	8) $\Delta\sigma$ вычисляется по сечению брутто	Расстояние от края элемента до центра болтового отверстия $e_1 \geq 1,5d$
9		9) Соединение с двойными накладками, болты повышенной точности	9) $\Delta\sigma$ вычисляется по сечению нетто	Расстояние до края $e_2 > 1,5d$
		9) Соединение с двойными накладками, инъекционными болтами без предварительного натяжения	9) $\Delta\sigma$ вычисляется по сечению нетто	
		10) Соединение с односторонними накладками и высокопрочными болтами с предварительным натяжением	10) $\Delta\sigma$ вычисляется по сечению брутто	Шаг болтов $p_1 > 2,5d$
		10) Соединение с односторонними накладками и инъекционными болтами с предварительным натяжением	10) $\Delta\sigma$ вычисляется по сечению брутто	
		11) Элементы конструкций с отверстиями, нагруженные изгибающим моментом и продольным усилием	11) $\Delta\sigma$ вычисляется по сечению нетто	Шаг болтов $p_2 > 2,5d$
				Обозначение по EN 1993-1-8, Рисунок 3.1

Таблица 3.4 - Плоские элементы и механические соединения

(продолжение)

№	Элемент конструкции	Описание	Требования	
80		12) Соединение с односторонними накладками, с болтами повышенной точности 13) Соединение с односторонними накладками и инъекционными болтами без предварительного натяжения	12) $\Delta\sigma$ вычисляется по сечению нетто	
50		13) Соединение с односторонними накладками или симметричное соединение с двойными накладками, болтами нормальной точности без предварительного натяжения. Без изменения направления вектора усилия	13) $\Delta\sigma$ вычисляется по сечению нетто	

3.6 Расчетная несущая способность одиночных крепежных деталей

3.6.1 Болты и заклепки

3.6.1.1 Расчетные значения несущей способности одиночных крепежных деталей в соединениях, подверженных сдвигу и/или растяжению, приведены в Таблице 3.4.

3.6.1.2 Расчетное значение усилия предварительного натяжения $F_{p,Cd}$ болтов согласно Пункту 3.1.2(а) настоящего пособия определяется по формуле:

$$F_{p,Cd} = 0,7f_{ub} A_s / \gamma_{M7}. \quad (3.1)$$

ПРИМЕЧАНИЕ Если предварительное натяжение не учитывается при расчете, см. примечание к Таблице 3.2.

3.6.1.3 Расчетные значения несущей способности на растяжение и на срез по резьбовой части болта, приведенные в Таблице 3.4, следует применять только для болтов, изготовленных в соответствии со ссылочными стандартами группы 4 (см. Пункт 1.2.4 настоящего пособия). Для элементов с резьбой, таких как фундаментные болты или стержни связей (тяжи), изготовленных из круглого проката с резьбой, выполненной согласно Требованиям к изготовлению стальных конструкций следует использовать соответствующие значения из Таблицы 3.4. Для болтов, резьба которых не соответствует Требованиям к изготовлению стальных конструкций, соответствующие значения из Таблицы 3.5 настоящих норм следует умножать на коэффициент 0,85.

3.6.1.4 Расчетное значение несущей способности на срез $F_{v,Rd}$, приведенное в Таблице 3.5, следует использовать только для болтов в отверстиях с номинальным зазором, не превышающим зазор для нормальных отверстий, установленный в ссылочных стандартах группы 7 (см. Пункт 1.2.7 настоящего пособия).

3.6.1.5 Болты М12 и М14 можно использовать также в отверстиях с зазором, равным 2 мм при условии, что расчетное значение несущей способности группы болтов на смятие больше или равно расчетному значению несущей способности группы болтов на срез. Кроме того, для болтов классов прочности 4.8, 5.8, 6.8, 8.8 и 10.9 расчетное значение несущей способности на срез $F_{v,Rd}$ следует принимать равным значению, приведенному в Таблице 3.5, умноженному на 0,85.

3.6.1.6 Призонные болты следует рассчитывать аналогично расчету болтов, установленных в нормальные отверстия.

3.6.1.7 Резьба призонных болтов не должна располагаться в плоскости среза.

Таблица 3.5 - Несущая способность одиночных крепежных деталей, подверженных срезу и/или растяжению

Вид отказа	Болты	Заклепки
Срез одной плоскости	$F_{v,Rd} = \frac{\alpha_v f_{ub} A}{\gamma_{M2}}$ <p>а) если плоскость среза проходит через резьбовую часть болта ($A = A_s$, где A_s - площадь сечения болта нетто): для болтов классов прочности 4.6, 5.6 и 8.8 $\alpha_v = 0,6$; для болтов классов прочности 4.8, 5.8, 6.8 и 10.8 $\alpha_v = 0,5$;</p> <p>б) если плоскость среза проходит через гладкую часть болта (A - поперечное сечение болта брутто) $\alpha_v = 0,6$</p>	$F_{v,Rd} = \frac{0,6 f_{ur} A_0}{\gamma_{M2}}$
Смятие ^{1),2),3)}	$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \alpha_b f_u d t}{\gamma_{M2}},$ <p>где α_b - наименьшее из α_d, $\frac{f_{ub}}{f_u}$ и 1,0;</p> <p>а) вдоль усилия: для крайних болтов $\alpha_d = \frac{e_1}{3d_0};$ для средних болтов $\alpha_d = \frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4};$</p> <p>б) поперек усилия: для крайних болтов k_1 - наименьшее из $2,8 \frac{e_2}{d_0} - 1,7$ и 2,5; для средних болтов k_1 - наименьшее из $1,4 \frac{p_2}{d_0} - 1,7$ и 2,5</p>	

Таблица 3.5 - Несущая способность одиночных крепежных деталей, подверженных срезу и/или растяжению (продолжение)

Потеря несущей способности на растяжение ²⁾	$F_{t,Rd} = \frac{k_2 f_{ub} A_s}{\gamma_{M2}},$ <p>где $k_2 = 0,63$ - для болта с потайной головкой; $k_2 = 0,9$ - в остальных случаях</p>	$F_{t,Rd} = \frac{0,6 f_{ur} A_0}{\gamma_{M2}}$
Продавливание	$B_{p,Rd} = 0,6 \pi d_m t_p f_u / \gamma_{M2}$	Проверка не требуется
Совместное действие среза и растяжения	$\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} + \frac{F_{t,Ed}}{1,4 F_{t,Rd}} \leq 1,0$	
<p>¹⁾ Несущая способность на смятие $F_{b,Rd}$ болтов составляет:</p> <ul style="list-style-type: none"> - для отверстий с большим зазором - 0,8 несущей способности на смятие болтов, установленных в нормальные отверстия; - для овальных отверстий при передаче нагрузки перпендикулярно продольной оси отверстия - 0,6 от несущей способности на смятие болтов, установленных в нормальные круглые отверстия. <p>²⁾ Для болтов с потайной головкой:</p> <ul style="list-style-type: none"> - несущая способность на смятие $F_{b,Rd}$ определяется из условия равенства толщины элемента t толщине присоединяемого элемента, за вычетом половины глубины зенкерования; - при определении несущей способности на растяжение $F_{t,Rd}$ угол и глубина зенкерования должны соответствовать ссылочным стандартам группы 4 (см. Пункт 1.2.4 настоящего пособия). В противном случае несущая способность на растяжение $F_{t,Rd}$ должна быть обоснована соответствующим образом. <p>³⁾ Если усилие на болт не параллельно краю элемента, то проверка несущей способности на смятие может осуществляться отдельно на действие компонентов усилия, приложенных параллельно и перпендикулярно краю элемента.</p>		

3.6.1.8 Длина резьбовой части призонных болтов, расположенная в пределах толщины элемента, не должна превышать 1/3 его толщины, см. Рисунок 3.1.

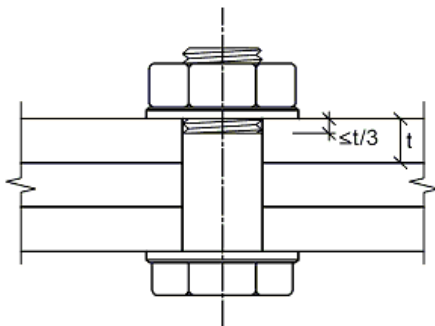


Рисунок 3.1 - Расположение резьбовой части призонных болтов

3.6.1.9 Допуск на диаметр отверстия для призонного болта должен соответствовать ссылочным стандартам группы 7 (см. Пункт 1.2.7 настоящего пособия).

3.6.1.10 При соединении элементов внахлестку одним рядом болтов, см. Рисунок 3.2, следует предусматривать шайбы как под головку болта, так и под гайку. Расчетное значение несущей способности болта на смятие $F_{b,Rd}$ не должно превышать:

$$F_{b,Rd} \leq 1,5f_u d t / \gamma_{M2}. \quad (3.2)$$

ПРИМЕЧАНИЕ Соединение элементов внахлестку одним рядом заклепок не допускается.

3.6.1.11 При соединении элементов внахлестку одним болтом или одним рядом болтов класса прочности 8.8 или 10.9, следует использовать закаленные шайбы.

3.6.1.12 При использовании болтов или заклепок, передающих усилия среза или смятия через прокладки общей толщиной t_p , большей, чем $1/3$ номинального диаметра d , см. Рисунок 3.4, расчетное значение несущей способности на срез $F_{v,Rd}$, вычисленное по таблице 3.4, следует умножать на понижающий коэффициент β_p , определяемый по формуле:

$$\beta_p = \frac{9d}{8d + 3t_p} \quad \text{при } \beta_p \leq 1. \quad (3.3)$$

3.6.1.13 В соединениях с двумя плоскостями среза, при наличии прокладок по обеим сторонам стыка, значение t_p следует принимать равным толщине более тонкой прокладки.

3.6.1.14 Заклепочные соединения следует рассчитывать на передачу усилий сдвига. В случае растяжения, расчетное значение растягивающего усилия $F_{t,Ed}$ не должно превышать расчетного значения несущей способности на растяжение $F_{t,Rd}$, приведенного в Таблице 3.5.

3.6.1.15 Для стали S235 значение f_{ur} после клепки может быть принято равным 400 Н/мм^2 .

3.6.1.16 Толщина стягиваемого заклепкой пакета листов, как правило, не должна превышать $4,5d$ при клепке молотком и $6,5d$ при клепке прессом.

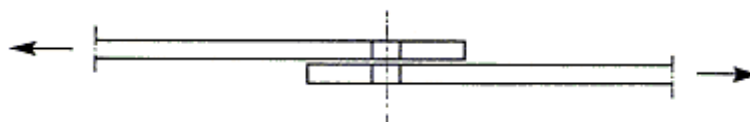


Рисунок 3.2 - Соединение внахлестку одним рядом болтов

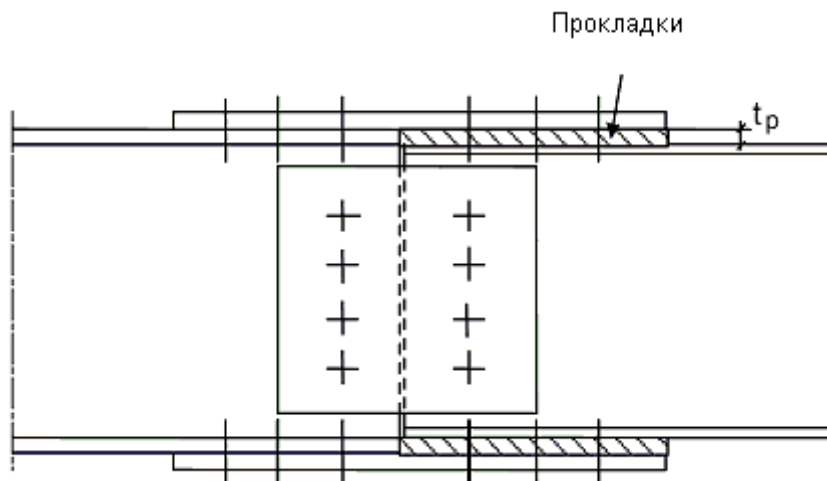


Рисунок 3.3 - Соединение с прокладками

ПРИМЕР 1 Расчет болтового соединения двух металлических пластин внахлестку одним болтом

Исходные данные: проверить прочность соединения двух металлических пластин внахлестку одним болтом. Соединение подвержено центральному растяжению силой $F_{Ed} = 40 \text{ кН}$ (см. Рисунок 1). Болт М16 класса прочности 5.6 с номинальным пределом текучести $f_{yb} = 300 \text{ Н/мм}^2$ и временным сопротивлением на растяжение $f_{ub} = 500 \text{ Н/мм}^2$. Металлические пластины выполнены из стали марки S355 с номинальным пределом текучести $f_y = 355 \text{ Н/мм}^2$.

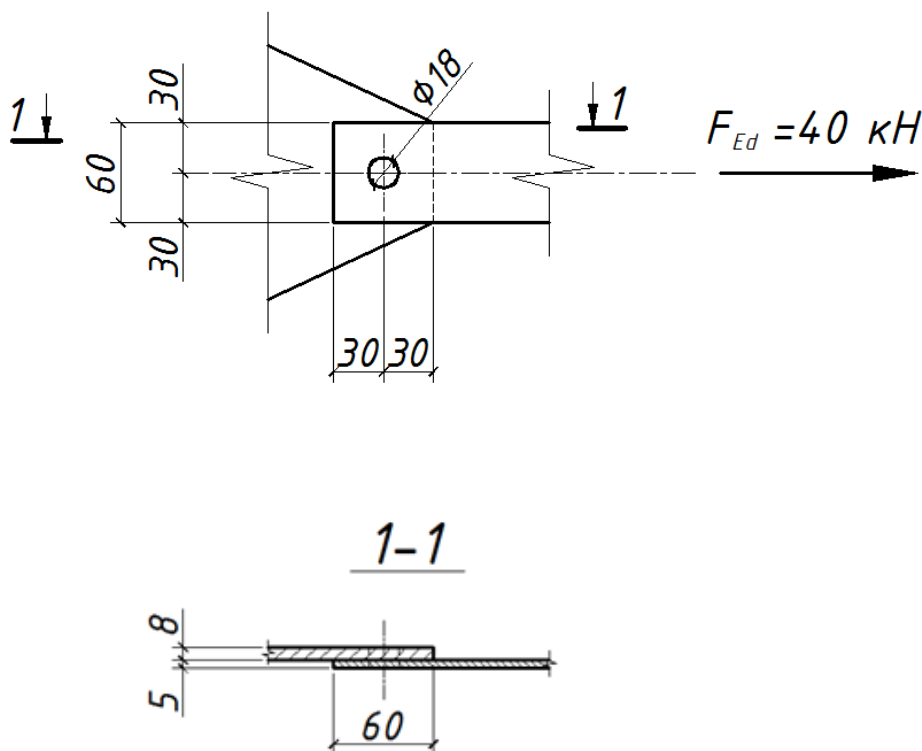


Рисунок 1 – Болтовое соединение внахлестку

2 Определение основных параметров соединения

2.1 Геометрические характеристики болта

Диаметр болта:

$$d = 16 \text{ мм}$$

Диаметр отверстия под болт:

$$d_0 = 18 \text{ мм}$$

Площадь поперечного сечения болта:

$$A = 201 \text{ мм}^2$$

2.2 Механические характеристики болта

Механические характеристики болта определяются по Таблице 3.1 СН РК EN 1993-1-8. Номинальный предел текучести $f_{yb} = 300 \text{ Н/мм}^2$ (для болтов класса прочности 5.6). Временное сопротивление на растяжение $f_{ub} = 500 \text{ Н/мм}^2$ (для болтов класса прочности 5.6).

2.3 Расстояние между отверстиями

Расстояние до края вдоль усилия $e_1 = 30 \text{ мм}$. По Таблице 3.3 СН РК EN 1993-1-8 размер величины e_1 должно быть в границах от $1,2d_0 = 1,2 \cdot 18 = 21,6 \text{ мм}$ до $8t = 8 \cdot 5 = 40 \text{ мм}$ или 125 мм .

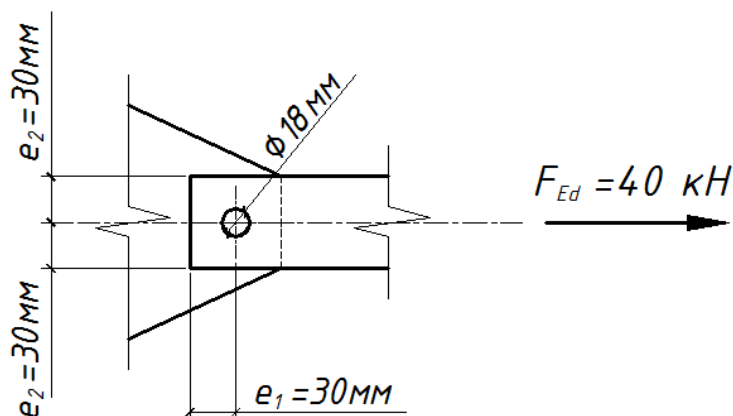


Рисунок 3 – Схема расположения отверстий

То есть:

$$e_1 = 30 \text{ мм} > 1,2d_0 = 1,2 \cdot 18 = 21,6 \text{ мм};$$

$$e_1 = 30 \text{ мм} < \max[8t = 8 \cdot 5 = 40 \text{ мм}; 125 \text{ мм}] = 125 \text{ мм}.$$

Расстояние до края поперек усилия $e_2 = 30 \text{ мм}$. По Таблице 3.3 СН РК EN 1993-1-8 размер величины e_2 должно быть в границах от $1,2d_0 = 1,2 \cdot 18 = 21,6 \text{ мм}$ до $8t = 8 \cdot 5 = 40 \text{ мм}$ или 125 мм .

То есть:

$$e_2 = 60 \text{ мм} > 1,2d_0 = 1,2 \cdot 18 = 21,6 \text{ мм};$$

$$e_2 = 60 \text{ мм} < \max[8t = 8 \cdot 5 = 40 \text{ мм}; 125 \text{ мм}] = 125 \text{ мм}.$$

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 Таблице 3.4 и Пункту 3.6.1(1) СН РК EN 1993-1-8).

Расчетная несущая способность одного болта на срез (см. Таблицу 3.4 СН РК EN 1993-1-8):

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

где α_V - параметр для болтов классов прочности 5.6 (см. Таблицу 3.4 СН РК EN 1993-1-8) равный:

$$\alpha_V = 0,6;$$

γ_{M2} - частный коэффициент безопасности (см. НП.2.13 СН РК EN 1993-1-1), равный:

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

f_{ub} - временное сопротивление на растяжение, равное:

$$f_{ub} = 500 \text{ Н/мм}^2;$$

A - площадь сечения болта нетто, равная:

$$A = 201 \text{ мм}^2.$$

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

$$F_{V,Rd} = \frac{\alpha_V f_{ub} A}{\gamma_{M2}} = \frac{0,6 \cdot 500 \cdot 201}{1,25} \cdot 10^{-3} = 48,24 \text{ кН}$$

Поперечная сила на один болт:

$$F_{V,Ed} = F_{Ed} = 40,0 \text{ кН}$$

Условие прочности:

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

Значит,

$$\frac{F_{V,Ed}}{F_{V,Rd}} = \frac{40}{48,24} = 0,83$$

Условие выполняется.

3.2 Несущая способность болтового соединения на смятие

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

Расчетная несущая способность одного болта на смятие (см. Таблицу 3.4 СН РК EN 1993-1-8):

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

где γ_{M2} - частный коэффициент безопасности (см. НП.2.13 СН РК EN 1993-1-1), равный:

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

f_u - номинальное значение временного сопротивления на растяжение (см. Таблицу 3,1 СН РК EN 1993-1-1), равное:

$$f_u = 510 \text{ Н/мм}^2;$$

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

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

$$\alpha_d = \frac{e_1}{3d_0} = \frac{30}{3 \cdot 18} = 0,55 \text{ (для крайних болтов)}$$

$$\frac{f_{ub}}{f_u} = \frac{500}{510} = 0,98$$

$$\alpha_b = \min \left[\alpha_d; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1.0 \right] = \min[0,55; 0,98; 1,0] = 0,55$$

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:

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

$$2,8 \frac{e_2}{d_0} - 1,7 = 2,8 \cdot \frac{30}{18} - 1,7 = 2,97$$

$$k_1 = \min(2,97; 2,5) = 2,5;$$

d - диаметр болта, равный:

$$d = 16 \text{ мм};$$

t - толщина пластины, равная:

$$t = 5 \text{ мм}.$$

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

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \alpha f_u d t}{\gamma_{M2}} = \frac{2,5 \cdot 0,55 \cdot 510 \cdot 16 \cdot 5}{1,25} \cdot 10^{-3} = 44,88 \text{ кН}.$$

Но согласно Пункту 3.6.1(10) СН РК EN 1993-1-8 расчетное значение несущей способности болта на смятие не должно превышать:

$$F_{b,Rd} = \frac{1,5 f_u d t}{\gamma_{M2}} \quad (3.2)$$

Значит,

$$F_{b,Rd} = \frac{1,5 f_u d t}{\gamma_{M2}} = \frac{1,5 \cdot 510 \cdot 16 \cdot 5}{1,25} = 49 \text{ кН} > 44,88$$

Условие выполняется.

Поперечная сила на один болт:

$$F_{V,Ed} = F_{Ed} = 40,0 \text{ кН}$$

Условие прочности:

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

Значит,

$$\frac{F_{V,Ed}}{F_{V,Rd}} = \frac{40,0}{44,88} = 0,89 < 1,0$$

Условие выполняется.

4 Расчет прочности 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 $N_{pl,Rd}$, $N_{u,Rd}$, $N_{net,Rd}$ (см. Пункт 6.2.3(2) СН РК EN 1993-1-1), то есть $N_{t,Rd} = \min[N_{pl,Rd}; N_{u,Rd}; N_{net,Rd}]$.

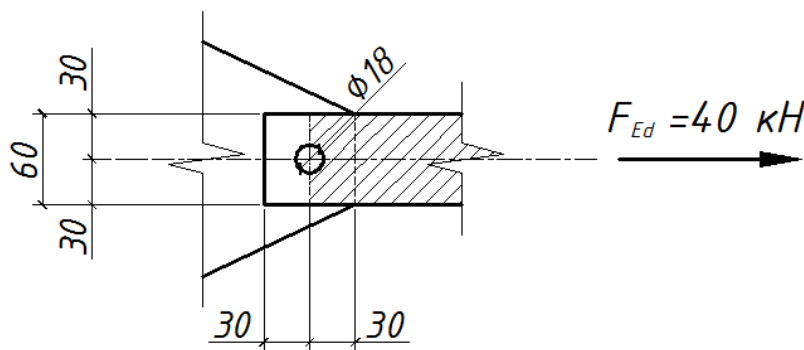


Рисунок 4 – Отрыв по ослабленному сечению

Условие прочности по Формуле (6.5) СН РК EN 1993-1-1:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} \leq 1,0 \quad (6.5)$$

Частные коэффициенты безопасности (см. НП.2.13 СН РК EN 1993-1-1):

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

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

Расчетное значение несущей способности поперечного сечения брутто в пластической стадии по Формуле (6.6) СН РК EN 1993-1-1:

$$N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (6.6)$$

Значит,

$$N_{pl,Rd} = \frac{60 \cdot 5 \cdot 355}{1,0} \cdot 10^{-3} = 106,5 \text{ кН}$$

Расчетное значение несущей способности поперечного сечения нетто в пластической стадии при наличии отверстий для болтов по Формуле (6.7) СН РК EN 1993-1-1:

$$N_{u,Rd} = \frac{0,9 A_{net} \cdot f_u}{\gamma_{M2}} \quad (6.7)$$

Значит,

$$N_{u,Rd} = \frac{0,9 \cdot (60 \cdot 5 - 18 \cdot 5) \cdot 510}{1,25} \cdot 10^{-3} = 77,1 \text{ кН}$$

Следовательно,

$$N_{t,Rd} = \min[N_{pl,Rd}; N_{u,Rd}] = \min[106,5; 77,1] = 77,1 \text{ кН}$$

Проверка условия:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} = \frac{40}{77,1} = 0,52 < 1,0$$

Условие выполняется.

ПРИМЕР 2 Расчет болтового соединения между двумя металлическими пластинами с металлической прокладкой

Исходные данные: определить несущую способность болтового соединения между двумя металлическими пластинами и металлической прокладкой между ними (см. Рисунок 1). Болты М16 – класса прочности 8.8 с номинальным пределом текучести $f_{yb} = 640 \text{ Н/мм}^2$ и временным сопротивлением на растяжение $f_{ub} = 800 \text{ Н/мм}^2$.

Все элементы болтового соединения выполнены из стали марки S355 с номинальным пределом текучести $f_y = 355 \text{ Н/мм}^2$ и временным сопротивлением на растяжение $f_u = 510 \text{ Н/мм}^2$.

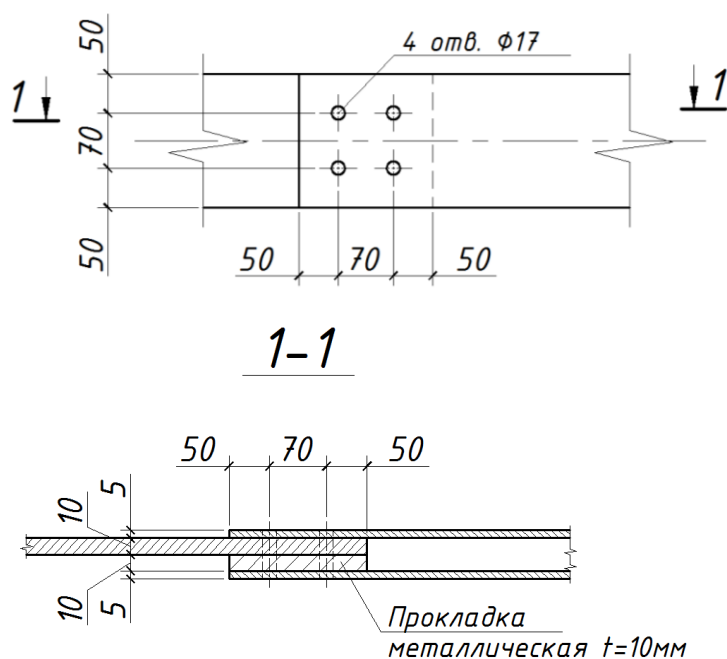


Рисунок 1 - Схема узла

2 Определение основных параметров соединения

2.1 Геометрические характеристики болта

Диаметр болта:

$$d = 16 \text{ мм}$$

Диаметр отверстия под болт:

$$d_0 = 18 \text{ мм}$$

Площадь поперечного сечения болта:

$$A = 201 \text{ мм}^2$$

2.2 Механические характеристики болта

Механические характеристики болта определяются по Таблице 3.1 СН РК EN 1993-1-8. Номинальный предел текучести $f_{yb} = 640 \text{ Н/мм}^2$ (для болтов класса прочности 8.8). Временное сопротивление на растяжение $f_{ub} = 800 \text{ Н/мм}^2$ (для болтов класса прочности 8.8).

2.3 Расстояние между отверстиями

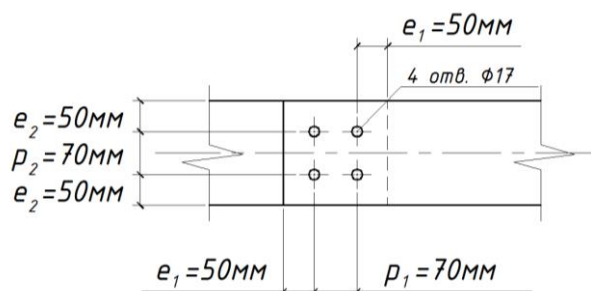


Рисунок 3 – Схема расположения отверстий

Расстояние до края вдоль усилия $e_1 = 50\text{мм}$. По Таблице 3.3 СН РК EN 1993-1-8 размер величины e_1 должно быть в границах от $1,2d_0 = 1,2 \cdot 18 = 21,6\text{мм}$ до $8t = 8 \cdot 10 = 80\text{мм}$ или 125мм .

То есть:

$$e_1 = 50\text{мм} > 1,2d_0 = 1,2 \cdot 18 = 21,6\text{мм};$$

$$e_1 = 50\text{мм} < \max[8t = 8 \cdot 10 = 80\text{мм}; 125\text{мм}] = 125\text{мм}.$$

Расстояние до края поперек усилия $e_2 = 50\text{мм}$. По Таблице 3.3 СН РК EN 1993-1-8 размер величины e_2 должно быть в границах от $1,2d_0 = 1,2 \cdot 18 = 21,6\text{мм}$ до $8t = 8 \cdot 10 = 80\text{мм}$ или 125мм .

То есть:

$$e_2 = 50\text{мм} > 1,2d_0 = 1,2 \cdot 18 = 21,6\text{мм};$$

$$e_2 = 50\text{мм} < \max[8t = 8 \cdot 10 = 80\text{мм}; 125\text{мм}] = 125\text{мм}.$$

Шаг $p_1 = 70\text{мм}$ (расстояние между болтами вдоль усилия). По Таблице 3.3 СН РК EN 1993-1-8 размер величины p_1 должно быть в границах от $2,2d_0 = 2,2 \cdot 18 = 39,6\text{мм}$ до $14t = 14 \cdot 10 = 140\text{мм}$ или 200мм .

То есть:

$$p_1 = 70\text{мм} > 2,2d_0 = 2,2 \cdot 18 = 39,6\text{мм};$$

$$p_1 = 70\text{мм} < \min[14t = 14 \cdot 10 = 140\text{мм}; 200\text{мм}] = 140\text{мм}.$$

Дорожка $p_2 = 70\text{мм}$ (расстояние между болтами поперек усилия). По Таблице 3.3 СН РК EN 1993-1-8 размер величины p_2 должно быть в границах от $2,4d_0 = 2,4 \cdot 18 = 43,2\text{мм}$ до $14t = 14 \cdot 10 = 140\text{мм}$ или 200мм .

То есть:

$$p_2 = 70\text{мм} > 2,4d_0 = 2,4 \cdot 18 = 43,2\text{мм};$$

$$p_2 = 70\text{мм} < \min[14t = 14 \cdot 10 = 140\text{мм}; 200\text{мм}] = 140\text{мм}.$$

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 Таблице 3.4 и Пункту 3.6.1(1) СН РК EN 1993-1-8).

Расчетная несущая способность одного болта на срез (см. Таблицу 3.4 СН РК EN 1993-1-8):

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

где α_V - параметр для болтов классов прочности 8.8 (см. Таблицу 3.4 СН РК EN 1993-1-8), равный:

$$\alpha_V = 0,6;$$

γ_{M2} - частный коэффициент безопасности, равный по НП.2.13 СН РК EN 1993-1-1:

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

f_{ub} - временное сопротивление на растяжение, равное:

$$f_{ub} = 800\text{Н/мм}^2;$$

A - площадь сечения болта нетто, равная:

$$A = 201\text{ мм}^2.$$

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

$$F_{V,Rd} = \frac{\alpha_V f_{ub} A}{\gamma_{M2}} = \frac{0,6 \cdot 800 \cdot 201}{1,25} \cdot 10^{-3} = 77,2\text{ кН}$$

Расчетная несущая способность 4 болтов на срез двумя плоскостями будет равна:

$$4 \cdot 2 \cdot F_{V,Rd} = 4 \cdot 2 \cdot 77,2 = 617,2 \text{ кН}$$

В данном примере в болтовом соединении усилие среза передается через прокладку толщиной:

$$t_p = 10 \text{ мм.}$$

Согласно Пункту 3.6.1(12) СН РК EN 1993-1-8, если при использовании болтов или заклепок, передающих усилия среза или смятия через прокладки общей толщиной t_p , большей, чем $1/3$ номинального диаметра d , то расчетное значение несущей способности на срез $F_{V,Rd}$, вычисленное по Таблице 3.4 СН РК EN 1993-1-8, следует умножать на понижающий коэффициент β_p , определяемый по Формуле (3.3) СН РК EN 1993-1-8:

$$\beta_p = \frac{9d}{8d + 3t_p} \quad (3.3)$$

но при условии, что β_p больше или равно 1,0.

Значит, понижающий коэффициент β_p равен:

$$\beta_p = \frac{9d}{8d + 3t_p} = \frac{9 \cdot 16}{8 \cdot 16 + 3 \cdot 10} = 0,91 < 1,0$$

Расчетная несущая способность с учетом понижающего коэффициента β_p для 4 болтов на срез двумя плоскостями равна:

$$\beta_p \cdot 4 \cdot 2 \cdot F_{V,Rd} = 0,91 \cdot 617,2 = 561,65 \text{ кН}$$

3.2 Несущая способность болтового соединения на смятие

Разрушение болтового соединения происходит не только на срез, но и на смятие. Расчетная несущая способность одного болта на смятие (см. Таблицу 3.4 СН РК EN 1993-1-8):

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

где γ_{M2} - частный коэффициент безопасности, равный по НП.2.13 СН РК EN 1993-1-1:

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

f_u - номинальное значение временного сопротивления на растяжение для стали марки S355 (см. Таблицу 3,1 СН РК EN 1993-1-1), равное:

$$f_u = 510 \text{ Н/мм}^2;$$

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

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

$$\alpha_d = \frac{e_1}{3d_0} = \frac{50}{3 \cdot 18} = 0,926 \text{ (для крайних болтов, таблица 3,4)}$$

$$\alpha_d = \frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4} = \frac{70}{3 \cdot 18} - \frac{1}{4} = 1,05 \text{ (для средних болтов, таблица 3,4)}$$

$$\frac{f_{ub}}{f_u} = \frac{500}{510} = 0,98$$

$$\alpha_b = \min \left[\alpha_d; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1,0 \right] = \min[0,926; 1,05; 0,98; 1,0] = 0,926$$

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:

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

$$2,8 \frac{e_2}{d_0} - 1,7 = 2,8 \cdot \frac{50}{18} - 1,7 = 6,08$$

$$1,4 \frac{p_2}{d_0} - 1,7 = 1,4 \cdot \frac{70}{18} - 1,7 = 3,75$$

$$k_1 = \min[6,08; 3,75; 2,5] = 2,5;$$

d - диаметр болта, равный:

$$d = 16 \text{ мм};$$

t - толщина пластины, равная:

$$t = 10 \text{ мм}.$$

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

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \alpha f_u d t}{\gamma_{M2}} = \frac{2,5 \cdot 0,926 \cdot 510 \cdot 16 \cdot 10}{1,25} \cdot 10^{-3} = 151,1 \text{ кН}.$$

Расчетная несущая способность 4 болтов на смятие равна:

$$F_{b,Rd} = 4 \cdot 151,1 = 604,4 \text{ кН}$$

4 Расчет прочности 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 $N_{pl,Rd}$, $N_{u,Rd}$, $N_{net,Rd}$ (см. Пункт 6.2.3(2) СН РК EN 1993-1-1), то есть $N_{t,Rd} = \min[N_{pl,Rd}; N_{u,Rd}; N_{net,Rd}]$.

Частные коэффициенты безопасности (см. НП.2.13 СН РК EN 1993-1-1):

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

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

Расчетное значение несущей способности поперечного сечения брутто в пластической стадии по Формуле (6.6) СН РК EN 1993-1-1:

$$N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (6.6)$$

Значит,

$$N_{pl,Rd} = \frac{170 \cdot 10 \cdot 355}{1,0} \cdot 10^{-3} = 603,5 \text{ кН}$$

Расчетное значение несущей способности поперечного сечения нетто в пластической стадии при наличии отверстий для болтов Формуле (6.6) СН РК EN 1993-1-1:

$$N_{u,Rd} = \frac{0,9 A_{net} \cdot f_u}{\gamma_{M2}} \quad (6.7)$$

Значит,

$$N_{u,Rd} = \frac{0,9 \cdot (170 \cdot 10 - 2 \cdot 18 \cdot 10) \cdot 510}{1,25} = 492,1 \text{ кН}$$

Таким образом,

$$N_{t,Rd} = \min[N_{pl,Rd}; N_{u,Rd}] = \min[603,5; 492,1] = 492,1 \text{ кН}$$

5 Определение несущей способности болтового соединения

Расчетная несущая способность с учетом понижающего коэффициента β_p для 4 болтов на срез двумя плоскостями равна:

$$\beta_p \cdot 4 \cdot 2 \cdot F_{V,Rd} = 0,91 \cdot 617,2 = 561,65 \text{ кН}$$

Расчетная несущая способность 4 болтов на смятие будет равна:

$$F_{b,Rd} = 4 \cdot 151,1 = 604,4 \text{ кН}$$

Расчетная несущая способность на растяжение соединительной планки по ослабленному сечению:

$$N_{t,Rd} = 492,1 \text{ кН}$$

Следовательно, расчетная несущая способность болтового соединения (болты М16 классом прочности 8.8) с прокладкой (толщина $t_p = 10 \text{ мм}$) определяется минимальным значением из трех величин:

$$F_{Rd} = \min[561,65; 604,4; 492,1] = 492,1 \text{ кН}.$$

3.6.2 Инъекционные болты

3.6.2.1 Общие положения

3.6.2.1.1 Инъекционные болты (см. Рисунок 3.4) могут применяться в качестве альтернативы обычным болтам и заклепкам в соединениях категорий А, В и С, согласно Пункту 3.4 настоящего пособия.

3.6.2.1.2 Подробная информация по изготовлению и установке инъекционных болтов приведена в ссылочных стандартах группы 7 (см. Пункт 1.2.7 настоящего пособия).

3.6.2.2 Расчетная несущая способность

3.6.2.2.1 Метод расчета, приведенный в Пунктах 3.6.2.2(2) – 3.6.2.2(6) настоящего пособия, следует применять для соединений с инъекционными болтами класса прочности 8.8 или 10.9. Болты в сборе должны отвечать требованиям ссылочных стандартов группы 4 (см. Пункт 1.2.4 настоящего пособия), а при использовании болтов с предварительным натяжением см. Пункт 3.6.2.2(3) настоящего пособия.

3.6.2.2.2 Расчетное усилие среза в предельном состоянии по несущей способности для любого болта в соединении категории А не должно превышать наименьшей из следующих величин: расчетной несущей способности на срез болта по Пунктам 3.6 и 3.7 настоящего пособия; расчетной несущей способности на смятие инъекционного состава по Пункту 3.6.2.2(5) настоящего пособия.

3.6.2.2.3 В соединениях категории В и С, для которых согласно Пункту 3.1.2(1) настоящего пособия следует использовать болты с предварительным натяжением, должны устанавливаться инъекционные болты с предварительным натяжением.

3.6.2.2.4 Расчетное усилие среза болта в соединении категории В в предельном состоянии по эксплуатационной пригодности и расчетное усилие среза болта в соединении категории С в предельном состоянии по несущей способности не должны превышать расчетной несущей способности на сдвиг контактных поверхностей согласно Пункту 3.9 настоящего пособия в соответствующем предельном состоянии, а также расчетной несущей способности инъекционного состава на смятие согласно Пункту 3.6.2.2(5) настоящего пособия в соответствующем предельном состоянии. Кроме того, расчетное усилие среза болта в предельном состоянии по несущей способности в соединениях категорий В и С не должно превышать расчетной несущей способности болта на срез по Пункту 3.6 настоящего пособия и расчетной несущей способности болта на смятие по Пунктам 3.6 и 3.7 настоящего пособия.

3.6.2.2.5 Расчетное значение несущей способности инъекционного состава на смятие $F_{b,Rd,resin}$ можно определить по следующей формуле:

$$F_{b,Rd,resin} = \frac{k_t k_s d t_{b,resin} \beta f_{b,resin}}{\gamma_{M4}}, \quad (3.4)$$

где $F_{b,Rd,resin}$ - прочность инъекционного состава на смятие;

γ_{M4} - коэффициент, зависящий от отношения толщин соединяемых элементов, см. Таблицу 3.5 и Рисунок 3.4;

$f_{b,resin}$ - прочность инъекционного состава на смятие, определяемая по ссылочным стандартам группы 7 (см. Пункт 1.2.7 настоящего пособия);

$t_{b,resin}$ - эффективная толщина при смятии инъекционного состава, приведенная в таблице 3.5;

k_t - принимается равным 1,0 в предельном состоянии по эксплуатационной пригодности (долгосрочной) и 1,2 в предельном состоянии по несущей способности;

k_s - принимается равным 1,0 - для отверстий с нормальным зазором или (1,0–0,1m) - для отверстий с большим зазором;

m - разность, в мм, между диаметром нормального отверстия и отверстия с большим зазором. В случае коротких овальных отверстий, согласно ссылочным стандартам группы 7 (см. Пункт 1.2.7 настоящего пособия), значение m принимается равным половине разности, в мм, между длиной и шириной отверстия.

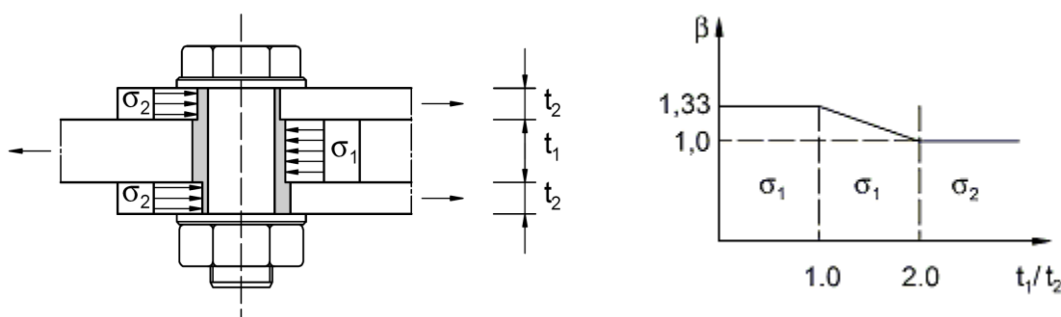


Рисунок 3.4 - Коэффициент γ_{M4} как функция отношения толщин соединенных элементов

Таблица 3.5 - Значения β и $t_{b,resin}$

t_1/t_2	β	$t_{b,resin}$
$\geq 2,0$	1,0	$2t_2 \leq 1,5d$
$1,0 < t_1/t_2 < 2,0$	$1,66 - 0,33(t_1/t_2)$	$t_1 \leq 1,5d$
$\leq 1,0$	1,33	$t_1 \leq 1,5d$

3.6.2.2.6 При вычислении несущей способности болта на смятие, длина заземленной части I которого превышает $3d$, для определения эффективной толщины инъекционного состава при смятии $t_{b,resin}$ следует принимать значение не более $3d$ (см. Рисунок 3.5).

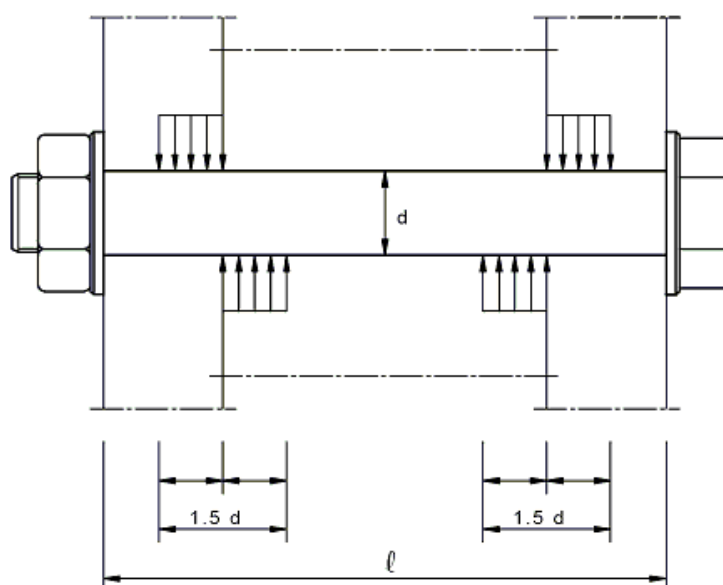


Рисунок 3.5 - Предельная эффективная длина длинномерных инъекционных болтов

3.7 Группа крепежных деталей

Несущая способность многоболтового соединения может быть принята равной сумме расчетных несущих способностей отдельных крепежных деталей на смятие $F_{b,Rd}$ при условии, что расчетная несущая способность каждой отдельной крепежной детали на срез $F_{v,Rd}$ больше или равна расчетной несущей способности на смятие $F_{b,Rd}$. В противном случае, расчетную несущую способность многоболтовых соединений следует принимать равной наименьшей несущей способности любой одной крепежной детали, умноженной на количество деталей.

ПРИМЕР 3 Расчет болтового соединения между двумя пластинами

Исходные данные: выполнить расчет прочности болтового соединения между двумя пластинами, которые нагружены растягивающим усилием $N = 130 \text{ кН}$. Пластины выполнены из стали класса S355 с номинальным пределом текучести $f = 355 \text{ Н/мм}^2$. Болты марки M16, класс прочности 5.6, болты без предварительного натяжения.

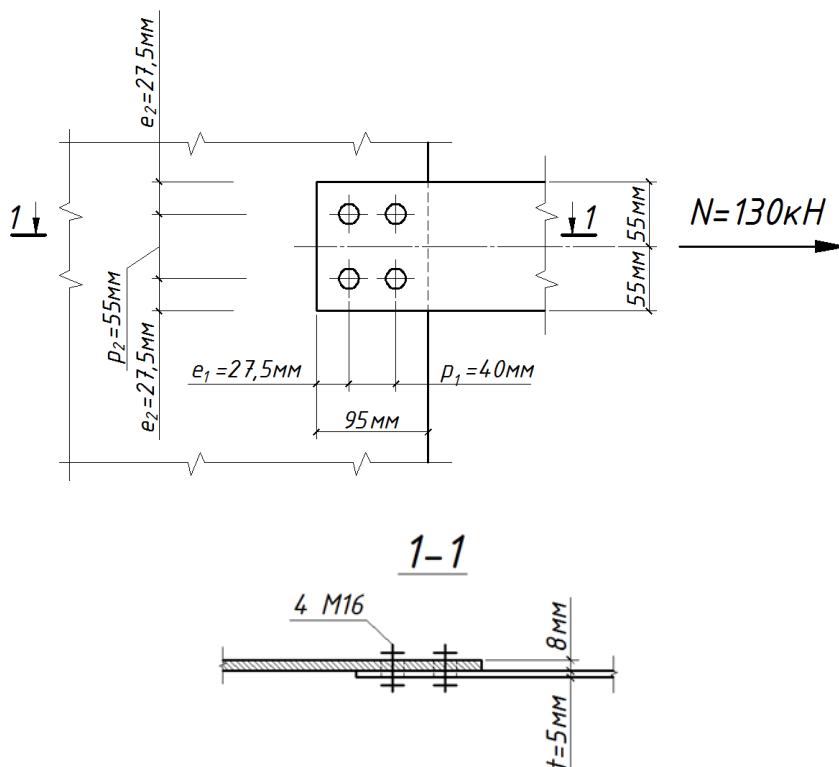


Рисунок 1 - Конструкция узла

2 Определение геометрических характеристик

Болты категории А, соединение работающее на срез (см. Пункт 3.4.1 СН РК EN 1993-1-8). Конструкция узла (см. Рисунок 1), расположение отверстий для болтов согласно Таблице 3.3 СН РК EN 1993-1-8, где:

- расстояние от края пластины до центра отверстия вдоль усилия $e_1 = 27,5\text{ мм}$;
- расстояние от края пластины до центра отверстия поперек усилия $e_2 = 27,5\text{ мм}$;
- расстояние между центрами отверстий вдоль усилия $p_1 = 40,0\text{ мм}$;
- ширина полосы между центрами отверстий $p_2 = 55,0\text{ мм}$.

Таблица 1 - Требуемые минимальные и максимальные значения шага, расстояний до края элемента.

Шаг	Минимальное значение	Максимальное значение
e_1 :	$e_{1,\min} = 1,2d_0 = 1,2 \cdot 18 = 21,6\text{ мм} < e_1 = 27,5\text{ мм}$	$e_{1,\max} = 4t + 40\text{ мм} = 4 \cdot 5 + 40 = 60\text{ мм} > e_1 = 27,5\text{ мм}$
e_2 :	$e_{2,\min} = 1,2d_0 = 1,2 \cdot 18 = 21,6\text{ мм} < e_2 = 27,5\text{ мм}$	$e_{2,\max} = 4t + 40\text{ мм} = 4 \cdot 5 + 40 = 60\text{ мм} > e_2 = 27,5\text{ мм}$
p_1 :	$p_{1,\min} = 2,2d_0 = 2,2 \cdot 18 = 39,6\text{ мм} < p_1 = 40,0\text{ мм}$	$p_{1,\max} = \min[14t; 200] = \min[70; 200] = 70\text{ мм} > p_1 = 40,0\text{ мм}$
p_2 :	$p_{2,\min} = 2,4d_0 = 2,4 \cdot 18 = 43,2\text{ мм} < p_2 = 55,0\text{ мм}$	$p_{2,\max} = \min[14t; 200] = \min[70; 200] = 70\text{ мм} > p_2 = 55,0\text{ мм}$

Следовательно, конструктивные требования болтового соединения выполняется.

3 Несущая способность

Действующая поперечная сила на каждый болт:

$$F_{V,Ed} = \frac{130}{4} = 32,5 \text{ кН}$$

Несущая способность одного болта:

а) срез одной плоскостью (см. Таблицу 3.4, СН РК EN 1993-1-8)

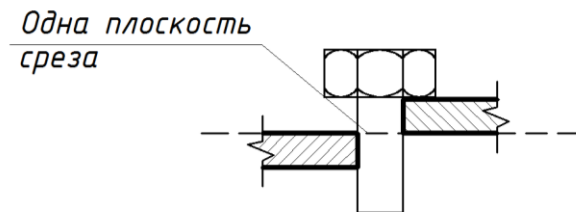


Рисунок 2 - Схема болтового соединения, подверженного действию среза одной плоскостью

Частный коэффициент безопасности (см. НП.2.13 СН РК EN 1993-1-1):

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

Значит,

$$F_{V,Rd} = \frac{\alpha_V f_{ub} A}{\gamma_{Mb}} = \frac{0,6 \cdot 500 \cdot \frac{\pi \cdot 16^2}{4}}{1,25} \cdot 10^{-3} = 48,23 \text{ кН};$$

б) смятие (см. Таблицу 3.4, СН РК EN 1993-1-8)

Параметр α_b :

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

$$\alpha_d = \frac{e_1}{3d_0} = \frac{27,5}{3 \cdot 18} = 0,509$$

$$\alpha_d = \frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4} = \frac{50}{3 \cdot 18} - \frac{1}{4} = 0,675$$

$$\frac{f_{ub}}{f_u} = \frac{500}{510} = 0,98$$

$$\alpha_b = 0,509$$

Параметр k_1 :

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

для крайних болтов:

$$k_1 = 2,8 \frac{e_2}{d_0} - 1,7 = 2,8 \cdot \frac{27,5}{18} - 1,7 = 2,58$$

для средних болтов:

$$k_1 = 1,4 \frac{p_2}{d_0} - 1,7 = 1,4 \cdot \frac{55}{18} - 1,7 = 2,58$$

$$k_1 = 2,5$$

$$k_1 = 2,5$$

Частный коэффициент безопасности (см. НП.2.13 СН РК EN 1993-1-1):

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

Значит,

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \alpha f_u d t}{\gamma_{M2}} = \frac{2,5 \cdot 0,509 \cdot 510 \cdot 16 \cdot 5}{1,25} \cdot 10^{-3} = 41,53 \text{ кН};$$

$$F_{b,Rd} = 41,53 \text{ кН} > F_{V,Ed} = 32,5 \text{ кН}$$

Условие прочности выполняется.

Несущая способность пластины на растяжение (см. Пункт 6.2.3 СН РК EN 1993-1-1):

$$N_{u,Rd} = 0,9 \frac{A_{net} f_u}{\gamma_{M2}} = 0,9 \cdot \frac{5 \cdot (110 - 2 \cdot 18) \cdot 510}{1,25} \cdot 10^{-3} = 151 \text{ кН}$$

Значит,

$$N_{u,Rd} = 151 \text{ кН} > 130 \text{ кН}$$

Условие прочности выполняется.

3.8 Протяженные соединения

3.8.1 Если расстояние L_j между центрами крайних крепежных деталей вдоль усилия (см. Рисунок 3.6) больше $15d$, то значение несущей способности соединения на срез $F_{v,Rd}$ следует умножать на понижающий коэффициент β_{Lf} , определяемый по формуле:

$$\beta_{Lf} = 1 - \frac{L_j - 15d}{200d}, \quad \text{но } \beta_{Lf} \leq 1 \text{ и } \beta_{Lf} \geq 0,75. \quad (3.5)$$

3.8.2 Указание Пункта 3.8(а) настоящего пособия не применяется, если имеет место равномерное распределение усилия сдвига по длине соединения, например, при передаче усилия сдвига между стенкой и полкой поперечного сечения.

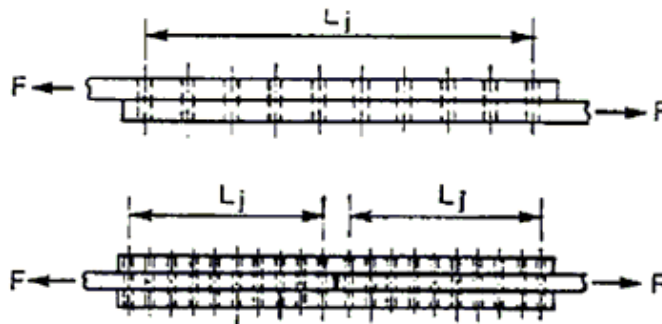


Рисунок 3.6 - Протяженные соединения

ПРИМЕР 4 Расчет болтового протяженного соединения

Исходные данные: выполнить расчет прочности болтового соединения между двумя металлическими пластинами (см. Рисунок 1). Болты М16 – класса прочности 5.6 с номинальным пределом текучести $f_{yb} = 300 \text{ Н/мм}^2$ и временным сопротивлением на растяжение $f_{ub} = 500 \text{ Н/мм}^2$. Все элементы болтового соединения выполнены из стали марки S235 с номинальным пределом текучести $f_y = 235 \text{ Н/мм}^2$.

2 Определение геометрических характеристик

Для данной группы болтов расстояние между центрами крайних болтов составляет 280мм, что больше 15 диаметров болтов М16, то есть $15d = 15 \cdot 16 = 240\text{мм} < L_j = 280\text{мм}$. Значит, согласно указаниям Пункта 3.8(1) СН РК EN 1993-1-8, если расстояние L_j между центрами крайних крепёжных деталей вдоль усилий больше $15d$, то значение несущей способности на срез $F_{V,Rd}$ следует умножать на понижающий коэффициент β_{Lf} , определяемый по Формуле (3.5) СН РК EN 1993-1-8:

$$\beta_{Lf} = 1 - \frac{L_j - 15d}{200d} \quad (3.5)$$

но при условии, что β_{Lf} больше или равно 0,75 и меньше или равно 1,0.

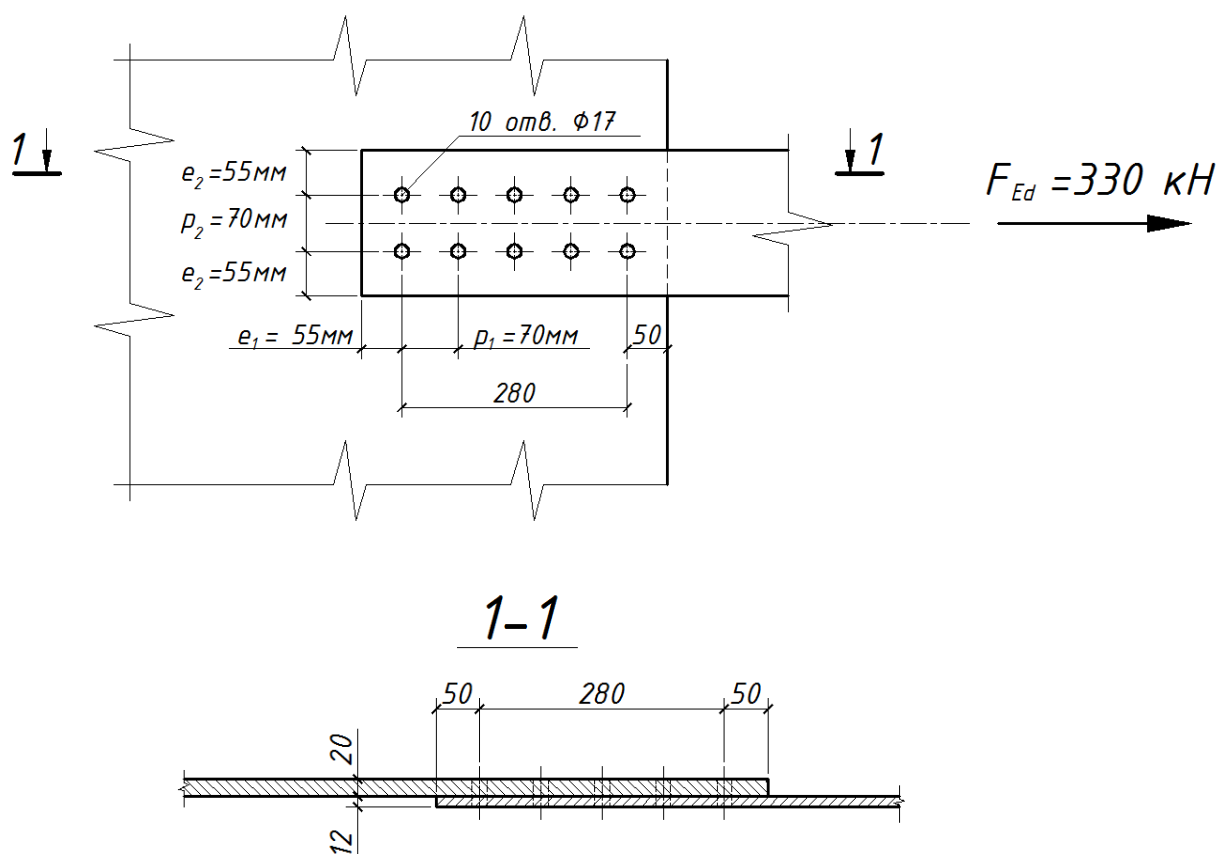


Рисунок 1 – Схема болтового соединения

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 таблице 3.4 (см. Пункт 3.6.1(1) СН РК EN 1993-1-8).

Расчетная несущая способность одного болта на срез (см. Таблица 3.4 СН РК EN 1993-1-8):

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

где α_V - параметр для болтов классов прочности 5.6 (см. Таблица 3.4 СН РК EN 1993-1-8) равный:

$$\alpha_V = 0,6;$$

γ_{M2} - частный коэффициент безопасности по НП.2.13 СН РК EN 1993-1-1:

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

f_{ub} - временное сопротивление на растяжение, равное:

$$f_{ub} = 500 \text{ Н/мм}^2;$$

A - площадь сечения болта нетто, равное:

$$A = A_s = 201 \text{ мм}^2.$$

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

$$F_{V,Rd} = \frac{\alpha_V f_{ub} A}{\gamma_{M2}} = \frac{0,6 \cdot 500 \cdot 201}{1,25} \cdot 10^{-3} = 48,24 \text{ кН}$$

Поперечная сила на один болт (всего болтов в соединении 10 штук):

$$F_{V,Ed} = \frac{N_{Ed}}{n} = \frac{330}{10} = 33 \text{ кН}$$

Условие прочности:

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

Значит,

$$\frac{F_{V,Ed}}{F_{V,Rd}} = \frac{33}{48,24} = 0,68$$

Условие выполняется.

3.2 Несущая способность болтового соединения на смятие

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

Расчетная несущая способность одного болта на смятие (см. Таблицу 3.4 СН РК EN 1993-1-1):

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

где γ_{M2} - частный коэффициент безопасности по НП.2.13 СН РК EN 1993-1-1:

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

f_u - номинальное значение временного сопротивления на растяжение для стали марки S235 (см. Таблицу 3,1 СН РК EN 1993-1-1):

$$f_u = 360 \text{ Н/мм}^2;$$

α_b - параметр, равный наименьшему значению из трех величин α_d , $\frac{f_{ub}}{f_u}$ и 1,0. То есть:

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

$$\alpha_d = \frac{e_1}{3d_0} = \frac{50}{3 \cdot 17} = 0,98 \text{ (для крайних болтов, таблица 3,4)}$$

$$\alpha_d = \frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4} = \frac{70}{3 \cdot 17} - \frac{1}{4} = 1,12 \text{ (для средних болтов, таблица 3,4)}$$

$$\frac{f_{ub}}{f_u} = \frac{500}{360} = 1,39$$

$$\alpha_b = \min \left[\alpha_d; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1,0 \right] = \min [0,98; 1,12; 1,39; 1,0] = 0,98$$

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. То есть:

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

$$2,8 \frac{e_2}{d_0} - 1,7 = 2,8 \cdot \frac{55}{17} - 1,7 = 7,35$$

$$1,4 \frac{p_2}{d_0} - 1,7 = 1,4 \cdot \frac{70}{17} - 1,7 = 4,06$$

$$k_1 = \min(7,35; 4,06; 2,5) = 2,5;$$

d - диаметр болта, равный:

$$d = 16 \text{ мм};$$

t - толщина пластины, равная:

$$t = 12 \text{ мм}.$$

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

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \alpha f_u d t}{\gamma_{M2}} = \frac{2,5 \cdot 0,98 \cdot 360 \cdot 16 \cdot 12}{1,25} \cdot 10^{-3} = 135,5 \text{ кН}.$$

Поперечная сила на один болт (всего болтов в соединении 10 штук):

$$F_{V,Ed} = \frac{N_{Ed}}{n} = \frac{330}{10} = 33 \text{ кН}$$

Условие прочности

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

$$\frac{F_{V,Ed}}{F_{V,Rd}} = \frac{33}{135,5} = 0,24$$

Условие выполняется.

4 Расчет прочности 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 $N_{pl,Rd}$, $N_{u,Rd}$, $N_{net,Rd}$ (см. Пункт 6.2.3(2) СН РК EN 1993-1-1), то есть $N_{t,Rd} = \min[N_{pl,Rd}; N_{u,Rd}; N_{net,Rd}]$.

При расчете элемента для сечений с отверстиями для болтов расчетное значение несущей способности на растяжение следует принимать наименьшим из $N_{pl,Rd}$, $N_{u,Rd}$, $N_{net,Rd}$ (см. Пункт 6.2.3(2) СН РК EN 1993-1-1), то есть $N_{t,Rd} = \min[N_{pl,Rd}; N_{u,Rd}; N_{net,Rd}]$.

Условие прочности по Формуле (6.5) СН РК EN 1993-1-1:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} \leq 1,0 \quad (6.5)$$

Частные коэффициенты безопасности (см. НП.2.13 СН РК EN 1993-1-1):

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

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

Расчетное значение несущей способности поперечного сечения брутто в пластической стадии по Формуле (6.6) СН РК EN 1993-1-1:

$$N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (6.6)$$

Значит,

$$N_{pl,Rd} = \frac{180 \cdot 12 \cdot 235}{1,0} \cdot 10^{-3} = 507,6 \text{ кН}$$

Расчетное значение несущей способности поперечного сечения нетто в пластической стадии при наличии отверстий для болтов по Формуле (6.7) СН РК EN 1993-1-1):

$$N_{u,Rd} = \frac{0,9 A_{net} \cdot f_u}{\gamma_{M2}} \quad (6.7)$$

Значит,

$$N_{u,Rd} = \frac{0,9 \cdot (180 \cdot 12 - 2 \cdot 17 \cdot 12) \cdot 360}{1,25} = 454,1 \text{ кН}$$

Таким образом,

$$N_{t,Rd} = \min[N_{pl,Rd}; N_{u,Rd}] = \min[507,6; 454,1] = 454,1 \text{ кН}$$

Проверка условия:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} = \frac{330}{454,1} = 0,73 < 1,00$$

Условие выполняется.

3.9 Фрикционные соединения на болтах классов прочности 8.8 и 10.9

3.9.1 Расчетная несущая способность на сдвиг поверхностей трения

3.9.1.1 Расчетную несущую способность на сдвиг поверхностей трения, стянутых одним болтом с предварительным натяжением классов прочности 8.8 и 10.9, следует определять по формуле:

$$F_{s,Rd} = \frac{k_s n \mu}{\gamma_{M3}} \cdot F_{p,C}, \quad (3.6)$$

где k_s - принимается по Таблице 3.6;

n - количество поверхностей трения соединяемых элементов;

μ - коэффициент трения, принимаемый по результатам испытаний поверхностей, приведенных в ссылочных стандартах группы 7 (см. Пункт 1.2.7 настоящего пособия), или в Таблице 3.7.

3.9.1.2 Для болтов классов прочности 8.8 и 10.9, соответствующих ссылочным стандартам группы 4 (см. Пункт 1.2.4 настоящего пособия) с контролируемым натяжением, в соответствии со ссылочными стандартами группы 7 (см. Пункт 1.2.7 настоящего пособия), усилие предварительного натяжения $F_{p,C}$ в Формуле (3.6) следует принимать равным:

$$F_{p,C} = 0,7 f_{ub} A_s. \quad (3.7)$$

Таблица 3.6 - Значения k_s

Описание	k_s
Болты, установленные в нормальные отверстия	1,0
Болты, установленные в отверстия с большим зазором или в короткие овальные отверстия при передаче усилия перпендикулярно продольной оси отверстия	0,85
Болты, установленные в длинные овальные отверстия при передаче нагрузки перпендикулярно продольной оси отверстия	0,7
Болты, установленные в короткие овальные отверстия при передаче нагрузки параллельно продольной оси отверстия	0,76
Болты, установленные в длинные овальных отверстиях при передаче нагрузки параллельно продольной оси отверстия	0,63

Таблица 3.7 - Значения коэффициента трения μ для болтов с предварительным натяжением

Класс поверхностей трения (см. ссылочные стандарты группы 7 (см. Пункт 1.2.7 настоящего пособия))	Коэффициент трения μ
A	0,5
B	0,4
C	0,3
D	0,2

ПРИМЕЧАНИЕ 1 Требования к испытаниям и контролю приведены в ссылочных стандартах группы 7 (см. Пункт 1.2.7 настоящего пособия).

ПРИМЕЧАНИЕ 2 Классификация поверхностей трения при любом другом способе обработки должна быть основана на результатах испытаний образцов поверхностей по процедуре, изложенной в ссылочных стандартах группы 7 (см. Пункт 1.2.7 настоящего пособия).

ПРИМЕЧАНИЕ 3 Определения классов поверхностей трения приведены в ссылочных стандартах группы 7 (см. Пункт 1.2.7 настоящего пособия).

ПРИМЕЧАНИЕ 4 При наличии окрашенной поверхности с течением времени может произойти потеря предварительного натяжения.

3.9.2 Совместное действие растяжения и сдвига

3.9.2.1 Если фрикционное соединение помимо сдвигающего усилия $F_{v,Ed}$ или $F_{v,Ed,ser}$ воспринимает также растягивающее усилие $F_{t,Ed}$ или $F_{t,Ed,ser}$, то расчетную несущую способность на сдвиг поверхностей трения, стянутых одним болтом, определяют следующим образом:

а) Для соединений категории В:

$$F_{s,Rd,ser} = \frac{k_s n \mu \cdot (F_{p,C} - 0,8 F_{t,Ed,ser})}{\gamma_{M3,ser}}; \quad (3.8a)$$

б) Для соединений категории С:

$$F_{s,Rd} = \frac{k_s n \mu \cdot (F_{p,C} - 0,8 F_{t,Ed})}{\gamma_{M3}}. \quad (3.8б)$$

3.9.2.2 Если в соединении, воспринимающем изгибающий момент, контактное усилие в сжатой зоне уравнивает приложенное растягивающее усилие, то снижение несущей способности на сдвиг контактных поверхностей не требуется.

3.9.3 Смешанные соединения

В виде исключения требований Пункта 2.4(3) настоящего пособия, в болты с предварительным натяжением классов прочности 8.8 и 10.9, рассчитанных как фрикционные при определении несущей способности на сдвиг (категория С, см. Пункт 3.4 настоящего пособия), можно рассматривать работающими совместно со сварными швами при условии окончательного затягивания болтов после завершения сварочных работ.

ПРИМЕР 5 Расчет болтового фрикционного соединения с предварительным натяжением

Исходные данные: Выполнить расчет болтового фрикционного соединения с предварительным натяжением (категория С). На соединение действует центральная растягивающая сила $F_{Ed} = 450 \text{ кН}$ (см. Рисунок 1). Болтовое соединение представляет собой группу из 8 болтов М20 класса прочности 10.9 с номинальным пределом текучести $f_{yb} = 900 \text{ Н/мм}^2$ и временным сопротивлением на растяжение $f_{ub} = 1000 \text{ Н/мм}^2$. Марка стали S235 с номинальным пределом текучести $f_{yb} = 235 \text{ Н/мм}^2$ и временным сопротивлением на растяжение $f_u = 360 \text{ Н/мм}^2$.

2 Определение основных параметров соединения

2.1 Геометрические характеристики болта

Диаметр болта (класс прочности 10.9 для фрикционных соединений):

$$d = 20 \text{ мм}$$

Диаметр отверстия под болт:

$$d_0 = 22 \text{ мм}$$

Площадь поперечного сечения болта нетто:

$$A_s = 245 \text{ мм}^2$$

2.2 Механические характеристики болта

Механические характеристики болта определяются по Таблице 3.1 СН РК EN 1993-1-8. Номинальный предел текучести $f_{yb} = 900 \text{ Н/мм}^2$ (для болтов класса прочности 10.9). Временное сопротивление на растяжение $f_{ub} = 1000 \text{ Н/мм}^2$ (для болтов класса прочности 10.9).

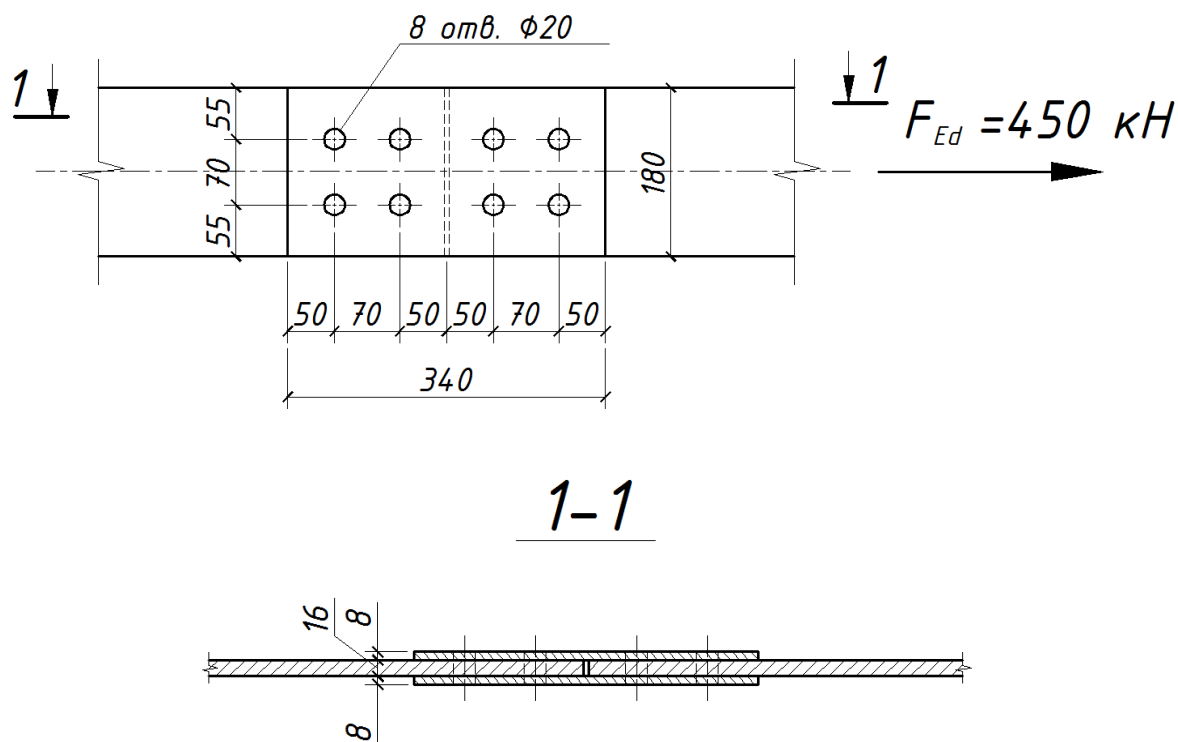


Рисунок 1 - Схема узла

2.3 Расстояние между отверстиями

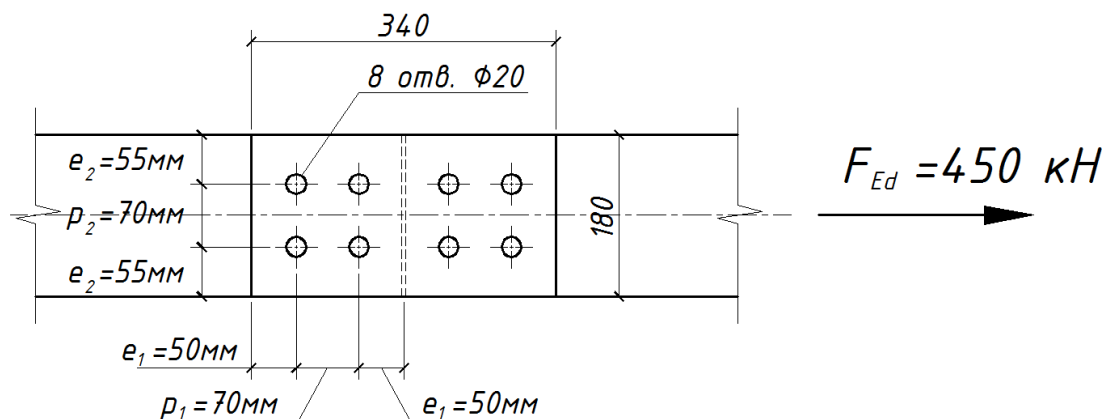


Рисунок 2 – Схема расположения отверстий

Расстояние до края вдоль усилия $e_1 = 50 \text{ мм}$. По Таблице 3.3 СН РК EN 1993-1-8 размер величины e_1 должно быть в границах от $1,2d_0 = 1,2 \cdot 22 = 26,4 \text{ мм}$ до $8t = 8 \cdot 16 = 128 \text{ мм}$ или 125 мм .

То есть:

$$e_1 = 50 \text{ мм} > 1,2d_0 = 1,2 \cdot 22 = 26,4 \text{ мм};$$

$$e_1 = 50 \text{ мм} < \max[8t = 8 \cdot 16 = 128 \text{ мм}; 125 \text{ мм}] = 128 \text{ мм}.$$

Расстояние до края поперек усилия $e_2 = 55 \text{ мм}$. По Таблице 3.3 СН РК EN 1993-1-8 размер величины e_2 должно быть в границах от $1,2d_0 = 1,2 \cdot 22 = 26,4 \text{ мм}$ до $8t = 8 \cdot 16 = 128 \text{ мм}$ или 125 мм .

То есть:

$$e_2 = 55\text{мм} > 1,2d_0 = 1,2 \cdot 22 = 26,4\text{мм};$$

$$e_2 = 55\text{мм} < \max[8t = 8 \cdot 16 = 128\text{мм}; 125\text{мм}] = 128\text{мм}.$$

Шаг $p_1 = 70\text{мм}$ (расстояние между болтами вдоль усилия). По Таблице 3.3 СН РК EN 1993-1-8 размер величины p_1 должно быть в границах от $2,2d_0 = 2,2 \cdot 22 = 48,4\text{мм}$ до $14t = 14 \cdot 16 = 224\text{мм}$ или 200мм .

То есть:

$$p_1 = 70\text{мм} > 2,2d_0 = 2,2 \cdot 22 = 48,4\text{мм};$$

$$p_1 = 70\text{мм} < \min[14t = 14 \cdot 16 = 224\text{мм}; 200\text{мм}] = 200\text{мм}.$$

Дорожка $p_2 = 70\text{мм}$ (расстояние между болтами поперек усилия). По Таблице 3.3 СН РК EN 1993-1-8 размер величины p_2 должно быть в границах от $2,4d_0 = 2,4 \cdot 22 = 52,8\text{мм}$ до $14t = 14 \cdot 16 = 224\text{мм}$ или 200мм .

То есть:

$$p_2 = 70\text{мм} > 2,4d_0 = 2,4 \cdot 22 = 52,8\text{мм};$$

$$p_2 = 70\text{мм} < \min[14t = 14 \cdot 15 = 224\text{мм}; 200\text{мм}] = 200\text{мм}.$$

3 Несущая способность болтового соединения

3.1 Несущая способность на сдвиг поверхностей трения

Данное болтовое соединение относится к категории С (см. Пункт 3.4.1(1)в СН РК EN 1993-1-8), то есть соединение фрикционное в предельном состоянии по несущей способности. Согласно Пункту 3.4.1(1)в СН РК EN 1993-1-8, проверку соединений категории С необходимо выполнить: на сдвиг поверхностей трения, на смятие болта и разрушения соединяемых металлических элементов по ослабленному сечению в пластической стадии.

Расчетная несущая способность на сдвиг поверхности трения по Формуле (3.6) СН РК EN 1993-1-8:

$$F_{s,Rd} = \frac{k_s n \mu}{\gamma_{M3}} \cdot F_{p,C};$$

где k_s - коэффициент принимается по Таблице 3.6 СН РК EN 1993-1-8. Для болтов, установленные в нормальные отверстия равен:

$$k_s = 1,0;$$

γ_{M3} - частный коэффициент безопасности (см. НП.2.13 СН РК EN 1993-1-1), равный:

$$\gamma_{M3} = 1,25;$$

μ - коэффициент трения, определяется по Таблице 3.7 СН РК EN 1993-1-8. Для поверхностей соединяемых элементов класса А равен:

$$\mu = 0,5;$$

n - количество поверхностей трения, в данном примере равно:

$$n = 2;$$

$F_{p,C}$ - усилие предварительного натяжения, определяется по Формуле (3.7) СН РК EN 1993-1-8:

$$F_{p,C} = 0,7f_{ub}A_s = 0,7 \cdot 1000 \cdot 245 \cdot 10^{-3} = 171,5\text{кН}$$

Таким образом, расчетная несущая способность на сдвиг поверхности трения равна:

$$F_{s,Rd} = \frac{k_s n \mu}{\gamma_{M3}} \cdot F_{p,C} = \frac{1,0 \cdot 2 \cdot 0,5}{1,25} \cdot 171,5 = 137,2\text{кН}$$

Поперечная сила на один болт:

$$F_{V,Ed} = \frac{N_{Ed}}{n} = \frac{450}{8} = 56,25\text{кН}$$

Условие прочности

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

Значит,

$$\frac{F_{V,Ed}}{F_{V,Rd}} = \frac{56,25}{137,2} = 0,41$$

Условие выполняется.

3.2 Несущая способность болтового соединения на смятие

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

Расчетная несущая способность одного болта на смятие (см. Таблицу 3.4 СН РК EN 1993-1-8):

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

где γ_{M2} - частный коэффициент безопасности (см. НП.2.13 СН РК EN 1993-1-1), равный:

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

f_u - номинальное значение временного сопротивления на растяжение (см. Таблицу 3,1 СН РК EN 1993-1-1):

$$f_u = 430 \text{ Н/мм}^2;$$

α_b - параметр, равный наименьшему значению из трех величин α_d , $\frac{f_{ub}}{f_u}$ и 1,0 (см. Таблицу 3,4 СН РК EN 1993-1-1):

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

$$\alpha_d = \frac{e_1}{3d_0} = \frac{50}{3 \cdot 22} = 0,758 \text{ (для крайних болтов)}$$

$$\alpha_d = \frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4} = \frac{70}{3 \cdot 22} - \frac{1}{4} = 0,811 \text{ (для средних болтов)}$$

$$\frac{f_{ub}}{f_u} = \frac{1000}{360} = 2,778$$

$$\alpha_b = \min \left[\alpha_d; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1,0 \right] = \min[0,758; 0,811; 2,778; 1,0] = 0,758$$

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 (см. Таблицу 3,4 СН РК EN 1993-1-1):

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

$$2,8 \frac{e_2}{d_0} - 1,7 = 2,8 \cdot \frac{55}{22} - 1,7 = 5,3$$

$$1,4 \frac{p_2}{d_0} - 1,7 = 1,4 \cdot \frac{70}{22} - 1,7 = 2,75$$

$$k_1 = \min(5,3; 2,75; 2,5) = 2,5;$$

d - диаметр болта, равный:

$$d = 20 \text{ мм};$$

t - толщина пластины, равная

$$t = 16 \text{ мм}.$$

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

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \alpha f_u d t}{\gamma_{M2}} = \frac{2,5 \cdot 0,758 \cdot 360 \cdot 20 \cdot 16}{1,25} \cdot 10^{-3} = 174,64 \text{ кН.}$$

Поперечная сила на один болт:

$$F_{V,Ed} = \frac{N_{Ed}}{n} = \frac{450}{8} = 56,25 \text{ кН}$$

Условие прочности

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

Значит,

$$\frac{F_{V,Ed}}{F_{V,Rd}} = \frac{56,25}{174,64} = 0,32$$

Условие выполняется.

4 Расчет прочности соединительной планки

4.1 Разрушение соединительной планки по ослабленному поперечному сечению в пластической стадии

При расчете фрикционного соединения необходимо проверить несущую способность соединяемых элементов по ослабленному сечению в пластической стадии. Для сечений с отверстиями для болтов расчетное значение несущей способности на растяжение (в пластической стадии) следует принимать по Формуле (6.7) СН РК EN 1993-1-1:

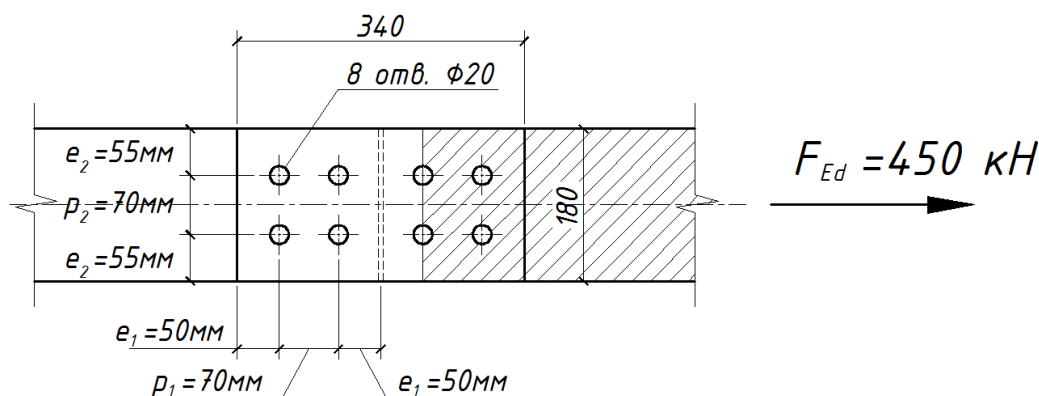


Рисунок 3 – Отрыв по ослабленному сечению

$$N_{u,Rd} = \frac{0,9 A_{net} \cdot f_u}{\gamma_{M2}}$$

Частный коэффициент безопасности (см. НП.2.13 СН РК EN 1993-1-1):

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

Расчетное значение несущей способности поперечного сечения нетто в пластической стадии при наличии отверстий для болтов:

$$N_{u,Rd} = \frac{0,9 \cdot (180 \cdot 16 - 2 \cdot 22 \cdot 16) \cdot 360}{1,25} \cdot 10^{-3} = 564 \text{ кН}$$

Значит,

$$\frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} = \frac{450}{564} = 0,8 < 1,0$$

Условие выполняется.

3.10 Учет отверстий для крепежных деталей

3.10.1 Общие положения

Учет отверстий при расчете элемента конструкции следует производить в соответствии с требованиями СН РК EN 1993-1-1, а именно:

а) Площадь поперечного сечения нетто следует принимать равной площади брутто за вычетом площадей поперечных сечений всех отверстий и других ослаблений;

б) При определении характеристик сечения элемента нетто вычитаемая площадь поперечного отверстия принимается равной площади его поперечного сечения брутто. Для отверстий с фаской ее следует учитывать аналогично;

в) При рядовом расположении отверстий общая вычитаемая площадь отверстий должна равняться максимальной сумме площадей сечения отверстий в любом поперечном сечении, перпендикулярном к оси элемента (см. плоскость разрушения 2 на Рисунке 6.1);

г) При шахматном расположении отверстий общая вычитаемая площадь отверстий должна быть наибольшее из двух вычисляемых значений:

$$1) A = t \cdot n \cdot d_0;$$

$$2) A = t \cdot \left(n d_0 - \sum \frac{s^2}{4p} \right),$$

где s - шаг при расположении в шахматном порядке, расстояние между центрами двух смежных отверстий, измеренное по линии, параллельной оси элемента;

p - расстояние между центрами тех же двух отверстий, измеренное по линии, перпендикулярной к оси элемента;

t - толщина;

n - количество отверстий, расположенных на любой диагональной или зигзагообразной линии, проходящей через весь элемент или его часть, см. Рисунок 3.7;

d_0 - диаметр отверстия.

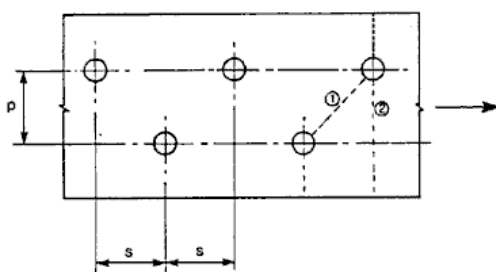


Рисунок 3.7 - Отверстия, расположенные в шахматном порядке, и линии критического разрушения 1 и 2

д) В уголках или других элементах с отверстиями, расположенными более чем в одной плоскости, расстояние p следует измерять между осями отверстий вдоль элемента (см. Рисунок 3.8).

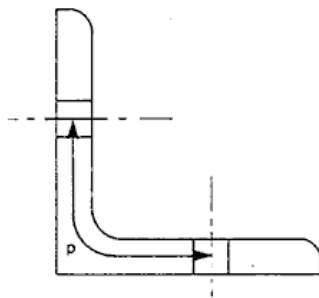


Рисунок 3.8 - Уголки с отверстиями в обеих полках

3.10.2 Расчет крайней зоны на вырыв материала (выкол)

3.10.2.1 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. Вырыв материала крайней зоны показан на Рисунке 3.9.

3.10.2.2 При передаче сдвигающего усилия на симметричную группу болтов без эксцентриситета расчетная несущая способность при вырыве материала крайней зоны определяется по формуле:

$$V_{\text{eff},1,Rd} = f_u A_{nt} / \gamma_{M2} + (1 / \sqrt{3}) \cdot f_y \cdot A_{nv} / \gamma_{M0}, \quad (3.9)$$

где A_{nt} - площадь сечения нетто растянутой зоны;

A_{nv} - площадь сечения нетто сдвигаемой зоны.

3.10.2.3 При передаче сдвигающего усилия на группу болтов с эксцентриситетом расчетная несущая способность при вырыве материала крайней зоны определяется по формуле:

$$V_{\text{eff},2,Rd} = 0,5 f_u A_{nt} / \gamma_{M2} + (1 / \sqrt{3}) \cdot f_y \cdot A_{nv} / \gamma_{M0}. \quad (3.10)$$

ПРИМЕР 6 Расчет крайней зоны элемента на вырыв материала при болтовом соединении

Исходные данные: выполнить расчет болтового соединения, работающего на срез. Центральная растягивающая сила равна $N_{Ed} = 839 \text{ кН}$. Болтовое соединение представляет собой группу из 8 болтов М24 класса прочности 8.8 с номинальным пределом текучести $f_{yb} = 430 \text{ МПа}$ и временным сопротивлением на растяжение $f_{ub} = 800 \text{ Н/мм}^2$. Марка стали S355 с номинальным пределом текучести $f_y = 355 \text{ Н/мм}^2$ и номинальное значение временного сопротивления на растяжение $f_u = 510 \text{ Н/мм}^2$.

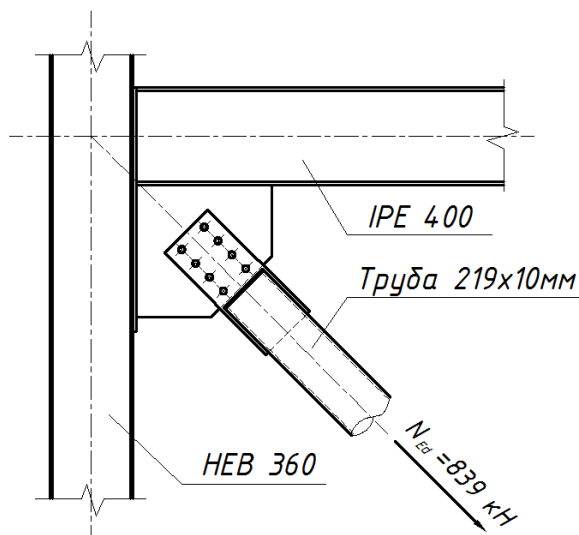


Рисунок 1 - Схема узла соединения

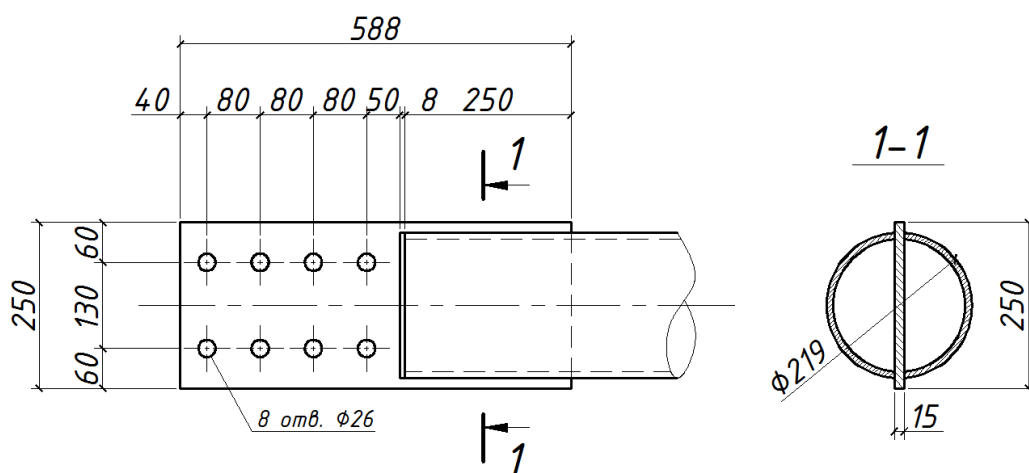


Рисунок 2 - Узел крепления

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:

$$A_s = 353 \text{ мм}^2$$

2.2 Механические характеристики болта (см. Таблицу 3.1 СН РК EN 1993-1-8)

Номинальный предел текучести $f_{yb} = 640 \text{ Н/мм}^2$ (для болтов класса прочности 8.8).

Временное сопротивление на растяжение $f_{ub} = 800 \text{ Н/мм}^2$ (для болтов класса прочности 8.8)

2.3 Расстояние между отверстиями

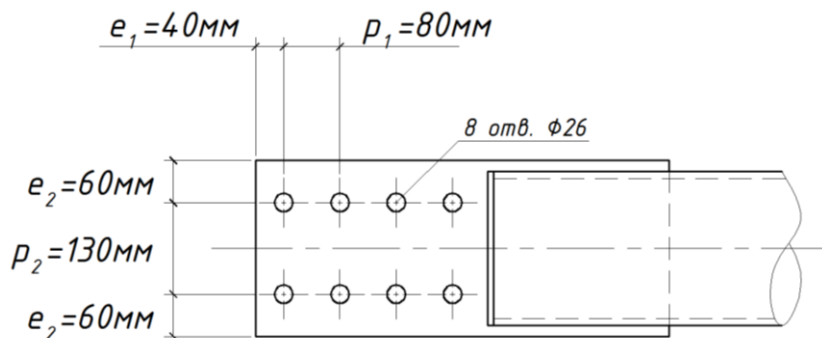


Рисунок 3 – Схема расположения отверстий

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 125мм .

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 125мм .

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 200мм .

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 200мм .

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 таблице 3.4 (см. Пункт 3.6.1(1) СН РК EN 1993-1-8).

Расчетная несущая способность одного болта на срез (см. Таблицу 3.4 СН РК EN 1993-1-8):

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

где α_V - параметр, для болтов классов прочности 8.8 равный (см. Таблицу 3.4 СН РК EN 1993-1-8):

$$\alpha_V = 0,6;$$

γ_{M2} - частный коэффициент безопасности, равный (см. НП.2.13 СН РК EN 1993-1-1):

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

f_{ub} - временное сопротивление на растяжение, равное (см. Таблицу 3.1 СН РК EN 1993-1-8):

$$f_{ub} = 800 \text{ Н/мм}^2;$$

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:

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

Поперечная сила на один болт:

$$F_{V,Ed} = \frac{N_{Ed}}{n} = \frac{839}{8} = 104,9 \text{ кН}$$

Условие прочности

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

Значит,

$$\frac{F_{V,Ed}}{F_{V,Rd}} = \frac{104,9}{135} = 0,78 < 1,0$$

Условие выполняется.

3.2 Несущая способность болтового соединения на смятие

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

Расчетная несущая способность одного болта на смятие (см. Таблицу 3.4 СН РК EN 1993-1-8):

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

где γ_{M2} - частный коэффициент безопасности, равный (см. НП.2.13 СН РК EN 1993-1-1):

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

f_u - номинальное значение временного сопротивления на растяжение соединяемых элементов, равное (см. Таблицу 3,1 СН РК EN 1993-1-1):

$$f_u = 430 \text{ МПа};$$

α_b - параметр, равный наименьшему значению из трех величин α_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, таблица 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, таблица 3,4 СН РК EN 1993-1-8

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

$$\alpha_d = 0,78$$

$$\frac{f_{ub}}{f_u} = \frac{800}{430} = 1,86$$

значит,

$$\alpha_b = \min \left[\alpha_d; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1,0 \right] = \min[0,51; 0,78; 1,86; 1,0] = 0,51$$

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:

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \alpha f_u d t}{\gamma_{M2}} = \frac{2,5 \cdot 0,51 \cdot 430 \cdot 24 \cdot 15}{1,25} \cdot 10^{-3} = 158 \text{ кН}.$$

Поперечная сила на один болт:

$$F_{V,Ed} = \frac{N_{Ed}}{n} = \frac{839}{8} = 104,9 \text{ кН}$$

Условие прочности:

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

Значит,

$$\frac{F_{V,Ed}}{F_{V,Rd}} = \frac{104,9}{158} = 0,67 < 1,0$$

Условие выполняется.

4 Расчет прочности 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 $N_{pl,Rd}$, $N_{u,Rd}$, $N_{net,Rd}$ (см. Пункт 6.2.3(2) СН РК EN 1993-1-1), то есть $N_{t,Rd} = \min[N_{pl,Rd}; N_{u,Rd}; N_{net,Rd}]$.

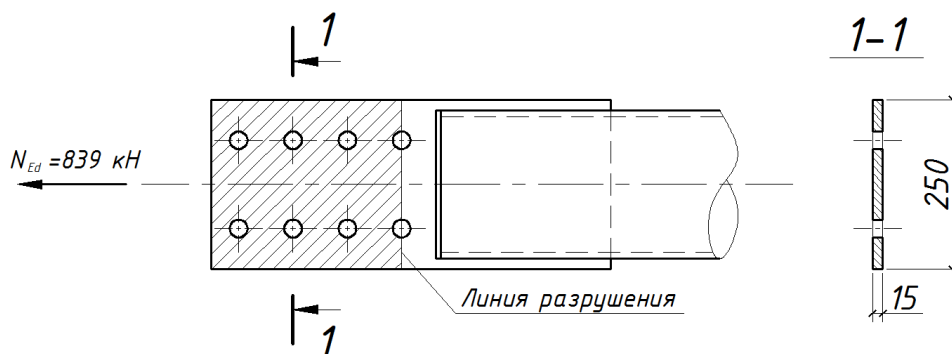


Рисунок 4 – Отрыв по ослабленному сечению

При расчете элемента для сечений с отверстиями для болтов расчетное значение несущей способности на растяжение следует принимать наименьшим из $N_{pl,Rd}$, $N_{u,Rd}$, $N_{net,Rd}$ (см. Пункт 6.2.3(2) СН РК EN 1993-1-1), то есть $N_{t,Rd} = \min[N_{pl,Rd}; N_{u,Rd}; N_{net,Rd}]$.

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

$$\frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} \leq 1,0 \quad (6.5)$$

Частные коэффициенты безопасности (НП.2.13 СН РК EN 1993-1-1):

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

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

Расчетное значение несущей способности поперечного сечения брутто в пластической стадии (см. Формулу 6.6 СН РК EN 1993-1-1):

$$N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (6.6)$$

Значит,

$$N_{pl,Rd} = \frac{250 \cdot 15 \cdot 275}{1,0} \cdot 10^{-3} = 1031 \text{ кН}$$

Расчетное значение несущей способности поперечного сечения нетто в пластической стадии при наличии отверстий для болтов (см. Формулу 6.7 СН РК EN 1993-1-1):

$$N_{u,Rd} = \frac{0,9 A_{net} \cdot f_u}{\gamma_{M2}} \quad (6.7)$$

Значит,

$$N_{u,Rd} = \frac{0,9 \cdot (250 \cdot 15 - 2 \cdot 26 \cdot 15) \cdot 430}{1,25} = 919 \text{ кН}$$

$$N_{t,Rd} = \min[N_{pl,Rd}; N_{u,Rd}] = \min[1031; 919] = 919 \text{ кН}$$

Проверка условия:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} = \frac{839}{919} = 0,91 < 1,0$$

Условие выполняется.

4.2 Разрушение соединительной планки с вырывом средней части

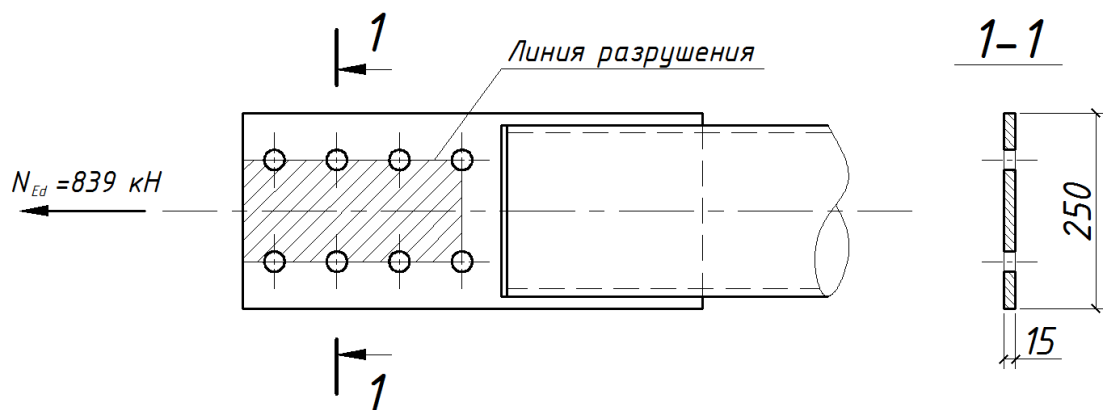


Рисунок 5 – Отрыв средней части

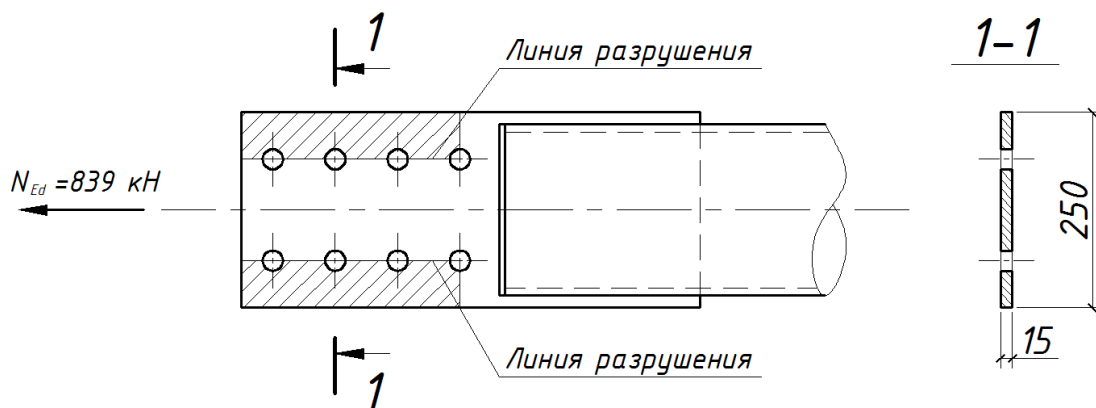


Рисунок 6 – Отрыв крайних частей

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), при передаче сдвигающего усилия на симметричную группу болтов без эксцентриситета расчетная несущая способность при вырыве материала крайней зоны определяется по формуле (см. Формулу 3.9 СН РК EN 1993-1-8):

$$V_{\text{eff},1,\text{Rd}} = \frac{f_u A_{\text{nt}}}{\gamma_{\text{M2}}} + \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{f_y A_{\text{nv}}}{\gamma_{\text{M2}}} \quad (3.9)$$

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:

$$\begin{aligned} A_{\text{nt}} &= \min[(p_2 - d_0)t_w; 2(e_2 - 0,5d_0)t_w] \\ A_{\text{nt}} &= \min[(130 - 26) \cdot 15; 2 \cdot 15(60 - 0,5 \cdot 26)] \\ A_{\text{nt}} &= \min[1560; 1410] = 1410 \text{ мм}^2 \end{aligned}$$

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

$$\begin{aligned} A_{\text{nv}} &= 2(3p_1 + e_1 - 2,5d_0)t_w \\ A_{\text{nv}} &= 2 \cdot 15(3 \cdot 80 + 40 - 2,5 \cdot 26) = 6450 \text{ мм}^2 \end{aligned}$$

Значит,

$$V_{\text{eff},1,\text{Rd}} = \frac{f_u A_{\text{nt}}}{\gamma_{\text{M2}}} + \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{f_y A_{\text{nv}}}{\gamma_{\text{M2}}} = \frac{430 \cdot 1410}{1,25 \cdot 10^3} + \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{275 \cdot 6450}{1,0 \cdot 10^3} = 1509 \text{ кН}$$

Таким образом,

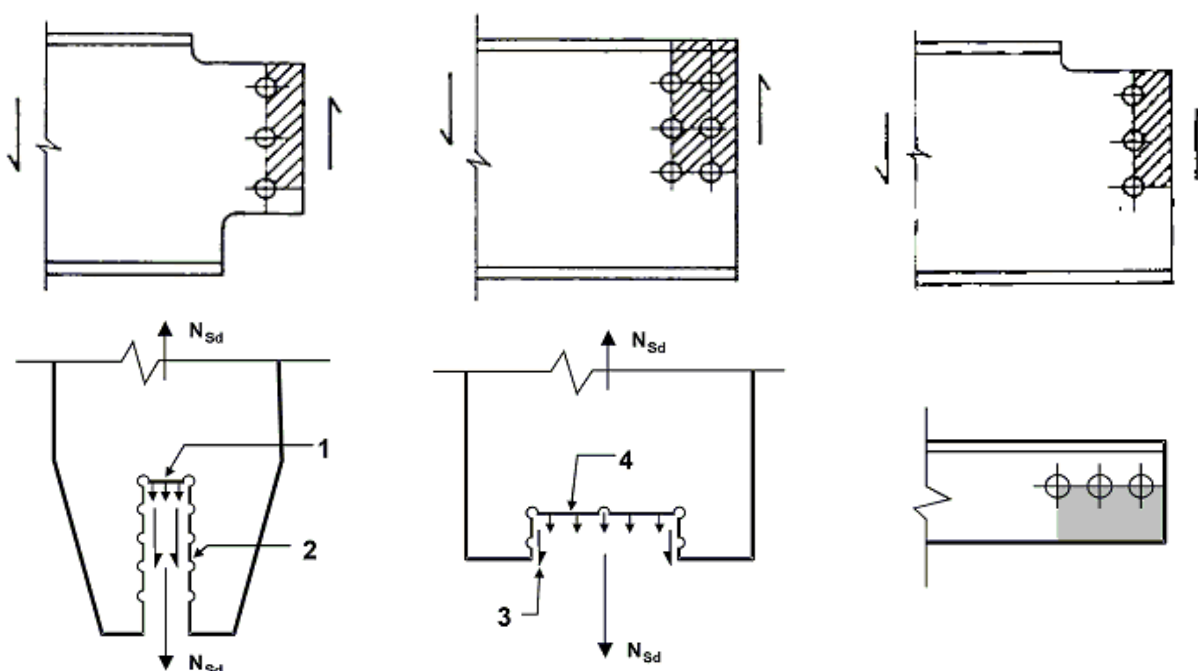
$$1509 \text{ кН} > 839 \text{ кН}$$

Условие выполняется.

3.10.3 Одиночные уголки, прикрепляемые одной полкой, и другие несимметрично прикрепляемые элементы, работающие на растяжение

3.10.3.1 Наличие эксцентриситета в соединениях, см. Пункт 2.7(1) настоящего пособия, а также влияние отверстий и расстояния до края элементов необходимо учитывать при определении расчетных несущих способностей соединений следующих элементов:

- а) несимметричных;
 б) симметричных, но несимметрично прикрепленных (например, уголки, прикрепленные одной полкой).



- 1 - малое растягивающее усилие; 2 - большое сдвигающее усилие;
 3 - малое сдвигающее усилие; 4 - большое растягивающее усилие

Рисунок 3.9 - Вырыв материала крайней зоны

3.10.3.2 Растянутые элементы из одиночных уголков, прикрепляемые одной полкой одним рядом болтов, см. Рисунок 3.10, можно рассматривать как нагруженные без эксцентриситета по эффективному сечению нетто, для которого несущую способность следует определять следующим образом:

- а) при креплении одним болтом:

$$N_{u,Rd} = \frac{2,0 \cdot (e_2 - 0,5d_0) \cdot t f_u}{\gamma_{M2}}; \quad (3.11)$$

- б) при креплении двумя болтами:

$$N_{u,Rd} = \frac{\beta_2 A_{net} f_u}{\gamma_{M2}}; \quad (3.12)$$

- в) при креплении тремя и более болтами:

$$N_{u,Rd} = \frac{\beta_3 A_{net} f_u}{\gamma_{M2}}; \quad (3.13)$$

где β_2 и β_3 - понижающие коэффициенты, зависящие от величины шага p_1 , см. Таблицу 3.8. При промежуточных значениях p_1 коэффициенты β могут быть получены линейной интерполяцией;

A_{net} - площадь уголка нетто. При креплении неравнополочного уголка меньшей полкой значение A_{net} следует принимать равным площади эквивалентного равнополочного уголка с полкой, равной меньшей полке неравнополочного уголка.

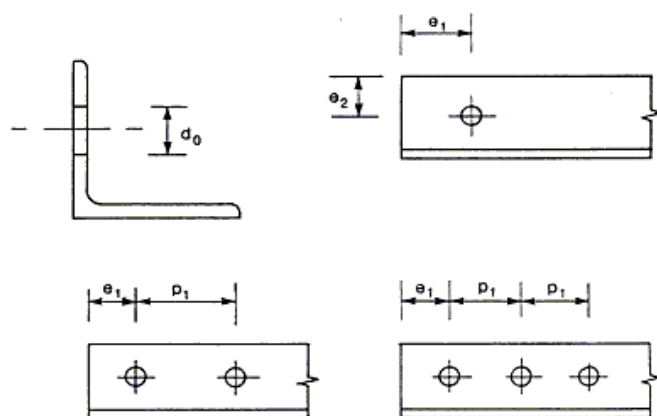


Рисунок 3.10 - Одиночные уголки, прикрепляемые одной полкой

Таблица 3.8 - Понижающие коэффициенты β_2 и β_3

Шаг p_1	$\leq 2,5d_0$	$\geq 5,0d_0$
β_2 , при двух болтах	0,4	0,7
β_3 , при трех и более болтах	0,5	0,7

3.10.4 Соединительные уголки

3.10.4.1 Соединительный уголок, показанный на Рисунке 3.11, прикрепляет уголкового элемента к фасонке или другой опорной части. Он должен быть рассчитан на усилие, в 1,2 раза превышающее усилие в выступающей полке уголкового элемента.

3.10.4.2 Крепежные детали, прикрепляющие соединительный уголок к полке уголкового элемента, следует рассчитывать на усилие, в 1,4 раза превышающее усилие в выступающей полке уголкового элемента.

3.10.4.3 Соединительные уголки, прикрепляющие швеллер или другой подобный элемент, следует рассчитывать на усилие, в 1,1 раза превышающее усилие в полках швеллера.

3.10.4.4 Крепежные детали, прикрепляющие соединительный уголок к швеллеру или другим подобным элементам, следует рассчитывать на усилие, в 1,2 раза превышающую усилие в полке швеллера, которую они крепят.

3.10.4.5 При креплении соединительного уголка к фасонке или другой опорной части следует предусматривать не менее двух болтов или заклепок.

3.10.4.6 Длина соединительного уголка должна быть не менее длины нахлестки прикрепляемого элемента с фасонкой или другой опорной частью.

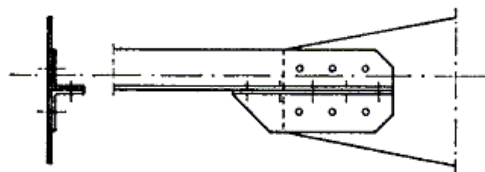


Рисунок 3.11 - Соединительные уголки

ПРИМЕР 7 Расчет болтового соединения металлического равнополочного уголка, прикрепляемый одной полкой, к металлической пластине

Исходные данные: выполнить расчет болтового соединения металлического равнополочного уголка L90×6 к металлической пластине толщиной $t = 15$ мм. Центральная растягивающая сила $N_{Ed} = 135$ кН. Уголок прикреплен к пластине двумя болтами в один ряд. Болты M20 класса прочности 8.8 с номинальным пределом текучести $f_{yb} = 430$ МПа и временным сопротивлением на растяжение $f_{ub} = 800$ Н/мм². Пластина выполнена из стали марки S275 с номинальным пределом текучести $f_y = 275$ Н/мм².

2 Определение основных параметров соединения

2.1 Геометрические характеристики болта

Диаметр болта:

$$d = 20 \text{ мм}$$

Диаметр отверстия под болт:

$$d_0 = 22 \text{ мм}$$

Площадь поперечного сечения болта:

$$A_s = 245 \text{ мм}^2$$

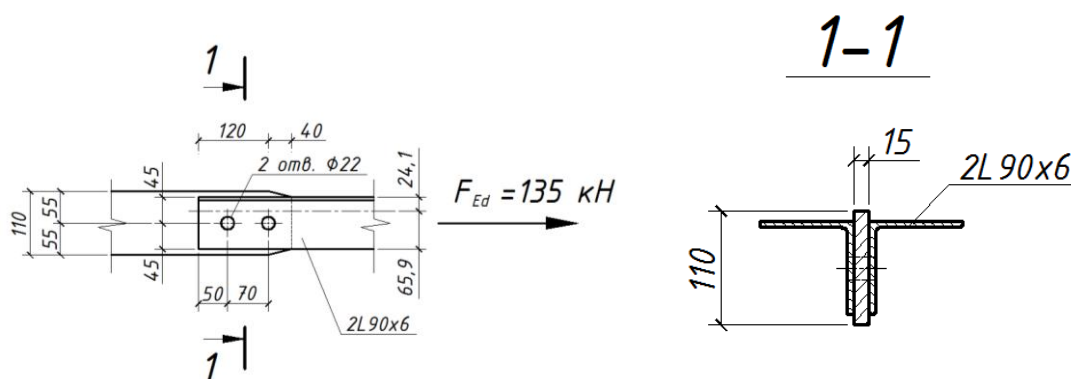


Рисунок 1

2.2 Механические характеристики болта

Механические характеристики болта определяются по Таблице 3.1 СН РК EN 1993-1-8. Номинальный предел текучести $f_{yb} = 640$ Н/мм² (для болтов класса прочности 8.8). Временное сопротивление на растяжение $f_{ub} = 800$ Н/мм² (для болтов класса прочности 8.8)

2.3 Расстояние между отверстиями

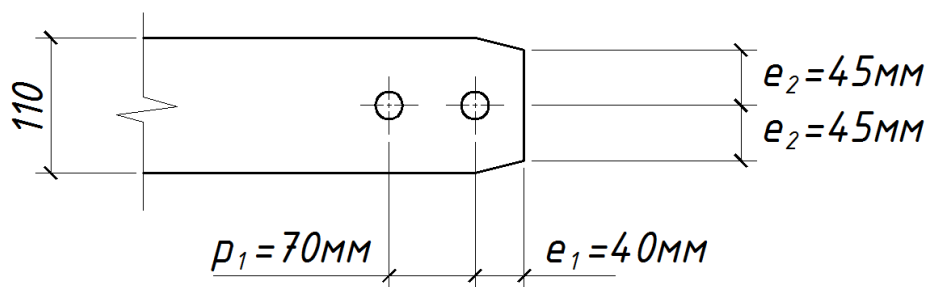


Рисунок 2 – Схема расположения отверстий

Расстояние до края вдоль усилия $e_1 = 40$ мм. По Таблице 3.3 СН РК EN 1993-1-8 размер величины e_1 должно быть в границах от $1,2d_0 = 1,2 \cdot 22 = 26,4$ мм до $8t = 8 \cdot 15 = 120$ мм или 125 мм.

То есть:

$$e_1 = 40 \text{ мм} > 1,2d_0 = 1,2 \cdot 22 = 26,4 \text{ мм};$$

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

Расстояние до края поперек усилия $e_2 = 45$ мм. По Таблице 3.3 СН РК EN 1993-1-8 размер величины e_2 должно быть в границах от $1,2d_0 = 1,2 \cdot 22 = 26,4$ мм до $8t = 8 \cdot 15 = 120$ мм или 125 мм.

То есть:

$$e_2 = 60 \text{ мм} > 1,2d_0 = 1,2 \cdot 22 = 26,4 \text{ мм};$$

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

Шаг $p_1 = 80$ мм (расстояние между болтами вдоль усилия). По таблице 3.3 СН РК EN 1993-1-8 размер величины p_1 должно быть в границах от $2,2d_0 = 2,2 \cdot 22 = 48,4$ мм до $14t = 14 \cdot 15 = 210$ мм или 200 мм.

То есть:

$$p_1 = 80 \text{ мм} > 2,2d_0 = 2,2 \cdot 22 = 48,4 \text{ мм};$$

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

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 Таблице 3.4 (см. Пункт 3.6.1(1) СН РК EN 1993-1-8).

Расчетная несущая способность одного болта на срез (см. Таблицу 3.4 СН РК EN 1993-1-8):

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

где α_V - параметр для болтов классов прочности 8.8 (см. Таблицу 3.4 СН РК EN 1993-1-8), равный:

$$\alpha_V = 0,6;$$

γ_{M2} - частный коэффициент безопасности, равный по НП.2.13 СН РК EN 1993-1-1:

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

f_{ub} - временное сопротивление на растяжение, равное:

$$f_{ub} = 800 \text{ Н/мм}^2;$$

A - площадь сечения болта нетто, равная:

$$A = A_s = 245 \text{ мм}^2.$$

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

$$F_{V,Rd} = \frac{\alpha_v f_{ub} A}{\gamma_{M2}} = \frac{0,6 \cdot 800 \cdot 245}{1,25} \cdot 10^{-3} = 147 \text{ кН}$$

Поперечная сила на один болт:

$$F_{V,Ed} = \frac{N_{Ed}}{n} = \frac{135}{2} = 67,5 \text{ кН}$$

Условие прочности:

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

$$\frac{F_{V,Ed}}{F_{V,Rd}} = \frac{67,5}{147} = 0,46$$

Условие выполняется.

3.2 Несущая способность болтового соединения на смятие

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

Расчетная несущая способность одного болта на смятие (см. Таблицу 3.4 СН РК EN 1993-1-8):

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

где γ_{M2} - частный коэффициент безопасности, равный по НП.2.13 СН РК EN 1993-1-1:

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

f_u - номинальное значение временного сопротивления на растяжение для стали марки S275 (см. Таблицу 3,1 СН РК EN 1993-1-1), равное:

$$f_u = 430 \text{ Н/мм}^2;$$

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

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

$$\alpha_d = \frac{e_1}{3d_0} = \frac{40}{3 \cdot 22} = 0,61 \text{ (для крайних болтов)}$$

$$\alpha_d = \frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4} = \frac{70}{3 \cdot 22} - \frac{1}{4} = 0,81 \text{ (для средних болтов)}$$

$$\frac{f_{ub}}{f_u} = \frac{800}{430} = 1,86$$

$$\alpha_b = \min \left[\alpha_d; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1,0 \right] = \min[0,61; 0,81; 1,86; 1,0] = 0,61$$

k_1 - параметр, равный наименьшему значению из двух величин $2,8 \frac{e_2}{d_0} - 1,7$ (для крайних болтов) и 2,5:

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

$$2,8 \frac{e_2}{d_0} - 1,7 = 2,8 \cdot \frac{45}{22} - 1,7 = 4,03$$

$$k_1 = \min[4,03; 2,5] = 2,5;$$

d - диаметр болта, равный:

$$d = 20 \text{ мм};$$

t - толщина пластины, равная:

$$t = 15 \text{ мм.}$$

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

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \alpha f_u d t}{\gamma_{M2}} = \frac{2,5 \cdot 0,61 \cdot 430 \cdot 20 \cdot 15}{1,25} \cdot 10^{-3} = 157,8 \text{ кН.}$$

Поперечная сила на один болт

$$F_{V,Ed} = \frac{N_{Ed}}{n} = \frac{135}{2} = 67,5 \text{ кН}$$

Условие прочности

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

$$\frac{F_{V,Ed}}{F_{V,Rd}} = \frac{67,5}{157,8} = 0,43$$

Условие выполняется.

4 Расчет прочности поперечного сечения соединяемых элементов

4.1 Разрушение металлической пластины

При расчете элемента для сечений с отверстиями для болтов расчетное значение несущей способности на растяжение следует принимать наименьшим из $N_{pl,Rd}$, $N_{u,Rd}$, $N_{net,Rd}$ (см. Пункт 6.2.3(2) СН РК EN 1993-1-1), то есть $N_{t,Rd} = \min[N_{pl,Rd}; N_{u,Rd}; N_{net,Rd}]$.

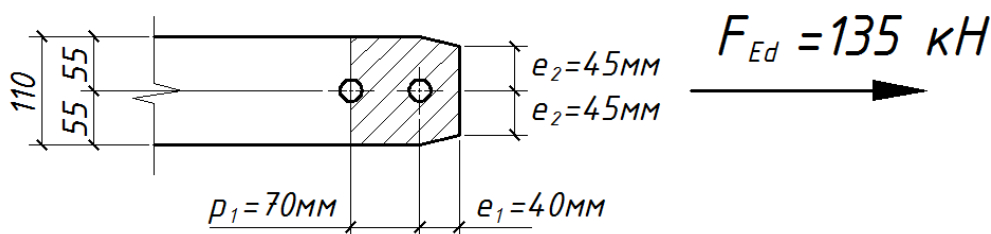


Рисунок 3 – Отрыв по ослабленному сечению пластины

При расчете элемента для сечений с отверстиями для болтов расчетное значение несущей способности на растяжение следует принимать наименьшим из $N_{pl,Rd}$, $N_{u,Rd}$, $N_{net,Rd}$ (см. Пункт 6.2.3(2) СН РК EN 1993-1-1), то есть $N_{t,Rd} = \min[N_{pl,Rd}; N_{u,Rd}; N_{net,Rd}]$.

Условие прочности:

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

Частные коэффициенты безопасности (см. НП.2.13 СН РК EN 1993-1-1):

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

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

Расчетное значение несущей способности поперечного сечения брутто в пластической стадии по Формуле (6.6) СН РК EN 1993-1-1:

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

Значит,

$$N_{pl.Rd} = \frac{110 \cdot 15 \cdot 275}{1,0} \cdot 10^{-3} = 453,75 \text{ кН}$$

Расчетное значение несущей способности поперечного сечения нетто в пластической стадии при наличии отверстий для болтов по Формуле (6.7) СН РК EN 1993-1-8:

$$N_{u.Rd} = \frac{0,9 A_{net} \cdot f_u}{\gamma_{M2}}$$

Значит,

$$N_{u.Rd} = \frac{0,9 \cdot (110 \cdot 15 - 22 \cdot 15) \cdot 430}{1,25} = 408,7 \text{ кН}$$

Таким образом,

$$N_{t.Rd} = \min[N_{pl.Rd}; N_{u.Rd}] = \min[453,75; 408,7] = 408,7 \text{ кН}$$

Проверка условия:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{t.Rd}} = \frac{135}{408,7} = 0,33 < 1,0$$

Условие выполняется.

4.2 Разрушение металлического равнополочного уголка

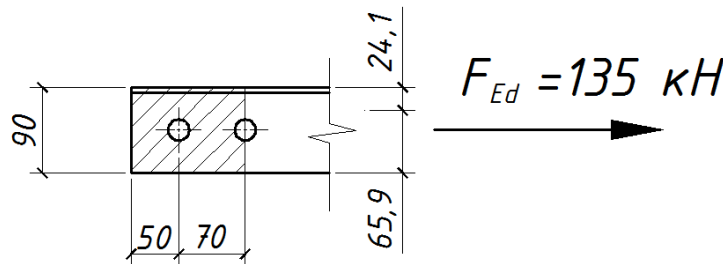


Рисунок 4 – Отрыв по ослабленному сечению уголка

Определение несущей способности одного уголка, прикрепляемого одной полкой одним рядом болтов, можно рассматривать как нагруженные без эксцентриситета по эффективному сечению нетто (см. Пункт 3.10.3(2) СН РК EN 1993-1-8). Для данного примера для определения несущей способности необходимо использовать Формулу (3.12) СН РК EN 1993-1-8:

$$N_{u.Rd} = \frac{\beta_2 A_{net} f_u}{\gamma_{M2}}$$

где A_{net} - площадь поперечного сечения нетто растянутого элемента (двух уголков), равная:

$$A_{net} = 2 \cdot (1050 - 22 \cdot 6) = 2 \cdot 918 = 1836 \text{ мм}^2;$$

f_u - номинальное значение временного сопротивления на растяжение для стали марки S275 (см. Таблицу 3,1 СН РК EN 1993-1-1):

$$f_u = 430 \text{ Н/мм}^2;$$

γ_{M2} - частный коэффициент безопасности (см. НП.2.13 СН РК EN 1993-1-1)

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

β_2 - понижающий коэффициент β_2 определяется по Таблице 3.8 СН РК EN 1993-1-8 в зависимости от величины шага p_1 между болтами вдоль усилия. В данном примере $p_1 = 70 \text{ мм} > 2,5d_0 = 2,5 \cdot 22 = 55 \text{ мм}$ и $p_1 = 70 \text{ мм} < 5d_0 = 5 \cdot 22 = 110 \text{ мм}$. Следовательно, для определения понижающего коэффициента β_2 необходимо выполнить линейную интерполяцию:

$$\beta_2 = 0,4 + \frac{0,7 - 0,4}{5d_0 - 2,5d_0} (p_1 - 2,5d_0) = 0,4 + \frac{0,3}{5 \cdot 22 - 2,5 \cdot 55} (70 - 2,5 \cdot 22) = 0,48$$

$$\beta_2 = 0,48$$

Таким образом, несущая способность равна:

$$N_{u,Rd} = \frac{\beta_2 A_{net} f_u}{\gamma_{M2}} = \frac{0,48 \cdot 1836 \cdot 430}{1,25} \cdot 10^{-3} = 303,1 \text{ кН}$$

Условие прочности по Формуле (6.5) СН РК EN 1993-1-1:

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

Значит,

$$\frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} = \frac{N_{Ed}}{N_{u,Rd}} = \frac{135}{303,1} = 0,45 < 1,0$$

Условие выполняется

ПРИМЕР 8 Расчет болтового соединения одиночного металлического равнополочного уголка, прикрепляемой одной полкой, к металлической фасонке

Исходные данные: проверить на прочность стержень, выполненный из равнополочного уголка 100×10мм с тремя круглыми отверстиями диаметром по 22мм, который нагружен центральной растягивающей силой $N_{Ed} = 37 \text{ кН}$ (см. Рисунок 1). Сталь марки S275 пределом текучести $f_y = 275 \text{ МПа}$ и временным сопротивлением сжатию $f_u = 430 \text{ МПа}$.

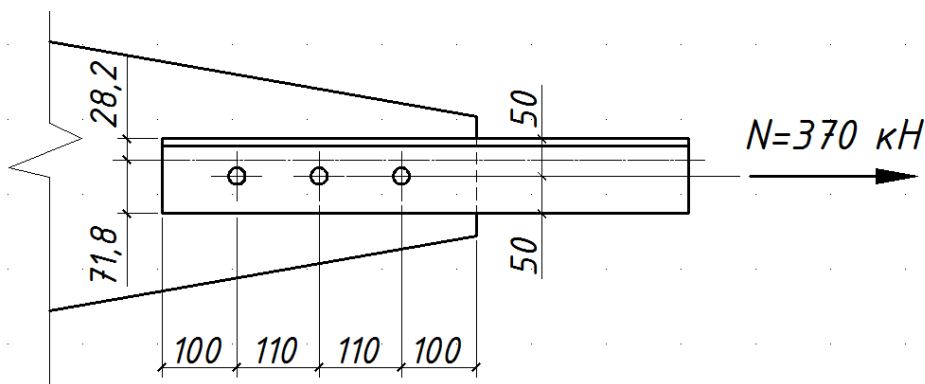


Рисунок 1

2 Определение геометрических характеристик

Площадь поперечного сечения брутто (см. Пункт 6.2.2.2(1) СН РК EN 1993-1-1):

$$A = 1920 \text{ мм}^2$$

Площадь поперечного сечения нетто:

$$A_{net} = 1920 - 22 \cdot 10 = 1700 \text{ мм}^2$$

Расстояние от края уголка до центра отверстия вдоль усилия:

$$e_1 = 100 \text{ мм}$$

Расстояние от края уголка до центра отверстия поперек усилия:

$$e_2 = 50 \text{ мм}$$

Расстояние между центрами отверстий вдоль усилия:

$$p_1 = 110 \text{ мм} \Rightarrow \beta_3 = 0,7;$$

3 Проверка несущей способности по прочности

3.1 Расчет несущей способности по центральному растяжению (см. Пункт 6.4 СН РК EN 1993-1-1)

Условие прочности по Формуле (6.5) СН РК EN 1993-1-1:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} \leq 1,0 \quad (6.5)$$

Частные коэффициенты безопасности (см. НП.2.13 СН РК EN 1993-1-1):

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

$$\gamma_{M0} = 1,25$$

Расчетное значение несущей способности поперечного сечения брутто в пластической стадии по Формуле (6.6) СН РК EN 1993-1-1:

$$N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (6.6)$$

Значит,

$$N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{1920 \cdot 275}{1,00} = 528 \text{ кН}$$

Расчетное значение несущей способности поперечного сечения нетто в пластической стадии при наличии отверстий для болтов по Формуле (6.7) СН РК EN 1993-1-1:

$$N_{u,Rd} = \frac{0,9 A_{net} \cdot f_u}{\gamma_{M2}} \quad (6.7)$$

Значит,

$$N_{u,Rd} = \frac{0,9 \cdot 1700 \cdot 430}{1,25} = 526 \text{ кН}$$

Расчетное значение несущей способности поперечного сечения нетто:

$$N_{u,Rd} = \frac{\beta_3 A_{net} f_u}{\gamma_{M2}}$$

Значит,

$$N_{u,Rd} = \frac{0,7 \cdot 1700 \cdot 430}{1,25} = 409,4 \text{ кН}$$

Таким образом,

$$N_{t,Rd} = \min[N_{pl,Rd}; N_{u,Rd}; N_{net,Rd}] = \min[528; 526; 409,4] = 409,4 \text{ кН}$$

Проверка условия:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} = \frac{370}{409,4} = 0,90 < 1,0$$

Условие прочности выполняется

3.11 Усилия отрыва (эффект рычага)

Крепежные детали, воспринимающие растягивающее усилие, следует проверять на действие дополнительного усилия отрыва, если оно может возникнуть.

ПРИМЕЧАНИЕ Правила расчета, приведенные в Пункте 6.2.4 настоящего пособия, в неявной форме учитывают усилия отрыва.

3.12 Распределение усилий между крепежными деталями в предельном состоянии по несущей способности

3.12.1 В соединении, подверженном действию изгибающего момента, распределение внутренних усилий между крепежными деталями может быть линейным (т. е. пропорциональным расстоянию от центра вращения) или пластическим (т. е. допускается любое равномерное распределение при условии, что несущие способности составных элементов соединения не превышены и их пластичность достаточна).

3.12.2 Упругое линейное распределение внутренних усилий следует применять в следующих случаях:

- а) При использовании болтов для создания фрикционного соединения категории С;
- б) В срезных соединениях, если расчетная несущая способность крепежной детали на срез $F_{v,Rd}$ меньше расчетной несущей способности на смятие $F_{b,Rd}$;
- в) Если соединения подвержены действию ударной, вибрационной или переменной (кроме ветровой) нагрузки.

3.12.3 При действии на соединение только усилия сдвига без эксцентриситета, распределение усилия между крепежными деталями можно считать равномерным при условии, что все крепежные детали одного размера и одного класса прочности.

ПРИМЕР 9 Расчет прочности крепления второстепенной балки к основной балке через вертикальную накладку

Исходные данные: выполнить расчет прочности крепления второстепенной балки к основной балке через вертикальную накладку (см. Рисунок 1). Вертикальная накладка толщиной $t = 10$ мм крепится к основной балке посредством сварного шва с эффективной толщиной $a_w = 4$ мм. Данная накладка имеет два отверстия диаметром 22 мм для болтов М20, посредством которых второстепенная балка крепится к основной балке.

Основная балка выполнена из прокатного двутаврового сечения IPE 450, а второстепенная балка - IPE 200. Вертикальная накладка - металлическая пластина 120×140 мм, толщиной 10 мм.

Все металлические элементы узла соединения - сталь марки S275 с номинальными значениями предела текучести $f_y = 275 \text{ Н/мм}^2$ и временного сопротивления на растяжение $f_u = 430 \text{ Н/мм}^2$.

Болты марки М20, класс прочности 8.8, болты без предварительного натяжения.

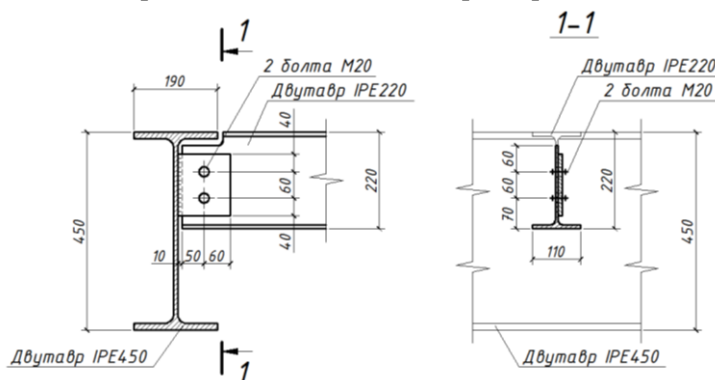


Рисунок 1 - Конструкция узла

2 Определение несущей способности болтового соединения

2.1 Геометрические характеристики болта

Диаметр болта:

$$d = 20\text{мм.}$$

Диаметр отверстия под болт:

$$d_0 = 22\text{мм.}$$

Площадь поперечного сечения болта нетто:

$$A_s = 245\text{мм}^2.$$

2.2 Физико-механические характеристики болта

Физико-механические характеристики болтов определяются по Таблице 3.1 СН РК EN 1993-1-8) в зависимости от класса прочности.

Номинальный предел текучести для болтов класса прочности 8.8 равен:

$$f_{yb} = 640\text{Н/мм}^2.$$

Номинальное временное сопротивление на растяжение для болтов класса прочности 8.8 равно:

$$f_{ub} = 800\text{Н/мм}^2.$$

2.3 Расстояние между отверстиями

Конструкция узла (см. Рисунок 1) и расположение отверстий (см. Рисунок 2) для болтов согласно Рисунку 3.1 СН РК EN 1993-1-8, где:

- расстояние от края пластины до центра отверстия вдоль усилия равно:

$$e_1 = 40\text{мм};$$

- расстояние от края пластины до центра отверстия поперек усилия равно:

$$e_2 = 60\text{мм};$$

- расстояние между центрами отверстий вдоль усилия равно:

$$p_1 = 60\text{мм.}$$

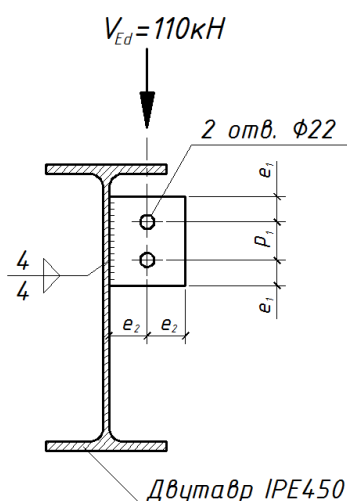


Рисунок 2 - Сварное соединение вертикальной накладки к двутавру IPE 450

Расстояние от центра отверстия до края вдоль усилия равно:

$$e_1 = 40\text{мм}.$$

По Таблице 3.3 СН РК EN 1993-1-8 размер величины e_1 должен быть в границах от $1,2d_0 = 1,2 \cdot 22 = 26,4\text{мм}$ до $8t = 8 \cdot 10 = 80\text{мм}$ или 125мм .

То есть:

$$e_1 = 40\text{мм} > 1,2d_0 = 1,2 \cdot 22 = 26,4\text{мм};$$

$$e_1 = 40\text{мм} < \max[8t = 8 \cdot 10 = 80\text{мм}; 125\text{мм}] = 125\text{мм}.$$

Расстояние от центра отверстия до края поперек усилия равно:

$$e_2 = 60\text{мм}.$$

По Таблице 3.3 СН РК EN 1993-1-8 размер величины e_2 должен быть в границах от $1,2d_0 = 1,2 \cdot 22 = 26,4\text{мм}$ до $8t = 8 \cdot 10 = 80\text{мм}$ или 125мм .

То есть:

$$e_2 = 60\text{мм} > 1,2d_0 = 1,2 \cdot 22 = 26,4\text{мм};$$

$$e_2 = 60\text{мм} < \max[8t = 8 \cdot 10 = 80\text{мм}; 125\text{мм}] = 125\text{мм}.$$

Шаг p_1 - расстояние между центрами отверстий вдоль усилия равно:

$$p_1 = 60\text{мм}.$$

По Таблице 3.3 СН РК EN 1993-1-8 размер величины p_1 должен быть в границах от $2,2d_0 = 2,2 \cdot 22 = 48,4\text{мм}$ до $14t = 14 \cdot 10 = 140\text{мм}$ или 200мм .

То есть:

$$p_1 = 60\text{мм} > 2,2d_0 = 2,2 \cdot 22 = 48,4\text{мм};$$

$$p_1 = 60\text{мм} < \min[14t = 14 \cdot 10 = 140\text{мм}; 200\text{мм}] = 200\text{мм}.$$

2.4 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 Таблице 3.4 (см. Пункт 3.6.1(1) СН РК EN 1993-1-8).

Расчетная несущая способность одного болта на срез одной плоскостью (см. Таблицу 3.4 СН РК EN 1993-1-8 и Рисунок 3):

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

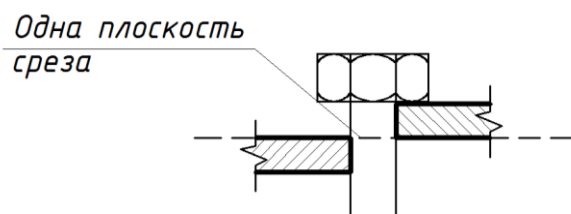


Рисунок 3 - Схема болтового соединения, подверженного действию среза одной плоскостью

где α_V - параметр, для болтов классов прочности 8.8 равный (см. Таблицу 3.4 СН РК EN 1993-1-8):

$$\alpha_V = 0,6;$$

γ_{M2} - частный коэффициент безопасности, равный (см. НП.2.13 СН РК EN 1993-1-1):

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

f_{ub} - временное сопротивление на растяжение, равное (см. Таблицу 3.1 СН РК EN 1993-1-8):

$$f_{ub} = 800 \text{ Н/мм}^2;$$

A - площадь сечения болта нетто, равная:

$$A = A_s = 245 \text{ мм}^2.$$

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

$$F_{V,Rd} = \frac{\alpha_V f_{ub} A}{\gamma_{M2}} = \frac{0,6 \cdot 800 \cdot 245}{1,25} \cdot 10^{-3} = 188,2 \text{ кН}$$

Поперечная сила на один болт (где n - количество болтов в соединении):

$$F_{V,Ed} = \frac{V_{Ed}}{n} = \frac{110}{2} = 55 \text{ кН}$$

Условие прочности:

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

Значит,

$$\frac{F_{V,Ed}}{F_{V,Rd}} = \frac{55}{188,2} = 0,29 < 1,0$$

Условие выполняется.

2.5 Несущая способность болтового соединения на смятие

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

Расчетная несущая способность одного болта на смятие (см. Таблицу 3.4 СН РК EN 1993-1-8):

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

где γ_{M2} - частный коэффициент безопасности, равный (см. НП.2.13 СН РК EN 1993-1-1):

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

f_u - номинальное значение временного сопротивления на растяжение соединяемых элементов, равное (см. Таблицу 3,1 СН РК EN 1993-1-1):

$$f_u = 430 \text{ МПа};$$

α_b - параметр, равный наименьшему значению из трех величин α_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 вдоль усилия по Таблице 3,4 СН РК EN 1993-1-8

$$\alpha_d = \frac{e_1}{3d_0} = \frac{40}{3 \cdot 22} = 0,61$$

$$\frac{f_{ub}}{f_u} = \frac{800}{430} = 1,86$$

Значит,

$$\alpha_b = \min \left[\alpha_d; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1,0 \right] = \min[0,61; 1,86; 1,0] = 0,61$$

k_1 - параметр, равный наименьшему значению из трех величин $2,8 \frac{e_2}{d_0} - 1,7$ (для крайних болтов) и 2,5:

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

для крайних болтов

$$2,8 \frac{e_2}{d_0} - 1,7 = 2,8 \cdot \frac{60}{22} - 1,7 = 4,24$$

значит,

$$k_1 = \min(4,24; 2,5) = 2,5;$$

d - диаметр болта, равный:

$$d = 20\text{мм};$$

t - толщина вертикальной накладки, равная:

$$t = 10\text{мм}.$$

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

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \alpha f_u d t}{\gamma_{M2}} = \frac{2,5 \cdot 0,61 \cdot 430 \cdot 20 \cdot 10}{1,25} \cdot 10^{-3} = 104,9\text{кН}.$$

Поперечная сила на один болт (где n - количество болтов в соединении):

$$F_{V,Ed} = \frac{V_{Ed}}{n} = \frac{110}{2} = 55\text{кН}$$

Условие прочности:

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

Значит,

$$\frac{F_{V,Ed}}{F_{V,Rd}} = \frac{55}{104,9} = 0,52 < 1,0$$

Условие выполняется.

3 Проверка несущей способности сварного шва

3.1 Эффективная толщина сварного шва

По требованиям Пункта 4.5.2(2) СН РК EN 1993-1-8, эффективная толщина углового сварного шва должна быть не менее 3мм. В данном примере:

$$a_w = 4,0\text{мм}.$$

3.2 Длина сварных швов

Длина двухстороннего сварного шва крепления накладки к основной балке (IPE 450) с каждой стороны накладки составляет:

$$l_w = 140,0\text{мм}.$$

Согласно Пункту 4.5.1(2) СН РК EN 1993-1-8, длина сварного шва должна быть больше 30мм, также длина не должна быть меньше 6 эффективных толщин сварного шва, то есть:

$$l_w = 140,0\text{мм} > 30\text{мм};$$

$$l_w = 140,0\text{мм} > 6 \cdot a_w = 6 \cdot 4 = 24,0\text{мм}.$$

3.3 Определение несущей способности продольного сварного шва по направленному методу

Согласно Пункту 5.5.3.1(1) СН РК EN 1993-1-8, расчетную несущую способность углового сварного шва следует определять по направленному методу или по упрощенному методу.

Условия прочности углового сварного шва по направленному методу по Формуле (4.1) СН РК EN 1993-1-8:

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} \leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}} \quad (4.1)$$

$$\sigma_{\perp} \leq 0,9 \frac{f_u}{\gamma_{M2}}$$

где σ_{\perp} - нормальное напряжение, перпендикулярное сечению сварного шва, для продольных сварных швов;

τ_{\perp} - касательное напряжение (в плоскости сечения сварного шва), перпендикулярное продольной оси сварного шва, для продольных сварных швов;

τ_{\parallel} - касательное напряжение (в плоскости сечения сварного шва), параллельное продольной оси сварного шва;

f_u - номинальное значение временного сопротивления на растяжение, равное для марки стали S275 по Таблице 3.1 СН РК EN 1993-1-1:

$$f_u = 430 \text{ Н/мм}^2;$$

β_w - поправочный коэффициент, принимаемый по Таблице 4.1 СН РК EN 1993-1-8, равный для марки стали S275:

$$\beta_w = 0,85;$$

γ_{M2} - частный коэффициент безопасности по НП.2.13 СН РК EN 1993-1-1, равный:

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

Нормальное напряжение перпендикулярное сечению сварного шва, для продольных сварных швов определяется из формулы:

$$\sigma = \frac{M_{Ed}}{W_w} = \frac{V_{Ed} \cdot e}{\frac{t \cdot l_w^2}{6}} = \frac{110 \cdot 10^3 \cdot 60}{\frac{10 \cdot 140^2}{6}} = 202 \text{ Н/мм}^2$$

Касательное напряжение (в плоскости сечения сварного шва), перпендикулярное продольной оси сварного шва, для продольных сварных швов определяется из формулы:

$$\tau_{\perp} = \sigma_{\perp} = \frac{t \cdot \sigma}{2 \cdot a_w \sqrt{2}} = \frac{10 \cdot 202}{2 \cdot 4 \cdot \sqrt{2}} = 178,5 \text{ Н/мм}^2.$$

Касательное напряжение (в плоскости сечения сварного шва), параллельное продольной оси сварного шва, для продольных сварных швов определяется из формулы:

$$\tau_{\parallel} = \frac{V_{Ed}}{2 \cdot a_w \cdot l_w} = \frac{110 \cdot 10^{-3}}{2 \cdot 4 \cdot 140} = 13,75 \text{ Н/мм}^2.$$

Значит,

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} = \sqrt{178,5^2 + 3(178,5^2 + 13,75^2)} = 357,8 \text{ Н/мм}^2;$$

$$\frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}} = \frac{430}{0,85 \cdot 1,25} = 404,7 \text{ Н/мм}^2.$$

Таким образом, первое условие Формулы (4.1) СН РК EN 1993-1-8:

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} = 357,8 \text{ Н/мм}^2 < \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}} = 404,7 \text{ Н/мм}^2.$$

Условие выполняется.

Кроме того, необходимо проверить второе условие Формулы (4.1) СН РК EN 1993-1-8:

$$\sigma_{\perp} \leq 0,9 \cdot \frac{f_u}{\gamma_{M2}}$$

$$\sigma_{\perp} = 178,5 \text{ Н/мм}^2 < 0,9 \cdot \frac{430}{1,25} = 309,6 \text{ Н/мм}^2.$$

Условие выполняется.

4 Проверка прочности соединяемых элементов в болтовом соединении

4.1 Разрушение вертикальной накладке по ослабленному поперечному сечению при действии поперечной нагрузки

Процедура расчета несущей способности соединения заключается не только в проверке несущей способности болта на срез и соединяемых деталей на смятие, но и в проверке несущей способности соединяемых деталей при действии поперечной нагрузки (см. Рисунок 4), а также проверке несущей способности при отрыве материала крайней зоны соединяемых деталей (см. Рисунок 5).

При расчете поперечных сечений с отверстиями под болты (ослабленное сечение) расчетное значение несущей способности при действии поперечной силы следует проверять условие прочности согласно Пункту 6.2.6(1) по Формуле (6.17) СН РК EN 1993-1-1:

$$\frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} \leq 1,0 \quad (6.17)$$

где V_{Ed} - расчетное значение действующей поперечной силы, равное:

$$V_{Ed} = 110 \text{ кН};$$

$V_{c,Rd}$ - расчетное значение несущей способности поперечного сечения при действии поперечной силы.

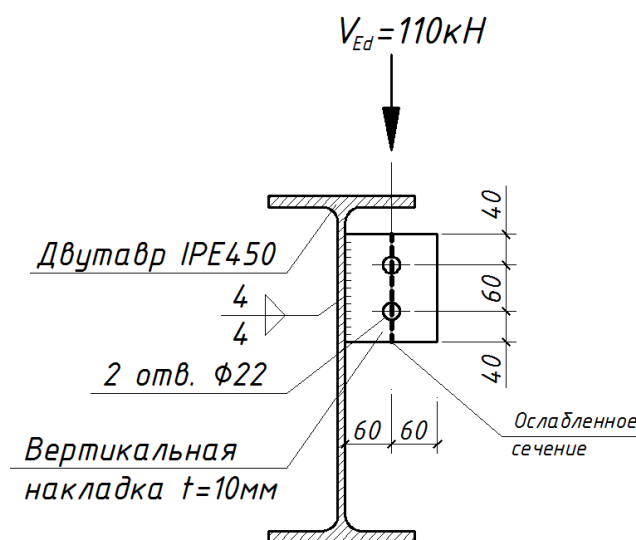


Рисунок 4 - Узел крепления вертикальной накладки к основной балке

В пластической стадии принимается равным расчетному значению несущей способности поперечного сечения при действии поперечной силы в пластической стадии $V_{pl,Rd}$. То есть:

$$V_{c,Rd} = V_{pl,Rd}$$

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_V \cdot (f_y / \sqrt{3})}{\gamma_{M0}} \quad (6.18)$$

где A_V - площадь сдвига вертикальной накладки, равная:

$$A_V = h \cdot t = 140 \cdot 10 = 1400 \text{ мм}^2;$$

f_y - номинальное значение предела текучести для стали марки S275, равное:

$$f_y = 275 \text{ Н/мм}^2;$$

γ_{M0} - частный коэффициент безопасности, равный согласно НП.2.13 СН РК EN 1993-1-1:

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

Значит,

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_V \cdot (f_y / \sqrt{3})}{\gamma_{M0}} = \frac{1400 \cdot (275 / \sqrt{3})}{1,0} = 222,3 \text{ кН}$$

Таким образом,

$$\frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} = \frac{110}{222,3} = 0,50$$

Условие выполняется.

4.2 Разрушение болтового соединения с отрывом крайней части вспомогательной балки

Отрыв 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).

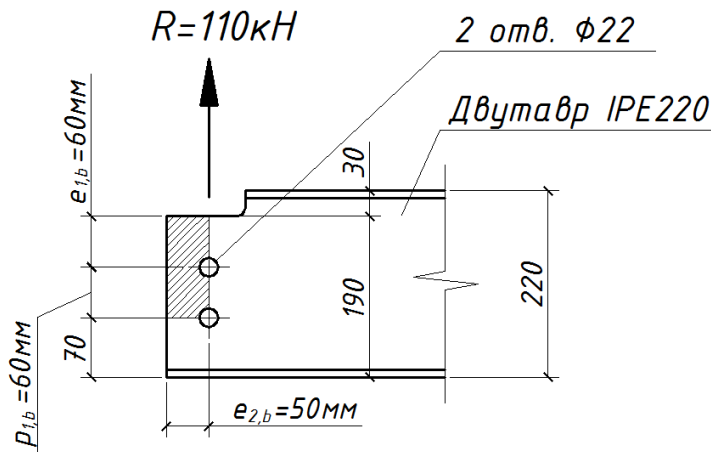


Рисунок 5 – Отрыв крайней части вспомогательной балки

Согласно Пункту 3.10.2(3), при передаче сдвигающего усилия на группу болтов с эксцентриситетом (см. Рисунок 5) расчетная несущая способность при отрыве материала крайней зоны определяется по Формуле (3.10) СН РК EN 1993-1-8:

$$V_{eff,2,Rd} = \frac{0,5 \cdot f_u \cdot A_{nt}}{\gamma_{M2}} + \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{f_y \cdot A_{nv}}{\gamma_{M0}} \quad (3.10)$$

где A_{nt} - площадь сечения нетто растянутой зоны, равная:

$$A_{nt} = t_w(e_{2,b} - 0,5d_0) = 5,9 \cdot (50 - 0,5 \cdot 22) = 230,1 \text{ мм}^2;$$

A_{nv} - площадь сечения нетто сдвигаемой зоны, равная:

$$A_{nv} = t_w(e_{1,b} + p_{1,b} - 1,5d_0) = 5,9 \cdot (60 + 60 - 1,5 \cdot 22) = 513,3 \text{ мм}^2;$$

f_u - номинальное значение временного сопротивления на растяжение, равное для марки стали S275 по Таблице 3.1 СН РК EN 1993-1-1:

$$f_u = 430 \text{ Н/мм}^2;$$

f_y - номинальное значение предела текучести, равное для марки стали S275 по Таблице 3.1 СН РК EN 1993-1-1:

$$f_y = 275 \text{ Н/мм}^2;$$

γ_{M0} , γ_{M2} - частные коэффициенты безопасности, равные согласно НП.2.13 СН РК EN 1993-1-1:

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

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

Значит,

$$V_{eff,2,Rd} = \frac{0,5 \cdot f_u \cdot A_{nt}}{\gamma_{M2}} + \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{f_y \cdot A_{nv}}{\gamma_{M0}} =$$

$$= \frac{0,5 \cdot 430 \cdot 10^{-3} \cdot 230,1}{1,25} + \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{275 \cdot 10^{-3} \cdot 513,3}{1,0} = 39,58 + 81,50 = 121,1 \text{ кН}$$

Таким образом,

$$\frac{V_{Ed}}{V_{eff,2,Rd}} = \frac{110}{121,1} = 0,90 < 1,0$$

Условие выполняется.

ПРИМЕР 10 Расчет болтового соединения балки к колонне посредством равнополочных уголков

Исходные данные: выполнить проверку несущей способности узла крепления балки к колонне через соединительные уголки (см. Рисунок 1). Узел крепления подвержен действию поперечной силы $V_{Ed} = 170 \text{ кН}$.

Балка выполнена из прокатного двутаврового сечения IPE 330, колонна - двутавр НЕВ 240. Соединительные уголки - прокатный равнополочный уголок L 100×10.

Все металлические элементы узла соединения - сталь марки S235 с номинальными значениями предела текучести $f_y = 235 \text{ Н/мм}^2$ и временного сопротивления на растяжение $f_u = 360 \text{ Н/мм}^2$.

Болты марки M20, класс прочности 5.6, болты без предварительного натяжения.

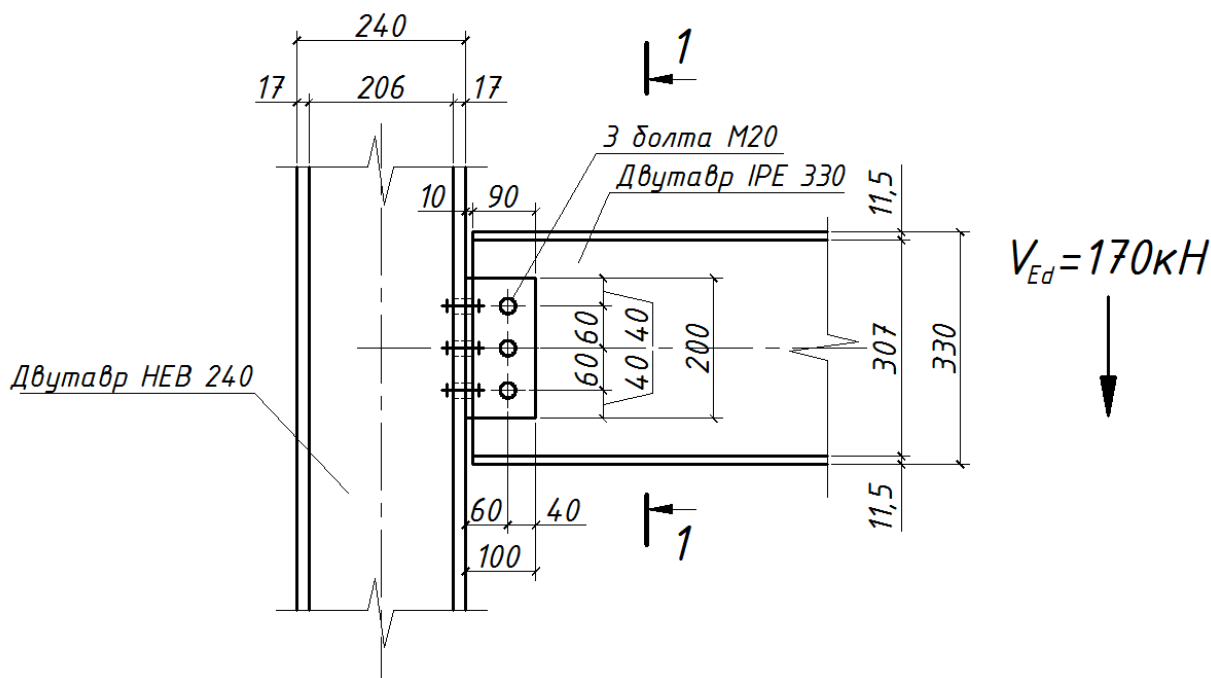


Рисунок 1 - Схема узла крепления балки (двутавр IPE 330) к колонне (НЕВ 240)

2 Определение несущей способности болтового соединения

2.1 Геометрические характеристики болта

Диаметр болта:

$$d = 20 \text{ мм.}$$

Диаметр отверстия под болт:

$$d_0 = 22\text{мм.}$$

Площадь поперечного сечения болта нетто:

$$A_s = 245\text{мм}^2.$$

2.2 Физико-механические характеристики болта

Физико-механические характеристики болтов определяются по Таблице 3.1 СН РК EN 1993-1-8) в зависимости от класса прочности.

Номинальный предел текучести для болтов класса прочности 5.6 равен:

$$f_{yb} = 300\text{Н/мм}^2.$$

Номинальное временное сопротивление на растяжение для болтов класса прочности 5.6 равно:

$$f_{ub} = 500\text{Н/мм}^2.$$

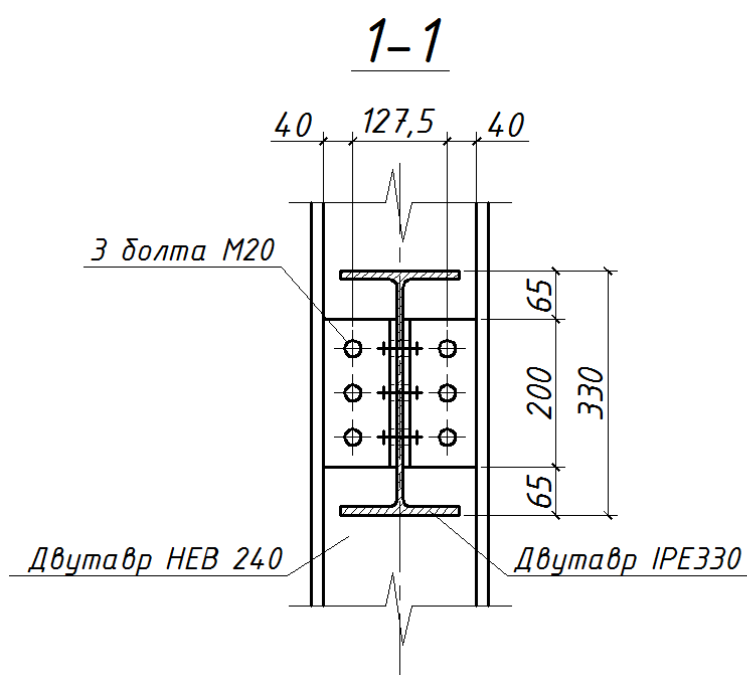


Рисунок 2 - Сечение узла крепления балки к колонне

2.3 Расстояние между отверстиями в соединительном уголке

Конструкция узла (см. Рисунок 1 и Рисунок 2) и расположение отверстий (см. Рисунок 3) для болтов согласно Рисунку 3.1 СН РК EN 1993-1-8, где:

- расстояние от края уголка до центра отверстия вдоль усилия равно:

$$e_1 = 40\text{мм};$$

- расстояние от края пластины до центра отверстия поперек усилия равно:

$$e_2 = 40\text{мм};$$

- расстояние между центрами отверстий вдоль усилия равно:

$$p_1 = 60\text{мм.}$$

Расстояние от центра отверстия до края вдоль усилия равно:

$$e_1 = 40\text{мм.}$$

По Таблице 3.3 СН РК EN 1993-1-8 размер величины e_1 должен быть в границах от $1,2d_0 = 1,2 \cdot 22 = 26,4\text{мм}$ до $8t = 8 \cdot 10 = 80\text{мм}$ или 125мм .

То есть:

$$e_1 = 40\text{мм} > 1,2d_0 = 1,2 \cdot 22 = 26,4\text{мм};$$

$$e_1 = 40\text{мм} < \max[8t = 8 \cdot 10 = 80\text{мм}; 125\text{мм}] = 125\text{мм}.$$

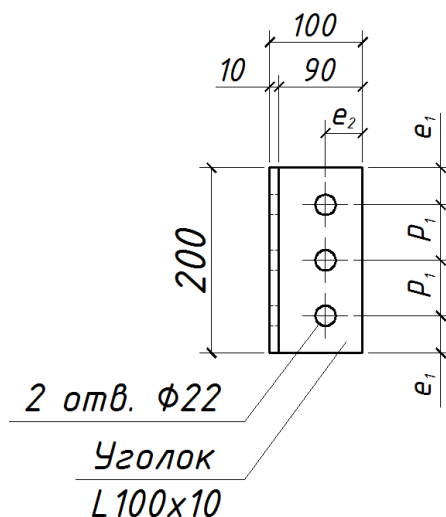


Рисунок 3 - Схема расположения отверстий под болты в соединительном уголке L140×10

Расстояние от центра отверстия до края поперек усилия равно:

$$e_2 = 40\text{мм}.$$

По Таблице 3.3 СН РК EN 1993-1-8 размер величины e_2 должен быть в границах от $1,2d_0 = 1,2 \cdot 22 = 26,4\text{мм}$ до $8t = 8 \cdot 10 = 80\text{мм}$ или 125мм .

То есть:

$$e_2 = 40\text{мм} > 1,2d_0 = 1,2 \cdot 22 = 26,4\text{мм};$$

$$e_2 = 60\text{мм} < \max[8t = 8 \cdot 10 = 80\text{мм}; 125\text{мм}] = 125\text{мм}.$$

Шаг p_1 - расстояние между центрами отверстий вдоль усилия равно:

$$p_1 = 60\text{мм}.$$

По Таблице 3.3 СН РК EN 1993-1-8 размер величины p_1 должен быть в границах от $2,2d_0 = 2,2 \cdot 22 = 48,4\text{мм}$ до $14t = 14 \cdot 10 = 140\text{мм}$ или 200мм .

То есть:

$$p_1 = 60\text{мм} > 2,2d_0 = 2,2 \cdot 22 = 48,4\text{мм};$$

$$p_1 = 60\text{мм} < \min[14t = 14 \cdot 10 = 140\text{мм}; 200\text{мм}] = 200\text{мм}.$$

2.4 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 Таблице 3.4 (см. Пункт 3.6.1(1) СН РК EN 1993-1-8).

Расчетная несущая способность одного болта на срез двумя плоскостями (см. Таблицу 3.4 СН РК EN 1993-1-8 и Рисунок 4):

$$F_{V,Rd} = 2 \cdot \frac{\alpha_v f_{ub} A}{\gamma_{M2}};$$

Две плоскости
среза

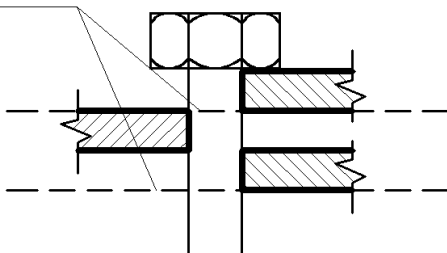


Рисунок 4 - Схема болтового соединения, подверженного действию среза двумя плоскостями

где α_V - параметр, для болтов классов прочности 5.6 равный (см. Таблицу 3.4 СН РК EN 1993-1-8):

$$\alpha_V = 0,6;$$

γ_{M2} - частный коэффициент безопасности, равный (см. НП.2.13 СН РК EN 1993-1-1):

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

f_{ub} - временное сопротивление на растяжение для болта класса прочности 5.6, равное (см. Таблицу 3.1 СН РК EN 1993-1-8):

$$f_{ub} = 500 \text{ Н/мм}^2;$$

A - площадь сечения болта нетто, равная:

$$A = A_s = 245 \text{ мм}^2.$$

Таким образом, расчетная несущая способность одного болта на срез двумя плоскостями будет равна:

$$F_{V,Rd} = 2 \cdot \frac{\alpha_V f_{ub} A}{\gamma_{M2}} = 2 \cdot \frac{0,6 \cdot 500 \cdot 245}{1,25} \cdot 10^{-3} = 117,6 \text{ кН}$$

Поперечная сила на один болт (где n - количество болтов):

$$F_{V,Ed} = \frac{V_{Ed}}{n} = \frac{170}{3} = 56,7 \text{ кН}$$

Условие прочности:

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

Значит,

$$\frac{F_{V,Ed}}{F_{V,Rd}} = \frac{56,7}{117,6} = 0,48 < 1,0$$

Условие выполняется.

2.5 Несущая способность болтового соединения на смятие

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

Расчетная несущая способность одного болта на смятие (см. Таблицу 3.4 СН РК EN 1993-1-8):

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

где γ_{M2} - частный коэффициент безопасности, равный (см. НП.2.13 СН РК EN 1993-1-1):

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

f_u - номинальное значение временного сопротивления на растяжение соединяемых элементов, равное (см. Таблицу 3,1 СН РК EN 1993-1-1):

$$f_u = 430 \text{ МПа};$$

α_b - параметр, равный наименьшему значению из трех величин α_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 вдоль усилия по Таблице 3,4 СН РК EN 1993-1-8

$$\alpha_d = \frac{e_1}{3d_0} = \frac{40}{3 \cdot 22} = 0,61$$

$$\frac{f_{ub}}{f_u} = \frac{500}{360} = 1,39$$

Значит,

$$\alpha_b = \min \left[\alpha_d; \frac{f_{ub}}{f_u}; 1,0 \right] = \min[0,61; 1,39; 1,0] = 0,61$$

k_1 - параметр, равный наименьшему значению из двух величин $2,8 \frac{e_2}{d_0} - 1,7$ (для крайних болтов) и 2,5:

$$k_1 = \min \left[2,8 \frac{e_2}{d_0} - 1,7; 2,5 \right]$$

для крайних болтов

$$2,8 \frac{e_2}{d_0} - 1,7 = 2,8 \cdot \frac{40}{22} - 1,7 = 3,39$$

значит,

$$k_1 = \min[3,39; 2,5] = 2,5;$$

d - диаметр болта, равный:

$$d = 20 \text{ мм};$$

t - толщина пера уголка, равная:

$$t = 10 \text{ мм}.$$

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

$$F_{b,Rd} = \frac{k_1 \alpha f_u d t}{\gamma_{M2}} = \frac{2,5 \cdot 0,61 \cdot 360 \cdot 20 \cdot 10}{1,25} \cdot 10^{-3} = 104,9 \text{ кН}.$$

Поперечная сила на один болт (где n - количество болтов в соединении):

$$F_{V,Ed} = \frac{V_{Ed}}{n} = \frac{110}{2} = 55 \text{ кН}$$

Условие прочности:

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

Значит,

$$\frac{F_{V,Ed}}{F_{V,Rd}} = \frac{55}{104,9} = 0,52 < 1,0$$

Условие выполняется.

3.13 Соединения на штифтах

3.13.1 Общие положения

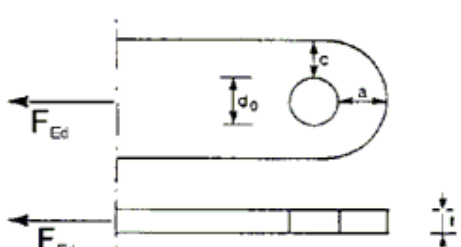
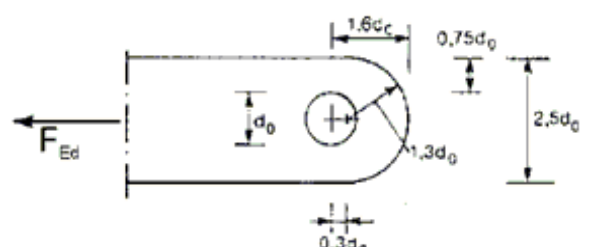
3.13.1.1 Если существует риск смещения штифтов в соединении, то они должны быть закреплены.

3.13.1.2 Если в соединении на штифтах вращение не требуется, то оно может быть рассчитано как одно болтовое соединение, при условии, что длина штифта менее трех его диаметров, см. Пункт 3.6.1 настоящего пособия. Во всех других случаях следует применять метод, приведенный в Пункт 3.13.2 настоящего пособия.

3.13.1.3 В соединении элементов на штифтах, геометрические размеры не усиленных проушин должны соответствовать требованиям, приведенным в Таблице 3.9.

3.13.1.4 Штифт должен быть расположен таким образом, чтобы исключить эксцентриситет приложения усилия, и должен быть такого размера, чтобы передать усилие, действующее в сечении проушины с отверстием на область проушины за пределами отверстия.

Таблица 3.9 - Требования к геометрическим размерам проушин

<p>Тип А: задана толщина t</p>  $a \geq \frac{F_{Ed} \gamma_{M0}}{2t f_y} + \frac{2d_0}{3}, c \geq \frac{F_{Ed} \gamma_{M0}}{2t f_y} + \frac{d_0}{3}$
<p>Тип Б: заданы геометрические размеры</p>  $t \geq 0,7 \cdot \sqrt{\frac{F_{Ed} \gamma_{M0}}{f_y}}, d_0 \leq 2,5t$

3.13.2 Расчет штифтов

3.13.2.1 Требования по расчету сплошных цилиндрических штифтов приведены в Таблице 3.10.

Таблица 3.10 - Расчетные критерии для штифтовых соединений

Вид отказа	Требования по расчету
Потеря несущей способности штифта на срез	$F_{v,Rd} = 0,6 A f_{up} / \gamma_{M2} \geq F_{v,Ed}$
Потеря несущей способности проушины и штифта на смятие	$F_{b,Rd} = 1,5 t d f_y / \gamma_{M0} \geq F_{b,Ed}$
То же, при наличии возможности замены штифта	$F_{b,Rd,ser} = 0,6 t d f_y / \gamma_{M6,ser} \geq F_{b,Ed,ser}$
Потеря несущей способности штифта на изгиб	$M_{Rd} = 1,5 W_{el} f_{yp} / \gamma_{M0} \geq M_{Ed}$
То же, при наличии возможности замены штифта	$M_{Rd,ser} = 0,8 W_{el} f_{yp} / \gamma_{M6,ser} \geq M_{Ed,ser}$
Потеря несущей способности штифта на совместное действие среза и изгиба	$\left[\frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} \right]^2 + \left[\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} \right]^2 \leq 1$
<p>d - диаметр штифта; f_y - наименьшее из значений пределов текучести материалов штифта и проушин; f_{up} - временное сопротивление материала штифта на растяжение; f_{yp} - предел текучести материала штифта; t - толщина проушины; A - площадь поперечного сечения штифта.</p>	

3.13.2.2 Моменты, возникающие в штифтах, следует вычислять исходя из того, что проушины образуют шарнирные опоры. В общем случае следует допустить, что реакции между штифтом и проушинами равномерно распределены по длине контакта каждой проушины, как показано на Рисунке 3.12.

3.13.2.3 Если предполагается возможность замены штифта, то помимо условий, приведенных в Пунктах 3.13.1 и 3.13.2 настоящего пособия, должно также выполняться следующее условие для напряжения смятия контактных поверхностей:

$$\sigma_{h,Ed} \leq f_{h,Rd}, \quad (3.14)$$

где

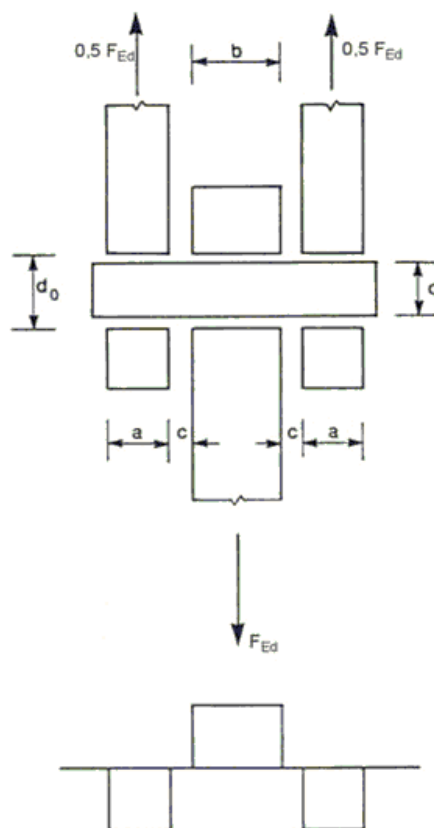
$$\sigma_{h,Ed} = 0,591 \cdot \sqrt{\frac{E F_{Ed,ser} \cdot (d_0 - d)}{d^2 t}}; \quad (3.15)$$

$$f_{h,Rd} = 2,5 f_y / \gamma_{M6,ser}, \quad (3.16)$$

здесь d - диаметр штифта;

d_0 - диаметр отверстия под штифт;

$F_{Ed,ser}$ - расчетное значение усилия при характеристическом сочетании нагрузок в предельном состоянии по эксплуатационной пригодности.



$$M_{Ed} = \frac{F_{Ed}}{8} (b + 4c + 2a)$$

Рисунок 3.12 - Изгибающий момент в штифте

ПРИМЕР 11 Расчет штифтового соединения

Исходные данные (штифтовое соединение): Выполнить расчет штифтового соединения воспринимающего нагрузку растягивающей силы $F_{Ed} = 110 \text{ кН}$ (см. Рисунок 1). Все элементы (кроме штифта) соединения выполнены из стали марки S275 с номинальным пределом текучести $f_y = 275 \text{ Н/мм}^2$. Штифт выполнен из стали марки S355 с номинальным пределом текучести $f_y = 355 \text{ Н/мм}^2$.

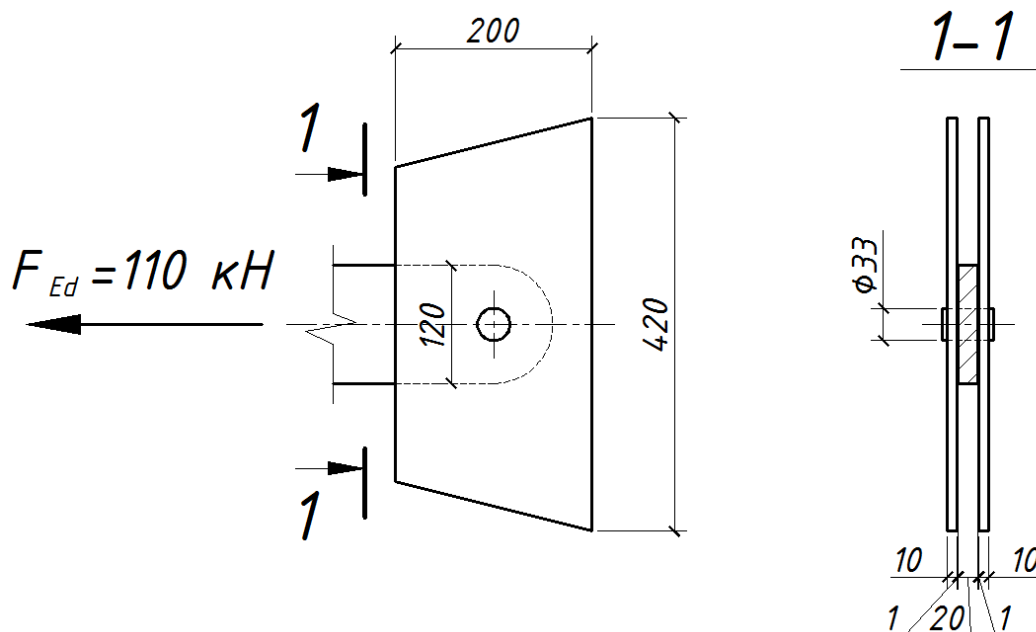


Рисунок 1 – Схема соединения на штифте

2 Определение геометрических характеристик

Толщина пластины проушины:

$$t = 20 \text{ мм}$$

Диаметр штифта:

$$d = 30 \text{ мм}$$

Диаметр отверстия в проушине под штифт:

$$d_0 = 33 \text{ мм}$$

Геометрические размеры не усиленных проушин в соединении на штифтах должны отвечать требованиям, приведенным в Таблице 3.9 по Пункту 3.13.1(3) СН РК EN 1993-1-8.

Проверка геометрических характеристик будет проводиться по типу Б, когда заданы геометрические характеристики:

- ширина пластины должна быть не меньше $2,5d_0 = 2,5 \cdot 33 = 82,5 \text{ мм}$, принимаем 120 мм;
- вертикальное расстояние от края отверстия под штифт до края пластины должно быть не меньше $0,75d_0 = 0,75 \cdot 33 = 24,75 \text{ мм}$, принимаем 43,5 мм;
- горизонтальное расстояние от центра отверстия под штифт до края пластины проушины должно быть не меньше $1,6d_0 = 1,6 \cdot 33 = 52,8 \text{ мм}$, принимаем 60 мм;
- толщина пластины должно удовлетворять условию:

$$t \geq 0,7 \cdot \sqrt{\frac{F_{Ed} \gamma_{M0}}{f_y}} = 0,7 \cdot \sqrt{\frac{110 \cdot 1,0}{275 \cdot 10^{-3}}} = 20 \text{ мм};$$

$$t = 20 \text{ мм};$$

- отверстие под штифт должно быть не больше $d_0 \leq 2,5t = 2,5 \cdot 20 \text{ мм} = 50 \text{ мм}$, принимаем 33 мм под штифт $d = 30 \text{ мм}$.

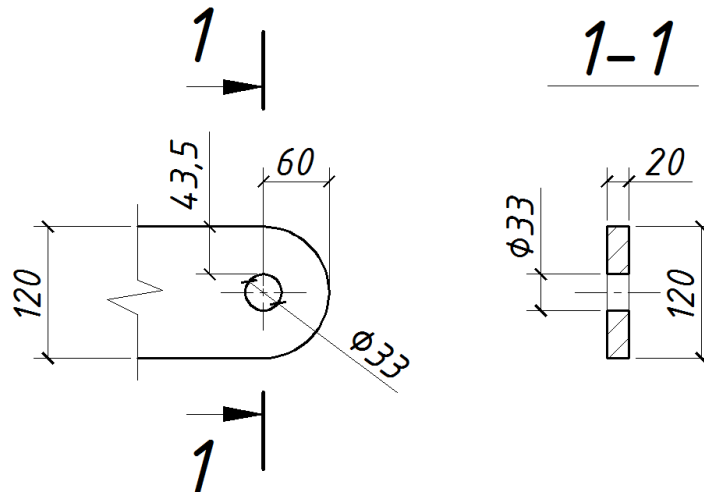


Рисунок 2 – Схема проушины под штифт

3 Несущая способность соединения на штифтах (см. Пункт 3.13.2 СН РК EN 1993-1-8)

3.1 Несущая способность штифта на срез

Условие прочности:

$$F_{v,Rd} \geq F_{v,Ed}$$

Несущая способность штифта на срез одной плоскостью:

$$F_{v,Rd} = \frac{0,6Af_{up}}{\gamma_{M2}}$$

где A – площадь поперечного сечения штифта, равная:

$$A = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 30^2}{4} = 706,5 \text{ мм}^2$$

f_{up} – временное сопротивление материала штифта на растяжение, равное для стали марки S355:

$$f_{up} = 510 \text{ Н/мм}^2$$

γ_{M2} – частный коэффициент безопасности, равный по НП.2.13 СН РК EN 1993-1-1:

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

Таким образом, несущая способность штифта на срез одной плоскостью:

$$F_{v,Rd} = \frac{0,6Af_{up}}{\gamma_{M2}} = \frac{0,6 \cdot 706,5 \cdot 510}{1,25} \cdot 10^{-3} = 172,95 \text{ кН}$$

Несущая способность штифта на срез двумя плоскостями:

$$2 \cdot F_{v,Rd} = 2 \cdot 172,95 = 345,9 \text{ кН}$$

Проверка условия прочности:

$$2 \cdot F_{v,Rd} = 345,9 \text{ кН} > F_{v,Ed} = 110 \text{ кН}$$

Условие выполняется.

3.2 Несущая способность штифта на смятие

Условие прочности:

$$F_{b,Rd} = F_{b,Ed}$$

Несущая способность штифта на смятие:

$$F_{b,Rd} = \frac{1,5dtf_y}{\gamma_{M0}}$$

где t – толщина проушины, равная:

$$t = 20 \text{ мм};$$

НТП-03-01-8.1-2011

d – диаметр штифта, равный:

$$d = 30 \text{ мм};$$

f_y – наименьшее из значений пределов текучести материалов штифта и проушины, равное:

$$f_y = \min[f_y(S275); f_y(S355)] = \min[275; 355] = 275 \text{ Н/мм}^2;$$

γ_{M0} – частный коэффициент безопасности, равный по НП.2.13 СН РК EN 1993-1-1

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

Таким образом, несущая способность проушины и штифта на смятие:

$$F_{b,Rd} = \frac{1,5 d t f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{1,5 \cdot 30 \cdot 20 \cdot 275}{1,00} \cdot 10^{-3} = 247,5 \text{ кН}$$

Проверка условия:

$$F_{b,Rd} = 247,5 \text{ кН} > F_{b,Ed} = 110 \text{ кН}$$

Условие выполняется.

3.3 Несущая способность штифта на изгиб

Условие прочности:

$$M_{Rd} \leq M_{Ed}$$

Несущая способность штифта на изгиб

$$M_{Rd} = \frac{0,8 \cdot W_{el} f_{yp}}{\gamma_{M0}}$$

где W_{el} – упругий момент сопротивления поперечного сечения штифта, равный:

$$W_{el} = \frac{\pi d^3}{32} = \frac{\pi \cdot 30^3}{32} = 2650 \text{ мм}^3;$$

f_{yp} – предел текучести материала штифта, равный:

$$f_{yp} = 355 \text{ Н/мм}^2;$$

γ_{M0} – частный коэффициент безопасности, равный по НП.2.13 СН РК EN 1993-1-1

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

Таким образом, несущая способность штифта на изгиб:

$$M_{Rd} = \frac{0,8 W_{el} f_{yp}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,8 \cdot 2650 \cdot 355}{1,0} = 752 \text{ Нмм}$$

Расчетный изгибающий момент в штифте согласно Рисунку 3.11 СН РК EN 1993-1-8:

$$M_{Ed} = \frac{F_{Ed}}{8} (2b + t + 4c)$$
$$M_{Ed} = \frac{110}{8} (2 \cdot 10 + 20 + 4 \cdot 1) = 605 \text{ Нмм}$$

Проверка условия:

$$M_{Rd} = 752 \text{ Нмм} > M_{Ed} = 605 \text{ Нмм}$$

Условие выполняется.

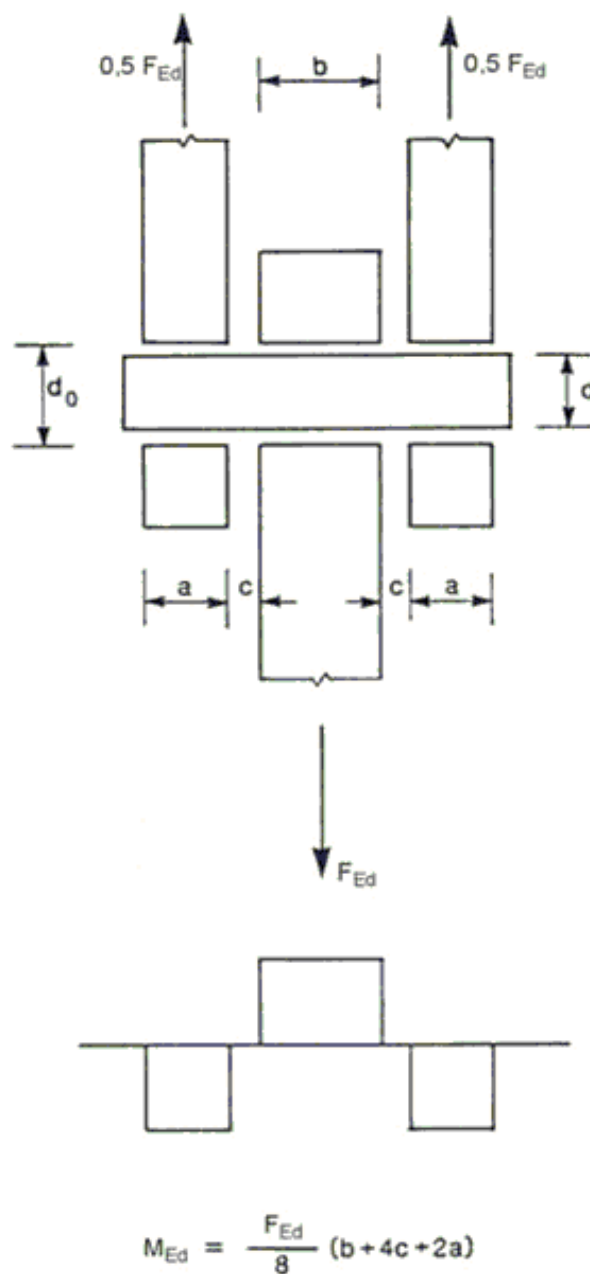


Рисунок 3 – Изгибающий момент в штифте

3.4 Несущая способность штифта на совместное действие среза и изгиба

Условие прочности:

$$\left[\frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} \right]^2 + \left[\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} \right]^2 \leq 1,0$$

Проверка условия:

$$\left[\frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} \right]^2 + \left[\frac{F_{v,Ed}}{F_{v,Rd}} \right]^2 = \left[\frac{605}{752} \right]^2 + \left[\frac{110}{345,9} \right]^2 = 0,64 + 0,1 = 0,74 \leq 1,0$$

Условие выполняется.

4 СВАРНЫЕ СОЕДИНЕНИЯ

4.1 Общие положения

4.1.1 Положения, приведенные в настоящем разделе, распространяются на свариваемые конструкционные стали в соответствии с СН РК EN 1993-1-1 и материалы толщиной свыше 4 мм и у которых номинальные значения предела текучести f_y и временного сопротивления f_u для конструкционной стали принимаются равными:

- а) либо: $f_y = R_{eh}$ и $f_u = R_m$ непосредственно по стандарту на прокат;
- б) или по нижеприведенной Таблице 4.1:

Таблица 4.1 - Номинальные значения предела текучести f_y и временного сопротивления на растяжение f_u горячекатаной конструкционной стали

Стандарт и марка стали	Номинальная толщина элемента t , мм			
	$t \leq 40$		$40 < t \leq 80$	
	f_y , Н/мм ²	f_u , Н/мм ²	f_y , Н/мм ²	f_u , Н/мм ²
EN 10025-2				
S 235	235	360	215	360
S 275	275	430	255	410
S 355	355	510	335	470
S 450	440	550	410	550
EN 10025-3				
S 275 N/NL	275	390	255	370
S 355 N/NL	355	490	335	470
S 420 N/NL	420	520	390	520
S 460 N/NL	460	540	430	540
EN 10025-4				
S 275 M/ML	275	370	255	360
S 355 M/ML	355	470	335	450
S 420 M/ML	420	520	390	500
S 460 M/ML	460	540	430	530
EN 10025-5				
S 235 W	235	360	215	340
S 355 W	355	510	335	490
EN 10025-6				
S 460 Q/QL/QL1	460	570	440	550
EN 10210-1				
S 235 H	235	360	215	340
S 275 H	275	430	255	410
S 355 H	355	510	335	490
S 275 NH/NLH	275	390	255	370
S 355 NH/NLH	355	490	335	470
S 420 NH/NHL	420	540	390	520
S 460 NH/NLH	460	560	430	550

Таблица 4.1 - Номинальные значения предела текучести f_y и временного сопротивления на растяжение f_u горячекатаной конструкционной стали
(продолжение)

Стандарт и марка стали	Номинальная толщина элемента t , мм			
	$t \leq 40$		$40 < t \leq 80$	
	f_y , Н/мм ²	f_u , Н/мм ²	f_y , Н/мм ²	f_u , Н/мм ²
EN 10219-1				
S 235 H	235	360		
S 275 H	275	430		
S 355 H	355	510		
S 275 NH/NLH	275	370		
S 355 NH/NLH	355	470		
S 460 NH/NLH	460	550		
S 275 MH/MLH	275	360		
S 355 MH/MLH	355	470		
S 420 MH/MLH	420	500		
S 460 MH/MLH	460	530		
* При выполнении расчетов номинальные значения параметров свойств материалов, приведенные в данной таблице, следует принимать как нормативные				

Положения также распространяются на соединения, для которых механические свойства металла шва совместимы со свойствами основного металла, см. 4.2.

По сварным соединениям элементов меньшей толщины в СН РК EN 1993, часть 1-3. приведены следующие указания:

- требования к расчету, приведенные в настоящем пособии, могут быть использованы для сталей в диапазоне толщины t_{cor} ; диапазон толщины t_{cor} для профилированных листов и элементов может быть приведен в Национальном Приложении, рекомендуемые значения толщины:

- для профилированных листов и элементов $0,45 \text{ мм} \leq t_{cor} \leq 15 \text{ мм}$;

- для соединений $0,45 \text{ мм} \leq t_{cor} \leq 4 \text{ мм}$, см. 8.1 (2).

- может быть использован материал большей или меньшей толщины, при условии, что несущая способность элемента определена по расчету, основанному на испытаниях.

В зависимости от вида соединения, на которые не распространяются указания СН РК EN 1993-1-8 и при сопрягаемых элементам толщиной $t_{cor} \leq 4 \text{ мм}$ необходимо учесть следующие требования:

- точечная сварка может быть использована для прокатного или оцинкованного основного материала толщиной до 4,0 мм при условии, что более тонкая соединяемая часть имеет толщину не более 3,0 мм;

- дуговая точечная сварка должна применяться только в соединениях, работающих на сдвиг;

- дуговая точечная сварка не должна использоваться для соединения элементов или листов, общая толщина Σt которых превышает 4 мм;

- дуговая точечная сварка должна иметь внутренний диаметр d_s не менее 10 мм;

- если толщина соединяемого элемента или листа менее 0,7 мм, то должна использоваться шайба (см. Рисунок 4.1);
- при проектировании сварных соединений внахлестку, выполненных дуговой сваркой, с основным материалом толщиной не более 4,0 мм. Для основного материала большей толщины указания по проектированию — см. СН РК EN 1993-1-8;
- размеры сварных швов должны выбираться таким образом, чтобы прочность соединения определялась толщиной соединяемого элемента или листа, но не сварным швом, если корень сварного шва не менее толщины соединяемого элемента или листа;
- для расчета прочности сварного соединения, выполненного внахлестку, коэффициент γ_M принимается равным γ_{M2} ; значение γ_{M2} может быть приведено в Национальном Приложении, рекомендуемое значение $\gamma_{M2} = 1,25$;
- угловые швы с эффективной длиной менее $8t$ (где t — толщина более тонкого из соединяемых элементов) не допускаются в расчетных соединениях.

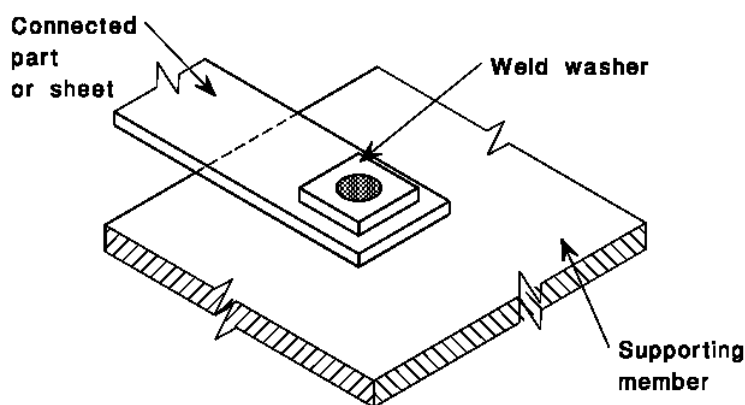


Рисунок 4.1 — Дуговая точечная сварка со сварной шайбой

При сварке замкнутых профилей с толщиной стенки 2,5 мм и выше следует руководствоваться указаниями Раздела 7 настоящего пособия.

Указания по сварке стержневых анкеров: — см. СН РК EN 1994-1-1.

- материалы для сварных соединений должны соответствовать соответствующим стандартам, приведенным в ссылочных стандартах группы 5 (см. 1.2.5);
- значения предела текучести, временного сопротивления на растяжение, относительного удлинения при разрыве и минимального значения ударной вязкости металла шва по Шарпи для образца с V-образным надрезом должны быть эквивалентны или выше значений, установленных для основного металла;
- в общем случае предпочтительно использовать электроды, превосходящие по марке используемую сталь.

4.1.2 Сварные швы, подверженные усталостным нагрузкам, должны удовлетворять принципам, приведенным в СН РК EN 1993-1-9, при этом должны использоваться следующие общие термины и определения:

- **номинальное напряжение** (nominal stress; нормальные напряжения, касательные напряжения, главные напряжения или эквивалентные напряжения) т. е. напряжение в исходном материале или в сварном шве, примыкающем к потенциальному месту

расположения трещины, вычисленное в соответствии с теорией упругости без учета всех эффектов концентрации напряжения;

- **локальное напряжение** (geometric stress), максимальное локальное напряжение (hotspot stress) т. е. максимальное главное напряжение в исходном материале, действующее на границе сварного шва, с учетом эффектов концентрации напряжения, вызванных общей геометрией конкретного элемента конструкции;

- **остаточное напряжение** (residual stress) т. е. постоянное действующее напряжение в конструкции, которое находится в статическом равновесии и не зависит ни от какого внешнего воздействия; остаточные напряжения могут возникать из-за напряжений проката, процессов резки, усадки сварных швов или при сборке из-за неточного изготовления деталей, вызывающих изгиб части конструкции.

Оценка сопротивления усталости сварных соединений должна производиться с применением метода работоспособности с повреждениями и метода безопасного ресурса. Методы оценки сопротивления усталости определяются параметрами кривых сопротивления усталости для:

- стандартных элементов — соответствующими номинальными напряжениями;
- рекомендуемых сварных соединений — соответствующими локальными напряжениями.

Для оценки усталости согласно настоящей части, требуемая надежность может быть достигнута корректировкой частного коэффициента безопасности для сопротивления усталости γ_{mf} , учитывающего последствия разрушения и принятые требования проекта.

Напряжения в сварном соединении должны вычисляться для первой группы предельных состояний по пригодности к эксплуатации. Расчетное значение размаха напряжений цикла в усталостных расчетах принимается равным $\gamma_{ff}\Delta\sigma_{E,2}$ на базе $N_C=2\cdot 10^6$ циклов.

Предел выносливости для номинальных размахов напряжений цикла представлен сериями кривых $(\log\Delta\sigma_R) - (\log N)$ и кривых $(\log\Delta\tau_R) - (\log N)$ ($S - N$ — кривые), которые соответствуют типовым категориям элементов. Каждая категория элементов обозначается числом, равным значению предела выносливости $\Delta\sigma_C$ и $\Delta\tau_C$ [Н/мм²], определенного на базе 2 млн. циклов нагружения.

4.1.3 Как правило, если не оговорено другое, для сварных соединений требуется уровень качества С согласно EN ISO 25817.

Частоту контроля сварных швов следует устанавливать в соответствии со ссылочными стандартами группы 7 (см. 1.2.7). Уровень качества сварных швов следует устанавливать по EN ISO 25817.

Уровень качества сварных швов в конструкциях, подверженных усталостным нагрузкам, следует устанавливать согласно требованиям по СН РК EN 1993-1-9.

4.1.4 Следует избегать расслоения стальных листов.

4.1.5 Указания по выбору материала по свойствам предотвращения расслоения в направлении толщины проката стальных листов приведены в СН РК EN 1993-1-10, а именно:

- критичность местоположения относительно напряжения растяжения и степени его воздействия;

- деформация в элементе сварного соединения в направлении толщины проката. Эта деформация возникает от усадки расплавленного металла сварного соединения в процессе его охлаждения. Она значительно возрастает при ограничении свободы деформаций другими элементами конструкции;

- вид сварных соединений, в частности крестообразные, Т — образные и угловые соединения. Например, как показано на Рисунке 4.2, горизонтальный лист в определенной зоне может иметь неудовлетворительную пластичность в направлении толщины. Расслаивание вероятнее всего наблюдается, если напряжение в этой зоне будет воздействовать по толщине материала, что происходит, если сварные швы примерно параллельны поверхности материала, а деформация усадки перпендикулярна направлению листового проката. Чем больше наплавленного металла сварного шва, тем больше чувствительность к расслаиванию;

- химические свойства материала в направлении, перпендикулярном растягивающим напряжениям. В частности, высокая концентрация серы может способствовать расслаиванию, даже при значениях, не превышающих требования стандартов.



Рисунок 4.2 — Расслаивание (листов)

Чувствительность материала к расслаиванию должна определяться измерением пластичности на образцах, изготовленных в направлении толщины проката, которое выражается в единицах классов качества Z.

ПРИМЕЧАНИЕ 1 Расслаивание — это вызванный сваркой дефект в материале, который обычно обнаруживается при ультразвуковой дефектоскопии. Основной риск расслаивания наблюдается у крестообразных, Т — образных и угловых соединений, а также у сварных швов с полным проплавлением.

ПРИМЕЧАНИЕ 2 Руководство по способам предотвращения расслаивания при сварке приведено в EN 011-2.

4.2 Материалы для сварных соединений

4.2.1 Все материалы для сварных соединений должны соответствовать соответствующим стандартам, приведенным в ссылочных стандартах группы 5 (см. 1.2.5): EN 12345:1998 Сварка. Многоязычные термины сварных соединений и узлов с иллюстрациями. Сентябрь 1998 г, EN ISO 14555:1998 Сварка. Дуговая сварка

металлических стержней. Май 1995 г, EN ISO 13918:1998 Сварка. Стержни и керамические шайбы для дуговой сварки стержней. Январь 1997 г, EN 288-3:1992 Технические требования и утверждение сварочных процессов для металлических материалов. Часть 3. Испытания режима дуговой сварки сталей. 1992 г, EN ISO 5817:2003 Стальные соединения дуговой сваркой. Уровни качества в зависимости от дефектов.

4.2.2 Значения предела текучести, временного сопротивления на растяжение, относительного удлинения при разрыве и минимального значения ударной вязкости металла шва по Шарпи для образца с V-образным надрезом должны быть эквивалентны или выше значений, установленных для основного металла.

ПРИМЕЧАНИЕ В общем случае предпочтительно использовать электроды, превосходящие по марке используемую сталь.

4.3 Геометрические параметры и размеры

4.3.1 Типы сварных швов

4.3.1.1 Настоящее пособие охватывает расчет угловых, круговых угловых, стыковых, пробочных сварных швов, а также сварных швов с конусным зазором. Стыковые сварные швы могут быть с полным или неполным проваром. Круговые угловые и пробочные сварные швы могут быть выполнены в круглых или вытянутых отверстиях.

4.3.1.2 Наиболее распространенные типы соединений и сварных швов приведены в EN 12345:1998 Сварка. Графическое изображение терминов, относящихся к сварным соединениям (заменен на EN ISO 17659:2004), EN ISO 17659:2004 Сварка. Многоязычные термины сварных соединений с иллюстрациями.

4.3.2 Угловые сварные швы

4.3.2.1 Общие положения

4.3.2.1.1 Угловые сварные швы могут применяться для соединения деталей, свариваемые поверхности которых расположены под углом от 60° до 120°.

4.3.2.1.2 Допускается угол менее 60°, однако в этом случае угловой сварной шов следует рассматривать как стыковой с неполным проваром.

4.3.2.1.3 При углах более 120° несущую способность угловых сварных швов следует определять испытанием в соответствии с СН РК EN 1990 (Приложение D. Расчет на основе испытаний), при этом должны проводиться испытания по непосредственному определению несущей способности или эксплуатационной пригодности несущих конструкций или их элементов для определенных условий нагрузок. Такие испытания могут, например, проводиться для пожарной нагрузки, нагрузок, приводящих к явлениям усталости, или нагрузок от ударов.

4.3.2.1.4 Угловые сварные швы, расположенные на концах соединяемых элементов (в торце или сбоку), следует заводить за угол непрерывно и полноразмерно на расстояние,

равное, по крайней мере, двум катетам шва, если доступность и конфигурация узла позволяют это выполнить.

ПРИМЕЧАНИЕ В случае прерывистых швов, это правило касается только прерывистых швов в углах концов элемента.

4.3.2.1.5 Расположение сварных швов в концевой части элемента следует отражать на чертежах.

4.3.2.1.6 При наличии эксцентриситета в односторонних сварных угловых швах — см. 4.12.

4.3.2.2 Прерывистые угловые сварные швы

4.3.2.2.1 Прерывистые угловые сварные швы не следует использовать в агрессивной среде.

4.3.2.2.2 В прерывистых угловых сварных швах расстояние (L_1 или L_2) между концами каждого отрезка шва длиной L_w должно отвечать требованиям, приведенным на Рисунке 4.3.

4.3.2.2.3 В прерывистых угловых сварных швах расстояние (L_1 или L_2) между концами каждого отрезка шва следует принимать равным наименьшему из расстояний между концами отрезков сварных швов на противоположных сторонах и между концами отрезков сварных швов на одной стороне.

4.3.2.2.4 В соединениях на прерывистых сварных швах во всех случаях каждый конец соединяемой детали должен быть приварен непрерывным двусторонним швом.

4.3.2.2.5 В элементах составного сечения, в которых листовые детали соединены прерывистыми угловыми швами, концы этих деталей следует приварить с каждой стороны угловыми сварными швами длиной, равной, по крайней мере, $3/4$ ширины более узкой из листовых деталей (см. Рисунок 4.3).

4.3.3 Круговые угловые сварные швы

4.3.3.1 Круговые угловые сварные швы, включая угловые швы в круглых или вытянутых отверстиях, могут применяться только для передачи сдвигающего усилия, или для предотвращения потери местной устойчивости элементов, соединяемых внахлестку, или для обеспечения плотности соединения.

4.3.3.2 Диаметр круглого или ширина вытянутого отверстия должны быть равными не менее четырех толщин элемента, в котором расположено отверстие.

4.3.3.3 Концы вытянутых отверстий должны быть полукруглыми, за исключением тех случаев, когда конец отверстия доходит до края рассматриваемой детали.

4.3.3.4 Расстояние между центрами круговых угловых сварных швов не должно превышать значений, указанных в таблице 3.3, во избежание потери местной устойчивости соединяемых элементов.

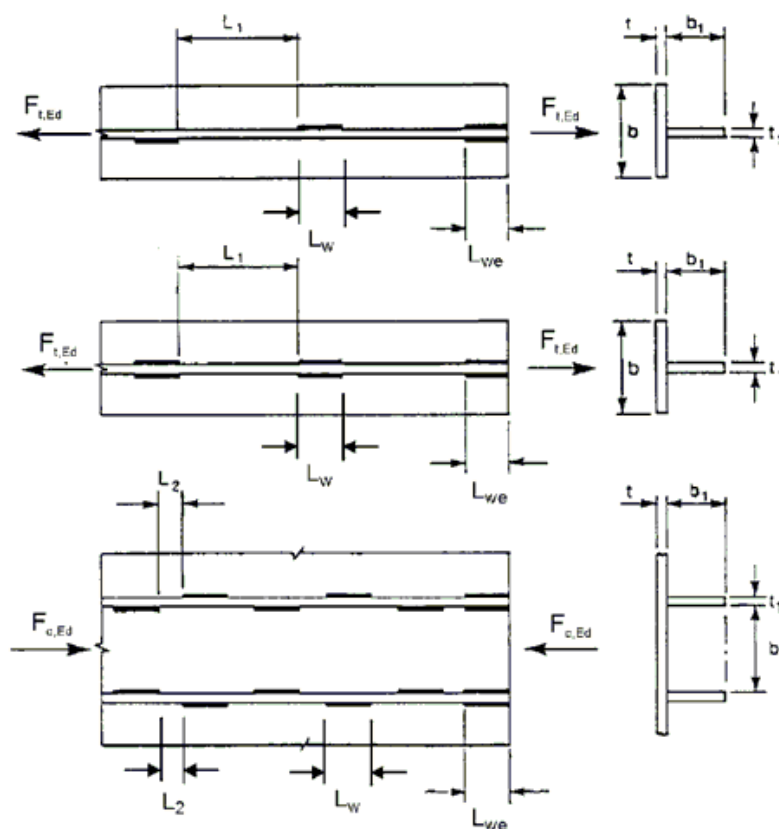
4.3.4 Стыковые сварные швы

4.3.4.1 Стыковой сварной шов следует считать как сварной шов с полным проваром, если по всей толщине соединения обеспечена глубина провара и сплавление металла шва и основного металла.

4.3.4.2 К стыковому сварному шву с неполным проваром относится шов с глубиной провара меньше толщины основного металла.

4.3.4.3 Применение прерывистых стыковых сварных швов не допускается.

4.3.4.4 При наличии эксцентриситета в односторонних стыковых сварных швах с неполным проваром — см. 4.12.



L_{we} следует принимать равным не менее меньшего из значений $0,75b$ и $0,75b_1$;

L_1 следует принимать равным не более меньшего из значений $16t$, $16t_1$ и 200 мм
для растянутых элементов составного сечения;

L_2 следует принимать равным не более меньшего из значений $12t$, $12t_1$, $0,25b$ и 200 мм
для элементов составного сечения, подверженных сжатию или сдвигу

Рисунок 4.3 — Прерывистые угловые сварные швы

4.3.5 Пробочные сварные швы

4.3.5.1 Пробочные сварные швы применяются для:

- передачи сдвигающего усилия;

- предотвращения потери местной устойчивости, элементов, соединяемых внахлестку, или обеспечения плотности соединения;

- соединения деталей в элементах составного сечения, но их не следует применять в случае внецентренного растяжения.

4.3.5.2 Диаметр круглого или ширина вытянутого отверстия должны быть, по крайней мере, на 8 мм больше толщины элемента, в котором расположено отверстие.

4.3.5.3 Концы вытянутых отверстий должны быть полукруглыми или иметь углы, скругленные по радиусу, равному не менее толщины элемента, за исключением тех случаев, когда конец отверстия доходит до края элемента.

4.3.5.4 Толщина пробочного шва при толщине основного металла до 16 мм должна быть равна толщине основного металла. Высота пробочного шва при толщине основного металла более 16 мм должна быть не менее половины толщины основного металла и не менее 16 мм.

4.3.5.5 Расстояние между центрами пробочных сварных швов не должно превышать значений, указанных в таблице 3.3, во избежание потери местной устойчивости соединяемых элементов.

4.3.6 Сварные швы с конусным зазором

Расчетная высота сварного шва с конусным зазором показана на Рисунке 4.4. Для определения расчетной толщины близкого по форме сварного шва при сварке между собой замкнутых профилей прямоугольного сечения см. 7.3.1(7).

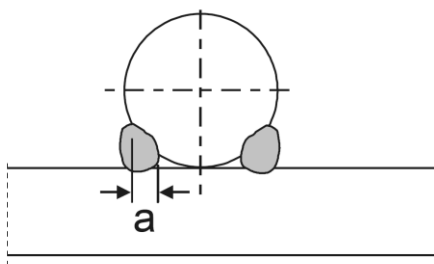


Рисунок 4.4 — Эффективная высота сварного шва с конусным зазором

4.4 Сварка с применением стальной прокладки

4.4.1 При сварке с применением стальной прокладки, последнюю следует выровнять заподлицо с краем свариваемой детали.

4.4.2 При сварке двух деталей через прокладку, толщина которой меньше катета сварного шва, необходимого для передачи усилия, требуемый катет шва следует увеличить до значения, равного толщине прокладки.

4.4.3 При сварке двух деталей через прокладку, толщина которой равна или больше катета сварного шва, необходимого для передачи усилия, каждую деталь следует приварить к прокладке катетом, необходимым для передачи расчетного усилия.

4.5 Расчетная несущая способность угловых сварных швов

4.5.1 Длина сварных швов

4.5.1.1 Эффективную длину сварного шва l следует принимать равной длине шва с полноразмерной эффективной высотой a . Ее можно принять равной полной длине шва за вычетом его двойной эффективной высоты a . Снижение эффективной длины сварного шва не требуется, при условии обеспечения полноразмерности сварного шва по всей его длине, включая начало и конец шва.

4.5.1.2 Сварной угловой шов эффективной длиной менее 30 мм или менее 6 толщин сварного шва, учитывая большее значение, не является несущим швом.

4.5.2 Эффективная толщина сварного шва

4.5.2.1 Эффективную толщину a углового сварного шва следует принимать равной высоте вписанного между соединяемыми поверхностями и лицевой поверхностью шва треугольника (равностороннего или неравностороннего), измеряемой перпендикулярно внешней стороне этого треугольника, см. Рисунок 4.5.

4.5.2.2 Эффективная толщина углового сварного шва должна быть не менее 3 мм.

4.5.2.3 При определении расчетной несущей способности углового сварного шва с полным проваром может быть учтено увеличение толщины шва, см. Рисунок 4.6, при том условии, что предварительные испытания подтверждают, что требуемый провар достигается постоянно.

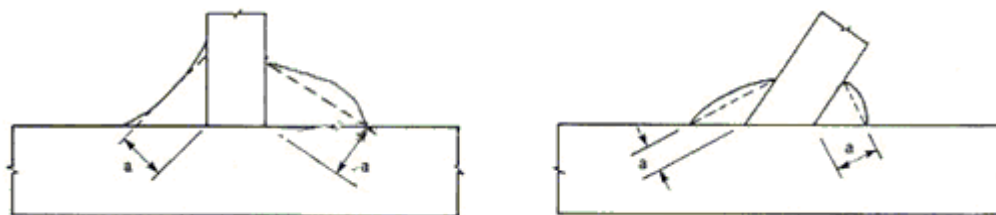


Рисунок 4.5 — Толщина углового сварного шва

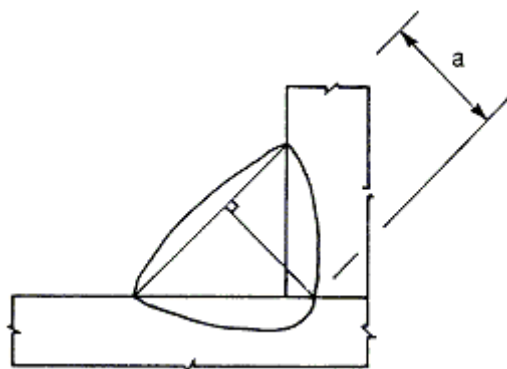


Рисунок 4.6 — Толщина углового сварного шва с полным проваром

4.5.3 Определение несущей способности угловых сварных швов

4.5.3.1 Общие положения

Расчетную несущую способность углового сварного шва следует определять по направленному методу, приведенному в 4.5.3.2 или по упрощенному методу, приведенному в 4.5.3.3.

4.5.3.2 Направленный метод

4.5.3.2.1 В этом методе усилия, передаваемые сварным швом единичной длины, раскладываются на следующие составляющие: параллельную и поперечную относительно продольной оси сварного шва, а также нормальную и поперечную составляющие в плоскости его сечения.

4.5.3.2.2 Расчетную площадь поперечного сечения A_w сварного шва следует принимать равной $A_w = \sum a l_{\text{eff}}$.

4.5.3.2.3 Следует считать, что расчетная площадь поперечного сечения сварного шва проходит через его корень.

4.5.3.2.4 Напряжения следует считать равномерно распределенными по сечению сварного шва, и сводятся к нормальным и касательным напряжениям, показанным на Рисунке 4.7, следующим образом:

σ_{\perp} — нормальное напряжение, перпендикулярное сечению сварного шва;

σ_{\parallel} — нормальное напряжение, параллельное продольной оси сварного шва;

τ_{\perp} — касательное напряжение (в плоскости сечения сварного шва),

перпендикулярное продольной оси сварного шва;

τ_{\parallel} — касательное напряжение (в плоскости сечения сварного шва), параллельное продольной оси сварного шва.

4.5.3.2.5 Нормальное напряжение σ_{\parallel} , параллельное продольной оси, не учитывается при проверке расчетной несущей способности сварного шва.

4.5.3.2.6 Расчетная несущая способность считается достаточной, если выполняются оба нижеследующих условия:

$$\left[\sigma_{\perp}^2 + 3 \cdot (\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2) \right]^{0,5} \leq f_u / (\beta_w \gamma_{M2}) \text{ и } \sigma_{\perp} \leq 0,9 f_u / \gamma_{M2}, \quad (4.1)$$

где f_u — номинальное значение временного сопротивления на растяжение более слабого соединяемого элемента;

β_w — поправочный коэффициент, принимаемый по Таблице 4.2.

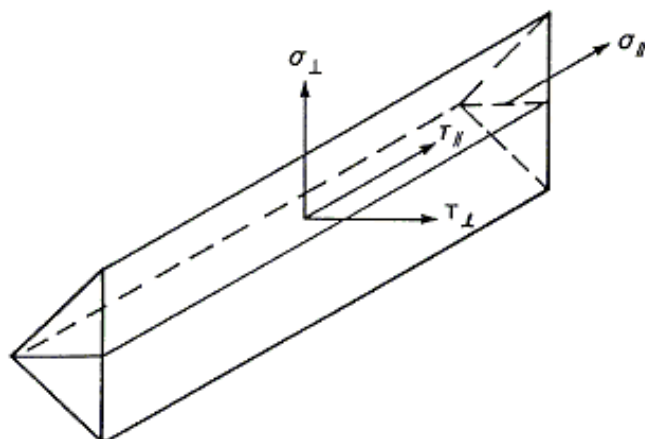


Рисунок 4.7 — Напряжения в поперечном сечении углового сварного шва

Таблица 4.2 — Поправочный коэффициент β_w для угловых сварных швов

Стандарт и марка стали			Поправочный коэффициент β_w
EN 10025	EN 10210	EN 10219	
S235 S235 W	S235 H	S235 H	0,8
S275 S275 N/NL S275 M/ML	S275 H S275 NH/NLH	S275 H S275 NH/NLH S275 MH/MLH	0,85
S355 S355 N/NL S355 M/ML S355 W	S355 H S355 NH/NLH	S355 H S355 NH/NLH S355 MH/MLH	0,9
S420 N/NL S420 M/ML		S420 MH/MLH	1,0
S460 N/NL S460 M/ML S460 Q/QL/QL1	S460 NH/NLH	S460 NH/NLH S460 MH/MLH	1,0

4.5.3.2.7 Сварные швы между деталями, имеющими разные прочностные характеристики материалов, следует рассчитывать с учетом характеристик материала с наименьшими показателями прочности.

ПРИМЕР 12 Расчет сварного соединения между металлическими пластинами по направленному методу

Исходные данные: проверить прочность сварного соединения с толщиной шва $a = 3\text{ мм}$ между двумя пластинами, нагруженными растягивающей силой $N_{Ed} = 320\text{ кН}$. Все металлические элементы сварного соединения выполнены из стали марки S460N с номинальным пределом текучести $f_y = 460\text{ Н/мм}^2$ и номинальным значением временного сопротивления на растяжение $f_u = 540\text{ Н/мм}^2$.

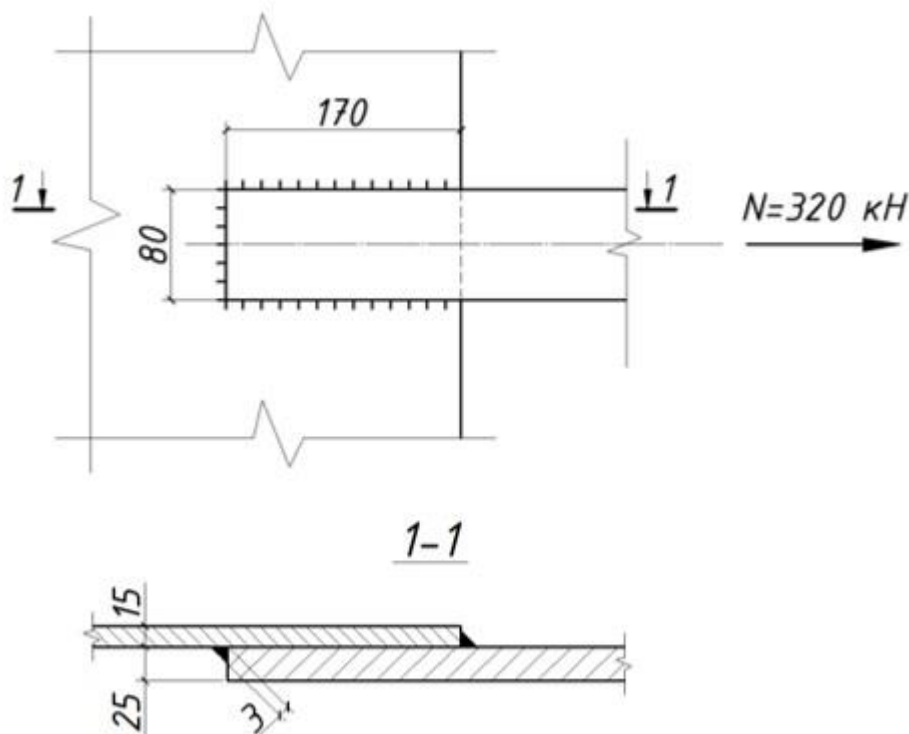


Рисунок 1 – Сварное соединение пластин

2 Определение геометрических характеристик

2.1 Эффективная толщина сварного шва

По требованиям Пункта 4.5.2(2) СН РК EN 1993-1-8, эффективная толщина a_w углового сварного шва должна быть не менее 3мм. В данном примере:

$$a_w = 3,0\text{мм.}$$

2.2 Длина сварных швов

Согласно Пункту 4.5.1(2) СН РК EN 1993-1-8, длина сварного шва должна быть больше 30мм, также длина не должна быть меньше 6 толщин сварного шва, то есть $6 \cdot a_w = 6 \cdot 3 = 18\text{мм}$, что меньше 80мм.

Кроме того, для сварных соединений внахлестку длина не должна превышать 150 кратной высоты сварного шва, чтобы шов считался как не протяженное соединение. То есть, шов не должен превышать длину $150 \cdot a_w = 150 \cdot 3 = 450\text{мм}$, что больше 170мм.

3 Несущая способность сварного соединения

3.1 Определение несущей способности продольного сварного шва по направленному методу

Согласно Пункту 5.5.3.1(1) СН РК EN 1993-1-8, расчетную несущую способность углового сварного шва следует определять по направленному методу или по упрощенному методу.

Условия прочности углового сварного шва по направленному методу по Формуле (4.1) СН РК EN 1993-1-8:

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} \leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}} \quad (4.1)$$

где σ_{\perp} - нормальное напряжение, перпендикулярное сечению сварного шва, для продольных сварных швов:

$$\sigma_{\perp} = 0;$$

τ_{\perp} - касательное напряжение (в плоскости сечения сварного шва), перпендикулярное продольной оси сварного шва, для продольных сварных швов:

$$\tau_{\perp} = 0.$$

τ_{\parallel} - касательное напряжение (в плоскости сечения сварного шва), параллельное продольной оси сварного шва;

f_u - номинальное значение временного сопротивления на растяжение, равное для стали марки S460:

$$f_u = 540 \text{ Н/мм}^2;$$

β_w - поправочный коэффициент, принимаемый по таблице 4.1 СН РК EN 1993-1-8, равный для марки стали S460N:

$$\beta_w = 1,0;$$

γ_{M2} - частный коэффициент безопасности по НП.2.13 СН РК EN 1993-1-1, равный

$$\gamma_{M2} = 1,0.$$

Тогда из условия прочности углового сварного шва определяем касательное напряжение τ_{\parallel} :

$$\begin{aligned} \sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} &\leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}} \\ \sqrt{0 + 3(0 + \tau_{\parallel}^2)} &\leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}} \end{aligned}$$

Значит,

$$\tau_{\parallel, Rd} = \frac{f_u}{\sqrt{3} \beta_w \gamma_{M2}} = \frac{540}{\sqrt{3} \cdot 1,0 \cdot 1,25} = 249,7 \text{ Н/мм}^2$$

Расчетная прочность продольного сварного шва (с двух сторон привариваемой пластины) длиной 170мм и толщиной 3мм:

$$F_{\parallel, w, Rd} = \tau_{\parallel, Rd} \cdot a_{w, \parallel} \cdot 2L_{w, \parallel} = 249,7 \cdot 10^{-3} \cdot 3 \cdot 2 \cdot 170 = 254,7 \text{ кН}$$

3.2 Определение несущей способности поперечного сварного шва по направленному методу

Согласно Пункту 5.5.3.1(1) СН РК EN 1993-1-8, расчетную несущую способность углового сварного шва следует определять по направленному методу или по упрощенному методу.

Условия прочности углового сварного шва по направленному методу по Формуле (4.1) СН РК EN 1993-1-8:

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} \leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}} \quad (4.1)$$

где σ_{\perp} - нормальное напряжение, перпендикулярное сечению сварного шва, равное $\frac{\sigma_w}{\sqrt{2}}$ (σ_w - результирующее напряжение от касательного напряжения τ_{\perp} и нормального напряжения σ_{\perp});

τ_{\perp} - касательное напряжение (в плоскости сечения сварного шва), перпендикулярное продольной оси сварного шва, равное $\frac{\sigma_w}{\sqrt{2}}$ (см. Рисунок 2);

τ_{\parallel} - касательное напряжение (в плоскости сечения сварного шва), параллельное продольной оси сварного шва, для поперечных сварных швов:

$$\tau_{\parallel} = 0;$$

f_u - номинальное значение временного сопротивления на растяжение, равное для стали марки S460:

$$f_u = 540 \text{ Н/мм}^2;$$

β_w - поправочный коэффициент, принимаемый по Таблице 4.1 СН РК EN 1993-1-8, равный для марки стали S460N:

$$\beta_w = 1,0;$$

γ_{M2} - частный коэффициент безопасности по НП.2.13 СН РК EN 1993-1-1, равный:

$$\gamma_{M2} = 1,0.$$

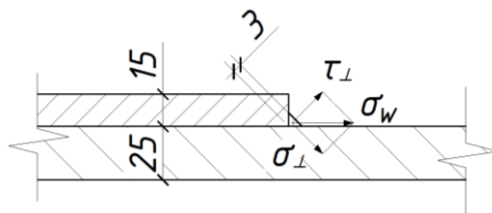


Рисунок 2

Тогда из условия прочности углового сварного шва определяем напряжение σ_w :

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} \leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}}$$

$$\sqrt{\left(\frac{\sigma_w}{\sqrt{2}}\right)^2 + 3\left(\frac{\sigma_w}{\sqrt{2}}\right)^2} \leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}}$$

$$\sigma_w = \frac{f_u}{\sqrt{2} \beta_w \gamma_{M2}} = \frac{540}{\sqrt{2} \cdot 1,0 \cdot 1,25} = 305,5 \text{ МПа}$$

Расчетная прочность поперечного сварного шва (с торца пластины) длиной 80мм и высотой 3мм:

$$F_{\perp, w, Rd} = \sigma_w a_{w, \perp} 2L_{w, \perp} = 305,5 \cdot 10^{-3} \cdot 3 \cdot 80 = 73,3 \text{ кН}$$

Общая расчетная прочность сварного шва:

$$F_{w, Rd} = F_{\parallel, w, Rd} + F_{\perp, w, Rd} = 254,7 \text{ кН} + 73,3 = 328,0 \text{ кН}$$

Значит,

$$F_{w, Rd} = 328,0 \text{ кН} > F_{Ed} = 320 \text{ кН}$$

Условие выполняется.

3.3 Определение несущей способности по растяжению присоединяемого металлического элемента

Разрушение сварного соединения может произойти не только по причине разрушения сварного шва, но и из-за потери несущей способности при действии осевой растягивающей силы.

Таким образом, необходимо выполнить проверку прочности поперечного сечения присоединяемого элемента.

Проверка несущей способности поперечного сечения присоединяемого элемента ведется согласно указаниям Пункта 6.2.3 СН РК EN 1993-1-1.

Условие прочности по Формуле (6.5) СН РК EN 1993-1-1:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{t, Rd}} \leq 1,0 \quad (6.5)$$

Расчетное значение несущей способности на растяжение:

$$N_{pl, Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (6.6)$$

где A – площадь поперечного сечения брутто, равная:

$$A = b \cdot t = 80 \cdot 25 = 2000 \text{ мм}^2$$

f_y – номинальный предел текучести, равный:

$$f_y = 460 \text{ Н/мм}^2;$$

γ_{M0} – частный коэффициент безопасности, равный по НП.2.13 СН РК EN 1993-1-1:

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

Таким образом,

$$N_{t,Rd} = N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{2000 \cdot 460}{1,0} \cdot 10^{-3} = 920 \text{ кН}$$

Проверка условия прочности:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} = \frac{320}{920} = 0,3$$

Условие выполняется.

ПРИМЕР 13 Расчет сварного соединения металлической пластины к полке двутавра по направленному методу

Исходные данные: проверить прочность сварного соединения с толщиной шва $a = 4 \text{ мм}$ и длиной сварного шва $L_w = 300 \text{ мм}$ (с двух сторон) между пластиной $90 \times 200 \times 15 \text{ мм}$, нагруженной поперечной силой $N_{Ed} = 250 \text{ кН}$, и прокатным профилем IPE 200. Все металлические элементы сварного соединения выполнены из стали марки S235 с номинальным пределом текучести $f_y = 235 \text{ Н/мм}^2$ и номинальным значением временного сопротивления на растяжение $f_u = 360 \text{ Н/мм}^2$.

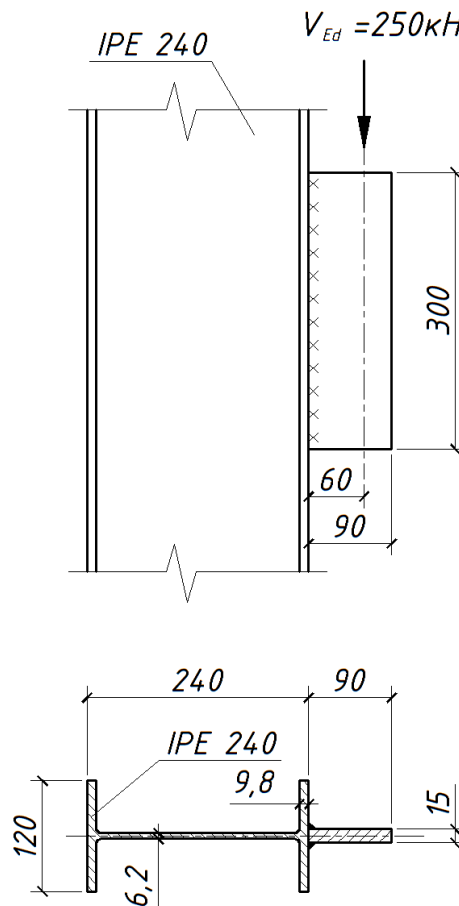


Рисунок 1 – Схема сварного соединения

2 Определение геометрических характеристик

2.1 Эффективная толщина сварного шва

По требованиям Пункта 4.5.2(2) СН РК EN 1993-1-8, эффективная толщина a_w углового сварного шва должна быть не менее 3мм. В данном примере:

$$a_w = 4,0\text{мм.}$$

2.2 Длина сварных швов

Согласно Пункту 4.5.1(2) СН РК EN 1993-1-8, длина сварного шва должна быть меньше 30мм, также длина не должна быть меньше 6 толщин сварного шва, то есть $6 \cdot a_w = 6 \cdot 4 = 24\text{мм}$.

Кроме того, для сварных соединений внахлестку длина не должна превышать 150 кратной высоты сварного шва, чтобы шов считался как не протяженное соединение. То есть, шов не должен превышать длину $150 \cdot a_w = 150 \cdot 4 = 600\text{мм}$

3 Несущая способность сварного соединения

3.1 Определение несущей способности сварного шва по направленному методу

Согласно Пункту 5.5.3.1(1) СН РК EN 1993-1-8, расчетную несущую способность углового сварного шва следует определять по направленному методу или по упрощенному методу.

Условия прочности углового сварного шва по Формуле (4.1) СН РК EN 1993-1-8:

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} \leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}} \quad (4.1)$$

где σ_{\perp} - нормальное напряжение, перпендикулярное сечению сварного шва, равное $\frac{\sigma_w}{\sqrt{2}}$ (σ_w - результирующее напряжение от касательного напряжения τ_{\perp} и нормального напряжения σ_{\perp});

τ_{\perp} - касательное напряжение (в плоскости сечения сварного шва), перпендикулярное продольной оси сварного шва, равное $\frac{\sigma_w}{\sqrt{2}}$ (см. Рисунок 2);

τ_{\parallel} - касательное напряжение (в плоскости сечения сварного шва), параллельное продольной оси сварного шва, равное:

$$\tau_{\parallel} = \frac{V_{Ed}}{a_w \cdot L_w} = \frac{250 \cdot 10^3}{4 \cdot 2 \cdot 300} = 104,2\text{Н/мм}^2;$$

f_u - номинальное значение временного сопротивления на растяжение для стали марки S235 равное:

$$f_u = 360\text{МПа};$$

β_w - поправочный коэффициент, принимаемый по Таблице 4.1 СН РК EN 1993-1-8, равный для марки стали S460N:

$$\beta_w = 1,0;$$

γ_{M2} - частный коэффициент безопасности по Пункту 6.1(1) СН РК EN 1993-1-1, равный

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

Напряжение σ_w определяется по формуле:

$$\sigma_w = \frac{M}{W_{el,w}} = \frac{V_{Ed} \cdot e}{\frac{2 \cdot a_w \cdot L_w^2}{6}} = \frac{250 \cdot 10^3 \cdot 60}{\frac{2 \cdot 4 \cdot 300^2}{6}} = 125\text{Н/мм}^2$$

Нормальное напряжение σ_{\perp} и касательное напряжение τ_{\perp} (см. Рисунок 2):

$$\sigma_{\perp} = \frac{\sigma_w}{\sqrt{2}} = \frac{125}{\sqrt{2}} = 88,34\text{Н/мм}^2$$

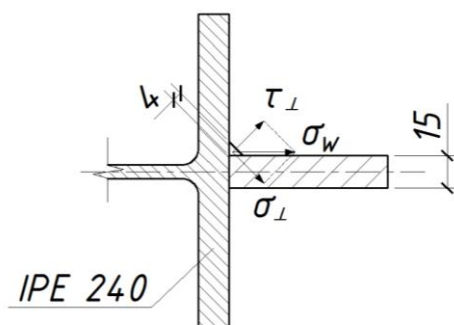


Рисунок 2

Тогда из условия прочности углового сварного шва определяем касательное напряжение τ_{\parallel} :

$$\sqrt{\sigma_{\perp}^2 + 3(\tau_{\perp}^2 + \tau_{\parallel}^2)} \leq \frac{f_u}{\beta_w \gamma_{M2}}$$

$$\sqrt{88,34^2 + 3(88,34 + 104,2^2)} \leq \frac{360}{0,8 \cdot 1,25}$$

Значит,

$$88,38 \text{ Н/мм}^2 < 360 \text{ Н/мм}^2$$

Расчетная прочность сварного шва (с двух сторон привариваемой пластины) длиной 300мм и толщиной сварного шва 4мм выше приложенной нагрузки.

3.2 Определение несущей способности по поперечной силе присоединяемого металлического элемента

Разрушение узла может произойти не только по причине разрушения сварного шва, но и из-за потери несущей способности при действии поперечной силы.

Таким образом, необходимо выполнить проверку прочности поперечного сечения присоединяемого элемента.

Проверка несущей способности поперечного сечения присоединяемого элемента ведется согласно указаниям Пункта 6.2.6 СН РК EN 1993-1-1.

Условие прочности по Формуле (6.17) СН РК EN 1993-1-1:

$$\frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} \leq 1,0 \quad (6.17)$$

Расчетное значение несущей способности на сдвиг

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v \cdot (f_y / \sqrt{3})}{\gamma_{M0}} \quad (6.18)$$

где A_v – площадь сдвига, равная:

$$A_v = b \cdot t = 300 \cdot 15 = 4500 \text{ мм}^2$$

f_y – номинальный предел текучести, равный:

$$f_y = 235 \text{ Н/мм}^2;$$

γ_{M0} – частный коэффициент безопасности, равный НП.2.13 СН РК EN 1993-1-1:

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

Таким образом,

$$V_{c,Rd} = V_{pl,Rd} = \frac{A_v \cdot (f_y / \sqrt{3})}{\gamma_{M0}} = \frac{4500 \cdot 235}{1,0 \cdot \sqrt{3}} \cdot 10^{-3} = 615 \text{ кН}$$

Проверка условия прочности:

$$\frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} = \frac{250}{615} = 0,40$$

Условие выполняется.

3.3 Определение несущей способности при действии изгибающего момента присоединяемого металлического элемента

Так же разрушение узла может произойти из-за потери несущей способности по прочности при действии изгибающего момента.

Проверка несущей способности поперечного сечения присоединяемого элемента ведется согласно указаниям Пункта 6.2.5 СН РК EN 1993-1-1.

Условие прочности по Формуле (6.12) СН РК EN 1993-1-1:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} \leq 1,0 \quad (6.17)$$

Расчетное значение несущей способности на изгиб

$$M_{c,Rd} = M_{el,Rd} = \frac{W_{el,min} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (6.18)$$

где $W_{el,min}$ – момент сопротивления поперечного сечения, равный:

$$W_{el,min} = \frac{b \cdot t^2}{6} = \frac{15 \cdot 300^2}{6} = 225000 \text{ мм}^3;$$

f_y – номинальный предел текучести, равный:

$$f_y = 235 \text{ Н/мм}^2;$$

γ_{M0} – частный коэффициент безопасности, равный по НП.2.13 СН РК EN 1993-1-1:

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

Таким образом,

$$M_{c,Rd} = M_{el,Rd} = \frac{W_{el,min} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{225000 \cdot 235}{1,0} \cdot 10^{-6} = 53 \text{ кНм}$$

Действующий изгибающий момент M_{Ed} от поперечной силы $V_{Ed} = 250 \text{ кН}$ на расстоянии $e = 60 \text{ мм}$:

$$M_{Ed} = V_{Ed} \cdot e = 250 \cdot 60 \cdot 10^{-3} = 15 \text{ кНм}$$

Проверка условия прочности:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{c,Rd}} = \frac{15}{53} = 0,28 < 1,0$$

Условие выполняется.

4.5.3.3 Упрощенный метод определения расчетной несущей способности угловых сварных швов

4.5.3.3.1 В качестве альтернативы 4.5.3.2, расчетную несущую способность углового сварного шва можно считать достаточной, если в каждой точке по его длине равнодействующая всех сил, передаваемых сварным швом единичной длины, удовлетворяет следующему условию:

$$F_{w,Ed} \leq F_{w,Rd}, \quad (4.2)$$

где $F_{w,Ed}$ — расчетное значение внешних усилий, действующих на единицу длины сварного шва;

$F_{w,Rd}$ — расчетное значение несущей способности на единицу длины сварного шва.

4.5.3.3.2 Независимо от ориентации плоскости сечения сварного шва относительно направления приложения силы, расчетную несущую способность сварного шва единичной длины $F_{w,Rd}$ следует определять по формуле:

$$F_{w,Rd} = f_{vw,d} a, \quad (4.3)$$

где $f_{vw,d}$ — расчетное сопротивление сварного шва на сдвиг.

4.5.3.3.3 Расчетное сопротивление сварного шва на сдвиг $f_{vw,d}$ следует определять по формуле:

$$f_{vw,d} = \frac{f_u / \sqrt{3}}{\beta_w \gamma_{M2}}, \quad (4.4)$$

где f_u и β_w определены в 4.5.3.2(6).

ПРИМЕР 14 Расчет сварного соединения равнополочного уголка к металлической колонне по упрощенному методу

Исходные данные: проверить прочность сварного соединения с толщиной шва $a = 3$ мм между двумя элементами, нагруженными растягивающей силой $N_{Ed} = 176,8$ кН. Все металлические элементы сварного соединения выполнены из стали марки S355 с номинальным пределом текучести $f_y = 355$ Н/мм² и номинальным значением временного сопротивления на растяжение $f_u = 510$ Н/мм².

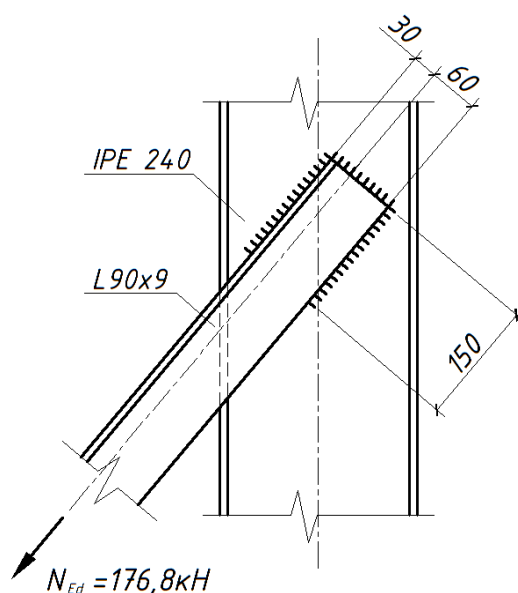


Рисунок 1 – Схема сварного соединения

2 Определение геометрических характеристик

2.1 Эффективная толщина сварного шва

По требованиям Пункта 4.5.2(2) СН РК EN 1993-1-8, эффективная толщина a_w углового сварного шва должна быть не менее 3 мм. В данном примере:

$$a_w = 5,0 \text{ мм.}$$

2.2 Длина сварных швов

Согласно Пункту 4.5.1(2) СН РК EN 1993-1-8, длина сварного шва должна быть больше 30мм, также длина не должна быть меньше 6 толщин сварного шва, то есть $6 \cdot a_w = 6 \cdot 5 = 30\text{мм}$.

Кроме того, для сварных соединений внахлестку длина не должна превышать 150 кратной высоты сварного шва, чтобы шов считался как не протяженное соединение. То есть, шов не должен превышать длину $150 \cdot a_w = 150 \cdot 5 = 750\text{мм}$

3 Несущая способность сварного соединения

3.1 Определение несущей способности продольного сварного шва по упрощенному методу

Согласно Пункту 5.5.3.1(1) СН РК EN 1993-1-8, расчетную несущую способность углового сварного шва следует определять по направленному методу или по упрощенному методу.

Условия прочности углового сварного шва упрощенному методу по Формуле (4.1) СН РК EN 1993-1-8:

$$F_{w,Ed} \leq F_{w,Rd} \quad (4.1)$$

где $F_{w,Ed}$ - расчетное значение внешних усилий, действующих на единицу длины сварного шва;

$F_{w,Ed}$ - расчетное значение несущей способности на единицу длины сварного шва на единицу длины сварного шва.

Расчетное значение внешних усилий, действующих на единицу длины сварного шва, определяется по формуле:

$$F_{w,Ed} = \frac{N_{Ed}}{\sum l_{eff}}$$

где N_{Ed} - значение действующих усилий на сварной шов, равное:

$$N_{Ed} = 176,8\text{кН};$$

$\sum l_{eff}$ - эффективная длина сварного шва, равная:

$$\sum l_{eff} = 150 + 90 + 150 = 390\text{мм}.$$

Значит,

$$F_{w,Ed} = \frac{N_{Ed}}{\sum l_{eff}} = \frac{176,8}{390} = 0,45\text{кН/мм}$$

Согласно Пункту 4.5.3.3(2) СН РК EN 1993-1-8, расчетная несущая способность сварного шва единичной длины независимо от ориентации плоскости сечения сварного шва относительно направления приложения силы определяется по Формуле (4.3) СН РК EN 1993-1-8:

$$F_{w,Rd} = f_{vw,d} \cdot a$$

где $f_{vw,d}$ - расчетное сопротивление сварного шва на сдвиг;

a - толщина сварного шва, равная:

$$a = 5\text{мм}.$$

Расчетное сопротивление сварного шва на сдвиг определяется по Пункту 4.5.3.3(3) и Формуле (4.4) СН РК EN 1993-1-8:

$$f_{vw,d} = \frac{f_u / \sqrt{3}}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}} \quad (4.4)$$

где f_u - номинальное значение временного сопротивления на растяжение для стали марки S355 равное:

$$f_u = 510\text{Н/мм}^2;$$

β_w - поправочный коэффициент, принимаемый по Таблице 4.1 СН РК EN 1993-1-8, равный для марки стали S355:

$$\beta_w = 0,9;$$

γ_{M2} - частный коэффициент безопасности по НП.2.13 СН РК EN 1993-1-1, равный

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

Таким образом, расчетное сопротивление сварного шва на сдвиг равно:

$$f_{vw,d} = \frac{f_u / \sqrt{3}}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}} = \frac{510}{\sqrt{3} \cdot 0,9 \cdot 1,25} = 0,26 \text{ кН/мм}^2.$$

Следовательно, расчетная несущая способность сварного шва единичной длины независимо от ориентации плоскости сечения сварного шва относительно направления приложения силы равна:

$$F_{w,Rd} = f_{vw,d} \cdot a = 0,26 \cdot 5 = 1,3 \text{ кН/мм}.$$

Проверка условия прочности:

$$F_{w,Ed} \leq F_{w,Rd}$$

$$0,45 \text{ кН} < 1,3 \text{ кН}$$

Условие выполняется.

4.6 Расчетная несущая способность круговых угловых сварных швов

Расчетную несущую способность круговых угловых сварных швов следует определять по одному из методов, приведенных в 4.5.

4.7 Расчетная несущая способность стыковых сварных швов

4.7.1 Стыковые сварные швы с полным проваром

Расчетную несущую способность стыковых сварных швов с полным проваром следует принимать равной расчетной несущей способности самой слабой из соединяемых деталей, при условии, что сварка выполнена с применением соответствующих сварочных материалов, позволяющих получать образцы сварного шва с пределом текучести металла шва и временным сопротивлением на растяжение, по крайней мере, равными соответствующим значениям для основного металла.

4.7.2 Стыковые сварные швы с неполным проваром

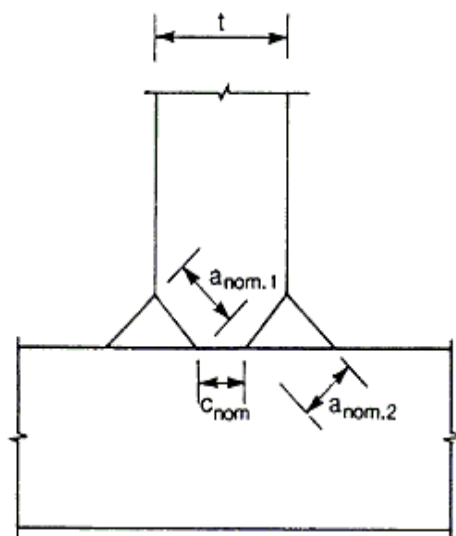
4.7.2.1 Расчетную несущую способность стыковых сварных швов с неполным проваром следует определять методом, приведенным в 4.5.2(3) для расчета угловых сварных швов с полным проваром.

4.7.2.2 Толщина стыкового сварного шва с неполным проваром не должна превышать стабильно достигаемой глубины провара при испытании образцов, см. 4.5.2(3).

4.7.3 Стыковые сварные швы в соединениях в тавр

4.7.3.1 Расчетную несущую способность сварного соединения в тавр, состоящего из пары стыковых сварных швов с неполным проваром, усиленных наложенными поверх них угловыми сварными швами, можно определить как для стыковых сварных швов с полным проваром (см. 4.7.1), если общая номинальная толщина сварного шва, за исключением

незаваренного участка, не менее толщины t примыкающего элемента соединения, при условии, что значение незаваренного зазора c_{nom} не превышает меньшее из двух значений $t/5$ и 3 мм, см. Рисунок 4.8 а).



$$a_{nom,1} + a_{nom,2} \geq t$$

c_{nom} следует принимать равным наименьшему из $t/5$ и 3 мм

Рисунок 4.8 — Эффективный полный провар стыковых сварных швов в соединениях в тавр

4.7.3.2 Расчетную несущую способность стыкового сварного соединения в тавр, не отвечающего требованиям, приведенным в 4.7.3(1), следует определять как для обычного углового сварного шва или для углового сварного шва с полным проваром, приведенного в 4.5, в зависимости от глубины провара. Высоту сварного шва следует определять в соответствии с требованиями, установленными для угловых сварных швов (см. 4.5.2) или для стыковых сварных швов с неполным проваром (см. 4.7.2).

4.8 Расчетная несущая способность пробочных сварных швов

Расчетное значение несущей способности $F_{w,Rd}$ пробочного сварного шва (см. 4.3.3) следует определять по формуле:

$$F_{w,Rd} = f_{vw,d} A_w, \quad (4.5)$$

где $f_{vw,d}$ — расчетное сопротивление сварного шва на сдвиг, приведено в 4.5.3.3(3);
 A_w — расчетная площадь сечения шва, принимается равной площади отверстия.

4.9 Распределение усилий

4.9.1 Распределение усилий в сварном соединении может быть принято в предположении упругой или пластической работы в соответствии с 2.4 и 2.5.

4.9.2 Допускается упрощенное распределение усилий между сварными швами.

4.9.3 При проверке несущей способности сварного шва не следует учитывать остаточные напряжения, а также напряжения, не связанные с внешними усилиями (например, нормальные напряжения, параллельные оси сварного шва).

Сварные соединения следует проектировать таким образом, чтобы они имели достаточную деформативность. Однако не следует рассчитывать на пластичность сварных швов.

4.9.4 В соединениях, в которых могут образоваться пластические шарниры, сварные швы следует проектировать таким образом, чтобы их несущая способность была, по крайней мере, не меньше несущей способности самой слабой детали соединения.

4.9.5 В других соединениях, в которых вследствие возможности возникновения значительных деформаций от напряжений требуется способность к вращению, сварные швы должны иметь несущую способность, исключающую их разрушение до перехода основного материала в пластическое состояние.

4.9.6 Если для определения расчетной несущей способности прерывистого сварного шва используется значение общей длины l_{tot} , то расчетное значение внешнего усилия сдвига на единицу длины $F_{w,Ed}$ следует умножать на коэффициент, равный $(e + 1)/l$, см. Рисунок 4.9.

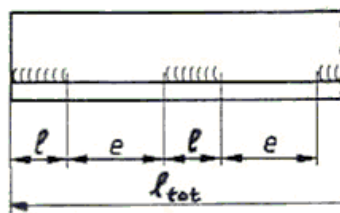


Рисунок 4.9 — Вычисление усилий в прерывистых сварных швах

ПРИМЕР 15 Расчет сварного прерывистого соединения между двумя металлическими пластинами

Исходные данные: проверить прочность сварного соединения с толщиной шва $a = 3\text{ мм}$ между двумя пластинами, нагруженными растягивающей силой $N_{Ed} = 300\text{ кН}$. Все металлические элементы сварного соединения выполнены из стали марки S355N с номинальным пределом текучести $f_y = 355\text{ Н/мм}^2$ и номинальным значением временного сопротивления на растяжение $f_u = 510\text{ Н/мм}^2$.

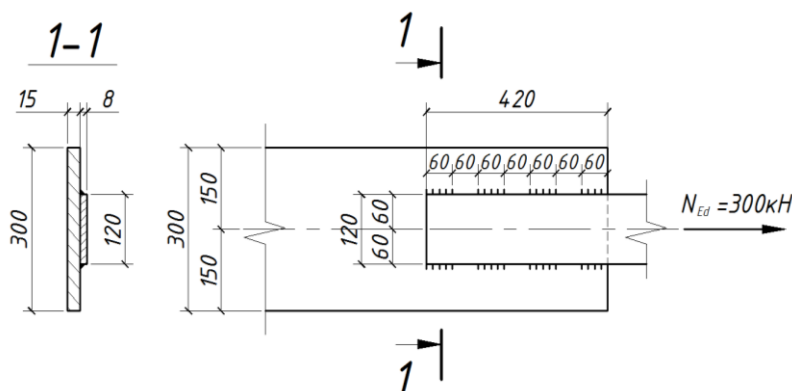


Рисунок 1 – Схема сварного соединения пластин

2 Определение геометрических характеристик

2.1 Эффективная толщина сварного шва

По требованиям Пункта 4.5.2(2) СН РК EN 1993-1-1, эффективная толщина a_w углового сварного шва должна быть не менее 3мм. В данном примере:

$$a_w = 3,0\text{мм.}$$

2.2 Длина сварных швов

Согласно Пункту 4.5.1(2) СН РК EN 1993-1-8, длина сварного шва должна быть больше 30мм, также длина не должна быть меньше 6 толщин сварного шва, то есть $6 \cdot a_w = 6 \cdot 3 = 18\text{мм}$, что меньше $l_{\text{tot}} = 420\text{мм}$.

Кроме того, по условиям Пункта 4.11(3) СН РК EN 1993-1-8, для сварных соединений внахлестку длина не должна превышать 150 кратной высоты сварного шва. То есть, шов не должен превышать длину $150 \cdot a_w = 150 \cdot 3 = 450\text{мм}$, что больше $l_{\text{tot}} = 420\text{мм}$.

В данном расчете применяется прерывистое сварное соединение. Необходимо при расчете несущей способности сварного соединения учитывать требования Пункта 4.9(7) СН РК EN 1993-1-8.

3 Несущая способность сварного соединения

3.1 Определение несущей способности сварного шва

Согласно Пункту 5.5.3.1(1) СН РК EN 1993-1-8, расчетную несущую способность углового сварного шва следует определять по направленному методу или по упрощенному методу.

Условия прочности углового сварного шва по упрощенному методу по Формуле (4.1) СН РК EN 1993-1-8):

$$F_{w,Ed} \leq F_{w,Rd} \quad (4.1)$$

где $F_{w,Ed}$ - расчетное значение внешних усилий, действующих на единицу длины сварного шва;

$F_{w,Ed}$ - расчетное значение несущей способности на единицу длины сварного шва на единицу длины сварного шва.

Расчетное значение внешних усилий, действующих на единицу длины сварного шва, определяется по формуле:

$$F_{w,Ed} = \frac{N_{Ed}}{\sum l_{eff}}$$

где N_{Ed} - значение действующих усилий на сварной шов, равное:

$$N_{Ed} = 500\text{кН};$$

$\sum l_{eff}$ - эффективная длина сварного шва, равная:

$$\sum l_{eff} = l_{\text{tot}} = 420\text{мм.}$$

Однако, следуя указаниям Пункта 4.9(7) СН РК EN 1993-1-8 при использовании (в расчетах прочности прерывистых швов) значения общей длины $l_{\text{tot}} = 420\text{мм}$, расчетное значение внешних усилий, действующих на единицу длины сварного шва следует умножать на коэффициент $\frac{e+l}{l}$ (см. Рисунок 2).

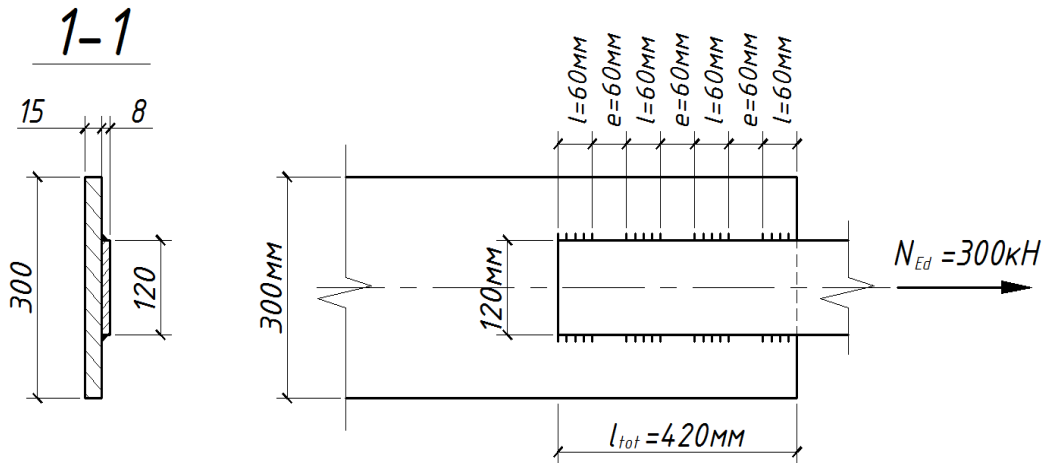


Рисунок 2

Значит,

$$F_{w,Ed} \cdot \frac{e+l}{l} = \frac{N_{Ed}}{l_{tot}} \cdot \frac{e+l}{l} = \frac{300}{2 \cdot 430} \cdot \frac{60+60}{60} = 0,70 \text{ кН/мм.}$$

Согласно Пункту 4.5.3.3(2) СН РК EN 1993-1-8, расчетная несущая способность сварного шва единичной длины независимо от ориентации плоскости сечения сварного шва относительно направления приложения силы определяется по Формуле (4.3) СН РК EN 1993-1-8:

$$F_{w,Rd} = f_{vw,d} \cdot a$$

где $f_{vw,d}$ - расчетное сопротивление сварного шва на сдвиг;

a - толщина сварного шва, равная:

$$a = 3 \text{ мм;}$$

β_{Lw} - понижающий коэффициент.

Расчетное сопротивление сварного шва на сдвиг $f_{vw,d}$ определяется по Пункту 4.5.3.3(3) и Формуле (4.4) СН РК EN 1993-1-8:

$$f_{vw,d} = \frac{f_u / \sqrt{3}}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}} \quad (4.4)$$

где f_u - номинальное значение временного сопротивления на растяжение для стали марки S355 равное:

$$f_u = 510 \text{ Н/мм}^2;$$

β_w - поправочный коэффициент, принимаемый по Таблице 4.1 СН РК EN 1993-1-8, равный для марки стали S355:

$$\beta_w = 0,9;$$

γ_{M2} - частный коэффициент безопасности по НП.2.13 СН РК EN 1993-1-1, равный:

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

Таким образом, расчетное сопротивление сварного шва на сдвиг равно:

$$f_{vw,d} = \frac{f_u / \sqrt{3}}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}} = \frac{510}{\sqrt{3} \cdot 0,9 \cdot 1,25} = 0,26 \text{ кН/мм}^2.$$

Следовательно, расчетная несущая способность сварного шва единичной длины независимо от ориентации плоскости сечения сварного шва относительно направления приложения силы равна:

$$F_{w,Rd} = f_{vw,d} \cdot a = 0,26 \cdot 3 = 1,04 \text{ кН/мм.}$$

Проверка условия прочности:

$$F_{w,Ed} = 0,70 \text{ кН} < F_{w,Rd} = 0,78 \text{ кН}$$

Условие выполняется.

3.2 Определение несущей способности по растяжению присоединяемого металлического элемента

Разрушение узла конструкции может произойти не только по причине разрушения сварного шва, но и из-за потери несущей способности при действии осевой растягивающей силы.

Таким образом, необходимо выполнить проверку прочности поперечного сечения присоединяемого элемента.

Проверка несущей способности поперечного сечения присоединяемого элемента ведется согласно указаниям Пункта 6.2.3 СН РК EN 1993-1-1.

Условие прочности по Формуле (6.5) СН РК EN 1993-1-1:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} \leq 1,0 \quad (6.5)$$

Расчетное значение несущей способности на растяжение

$$N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (6.6)$$

где A – площадь поперечного сечения брутто, равная:

$$A = b \cdot t = 120 \cdot 8 = 980 \text{ мм}^2$$

f_y – номинальный предел текучести, равный:

$$f_y = 355 \text{ Н/мм}^2;$$

γ_{M0} – частный коэффициент безопасности, равный по НП.2.13 СН РК EN 1993-1-1:

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

Таким образом,

$$N_{t,Rd} = N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{980 \cdot 355}{1,0} \cdot 10^{-3} = 347,9 \text{ кН}$$

Проверка условия прочности:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} = \frac{300}{347,9} = 0,86$$

Условие выполняется.

4.10 Крепление к полкам, не подкрепленным поперечными ребрами жесткости

4.10.1 Если пластина (или полка балки) приваривается к неподкрепленной полке двутавровой балки, см. Рисунок 4.10, и выполнено условие 4.10(3), то усилие, приложенное перпендикулярно к неподкрепленной полке, не должно превышать любое из следующих значений:

- несущей способности стенки опорного элемента из двутаврового профиля, приведенного в 6.2.6.2 или 6.2.6.3;
- несущей способности поперечной фасонки, приваренной к элементу замкнутого профиля прямоугольного сечения, приведенного в Таблице 7.13;
- несущей способности опорной полки, вычисленной по Формуле (6.20) (см. 6.2.6.4.3(1)), предполагая концентрацию приложенной нагрузки в пределах эффективной ширины полки b_{eff} , согласно 4.10(2) или 4.10(4).

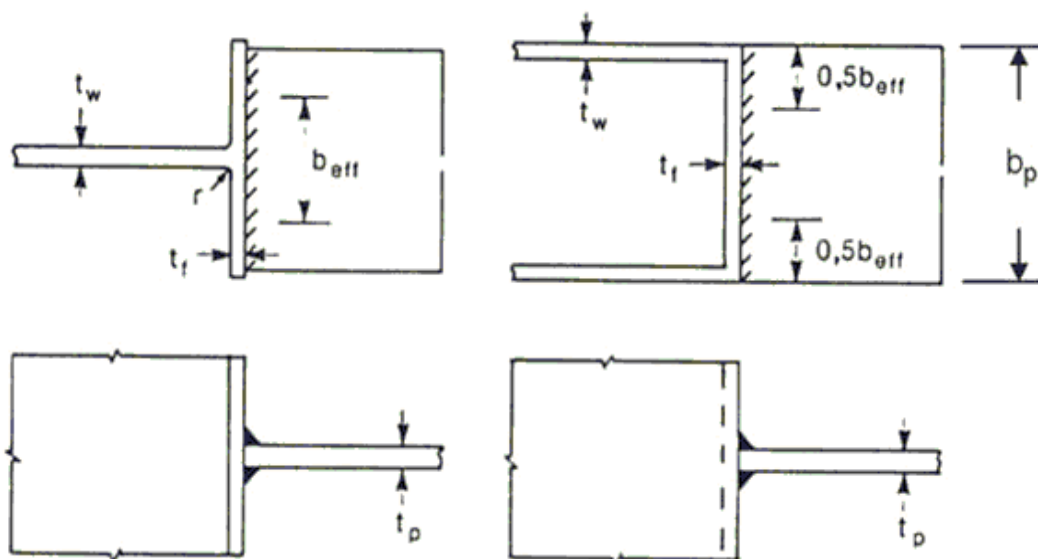


Рисунок 4.10 — Эффективная ширина неподкрепленного соединения в тавр

4.10.2 Эффективную ширину b_{eff} сечения неподкрепленного двутаврового профиля следует определять по формуле:

$$b_{eff} = t_w + 2s + 7kt_f, \quad (4.6a)$$

$$\text{где} \quad k = (t_f/t_p) \cdot (f_{y,f}/f_{y,p}) \quad \text{при } k \leq 1, \quad (4.6б)$$

здесь $f_{y,f}$ — предел текучести стали полки двутавра;

$f_{y,p}$ — предел текучести стали пластинки, приваренной к двутавру.

Значение s определяется следующим образом:

- для прокатных двутавров

$$s = r, \quad (4.6в)$$

- для сварных двутавров

$$s = \sqrt{2}a. \quad (4.6г)$$

4.10.3 Для неусиленной полки двутавра должно выполняться следующее условие:

$$b_{eff} \geq (f_{y,p}/f_{u,p}) \cdot b_p, \quad (4.7)$$

где $f_{u,p}$ — временное сопротивление стали пластины, приваренной к двутавру;

b_p — ширина пластины, приваренной к двутавру.

При невыполнении данного условия полка должна быть усилена.

4.10.4 Для других типов сечений, таких как швеллеры или коробчатые сечения, при равенстве ширин полки и прикрепляемой пластины, значение эффективной ширины b_{eff} следует определять по формуле:

$$b_{eff} = 2t_w + 5t_f \quad \text{при } b_{eff} \leq 2t_w + 5kt_f \quad (4.8)$$

ПРИМЕЧАНИЕ Для замкнутых профилей эффективную ширину следует определять по Таблице 7.13.

4.10.5 Если $b_{\text{eff}} \leq b_p$, то сварные швы, прикрепляющие пластину к полке, следует рассчитывать на усилие, равное несущей способности пластины $b_p t_p f_{y,p} / \gamma_{M0}$, принимая равномерное распределение напряжений.

ПРИМЕР 16 Расчет сварного соединения квадратной трубы к полке двутавра, которая не подкреплена поперечными ребрами жесткости

Исходные данные: выполнить расчет узла крепления квадратной трубы 100×100×6,3мм к пластине толщиной $t = 10$ мм. Схема узла крепления – см. Рисунок 1. Узел подвержен осевому растяжению $N_{Ed} = 140$ кН. Все металлические элементы выполнены из стали марки S355 с номинальным пределом текучести $f_y = 355$ Н/мм² и номинальным временным сопротивлением на растяжение $f_u = 510$ Н/мм².

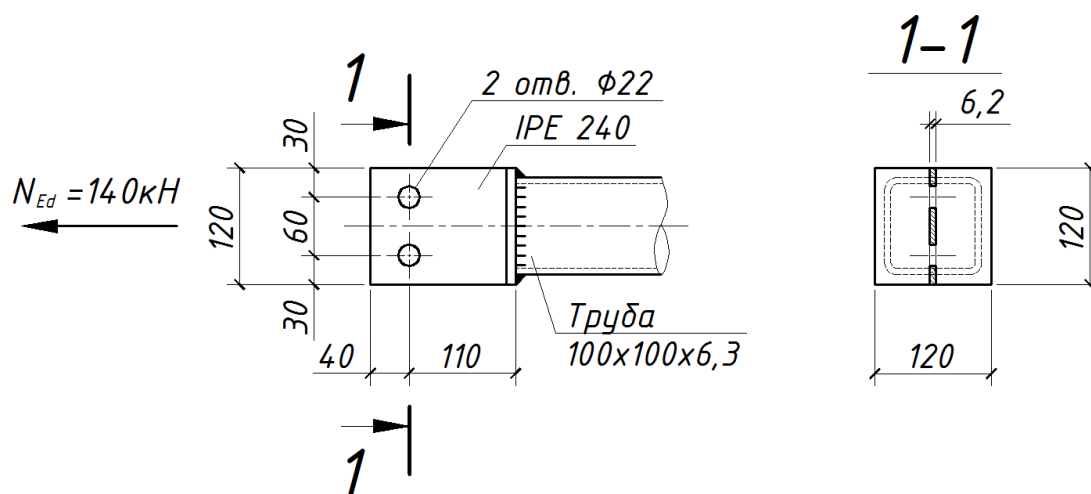


Рисунок 1 – Схема узла

2 Определение основных параметров соединения

2.1 Эффективная ширина полки неподкрепленной поперечными ребрами жесткости

В данном примере сварное соединение используется для крепления квадратной трубы к проушине (в качестве проушины – обрезанный прокатный профиль IPE 240). Круговой сварной шов крепит квадратную трубу и нижнюю полку обрезанного двутавра, не подкрепленной поперечными ребрами жесткости.

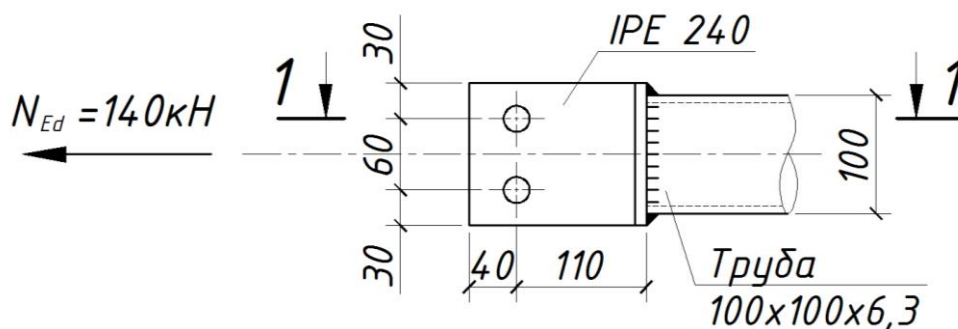


Рисунок 2

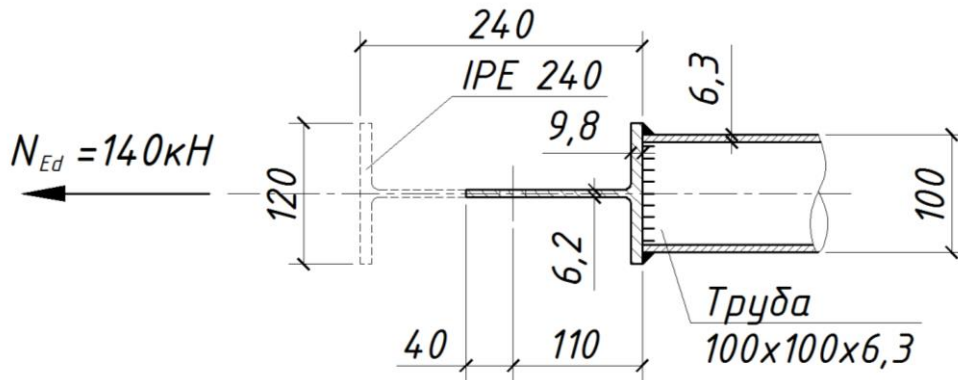


Рисунок 3

В узлах, где к полке двутавровой балки неподкрепленной поперечными ребрами жесткости приваривается пластина (или полка балки) и прилагаемое усилие перпендикулярно к полке двутавровой балки неподкрепленной поперечными ребрами жесткости, необходимо определить эффективную ширину полки (см. Пункт 4.10(2) СН РК EN 1993-1-8).

Эффективную ширину b_{eff} сечения неподкрепленного двутаврового профиля определяется по Формуле (4.6a) СН РК EN 1993-1-8:

$$b_{eff} = t_w + 2s + 7kt_f \quad (4.6a)$$

где t_w - толщина стенки двутавра, равная:

$$t_w = 6,2 \text{ мм};$$

t_f - толщина полки двутавра, равная:

$$t_f = 9,8 \text{ мм};$$

s - параметр, для прокатных двутавров - радиус сопряжения стенки и полки двутавра, равный :

$$s = r = 15 \text{ мм};$$

k - коэффициент, определяемый по Формуле (4.6б) СН РК EN 1993-1-8:

$$k = (t_f/t_p) \cdot (f_{y,f}/f_{y,p}) \quad (4.6б)$$

где t_p - толщина элемента, который приварен к не усиленной полке двутавра;

$f_{y,f}$ - номинальный предел текучести стали полки двутавра, равный:

$$f_{y,f} = 355 \text{ Н/мм}^2;$$

$f_{y,p}$ - номинальный предел текучести стали элемента, который приварен к не усиленной полке двутавра, равный:

$$f_{y,p} = 355 \text{ Н/мм}^2.$$

Значит,

$$k = \left(\frac{t_f}{t_p}\right) \cdot \left(\frac{f_{y,f}}{f_{y,p}}\right) = \frac{6,2}{6,3} \cdot \frac{355}{355} = 0,988$$

Таким образом,

$$b_{eff} = t_w + 2s + 7kt_f = 6,2 + 2 \cdot 15 + 7 \cdot 0,988 \cdot 9,8 = 103,7 \text{ мм}$$

$$b_{eff} = 103,7 < b = 120 \text{ мм}$$

Также для не усиленной полки двутавра должно выполняться условие Пункта 4.10(3) по Формуле (4.7) СН РК EN 1993-1-8:

$$b_{eff} \geq (f_{y,p}/f_{u,p}) \cdot b_p \quad (4.7)$$

где $f_{y,p}$ - предел текучести стали элемента приваренного к полке двутавра, равный:

$$f_{y,p} = 355 \text{ Н/мм}^2;$$

$f_{u,p}$ - временное сопротивление стали элемента приваренного к полке двутавра, равный $f_{u,p} = 355 \text{ Н/мм}^2$.

Значит,

$$b_{\text{eff}} \geq (f_{y,p}/f_{u,p}) \cdot b_p = (355/510) \cdot 100 = 69,6 \text{ мм}$$

$$b_{\text{eff}} = 103,7 > 69,6 \text{ мм}$$

3 Определение несущей способности продольного сварного шва по упрощенному методу

В данном примере сварное соединение используется для крепления квадратной трубы к проушине (в качестве проушины – обрезанный прокатный профиль IPE 240). Круговой сварной шов крепит квадратную трубу и нижнюю полку обрезанного двутавра, не подкрепленной поперечными ребрами жесткости.

Согласно Пункту 5.5.3.1(1) СН РК EN 1993-1-8, расчетную несущую способность углового сварного шва следует определять по направленному методу или по упрощенному методу.

Условия прочности углового сварного шва упрощенному методу по Формуле (4.1) СН РК EN 1993-1-8:

$$F_{w,Ed} \leq F_{w,Rd} \quad (4.1)$$

где $F_{w,Ed}$ - расчетное значение внешних усилий, действующих на единицу длины сварного шва;

$F_{w,Ed}$ - расчетное значение несущей способности на единицу длины сварного шва на единицу длины сварного шва.

Расчетное значение внешних усилий, действующих на единицу длины сварного шва, определяется по формуле:

$$F_{w,Ed} = \frac{N_{Ed}}{\sum l_{\text{eff}}}$$

где N_{Ed} - значение действующих усилий на сварной шов. С учетом указаний Пункта 4.10(5) СН РК EN 1993-1-8, при $b_{\text{eff}} \leq b_p$, сварные швы, прикрепляющие пластину (или полку балки) к полке, следует рассчитывать на усилие, равное несущей способности пластины, равное $b_p t_p f_{y,p} / \gamma_{M0}$. Следовательно:

$$N_{Ed,p} = \frac{b_p t_p f_{y,p}}{\gamma_{M0}} = \frac{100 \cdot 6,3 \cdot 355}{1,0} \cdot 10^{-3} = 223,6 \text{ кН} > N_{Ed} = 140 \text{ кН}$$

$\sum l_{\text{eff}}$ – эффективная длина сварного шва, равная:

$$\sum l_{\text{eff}} = 103,7 \text{ мм.}$$

Значит,

$$F_{w,Ed} = \frac{N_{Ed,p}}{\sum l_{\text{eff}}} = \frac{223,6}{2 \cdot 103,7} = 1,08 \text{ кН/мм}$$

Согласно Пункту 4.5.3.3(2) СН РК EN 1993-1-8, расчетная несущая способность сварного шва единичной длины независимо от ориентации плоскости сечения сварного шва относительно направления приложения силы определяется по Формуле (4.3) СН РК EN 1993-1-8:

$$F_{w,Rd} = f_{vw,d} \cdot a$$

где $f_{vw,d}$ - расчетное сопротивление сварного шва на сдвиг;

a - толщина сварного шва, равная:

$$a = 5 \text{ мм.}$$

Расчетное сопротивление сварного шва на сдвиг определяется по Пункту 4.5.3.3(3) и Формуле (4.4) СН РК EN 1993-1-8:

$$f_{vw,d} = \frac{f_u / \sqrt{3}}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}} \quad (4.4)$$

где f_u - номинальное значение временного сопротивления на растяжение для стали марки S355 равно:

$$f_u = 510 \text{ Н/мм}^2;$$

β_w - поправочный коэффициент, принимаемый по Таблице 4.1 СН РК EN 1993-1-8, равный для марки стали S355:

$$\beta_w = 0,9;$$

γ_{M2} - частный коэффициент безопасности по НП.2.13 СН РК EN 1993-1-1, равный

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

Значит,

Таким образом, расчетное сопротивление сварного шва на сдвиг равно:

$$f_{vw,d} = \frac{f_u / \sqrt{3}}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}} = \frac{510}{\sqrt{3} \cdot 0,9 \cdot 1,25} \cdot 10^{-3} = 0,26 \text{ кН/мм}^2.$$

Следовательно, расчетная несущая способность сварного шва единичной длины независимо от ориентации плоскости сечения сварного шва относительно направления приложения силы равна:

$$F_{w,Rd} = f_{vw,d} \cdot a = 0,26 \cdot 5 = 1,3 \text{ кН/мм}.$$

Проверка условия прочности:

$$F_{w,Ed} \leq F_{w,Rd} \\ 1,04 \text{ кН} < 1,3 \text{ кН}$$

Условие выполняется.

4.11 Протяженные соединения

4.11.1 В соединениях внахлестку расчетное значение несущей способности углового сварного шва следует умножать на понижающий коэффициент β_{Lw} , который учитывает неравномерное распределение напряжений по всей длине шва.

4.11.2 Если распределение напряжений по длине сварного шва соответствует распределению напряжений в прилегающем к нему основному металлу (например, в случае приварки полки к стенке составной двутавровой балки), условия, приведенные в 4.11, выполнять не следует.

4.11.3 Для сварных швов соединений внахлестку длиной более $150a$ понижающий коэффициент β_{Lw} следует принимать равным коэффициенту β_{Lw1} , определяемому по формуле:

$$\beta_{Lw1} = 1,2 - 0,2L_j / (150a) \quad \text{при } \beta_{Lw1} \leq 1,0, \quad (4.9)$$

где L_j — общая длина нахлеста вдоль усилия.

4.11.4 Для угловых сварных швов длиной более 1,7 м при креплении поперечных ребер жесткости в элементах сплошного сечения, понижающий коэффициент β_{Lw} можно принять равным коэффициенту β_{Lw2} , определяемому по формуле:

$$\beta_{Lw2} = 1,1 - L_w / 17 \quad \text{при } \beta_{Lw2} \leq 1,0 \text{ и } \beta_{Lw2} \geq 0,6, \quad (4.10)$$

где L_w — длина сварного шва, м.

ПРИМЕР 17 Расчет сварного протяженного соединения между двумя металлическими пластинами

Исходные данные: проверить прочность сварного соединения с толщиной шва $a = 3\text{мм}$ между двумя пластинами, нагруженными растягивающей силой $N_{Ed} = 500\text{кН}$. Все металлические элементы сварного соединения выполнены из стали марки S355N с номинальным пределом текучести $f_y = 355\text{Н/мм}^2$ и номинальным значением временного сопротивления на растяжение $f_u = 510\text{Н/мм}^2$.

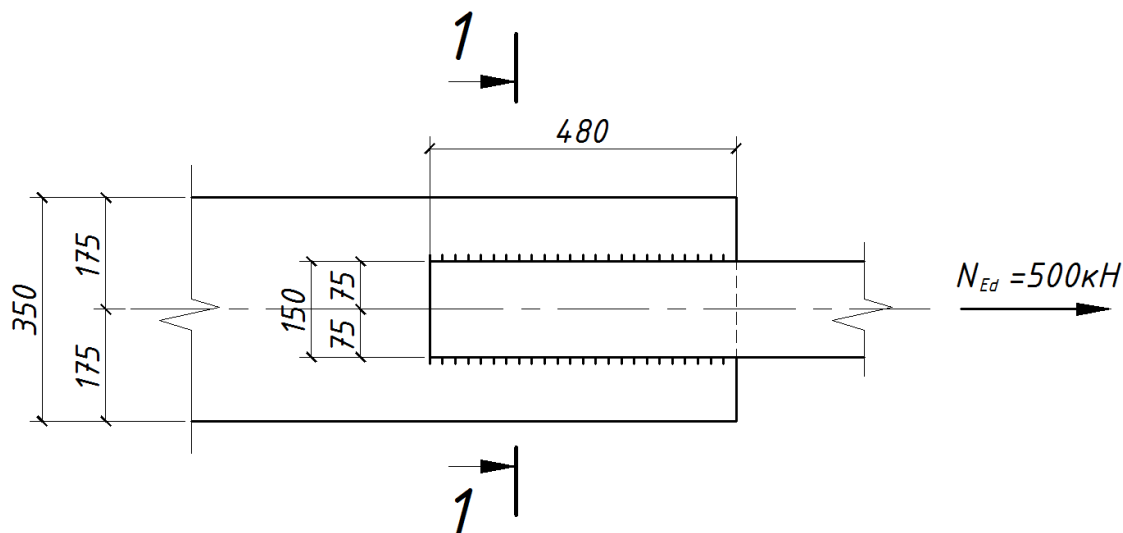


Рисунок – Схема сварного соединения пластин

2 Определение геометрических характеристик

2.1 Эффективная толщина сварного шва

По требованиям Пункта 4.5.2(2) СН РК EN 1993-1-8, эффективная толщина a_w углового сварного шва должна быть не менее 3мм. В данном примере:

$$a_w = 3,0\text{мм}.$$

2.2 Длина сварных швов

Согласно Пункту 4.5.1(2) СН РК EN 1993-1-8, длина сварного шва должна быть больше 30мм, также длина не должна быть меньше 6 толщин сварного шва, то есть $6 \cdot a_w = 6 \cdot 3 = 18\text{мм}$.

Кроме того, по условиям Пункта 4.11(3) СН РК EN 1993-1-8, для сварных соединений внахлестку длина не должна превышать 150 кратной высоты сварного шва. То есть, шов не должен превышать длину $150 \cdot a_w = 150 \cdot 3 = 450\text{мм}$, но в данном примере длина сварного шва $L_j = 480\text{мм}$ превышает заданную длину. Следовательно, при расчете сварного шва необходимо учитывать указания Пункта 4.11 СН РК EN 1993-1-8.

3 Несущая способность сварного соединения

3.1 Определение несущей способности сварного шва

Согласно Пункту 5.5.3.1(1) СН РК EN 1993-1-8, расчетную несущую способность углового сварного шва следует определять по направленному методу или по упрощенному методу.

Условия прочности углового сварного шва по упрощенному методу по Формуле (4.1) СН РК EN 1993-1-8):

$$F_{w,Ed} \leq F_{w,Rd} \quad (4.1)$$

где $F_{w,Ed}$ - расчетное значение внешних усилий, действующих на единицу длины сварного шва;

$F_{w,Ed}$ - расчетное значение несущей способности на единицу длины сварного шва на единицу длины сварного шва.

Расчетное значение внешних усилий, действующих на единицу длины сварного шва, определяется по формуле:

$$F_{w,Ed} = \frac{N_{Ed}}{\sum l_{eff}}$$

где N_{Ed} - значение действующих усилий на сварной шов, равное:

$$N_{Ed} = 500 \text{ кН};$$

$\sum l_{eff}$ - эффективная длина сварного шва, равная:

$$\sum l_{eff} = 480 + 480 = 960 \text{ мм}.$$

Значит,

$$F_{w,Ed} = \frac{N_{Ed}}{\sum l_{eff}} = \frac{500}{2 \cdot 480} = 0,52 \text{ кН/мм}.$$

Согласно Пункту 4.5.3.3(2) СН РК EN 1993-1-8, расчетная несущая способность сварного шва единичной длины независимо от ориентации плоскости сечения сварного шва относительно направления приложения силы определяется по Формуле (4.3) СН РК EN 1993-1-8. Но учитывая, что длина углового сварного шва $L_j = 480 \text{ мм}$ превышает 150-кратную толщину, то расчетная несущая способность сварного шва должна быть умножена на понижающий коэффициент β_{Lw} (см. Пункт 4.11(1) СН РК EN 1993-1-8):

$$F_{w,Rd} = \beta_{Lw} \cdot f_{vw,d} \cdot a$$

где $f_{vw,d}$ - расчетное сопротивление сварного шва на сдвиг;

a - толщина сварного шва, равная:

$$a = 3 \text{ мм};$$

β_{Lw} - понижающий коэффициент.

Расчетное сопротивление сварного шва на сдвиг $f_{vw,d}$ определяется по Пункту 4.5.3.3(3) и Формуле (4.4) СН РК EN 1993-1-8:

$$f_{vw,d} = \frac{f_u / \sqrt{3}}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}} \quad (4.4)$$

где f_u - номинальное значение временного сопротивления на растяжение для стали марки S355 равно:

$$f_u = 510 \text{ Н/мм}^2;$$

β_w - поправочный коэффициент, принимаемый по Таблице 4.1 СН РК EN 1993-1-8, равный для марки стали S355:

$$\beta_w = 0,9;$$

γ_{M2} - частный коэффициент безопасности по Пункту НП.2.13 СН РК EN 1993-1-1, равный

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

Таким образом, расчетное сопротивление сварного шва на сдвиг равно:

$$f_{vw,d} = \frac{f_u / \sqrt{3}}{\beta_w \cdot \gamma_{M2}} = \frac{510}{\sqrt{3} \cdot 0,9 \cdot 1,25} = 0,26 \text{ кН/мм}^2.$$

Согласно Пункту 4.11(3) СН РК EN 1993-1-8, понижающий коэффициент β_{Lw} , следует принимать равным коэффициенту, определяемым по Формуле 4.9 СН РК EN 1993-1-8:

$$\beta_{Lw1} = 1,2 - \frac{0,2L_j}{150a}, \text{ но } \beta_{Lw1} \leq 1,0 \quad (4.9)$$

$$\beta_{Lw1} = 1,2 - \frac{0,2 \cdot 480}{150 \cdot 3} = 0,98 < 1,0$$

Следовательно, расчетная несущая способность сварного шва единичной длины независимо от ориентации плоскости сечения сварного шва относительно направления приложения силы равна:

$$F_{w,Rd} = \beta_{Lw} \cdot f_{vw,d} \cdot a = 0,98 \cdot 0,26 \cdot 3 = 0,76 \text{ кН}.$$

Проверка условия прочности:

$$\begin{aligned} F_{w,Ed} &\leq F_{w,Rd} \\ 0,52 \text{ кН} &< 0,76 \text{ кН} \end{aligned}$$

Условие выполняется.

3.2 Определение несущей способности по растяжению присоединяемого металлического элемента

Разрушение узла конструкции может произойти не только по причине разрушения сварного шва, но и из-за потери несущей способности при действии осевой растягивающей силы.

Таким образом, необходимо выполнить проверку прочности поперечного сечения присоединяемого элемента.

Проверка несущей способности поперечного сечения присоединяемого элемента ведется согласно указаниям Пункта 6.2.3 СН РК EN 1993-1-1.

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

$$\frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} \leq 1,0 \quad (6.5)$$

Расчетное значение несущей способности на растяжение

$$N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (6.6)$$

где A – площадь поперечного сечения брутто, равная

$$A = b \cdot t = 150 \cdot 10 = 1500 \text{ мм}^2$$

f_y – номинальный предел текучести, равный

$$f_y = 355 \text{ Н/мм}^2;$$

γ_{M0} – частный коэффициент безопасности, равный по НП.2.13 СН РК EN 1993-1-1

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

Таким образом,

$$N_{t,Rd} = N_{pl,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{1500 \cdot 355}{1,0} \cdot 10^{-3} = 535,5 \text{ кН}$$

Проверка условия прочности:

$$\begin{aligned} \frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} &= \frac{500}{535,5} = 0,93 \\ \frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} &= 0,93 < 1,0 \end{aligned}$$

Условие выполняется.

4.12 Угловые и односторонние стыковые сварные швы с неполным проваром, подверженные внецентренному нагружению

4.12.1 Во всех случаях, где это возможно, следует избегать возникновения местного эксцентриситета приложения усилия.

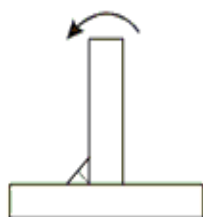
4.12.2 Влияние местного эксцентриситета (относительно линии действия осевой силы) следует учитывать в следующих случаях:

- если изгибающий момент, приложенный относительно продольной оси сварного шва, вызывает растяжение в корне сварного шва, см. Рисунок 4.11 а);

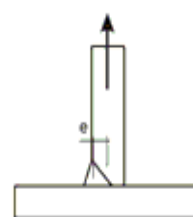
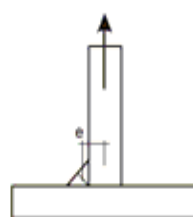
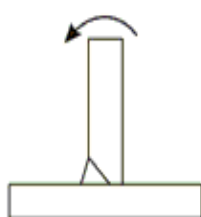
- если растягивающее усилие, приложенное перпендикулярно продольной оси сварного шва, вызывает изгибающий момент, приводящий к возникновению растягивающего усилия в корне сварного шва, см. рисунок 4.11 б).

4.12.3 Если сварной шов является частью сварных швов по периметру сечения замкнутого профиля, местный эксцентриситет учитывать не следует.

а)



б)



а — изгибающий момент вызывает растяжение в корне сварного шва;

б — растягивающее усилие вызывает растяжение в корне сварного шва

Рисунок 4.11 — Одиночные угловые и односторонние стыковые сварные швы с неполным проваром при внецентренном нагружении

4.13 Уголки, прикрепляемые одной полкой

4.13.1 При креплении уголков одной полкой влияние эксцентриситета приложения усилия на уголок в сварном соединении внахлестку учитывается путем использования в расчетах эффективной площади поперечного сечения, рассматривая его центрально нагруженным.

4.13.2 Для равнополочных уголков и неравнополочных, прикрепленных широкой полкой, эффективная площадь сечения может быть принята равной площади сечения брутто.

4.13.3 При определении расчетной несущей способности по прочности поперечного сечения неравнополочного уголка, прикрепленного меньшей полкой, эффективную площадь следует принять равной площади поперечного сечения брутто эквивалентного равнополочного уголка с шириной полки, равной ширине меньшей полки неравнополочного уголка, относительно поперечных сечений класса 4 для определения необходимых допусков при снижении несущей способности от действия местной потери устойчивости может быть использована эффективная ширина элементы жесткости должны соответствовать требованиям СН РК EN 1993-1-5 согласно которым, 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 $\eta f_{yw} t / (\sqrt{3} \gamma_{M1})$; 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.

Однако, при определении несущей способности по устойчивости сжатого элемента, следует использовать фактическую площадь поперечного сечения брутто согласно положениям СН РК EN 1993-1-1 и в случае применения неравнополочных уголков, см. Рисунок 4.12, устойчивость относительно оси $y-y$ может быть проверена радиусом инерции сечения, равным

$$i_y = \frac{i_0}{1,15},$$

где i_0 — минимальный радиус инерции составного элемента.

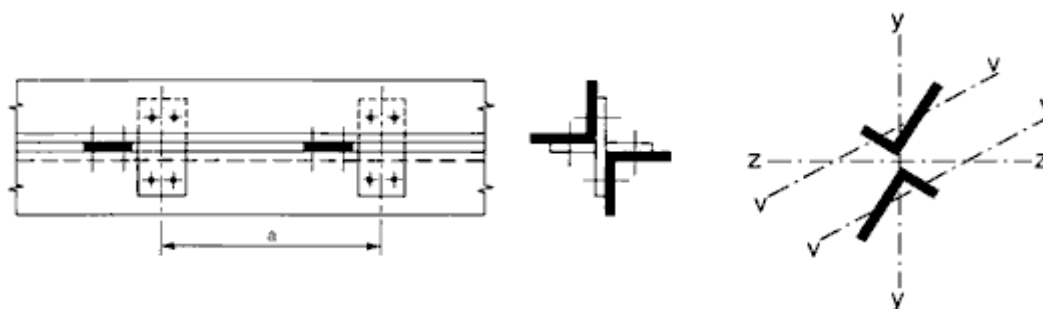


Рисунок 4.12 - Угловые элементы, соединенные по типу «звезда»

4.14 Сварка в холоднодеформированных зонах

Сварку можно производить в пределах участков длиной $5t$ с каждой стороны холоднодеформированной зоны, см. Таблицу 4.3, при выполнении одного из следующих требований:

- холоднодеформированные зоны подвергнуты нормализации после холодного деформирования до начала сварочных работ;
- отношение r/t удовлетворяет значениям Таблицы 4.3.

Таблица 4.3 — Требования к сварке холоднодеформированных зон и прилегающего к ней металла

r/t	Деформация вследствие холодного деформирования, %	Максимальная толщина, мм		
		В общем случае		При полном раскислении алюминием ($Al \geq 0,02 \%$)
		доминирует статическая нагрузка	доминирует подвижная, вибрационная и т. п. нагрузка	
≥ 25	≤ 2	Любая	Любая	Любая
≥ 10	≤ 5	Любая	16	Любая
$\geq 3,0$	≤ 14	24	12	24

Таблица 4.3 — Требования к сварке холоднодеформированных зон и прилегающего к ней металла (продолжение)

$\geq 2,0$	≤ 20	12	10	12
$\geq 1,5$	≤ 25	8	8	10
$\geq 1,0$	≤ 33	4	4	6

5 АНАЛИЗ, КЛАССИФИКАЦИЯ И МОДЕЛИРОВАНИЕ

5.1 Статический расчет

5.1.1 Общие положения

5.1.1.1 Как правило, следует учитывать влияние работы соединений на распределение внутренних сил и моментов в конструкции, а также на общие деформации конструкции. Если это влияние незначительно, то им можно пренебречь.

5.1.1.2 Чтобы установить, должно ли учитываться влияние работы соединения на выполнение статического расчета, различают три типа упрощенных моделей узлов:

- простой, в котором можно допустить, что узел не передает изгибающий момент;
- жесткий, в котором работа узла не влияет на результаты статического расчета;
- полужесткий, в котором следует учитывать влияние работы узла на статический расчет.

5.1.1.3 Тип модели узла следует определять по Таблице 5.1, в зависимости от классификации узла и выбранного метода статического расчета.

5.1.1.4 Зависимость между углом поворота и моментом в узле, используемая при статическом расчете, может быть упрощена и представлена в виде соответствующей кривой, включая линейную аппроксимацию (например, билинейную или трилинейную), при условии, что эта аппроксимирующая кривая полностью расположена ниже расчетной кривой зависимости между углом поворота и изгибающим моментом.

5.1.2 Упругий расчет

5.1.2.1 Узлы следует классифицировать по их вращательной жесткости, см. 5.2.2.

5.1.2.2 Узлы должны иметь достаточную прочность для передачи действующих в узле сил и моментов, полученных при статическом расчете.

Таблица 5.1 — Тип модели узла

Метод расчета	Классификация узла		
Упругий	Номинально-шарнирный	Жесткий	Полужесткий
Жестко-пластический	Номинально-шарнирный	Равнопрочный	Частично равнопрочный
Упруго-пластический	Номинально-шарнирный	Жесткий и равнопрочный	Полужесткий и частично равнопрочный Полужесткий и равнопрочный Жесткий и частично равнопрочный
Тип модели узла	Простой	Жесткий	Полужесткий

5.1.2.3 В случае полужесткого узла, в статическом расчете следует принимать вращательную жесткость S_j , соответствующую изгибающему моменту $M_{j,Ed}$. Если $M_{j,Ed}$ не превышает $2/3 M_{j,Rd}$, то в статическом расчете можно принять начальную вращательную жесткость $S_{j,ini}$, см. Рисунок 5.1 а).

5.1.2.4 Для упрощения методики, приведенной в 5.1.2(3), расчетное значение вращательной жесткости можно принять равным $S_{j,ini}/\eta$ для всех значений изгибающего момента $M_{j,Ed}$, как показано на Рисунке 5.1 б), где η — коэффициент перехода к модифицированной жесткости, принимаемый по Таблице 5.2.

5.1.2.5 Для узлов из двутавров значение вращательной жесткости S_j приведено в 6.3.1.

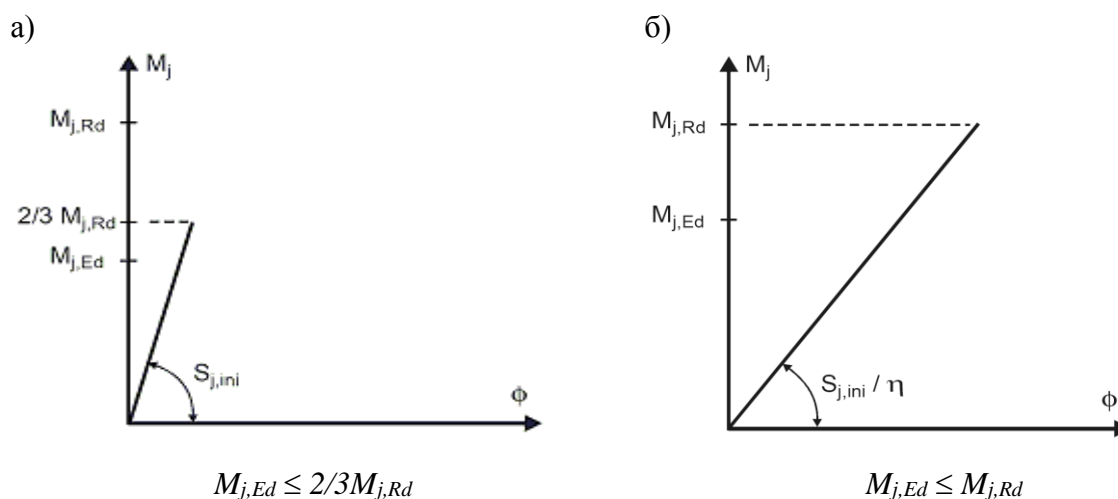


Рисунок 5.1 — Вращательная жесткость, принимаемая при упругом расчете

Таблица 5.2 — Коэффициент перехода к модифицированной жесткости η

Тип соединения	Сопряжение балки с колонной	Другие типы сопряжений (сопряжения балки с балкой, стыки балок, сопряжения базы колонны с фундаментом)
Сварное соединение	2	3
Болтовое соединение торцевого опорного листа	2	3
Болтовое соединение свесов полки сечения	2	3,5
Опорные листы базы	—	3

5.1.3 Жестко-пластический расчет

5.1.3.1 Узлы следует классифицировать по их прочности, см. 5.2.3.

5.1.3.2 Значение $M_{j,Rd}$ для узлов из двутавров приведено в 6.2.

5.1.3.3 Для расчета узлов из элементов замкнутого профиля можно использовать метод, приведенный в Разделе 7.

5.1.3.4 Вращательная способность узлов должна быть достаточной по отношению к углу поворота узла, полученному при расчете.

5.1.3.5 Вращательная способность узлов из двутавров должна быть проверена в соответствии с 6.4.

5.1.4 Упруго-пластический расчет

5.1.4.1 Узлы следует классифицировать по их жесткости (см. 5.2.2) и прочности (см. 5.2.3).

5.1.4.2 Для узлов из двутавров $M_{j,Rd}$ приведено в 6.2, S_j — в 6.3.1, φ_{Cd} — в 6.4.

5.1.4.3 Для расчета узлов из замкнутых профилей можно использовать метод, приведенный в Разделе 7.

5.1.4.4 Для определения распределения внутренних сил и моментов в элементах конструкций следует использовать зависимость между изгибающим моментом и углом поворота узла.

5.1.4.5 Для упрощения расчета может быть принята билинейная зависимость между моментом и углом поворота узла, показанная на Рисунке 5.2. Коэффициент перехода к модифицированной жесткости η следует принимать по Таблице 5.2.

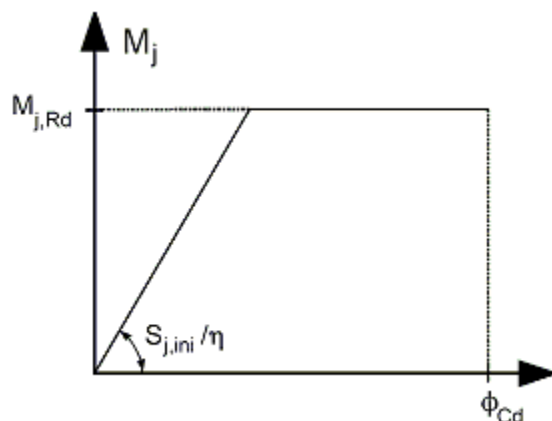


Рисунок 5.2 — Упрощенная билинейная зависимость между моментом и углом поворота узла

5.1.5 Статический расчет ферм

5.1.5.1 Положения, приведенные в 5.1.5, применимы только для конструкций, узлы которых проверены согласно Разделу 7.

5.1.5.2 Распределение осевых усилий в фермах можно определить, предполагая шарнирное сопряжение стержней в узлах (см. также 2.7).

5.1.5.3 Моментами от эффектов второго рода, обусловленными вращательной жесткостью узлов, можно пренебречь как при расчете стержней, так и при расчете узлов, если выполняются два следующих условия:

- геометрия и параметры узлов соответствуют области применения, указанной в Таблицах 7.1, 7.8, 7.9 или 7.20;

- отношение конструктивной длины к высоте сечения элемента в плоскости фермы не меньше соответствующего минимального значения. Для конструкций зданий минимальное значение может быть принято равным 6. Большие значения могут устанавливаться в других частях СН РК EN 1993.

5.1.5.4 Моменты, возникающие от действия поперечных нагрузок (в плоскости или из плоскости), приложенных между узлами фермы, следует учитывать при расчете элементов, к которым они приложены, если выполнены условия, приведенные в 5.1.5(3):

- стержни решетки могут считаться шарнирно соединенными с поясами, и таким образом моменты от действия поперечных сил, приложенных к поясам, не должны передаваться на стержни решетки и наоборот;

- пояса можно рассматривать как неразрезные балки с шарнирными опорами в узлах ферм.

5.1.5.5 Моменты, возникающие от эксцентриситетов, можно не учитывать при расчете растянутых поясов и стержней решетки. Ими также можно пренебречь при расчете соединений, если значения эксцентриситетов находятся в следующих пределах:

$$-0,55d_0 \leq e \leq 0,25d_0 ; \quad (5.1a)$$

$$-0,55h_0 \leq e \leq 0,25h_0 , \quad (5.1б)$$

где e — эксцентриситет, см. Рисунок 5.3;
 d_0 — диаметр сечения пояса;
 h_0 — высота сечения пояса в плоскости решетки.

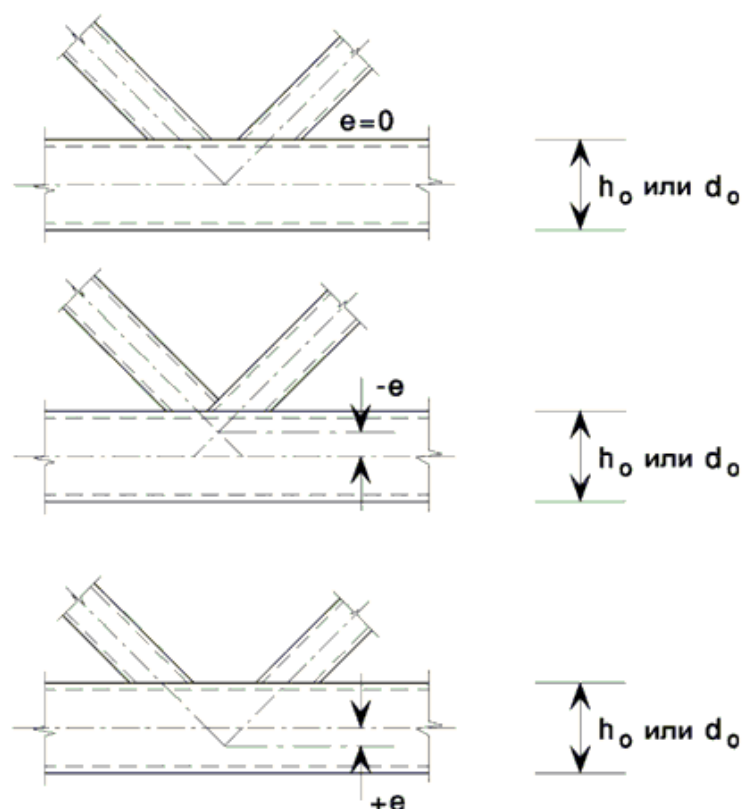


Рисунок 5.3 — Эксцентриситет в узлах

5.1.5.6 Если значения эксцентриситетов находятся в пределах границ, указанных в 5.1.5(5), то моменты, возникающие от этих эксцентриситетов, следует учитывать при расчете сжатых элементов поясов. В этом случае моменты, возникающие от эксцентриситета, должны быть распределены между сжатыми элементами пояса с каждой стороны узла исходя из их погонных жесткостей I/L , где L — конструктивная длина элемента, равная расстоянию между узлами фермы.

5.1.5.7 Если значения эксцентриситетов находятся за пределами, указанными в 5.1.5(5), то моменты, возникающие от этих эксцентриситетов, следует учитывать при расчете узлов их соединений и сжатых поясов. В этом случае моменты, возникающие от эксцентриситета, должны быть распределены между всеми элементами, сходящимися в узле с учетом их погонных жесткостей I/L , где L — конструктивная длина элемента, равная расстоянию между узлами фермы.

5.1.5.8 Напряжения в поясе от моментов, учитываемых при расчете пояса, также следует учитывать при определении коэффициентов k_m , k_n и k_p , используемых при расчете узлов, см. Таблицы 7.2 – 7.5, 7.10, 7.12 – 7.14.

5.1.5.9 Случаи, когда моменты должны учитываться при расчете, сведены в Таблицу 5.3.

Таблица 5.3 — Учет изгибающих моментов

Тип компонента	Изгибающий момент возникающий от		
	эффектов второго рода	поперечной нагрузки	эксцентриситета
Сжатый пояс	Не учитывается, если удовлетворены условия 5.1.5(3)	Учитывается	Учитывается
Растянутый пояс			Не учитывается
Стержень решетки			Не учитывается
Узел			Не учитывается, если удовлетворены условия 5.1.5(3)

5.2 Классификация узлов

5.2.1 Общие положения

5.2.1.1 Конструктивные свойства всех узлов должны соответствовать предпосылкам, принятым в каждом конкретном методе расчета, и не оказывать неблагоприятного воздействия на другие части конструкции.

5.2.1.2 Узлы классифицируют по их жесткости (см. 5.2.2) и прочности (см. 5.2.3).

ПРИМЕЧАНИЕ В Национальном Приложении может быть приведена дополнительная информация по классификации узлов по их жесткости и прочности, например информация, аналогичная приведенной в 5.2.2.1(2).

5.2.2 Классификация по жесткости

5.2.2.1 Общие положения

5.2.2.1.1 Узел можно классифицировать как жесткий, номинально-шарнирный или полужесткий, в зависимости от его вращательной жесткости, сравнивая его начальную вращательную жесткость $S_{j,ini}$ с граничными значениями классификационных зон, приведенными в 5.2.2.5.

ПРИМЕЧАНИЕ Правила определения $S_{j,ini}$ узлов из двутавров изложены в 6.3.1. Правила определения $S_{j,ini}$ узлов из замкнутых профилей в настоящем пособии не приведены.

5.2.2.1.2 Узел можно классифицировать на основе экспериментальных данных, опыта предыдущей удовлетворительной эксплуатации или по результатам расчета на основе результатов испытаний.

5.2.2.2 Номинально-шарнирные узлы

5.2.2.2.1 Номинально-шарнирный узел должен передавать внутренние усилия без

появления значительных моментов, которые могли бы неблагоприятно воздействовать на отдельные элементы или на конструкцию в целом.

5.2.2.2.2 Номинально-шарнирный узел не должен сдерживать вращение узла при действии расчетной нагрузки.

5.2.2.3 Жесткие узлы

Узлы, классифицируемые как жесткие, должны иметь достаточную вращательную жесткость для подтверждения расчетной предпосылки, принятые при статическом расчете.

5.2.2.3 Полу жесткие узлы

5.2.2.3.1 Узлы, не удовлетворяющие критериям для жестких или номинально-шарнирных узлов, следует классифицировать как полу жесткие.

ПРИМЕЧАНИЕ Полу жесткие узлы обеспечивают предсказуемую степень взаимодействия между элементами, основанную на расчетной зависимости между моментом и углом поворота узла.

5.2.2.3.2 Полу жесткие узлы должны передавать внутренние усилия и моменты.

5.2.2.4 Граничные значения классификационных зон

5.2.2.4.1 Границы классификации для узлов, кроме сопряжений баз колонн, приведены в 5.2.2.1(1) и на Рисунке 5.4.

5.2.2.4.2 Базы колонн можно классифицировать как жесткие, если удовлетворяются следующие условия:

- в рамках каркасов, в которых система связей уменьшает горизонтальные перемещения, по крайней мере, на 80 % и влиянием деформаций можно пренебречь, если

$$\bar{\lambda}_0 \leq 0,5; \quad (5.2a)$$

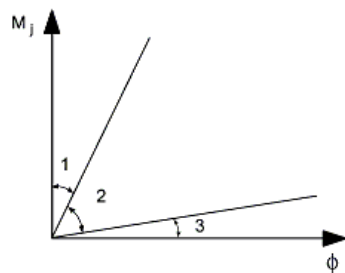
$$0,5 < \bar{\lambda}_0 < 3,93 \text{ и } S_{j,ini} \geq 7 \cdot (2\bar{\lambda}_0 - 1) \cdot EI_c / L_c; \quad (5.2б)$$

$$\bar{\lambda}_0 \geq 3,93 \text{ и } S_{j,ini} \geq 48EI_c / L_c, \quad (5.2в)$$

- или если

$$S_{j,ini} \geq 30EI_c / L_c, \quad (5.2г)$$

где $\bar{\lambda}_0$ — гибкость колонны с шарнирным закреплением концов;
 I_c, L_c — см. Рисунок 5.4.



Зона 1 — жесткий узел, если $S_{j,ini} \geq k_b E I_b / L_b$, где $k_b = 8$ для рам каркасов, в которых система связей уменьшает горизонтальные перемещения, по крайней мере, на 80 %; $k_b = 25$ для остальных рам каркасов, при условии что на каждом этаже $K_b / K_c \geq 0,1^*$.

Зона 2 — полужесткий узел. Все узлы зоны 2, следует классифицировать как полужесткие. Узлы зон 1 или 3 в отдельных случаях могут также рассматриваться как полужесткие.

Зона 3 — номинально-шарнирный узел, если $S_{j,ini} \leq 0,5 E I_b / L_b$.

* При $K_b / K_c < 0,1$ узлы следует классифицировать как полужесткие.

Условные обозначения:

K_b — среднее значение I_b / L_b для всех балок данного этажа;

K_c — среднее значение I_c / L_c для всех колонн данного этажа;

I_b — момент инерции поперечного сечения балки;

I_c — момент инерции поперечного сечения колонны;

L_b — пролет балок (расстояние между центрами колонн);

L_c — высота колонны в пределах этажа

Рисунок 5.4 — Классификация узлов по жесткости

5.2.3 Классификация по прочности

5.2.3.1 Общие положения

Узел классифицируют как равнопрочный, номинально-шарнирный или частично равнопрочный, сравнивая его расчетную несущую способность на изгиб $M_{j,Rd}$ с расчетными несущими способностями на изгиб соединяемых элементов. При классификации узлов расчетную несущую способность элемента следует принимать как для элемента, примыкающего к узлу.

5.2.3.2 Номинально-шарнирные узлы

5.2.3.2.1 Номинально-шарнирный узел должен передавать внутренние усилия без появления значительных моментов, которые могли бы неблагоприятно воздействовать на отдельные элементы или на конструкцию в целом.

5.2.3.2.2 Номинально-шарнирный узел должен сдерживать вращение узла при действии расчетной нагрузки.

5.2.3.2.3 Узел можно классифицировать как номинально-шарнирный, если его расчетная несущая способность на изгиб $M_{j,Rd}$ не превосходит 0,25 расчетного значения

несущей способности на изгиб, требуемой для равнопрочного узла, при условии что он также имеет достаточную вращательную способность.

5.2.3.3 Равнопрочные узлы

5.2.3.3.1 Расчетная несущая способность равнопрочного узла должна быть не меньше расчетной несущей способности соединяемых элементов.

5.2.3.3.2 Узел можно классифицировать как равнопрочный, если он удовлетворяет условиям, приведенным на Рисунке 5.5.

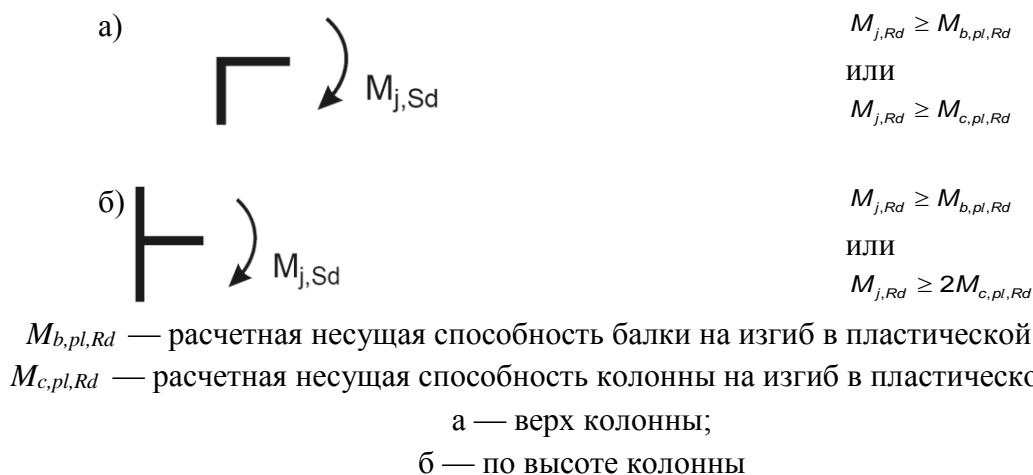


Рисунок 5.5 — Равнопрочные узлы

5.2.3.4 Частично равнопрочные узлы

Узел, который не отвечает условиям, предъявляемым к равнопрочному или номинально-шарнирному узлу, следует классифицировать как частично равнопрочный узел.

5.3 Моделирование сопряжения балки с колонной

5.3.1 При моделировании деформированного состояния узла следует учитывать деформации сдвига участка стенки колонны в месте примыкания балки, а также деформацию, обусловленную поворотом узлового соединения.

5.3.2 Узлы следует рассчитывать на восприятие внутренних изгибающих моментов $M_{b1,Ed}$ и $M_{b2,Ed}$, нормальных усилий $N_{b1,Ed}$ и $N_{b2,Ed}$ и поперечных сил $V_{b1,Ed}$ и $V_{b2,Ed}$ от присоединяемых элементов, см. Рисунок 5.6.

5.3.3 Суммарное усилие сдвига $V_{wp,Ed}$ в участке стенки колонны следует определять по формуле:

$$V_{wp,Ed} = (M_{b1,Ed} - M_{b2,Ed})/z - (V_{c1,Ed} - V_{c2,Ed})/2, \quad (5.3)$$

где z — плечо внутренней пары сил, см. 6.2.7.

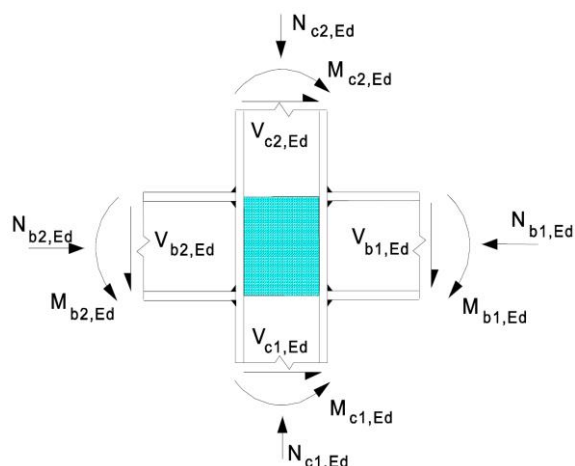
5.3.4 Для того, чтобы модель узла наиболее точно отражала его действительную работу, участок стенки колонны, работающий на сдвиг, и каждое из креплений узлов следует моделировать отдельно, учитывая внутренние силы и моменты, действующие на

периферии участка стенки колонны, см. Рисунки 5.6 а) и 5.7.

5.3.5 В качестве упрощающей альтернативы методу, изложенному в 5.3(4), односторонние узлы можно моделировать как одиночные узлы, а двусторонние узлы можно моделировать как два отдельных, но взаимодействующих узла, по одному с каждой стороны. Следовательно, двусторонняя конфигурация сопряжения балки с колонной имеет две зависимости «момент – угол поворота»: одну — для правого и одну — для левого сопряжения.

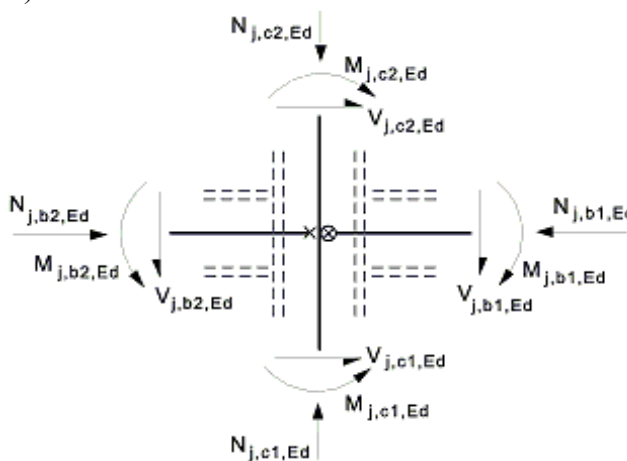
5.3.6 При двустороннем сопряжении каждый узел следует моделировать в виде спиральной пружины, как показано на Рисунке 5.8, характеризуемой зависимостью «момент – угол поворота», которая учитывает работу участка стенки колонны на сдвиг, а также влияние соответствующих креплений.

а)



а — значения усилий на периферии участка стенки колонны;

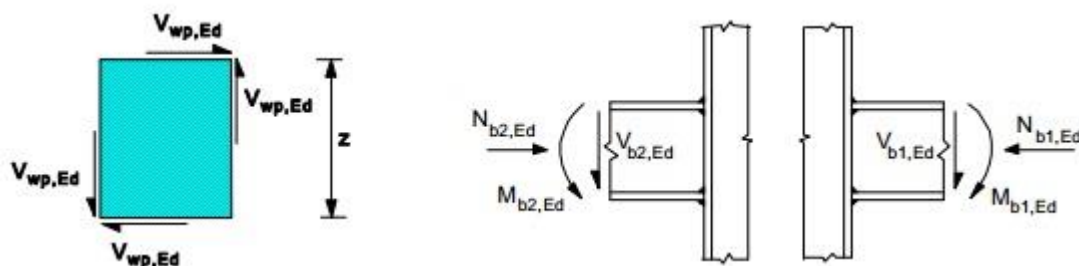
б)



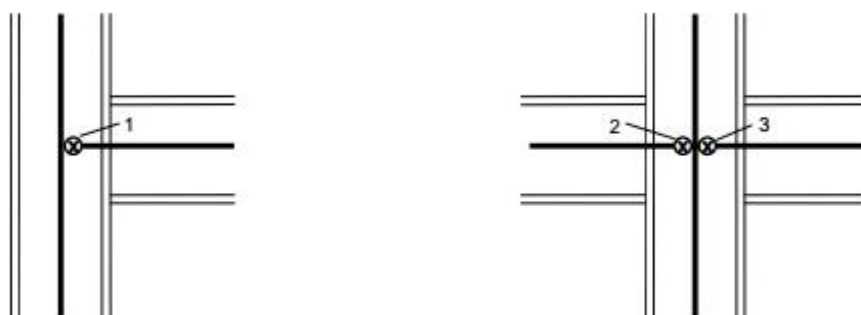
б — значения усилий в точке пересечения осей элементов

Рисунок 5.6 — Внутренние силы и моменты в узле

Направление сил и моментов соответствует положительным значениям усилий в Формулах (5.3) и (5.4)



а) Поперечные силы в сечении стержня

б) Силы и моменты в узлах
присоединения
балок**Рисунок 5.7 — Внутренние усилия и моменты, действующие на участках стенки колонны в соединениях**

Односторонняя конфигурация узла

Двусторонняя конфигурация узла

1, 2, 3 — узлы сопряжения балок с колоннами

Рисунок 5.8 — Моделирование узла

5.3.7 При определении расчетной несущей способности на изгиб, а также вращательной жесткости для каждого узла, возможное влияние участка стенки колонны, работающего на срез, следует учитывать с помощью коэффициентов трансформации β_1 и β_2 ,

где β_1 — значение коэффициента трансформации β для правой стороны узла;
 β_2 — значение коэффициента трансформации β для левой стороны узла.

ПРИМЕЧАНИЕ Коэффициенты трансформации β_1 и β_2 применяются непосредственно в 6.2.7.2(7) и 6.3.2(1). Также они используются в 6.2.6.2(1) и 6.2.6.3(4) совместно с Таблицей 6.3 для определения понижающего коэффициента ω при сдвиге.

5.3.8 Приближенные значения β_1 и β_2 , основанные на значениях изгибающих моментов в балке $M_{b1,Ed}$ и $M_{b2,Ed}$, действующих на периферии участка стенки колонны, см. Рисунок 5.6 а), можно определить по Таблице 5.4.

5.3.9 В качестве альтернативы 5.3(8) более точные значения β_1 и β_2 , основанные на значениях изгибающих моментов в балке в точке пересечения осей элементов,

см. Рисунок 5.6 б), могут быть определены по упрощенной модели:

$$\beta_1 = |1 - M_{j,b2,Ed} / M_{j,b1,Ed}| \leq 2, \quad (5.4a)$$

$$\beta_2 = |1 - M_{j,b1,Ed} / M_{j,b2,Ed}| \leq 2, \quad (5.4б)$$

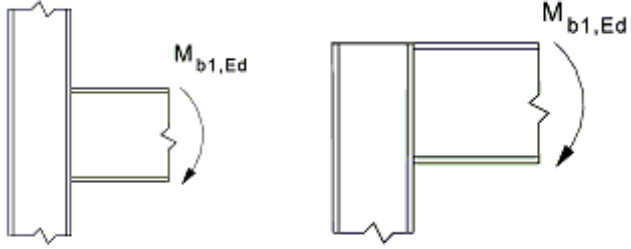
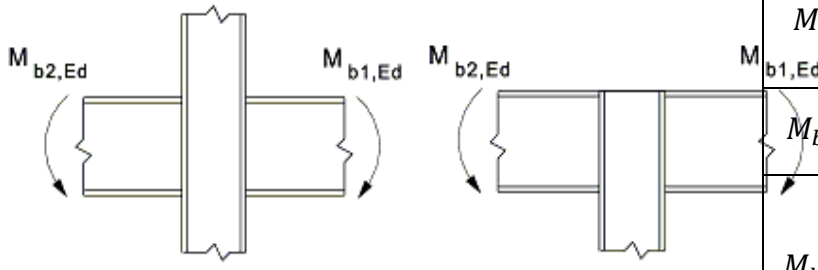
где

$M_{j,b1,Ed}$ — момент в точке пересечения осей элементов со стороны правой балки;

$M_{j,b2,Ed}$ — момент в точке пересечения осей элементов со стороны левой балки.

5.3.10 При определении расчетной несущей способности на изгиб не усиленного двустороннего сопряжения балки с колонной с неравными по высоте балками, следует учитывать фактическое распределение касательных напряжений на участке стенки колонны.

Таблица 5.4 — Приближенные значения коэффициента перехода β

Конфигурация узла	Воздействие	Значение β
	$M_{b1,Ed}$	$\beta \approx 1$
	$M_{b1,Ed} = M_{b2,Ed}$	$\beta = 0 *$
	$M_{b1,Ed} / M_{b2,Ed} > 0$	$\beta \approx 1$
	$M_{b1,Ed} / M_{b2,Ed} < 0$	$\beta \approx 2$
	$M_{b1,Ed} + M_{b2,Ed} = 0$	$\beta \approx 2$
* В данном случае значение β является точным.		

ПРИМЕР 18 Расчет определения несущей способности полужесткого узла

Исходные данные: определить несущую способность полужесткого узла (см. Рисунок 1).
 Балка изготовлена из прокатного профиля IPE 220, колонна - из НЕВ 140. Балка к колонне крепится через опорную плиту $t = 12\text{ мм}$ на болтах M16 класса прочности 8.8 с номинальным пределом текучести $f_{yb} = 430\text{ Н/мм}^2$ и временным сопротивлением на растяжение $f_{ub} = 800\text{ Н/мм}^2$.

Все элементы узла выполнены из стали марки S235 номинальным пределом текучести $f_y = 235\text{ Н/мм}^2$ и номинальным значением временного сопротивления на растяжение $f_u = 360\text{ Н/мм}^2$.

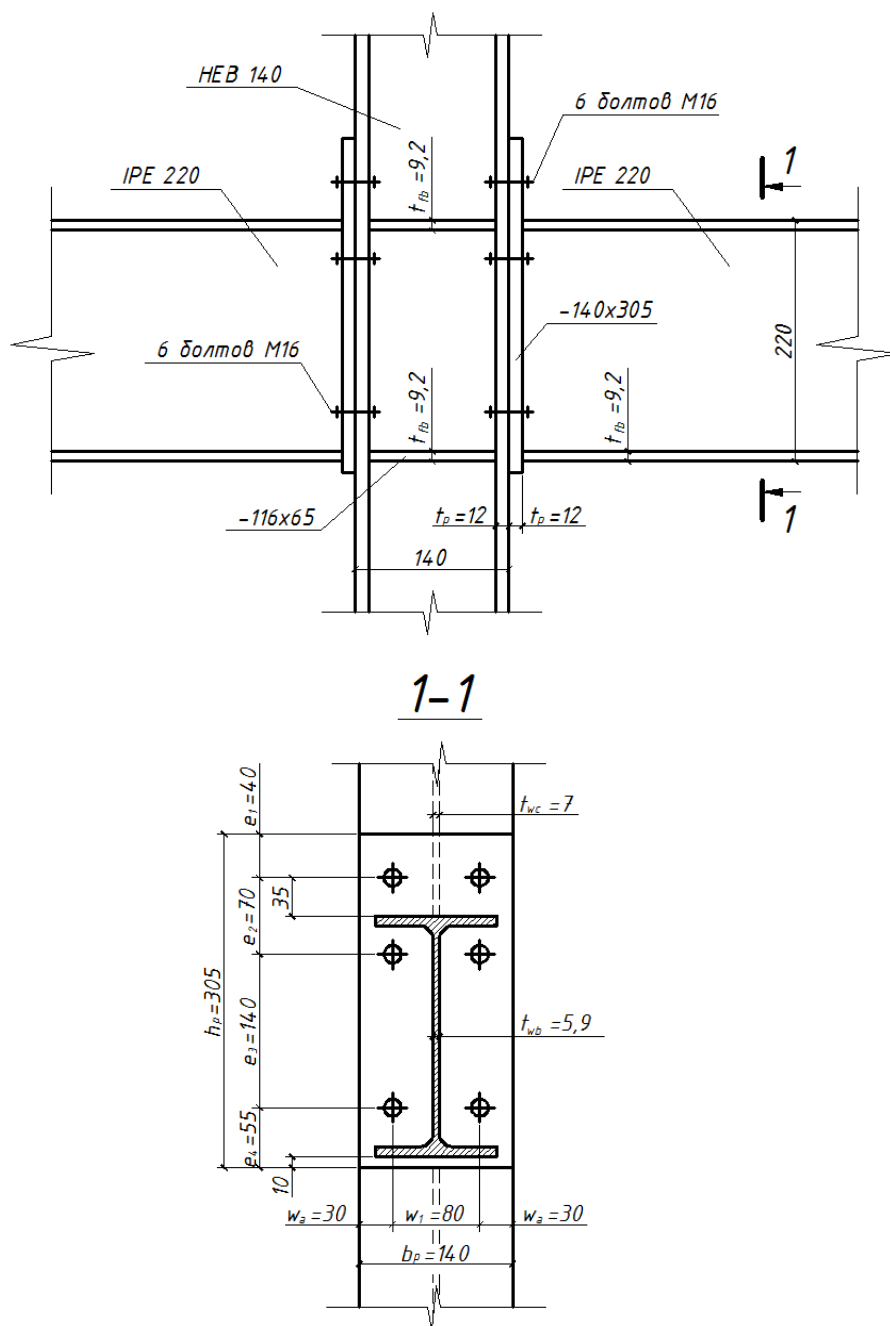


Рисунок 1 - Схема узла

2 Определение расчетной несущей способности ряда болтов в полке колонны

Определение расстояний m_1 и m_2 (см. Рисунок 6.11 СН РК 1993-1-8):

$$m_1 = \frac{80 - 7 - 2 \cdot 0,8 \cdot 12}{2} = 26,9 \text{ мм}$$

$$m_2 = \frac{70 - 152 - 2 \cdot 0,8 \cdot \sqrt{5} \cdot 5}{2} = 23,3 \text{ мм}$$

Определение расстояния e (см. Рисунок 6.8 СН РК 1993-1-8):

$$e = e_{\min} = 30 \text{ мм}$$

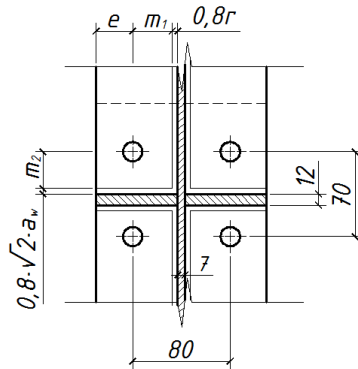


Рисунок 2 - Схема Т-образного эквивалентного элемента

Определение параметров λ_1 и λ_2 (см. Рисунок 6.11 СН РК 1993-1-8):

$$\lambda_1 = \frac{m_1}{m_1 + e} = \frac{26,9}{26,9 + 30} = 0,47$$

$$\lambda_2 = \frac{m_2}{m_1 + e} = \frac{23,3}{26,9 + 30} = 0,41$$

Определение параметра α (см. Рисунок 6.11 СН РК 1993-1-8):

$$\alpha = 6,1$$

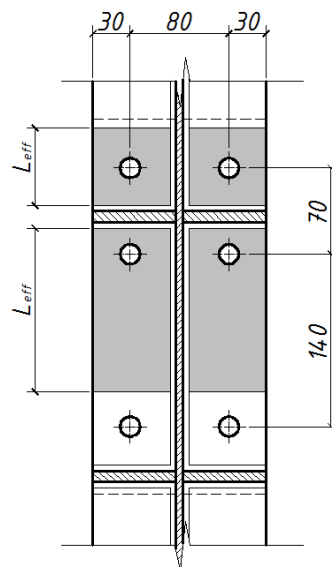


Рисунок 3

Эффективные длины (см. Таблицу 6.5 СН РК 1993-1-8):

$$L_{\text{eff.ср}} = 2\pi m = 2 \cdot \pi \cdot 26,9 = 169,0 \text{ мм}$$

$$L_{\text{eff.cp}} = \alpha \cdot m = 6,1 \cdot 26,9 = 166,8 \text{ мм}$$

$$L_{\text{eff.1}} = \min(L_{\text{eff.cp}}; L_{\text{eff.op}}) = \min(169,0; 166,8) = 166,8 \text{ мм}$$

$$L_{\text{eff.2}} = L_{\text{eff.op}} = 166,8 \text{ мм}$$

Погонная несущая способность полки:

$$m_{\text{c.pl.Rd}} = \frac{t_{\text{fc}}^2 f_y}{4 \gamma_{M0}} = \frac{12,0^2 \cdot 235}{4 \cdot 1,15} = 7356,5 \text{ Н} \cdot \text{мм/мм}$$

Расчетная несущая способность одного болта на растяжение:

$$B_{\text{t.Rd}} = \frac{0,9 A_s f_{\text{ub}}}{\gamma_{Mb}} = \frac{0,9 \cdot 800 \cdot 157}{1,45} = 78,0 \cdot 10^3 \text{ Н} = 78,0 \text{ кН}$$

Определение расстояния n (см. Таблица 6.2 СН РК 1993-1-8):

$$n = \min(e; 1,25 m_2) = \min(30; 1,25; 26,9) = 30 \text{ мм}$$

Расчетная несущая способность стенки при сжатии:

- тип разрушения 1 (полное развитие пластических деформаций в полке):

$$F_{\text{cf1.Rd}} = \frac{4 L_{\text{eff.1}} m_{\text{c.pl.Rd}}}{m}$$

$$F_{\text{cf1.Rd}} = \frac{4 \cdot 166,8 \cdot 7356,5}{26,9} = 182,4 \cdot 10^3 \text{ Н} = 182,4 \text{ кН}$$

- тип разрушения 2 (разрыв болта с развитием пластических деформаций в полке):

$$F_{\text{cf1.Rd}} = \frac{2 L_{\text{eff.2}} m_{\text{c.pl.Rd}} + 2 n B_{\text{t.Rd}}}{m + n}$$

$$F_{\text{cf1.Rd}} = \frac{2 \cdot 166,8 \cdot 7356,5 + 2 \cdot 30 \cdot 78,0 \cdot 10^3}{26,9 + 30} = 125,4 \cdot 10^3 \text{ Н} = 125,4 \text{ кН}$$

- тип разрушения 3 (разрыв болта):

$$F_{\text{cf1.Rd}} = 2 B_{\text{t.Rd}} = 2 \cdot 78,0 = 156,0 \cdot 10^3 \text{ Н} = 156,0 \text{ кН}$$

Определение эффективной длины участка второго ряда болтов:

$$L_{\text{eff.cp}} = 2 \pi m = 2 \cdot \pi \cdot 26,9 = 169,0 \text{ мм}$$

$$L_{\text{eff.cp}} = \pi m + p = \pi \cdot 26,9 + 140 = 224,5 \text{ мм}$$

$$L_{\text{eff.op}} = \alpha \cdot m = 6,2 \cdot 26,9 = 166,8 \text{ мм}$$

$$L_{\text{eff.op}} = \alpha m + 0,5 p - (2m + 0,625 e) = 6,2 \cdot 26,9 + 0,5 \cdot 140 - (2 \cdot 26,9 + 0,625 \cdot 30)$$

$$L_{\text{eff.op}} = 164,2 \text{ мм}$$

Расчетные эффективные длины участков:

$$L_{\text{eff.1}} = \min(L_{\text{eff.cp}}; L_{\text{eff.op}}) = \min(169,0; 224,5; 166,8; 164,2) = 164,2 \text{ мм}$$

$$L_{\text{eff.2}} = \min(L_{\text{eff.op}}) = \min(166,8; 164,2) = 164,2 \text{ мм}$$

Расчетная несущая способность стенки при сжатии:

- тип разрушения 1:

$$F_{\text{cf2.Rd}} = \frac{4 L_{\text{eff.1}} m_{\text{c.pl.Rd}}}{m} = \frac{4 \cdot 164,2 \cdot 7356,5}{26,9} = 179,6 \cdot 10^3 \text{ Н} = 179,6 \text{ кН}$$

- тип разрушения 2:

$$F_{\text{cf2.Rd}} = \frac{2 L_{\text{eff.2}} m_{\text{c.pl.Rd}} + 2 n B_{\text{t.Rd}}}{m + n} = \frac{2 \cdot 164,2 \cdot 7356,5 + 2 \cdot 30 \cdot 78,0 \cdot 10^3}{26,9 + 30}$$

$$F_{\text{cf2.Rd}} = 124,7 \cdot 10^3 \text{ Н} = 124,7 \text{ кН}$$

- тип разрушения 3:

$$F_{\text{cf2.Rd}} = 2 B_{\text{t.Rd}} = 2 \cdot 78,0 = 156,0 \cdot 10^3 \text{ Н} = 156,0 \text{ кН}$$

3 Расчетная несущая способность опорной плиты при растяжении

Расстояние от края плиты до центра отверстия:

$$e_x = 40 \text{ мм}$$

$$m_x = a_1 - 0,8\sqrt{2}a_f = 35 - 0,8 \cdot \sqrt{2} \cdot 5 = 29,3 \text{ мм}$$

$$n = \min(e_x; 1,25m_x) = \min(40; 1,25 \cdot 29,3) = 36,6 \text{ мм}$$

Эффективные длины:

$$L_{\text{eff.cp}} = \min \left\{ \begin{array}{l} 2\pi m_x \\ \pi m_x + w \\ \pi m_x + 2e \end{array} \right\}$$

$$L_{\text{eff.cp}} = \min \left\{ \begin{array}{l} 2 \cdot \pi \cdot 29,3 \\ \pi \cdot 29,3 + 80 \\ \pi \cdot 29,3 + 2 \cdot 30 \end{array} \right\} = \min \left\{ \begin{array}{l} 184,1 \\ 172,0 \\ 152,0 \end{array} \right\} = 152,0 \text{ мм}$$

$$L_{\text{eff.op}} = \min \left\{ \begin{array}{l} 4m_x + 1,25e_x \\ e + 2m_x + 0,625e_x \\ 0,5b_p \end{array} \right\}$$

$$L_{\text{eff.op}} = \min \left\{ \begin{array}{l} 4 \cdot 29,3 + 1,25 \cdot 40 \\ 30 + 2 \cdot 29,3 + 0,625 \cdot 40 \\ 0,5 \cdot 140,0 \end{array} \right\} = \min \left\{ \begin{array}{l} 167,2 \\ 113,6 \\ 70,0 \end{array} \right\} = 70,0 \text{ мм}$$

Расчетные эффективные длины участков:

$$L_{\text{eff.1}} = \min(L_{\text{eff.cp}}; L_{\text{eff.op}}) = \min(152,0; 70,0) = 70,0 \text{ мм}$$

$$L_{\text{eff.2}} = L_{\text{eff.op}} = 70 \text{ мм}$$

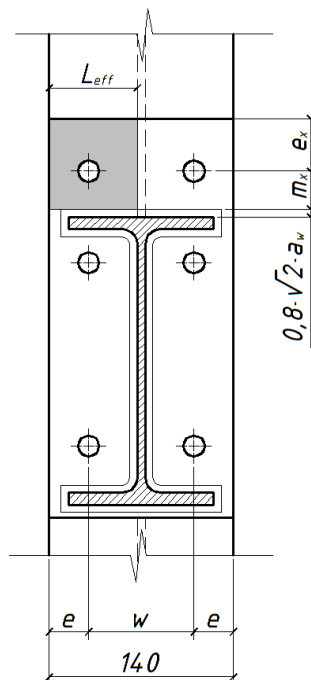


Рисунок 4

Расчетная несущая способность опорной плиты при действии изгиба:

$$m_{p.pl.Rd} = \frac{t_p^2 f_y}{4 \gamma_{M0}} = \frac{12,0^2 \cdot 235}{4 \cdot 1,15} = 7356,5 \text{ Нмм/мм}$$

- тип разрушения 1:

$$F_{p1.Rd} = \frac{4 L_{eff.1} m_{p.pl.Rd}}{m} = \frac{4 \cdot 70 \cdot 7356,5}{29,3} = 70,3 \cdot 10^3 \text{ Н} = 70,3 \text{ кН}$$

- тип разрушения 2:

$$F_{p1.Rd} = \frac{2 L_{eff2} m_{p.pl.Rd} + 2 n B_{t.Rd}}{m + n} = \frac{2 \cdot 70 \cdot 7356,5 + 2 \cdot 36,6 \cdot 78,0 \cdot 10^3}{29,3 + 36,6} = 102,3 \text{ кН}$$

- тип разрушения 3:

$$F_{p1.Rd} = 2 B_{t.Rd} = 2 \cdot 78,0 = 156,0 \cdot 10^3 \text{ Н} = 156,0 \text{ кН}$$

4 Определение расчетной несущей способности второго ряда болтов в опорной плите

Определение расстояния m_1 и m_2 (см. Рисунок 6.1 СН РК 1993-1-8):

$$m_1 = \frac{80 - 5,9 - 2 \cdot 0,8 \cdot \sqrt{2} \cdot 4}{2} = 32,5 \text{ мм}$$

$$m_2 = 70 - 35 - 9,2 - 0,8 \cdot \sqrt{2} \cdot 2 = 20,1 \text{ мм}$$

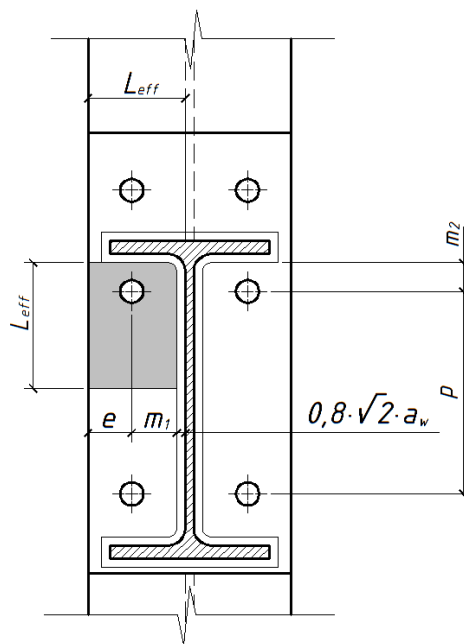


Рисунок 5

Определение параметров λ_1 и λ_2 (см. Рисунок 6.1 СН РК 1993-1-8):

$$\lambda_1 = \frac{m_1}{m_1 + e} = \frac{32,5}{32,56 + 30} = 0,52$$

$$\lambda_2 = \frac{m_2}{m_1 + e} = \frac{20,1}{32,5 + 30} = 0,32$$

Определение параметра α (см. Рисунок 6.1 СН РК 1993-1-8):

$$\alpha = 6,0$$

Определение расстояния n :

$$n = \min(e; 1,25m) = \min(30; 1,25; 32,5) = 30 \text{ мм}$$

Определение эффективной длины участка второго ряда болтов:

$$L_{\text{eff.cp}} = 2\pi m = 2\pi \cdot 32,5 = 204,2\text{мм}$$

$$L_{\text{eff.cp}} = \pi m = \pi m + p = \pi \cdot 32,5 + 140 = 242,1\text{мм}$$

$$L_{\text{eff.op}} = \alpha m = 6,0 \cdot 32,5 = 195,0\text{мм}$$

$$L_{\text{eff.op}} = \alpha m + 0,5p - (2m + 0,625e)$$

$$L_{\text{eff.op}} = 6,0 \cdot 32,5 + 0,5 \cdot 140 - (2 \cdot 32,5 + 0,625 \cdot 30) = 181,3\text{мм}$$

Определение эффективной длины участка:

$$L_{\text{eff1}} = \min(L_{\text{eff.cp}}; L_{\text{eff.op}}) = \min(204,2; 242,1; 195,0; 181,3) = 181,3\text{мм}$$

$$L_{2.\text{eff2}} = \min(L_{\text{eff.op}}) = \min(195,0; 181,3) = 181,3\text{мм}$$

Расчетная несущая способность стенки при сжатии:

- тип разрушения 1:

$$F_{p2.\text{Rd}} = \frac{4L_{\text{eff.1}}m_{p.\text{pl.Rd}}}{m}$$

$$F_{p2.\text{Rd}} = \frac{4 \cdot 181,3 \cdot 7356,5}{32,5} = 164,2 \cdot 10^3 \text{Н} = 164,2\text{кН}$$

- тип разрушения 2:

$$F_{p1.\text{Rd}} = \frac{2L_{\text{eff2}}m_{p.\text{pl.Rd}} + 2nB_{t.\text{Rd}}}{m + n}$$

$$F_{p1.\text{Rd}} = \frac{2 \cdot 181,3 \cdot 7356,5 + 2 \cdot 30 \cdot 78,0 \cdot 10^3}{32,5 + 30} = 117,6 \cdot 10^3 \text{Н} = 117,6\text{кН}$$

- тип разрушения 3:

$$F_{p1.\text{Rd}} = 2B_{t.\text{Rd}} = 2 \cdot 78,0 = 156,0 \cdot 10^3 \text{Н} = 156,0\text{кН}$$

Расчетная несущая способность полки балки при сжатии:

$$F_{fb.\text{Rd}} = \frac{M_{pl.\text{Rd}}}{h_b - t_{fb}} = \frac{W_{pl}f_y}{\gamma_{M0}(h_b - t_{fb})} = \frac{285,4 \cdot 10^3 \cdot 235}{1,15 \cdot (220 - 9,2)} = 276,7 \cdot 10^3 \text{Н} = 276,7\text{кН}$$

Расчетная несущая способность рядов болтов при растяжении:

- верхнего ряда:

$$F_{t1.\text{Rd}} = \min(F_{cf1.\text{Rd}}; F_{p1.\text{Rd}}) = \min(125,4; 70,3) = 70,3\text{кН}$$

- среднего ряда:

$$F_{t2.\text{Rd}} = \min(F_{cf2.\text{Rd}}; F_{p2.\text{Rd}}) = \min(124,7; 117,6) = 117,6\text{кН}$$

Расстояние от центра нижней полки балки до среднего ряда болтов:

$$z_1 = 220 + 35 - \frac{9,2}{2} = 250,4\text{мм}$$

Расстояние от центра нижней полки до верхнего ряда болтов:

$$z_2 = 220 - 35 - \frac{9,2}{2} = 180,4\text{мм}$$

Расчетная несущая способность при изгибе:

$$M_{j.\text{Rd}} = F_{t1.\text{Rd}} \cdot z_1 + F_{t2.\text{Rd}} \cdot z_2 = 70,3 \cdot 0,2504 + 117,6 \cdot 0,1804 = 38,8\text{кНм}$$

Расчетная несущая способность сварного шва у полок:

$$F_{wfb.\text{Rd}} = \frac{f_u a_f (2b_{fb} - t_{wb})}{\beta_w \gamma_{Mw} \sqrt{3}}$$

$$F_{wfb.\text{Rd}} = \frac{360 \cdot 5 \cdot (2 \cdot 140 - 5,9)}{0,80 \cdot 1,50 \cdot \sqrt{3}} = 237,4 \cdot 10^3 \text{Н} = 237,4\text{кН}$$

Расчетная несущая способность сварного шва при изгибе:

$$M_{wfb.\text{Rd}} = F_{wfb.\text{Rd}} (h_b - t_{fb})$$

$$M_{wfb.\text{Rd}} = 237,4 \cdot 10^3 \cdot (220 - 9,2) = 50,0 \cdot 10^6 \text{Нмм} = 50,0\text{кНм}$$

Проверка условия прочности:

$$M_{wfb.Rd} = 50,0 \text{ кНм} > M_{j.Rd} = 38,8 \text{ кНм}$$

Расчетная несущая способность болтового соединения на сдвиг:

$$F_{v.Rd} = \frac{0,6 f_{ub} A_b}{\gamma_{Mb}} = \frac{0,6 \cdot 800 \cdot 201}{1,45} = 66,5 \cdot 10^3 \text{ Н} = 66,5 \text{ кН}$$

Расчетная несущая способность болтового соединения на сдвиг:

$$\alpha = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{p_1}{3d_0} - \frac{1}{4} \\ \frac{f_{ub}}{f_u} \\ 1,00 \end{array} \right\} = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{140}{3 \cdot 17} - \frac{1}{4} \\ \frac{800}{360} \\ 1,00 \end{array} \right\} = \min \left\{ \begin{array}{l} 2,50 \\ 2,22 \\ 1,00 \end{array} \right\} = 1,00$$

$$F_{b.Rd} = \frac{2,5 \alpha f_u d t}{\gamma_{Mb}} = \frac{2,5 \cdot 1,0 \cdot 360 \cdot 16 \cdot 12}{1,45} = 119,2 \cdot 10^3 \text{ Н} = 119,2 \text{ кН}$$

$$F_{wbw.Rd} = \frac{a_{we} L_{we} f_u}{\beta_w \gamma_{Mw} \sqrt{3}} = \frac{4 \cdot 2 \cdot (220 - 2 \cdot 9,2) \cdot 360}{0,801,50 \cdot \sqrt{3}} = 279,3 \cdot 10^3 \text{ Н} = 279,3 \text{ кН}$$

$$F_{b3.Rd} = \min \left\{ \begin{array}{l} 2 F_{v.Rd} \\ 2 F_{b.Rd} \\ F_{wbw.Rd} \end{array} \right\} = \min \left\{ \begin{array}{l} 2 \cdot 66,6 \\ 2 \cdot 119,2 \\ 279,3 \end{array} \right\} = 2 \cdot 66,6 = 133,2 \text{ кН}$$

Определение коэффициентов:

$$k_4^1 = \frac{0,85 L_{eff} t_{fc}^3}{m^3} = \frac{0,85 \cdot 166,8 \cdot 12^3}{26,9^3} = 12,586 \text{ мм}$$

$$k_{10} = 1,6 \frac{A_s}{L_b} = 1,6 \cdot \frac{157}{12 + 12 + 2 \cdot 6} = 6,978 \text{ мм}$$

$$k_5^1 = \frac{0,85 L_{eff} t_p^3}{m^3} = \frac{0,85 \cdot 70 \cdot 12^3}{29,3^3} = 4,088 \text{ мм}$$

$$k_{eff1} = \frac{1}{\frac{1}{k_4^1} + \frac{1}{k_{10}} + \frac{1}{k_5^2}} = \frac{1}{\frac{1}{12,586} + \frac{1}{6,978} + \frac{1}{4,088}} = 2,140 \text{ мм}$$

$$k_4^2 = \frac{0,85 L_{eff} t_{fc}^3}{m^3} = \frac{0,85 \cdot 164,2 \cdot 12^3}{26,9^3}$$

$$k_5^2 = \frac{0,85 L_{eff} t_p^3}{m^3} = \frac{0,85 \cdot 181,3 \cdot 12^3}{32,5^3} = 7,757 \text{ мм}$$

$$k_{eff2} = \frac{1}{\frac{1}{k_4^2} + \frac{1}{k_{10}} + \frac{1}{k_5^2}} = \frac{1}{\frac{1}{12,390} + \frac{1}{6,978} + \frac{1}{7,757}}$$

Определения расстояния z

$$z = \frac{\sum_i k_{eff} z_i^2}{\sum_i k_{eff,i} z_i} = \frac{2,140 \cdot 250,4^2 + 2,833 \cdot 180,4^2}{2,140 \cdot 250,4 + 2,833 \cdot 180,4} = 216,2 \text{ мм}$$

$$k_{eq} = \frac{\sum_i k_{eff,i} z_i}{z} = \frac{2,140 \cdot 250,4 + 2,833 \cdot 180,4}{216,2} = 4,842 \text{ мм}$$

Начальная жесткость:

$$S_{j.ini} = \frac{E z_2}{\sum \frac{1}{k}} = \frac{210000 \cdot 216,2^2}{\frac{1}{4,842}} = 47,529 \cdot 10^9 \text{ Нмм/рад} = 47529 \text{ кНм / рад}$$

Определение параметра:

$$\mu = \left(1,5 \frac{M_{Sd}}{M_{Rd}} \right)^\psi = \left(1,5 \cdot \frac{38,8}{38,8} \right)^{2,2} = 2,988$$

Жёсткость:

$$S_j = \frac{S_{j.ini}}{\mu} = \frac{47,529 \cdot 10^9}{2,988} = 15,907 \cdot 10^9 \text{ Нмм/рад} = 15907 \text{ кНм / рад}$$

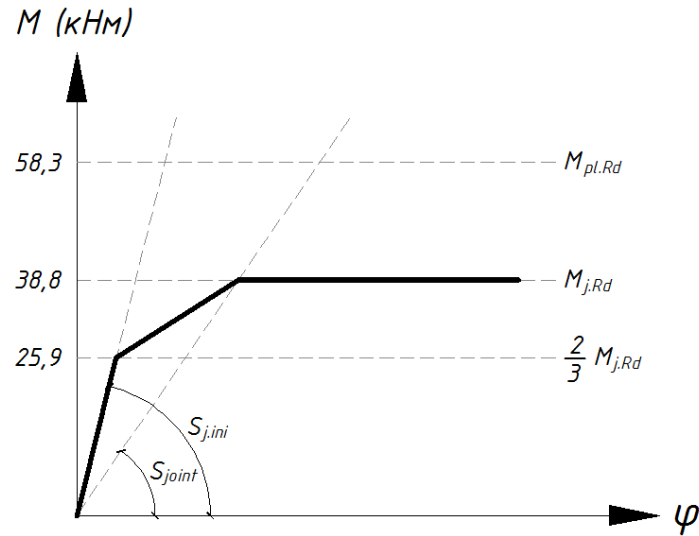


Рисунок 6

Расчетная несущая способность балки в пластической стадии работы:

$$M_{pl.Rd} = \frac{W_{pl} f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{285,4 \cdot 10^3 \cdot 235}{1,15} = 58,3 \cdot 10^6 \text{ Нмм} = 58,3 \text{ кНм}$$

Длина балки, больше которой балка работает как жестко защемленная:

$$L_b = \frac{8EI_b}{S_{j.ini}} = \frac{8 \cdot 210000 \cdot 27,7 \cdot 10^6}{47,529 \cdot 10^9} = 979 \text{ мм}$$

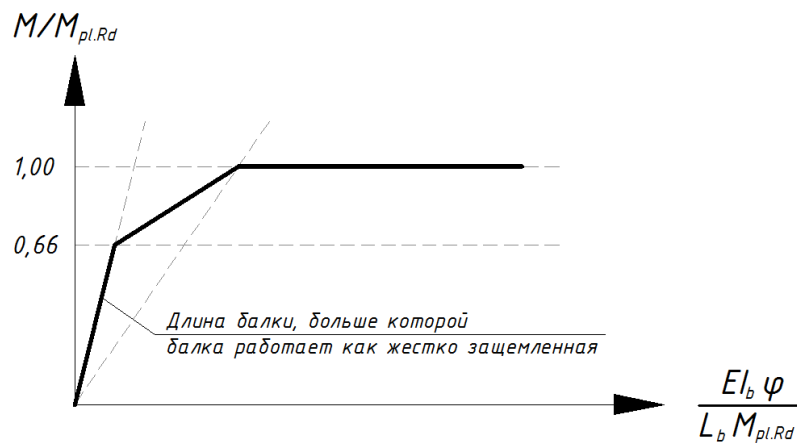


Рисунок 7

6 УЗЛЫ СОПРЯЖЕНИЯ КОНСТРУКТИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ ДВУТАВРОВ

6.1 Общие положения

6.1.1 Основные положения

6.1.1.1 В настоящем разделе содержатся методы расчета для определения конструктивных свойств узлов рам любого типа. При применении этих методов узлы следует моделировать как совокупность основных компонентов, см. 1.4(1).

6.1.1.2 Основные компоненты узла, используемые в настоящем пособии, представлены в Таблице 6.1, и их свойства следует определять согласно положениям настоящего пособия. Другие разновидности основных компонентов могут быть использованы при условии, что их свойства базируются на результатах испытаний или на данных расчетов аналитическими численными методами, подтвержденных испытаниями, с помощью которых можно провести непосредственное определение несущей способности или эксплуатационной пригодности несущих конструкций или их элементов для определенных условий нагрузок, такие испытания могут, например, проводиться для пожарной нагрузки, нагрузок, приводящих к явлениям усталости, или нагрузок от ударов или же испытания по уменьшению погрешностей определенных величин моделей сопротивления, например, испытания элементов конструкции или испытания групп элементов конструкции (например, конструкции кровель и перекрытий).

ПРИМЕЧАНИЕ Методы расчета, применяемые для основных элементов узлов, приведенные в настоящем техническом пособии, являются методами общего применения и могут использоваться также для подобных элементов в других конфигурациях узлов. Однако, конкретные расчетные методы определения несущей способности на изгиб, поворотной жесткости и поворотной способности узлов базируются на распределении внутренних усилий для конфигураций узлов, представленных на Рисунке 1.2. Для других конфигураций узлов расчетные методы определения несущей способности на изгиб, поворотной жесткости и поворотной способности должны основываться на соответствующих предположениях о распределении внутренних усилий.

6.1.2 Конструктивные свойства

6.1.2.1 Расчетная зависимость «изгибающий момент – угол поворота»

6.1.2.1.1 Узел может быть представлен в виде стальной пружины в точке пересечения осей соединяемых элементов, как показано на Рисунках 6.2 а) и б) для односторонней конфигурации сопряжения балки с колонной. Свойства этого сопряжения могут быть выражены в форме расчетной зависимости «изгибающий момент – угол поворота», которая описывает связь между изгибающим моментом $M_{j,Ed}$, приложенным в узле, и соответствующим углом поворота ϕ_{Ed} между соединяемыми элементами. В общем случае расчетная зависимость «изгибающий момент – угол поворота» является нелинейной, как показано на Рисунке 6.2 с).

6.1.2.1.2 Расчетная зависимость между изгибающим моментом и углом поворота, см. Рисунок 6.2 с), определяет следующие три основных конструктивных свойства:

- несущую способность на изгиб;
- вращательную жесткость;
- вращательную способность.

ПРИМЕЧАНИЕ В некоторых случаях, при действительной работе соединения, под воздействием изгибающего момента имеет место определенный поворот, являющийся следствием взаимного сдвига элементов в болтовых соединениях, а в случае баз колонн взаимодействия фундамента с основанием. Эти факторы могут привести к значительному начальному повороту, который следует учитывать в расчетной зависимости «изгибающий момент – угол поворота».

6.1.2.1.3 Расчетная зависимость «изгибающий момент – угол поворота» сопряжения балки с колонной должна соответствовать предпосылкам, принятым при статическом расчете конструкции в целом и при расчете отдельных элементов, которые базируются на расчетных моделях строительных конструкций, соответствующих рассматриваемому предельному состоянию. Расчетная модель и основные допущения при расчетах должны отражать работу конструкции в соответствующем предельном состоянии с соответствующей точностью и отражать предполагаемый тип поперечных сечений, элементов, соединений и опор, а также метод, используемый при расчете, должен быть совместим с расчетными предпосылками.

6.1.2.1.4 При моделировании конструкций и их статическом расчете необходимо учесть следующие требования:

а) Анализ должен базироваться на расчетных моделях строительных конструкций, которые соответствуют рассматриваемому предельному состоянию;

б) Расчетная модель и основные допущения при расчетах должны отражать работу конструкции в соответствующем предельном состоянии с соответствующей точностью и отражать предполагаемый тип поперечных сечений, элементов, соединений и опор;

в) Метод, используемый при расчете, должен быть совместим с расчетными предпосылками;

д) Упругий статический расчет базируется на предпосылке, что зависимость «напряжения-деформации» носит линейный характер независимо от уровня напряжений;

е) Внутренние силы и моменты могут быть определены при упругом статическом расчете, даже если несущая способность поперечного сечения основана на его несущей способности в пластической стадии;

ж) Упругий статический расчет может также использоваться для поперечных сечений, несущая способность которых ограничена потерей местной устойчивости;

з) Пластический статический расчет учитывает физическую нелинейность при определении усилий в конструктивной системе, поведение которой следует моделировать одним из следующих способов:

1) Упруго-пластический расчет системы с элементами, в сечении которых имеют место пластические деформации, и/или при наличии соединений, подобных пластическим шарнирам;

2) Нелинейный пластический расчет, учитывающий ограниченное развитие пластических деформаций в элементах;

3) Жестко-пластический расчет, пренебрегающий упругими деформациями между пластическими шарнирами.

и) Пластический статический расчет следует использовать там, где элементы имеют достаточную вращательную способность, чтобы обеспечить перераспределение изгибающих моментов;

к) Пластический статический расчет следует использовать только там, где может быть гарантирована устойчивость элементов в пластических шарнирах;

л) Билинейная зависимость «напряжения-деформации» показанная на Рисунке 6.1, может применяться для марок конструкционной стали качестве альтернативы, согласно СН РК EN 1993-1-5, может быть принята более точная зависимость;

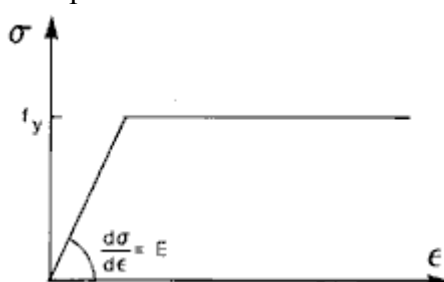


Рисунок 6.1—Билинейная зависимость «напряжения-деформации»

м) Жестко-пластический расчет может быть применен, если не рассматриваются никакие эффекты деформированной геометрии (например, эффекты второго рода). В этом случае узлы сопряжений классифицируются только по прочности согласно СН РК EN 1993-1-8;

н) Эффекты деформированной геометрии конструкции и общую устойчивость каркаса следует проверять согласно принципам, изложенным в СН РК EN 1993-1-1, при этом максимальное значение несущей способности рамы со значительно деформированной геометрией может быть достигнуто прежде, чем будут сформированы все пластические шарниры и кинематически изменяемая система (механизм) с одной лишней степенью свободы.

6.1.2.1.5 Для упрощения статического расчета, можно допустить, что расчетная зависимость «изгибающий момент – угол поворота» узлов и баз колонн двутаврового сечения, полученная из 6.3.1(4), удовлетворяет требованиям 5.1.1(4).

6.1.2.2 Несущая способность узла на изгиб

Расчетное значение изгибающего момента $M_{j,Rd}$, равное максимальному значению момента расчетной зависимости «изгибающий момент – угол поворота», см. Рисунок 6.2 в), следует принимать по 6.1.3(4).

6.1.2.3 Вращательная жесткость

Вращательную жесткость S_j , являющуюся секущей жесткостью, как показано на

Рисунке 6.2 в), следует принимать по указаниям 6.3.1(4). Для расчетной зависимости «изгибающий момент – угол поворота» определение S_j производится вплоть до угла поворота ϕ_{Xd} , при котором значение $M_{j,Ed}$ впервые достигает значения $M_{j,Rd}$, но не при больших значениях угла, см. Рисунок 6.2 в). Начальную вращательную жесткость $S_{j,ini}$, наклон упругой области расчетной кривой зависимости «изгибающий момент – угол поворота» следует принимать по 6.1.3(4).

6.1.2.4 Вращательная способность

Расчетную вращательную способность ϕ_{Cd} узла, равную максимальному значению угла поворота в расчетной зависимости «изгибающий момент – угол поворота», см. Рисунок 6.2 в), следует принимать по указаниям 6.1.3(4).

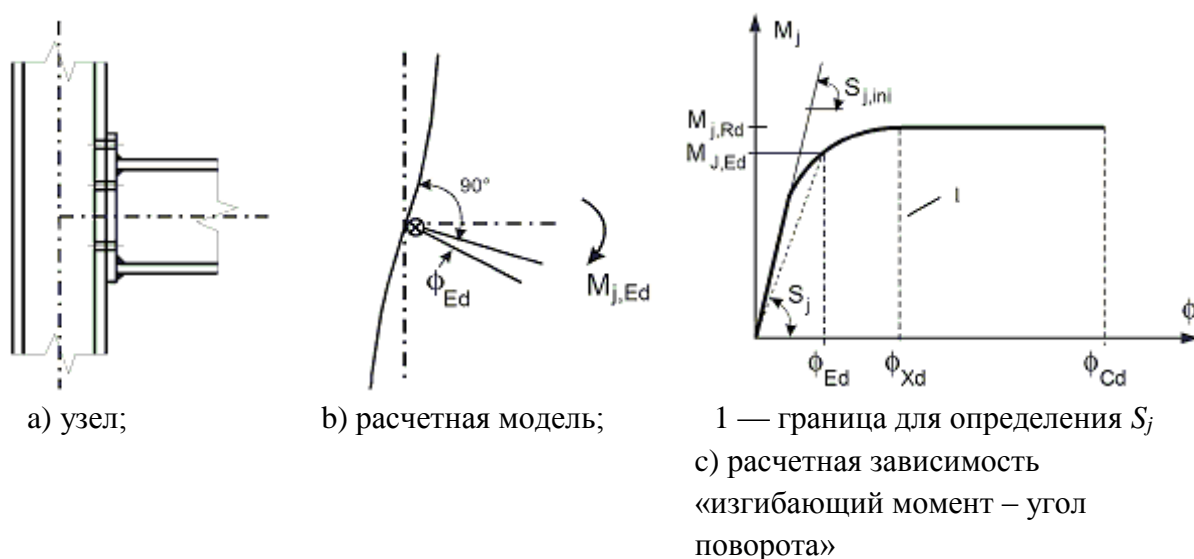


Рисунок 6.1 — Расчетная зависимость «изгибающий момент – угол поворота» узла

6.1.3 Основные компоненты узла

6.1.3.1 Расчетная зависимость «изгибающий момент – угол поворота» узла является функцией свойств его основных компонентов, см. 6.1.3(2).

6.1.3.2 Основные компоненты узлов должны соответствовать приведенным в Таблице 6.2 со ссылками на правила оценки их конструктивных свойств.

6.1.3.3 Некоторые компоненты узлов могут быть усилены. Сведения о различных методах усиления изложены в 6.2.4.3 и 6.2.6.

6.1.3.4 Зависимости между конструктивными свойствами узла и конструктивными свойствами основных компонентов должны соответствовать приведенным в следующих пунктах:

- для несущей способности на изгиб — в 6.2.7 и 6.2.8;
- для вращательной жесткости — в 6.3.1;
- для вращательной способности — в 6.4.

Таблица 6.1 — Основные компоненты узлов

Компонент		Ссылка на правила применения		
		Несущая способность	Коэффициент жесткости	Вращательная способность
1 Участок стенки колонны при сдвиге		6.2.6.1	6.3.2	6.4.2 и 6.4.3
2 Стенка колонны при поперечном сжатии		6.2.6.2	6.3.2	6.4.2 и 6.4.3
3 Стенка колонны при поперечном растяжении		6.2.6.3	6.3.2	6.4.2 и 6.4.3
4 Полка колонны при изгибе		6.2.6.4	6.3.2	6.4.2 и 6.4.3
5 Фланец при изгибе		6.2.6.5	6.2.6.5	6.4.2
6 Поясная накладка при изгибе		6.2.6.6	6.3.2	6.4.2

Таблица 6.1 — Основные компоненты узлов
(продолжение)

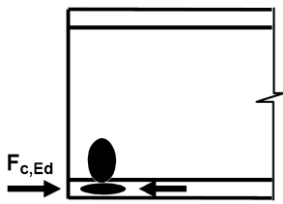
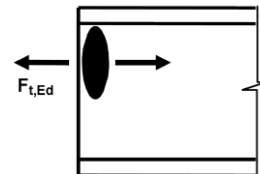
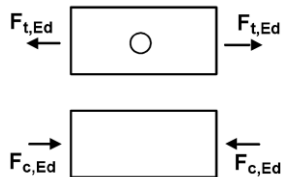
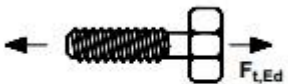
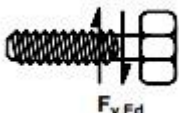
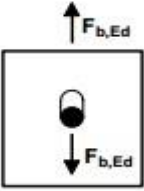
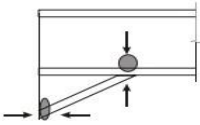
Компонент		Ссылка на правила применения		
		Несущая способность	Коэффициент жесткости	Вращательная способность
7 Полка и стенка балки или колонны при сжатии		6.2.6.7	6.3.2	*
8 Стенка балки при растяжении		6.2.6.8	6.3.2	*
9 Пластина при растяжении или сжатии		EN 1993-1-1	6.3.2	*
10 Болты при растяжении		В соединениях: с полкой колонны — 6.2.6.4; с торцевой пластиной — 6.2.6.5; с поясной накладкой — 6.2.6.6	6.3.2	6.4.7
11 Болты при срезе		3.6	6.3.2	6.4.2

Таблица 6.1 — Основные компоненты узлов
(продолжение)

Компонент		Ссылка на правила применения		
		Несущая способность	Коэффициент жесткости	Вращательная способность
12 Болты при смятии полок балки, полки колонны, фланца или поясной накладки		3.6	6.3.2	*
13 Бетон при сжатии, включая раствор		6.2.6.9	6.3.2	*
14 Опорная плита при сжатии с изгибом		6.2.6.10	6.3.2	*
15 Опорная плита при растяжении с изгибом		6.2.6.11	6.3.2	*
16 Фундаментные болты при растяжении		6.2.6.12	6.3.2	*
17 Фундаментные болты при срезе		6.2.2	*	*
18 Фундаментные болты при смятии		6.2.2	*	*
19 Сварные швы		4	6.3.2	*
20 Балка с вугами		6.2.6.7	6.3.2	*
* Информация отсутствует.				

6.2 Расчетная несущая способность

6.2.1 Внутренние усилия

6.2.1.1 Напряжения в элементах от внутренних сил и моментов допускается считать не оказывающими влияния на расчетную несущую способность основных компонентов узла, за исключением случаев, приведенных в 6.2.1(2) и 6.2.1(3).

6.2.1.2 При определении расчетной несущей способности стенки колонны при сжатии следует учитывать продольное напряжение в колонне, см. 6.2.6.2(2).

6.2.1.3 Сдвиг на участке стенки колонны следует учитывать при определении расчетной несущей способности следующих основных компонентов:

- стенки колонны при поперечном сжатии, см. 6.2.6.2;
- стенки колонны при поперечном растяжении, см. 6.2.6.3.

6.2.2 Поперечные силы

6.2.2.1 В сварных соединениях, а также в болтовых соединениях с фланцами сварные швы, прикрепляющие стенку балки, следует рассчитывать на поперечную силу в балке, т. е. без учета сварных швов, прикрепляющих полки балки.

6.2.2.2 В болтовых соединениях с фланцами расчетную несущую способность каждого ряда болтов при совместном действии среза и растяжения следует проверять по условию, приведенному в Таблице 3.4, учитывая суммарное растягивающее усилие в болте, включая все усилия, возникающие от отрыва фланца.

ПРИМЕЧАНИЕ В качестве упрощения можно допустить, что болты, работающие на растяжение, полностью сохраняют свою несущую способность на растяжение, если расчетная поперечная сила не превышает суммы, следующих двух значений:

- а) суммарной несущей способности болтов на срез, которые не используются для передачи растягивающих усилий;
- б) суммарной несущей способности болтов на срез, умноженной на (0,4/1,4), которые используются также и для передачи растягивающих усилий.

6.2.2.3 В болтовых соединениях с уголковыми поясными накладками (см. Рисунок 6.14) можно допустить, что накладка, прикрепляющая сжатую полку балки, передает поперечную силу балки на колонну, при выполнении следующих условий:

- зазор g между торцом балки и поверхностью колонны не превышает толщину уголковой накладки t_a ;
- действующее усилие не превышает расчетной несущей способности на срез болтов, прикрепляющих накладку к колонне;
- стенка балки должна быть проверена на несущую способность при возможности местной потере устойчивости под воздействием локальной нагрузки, которая должна выполняться по нижеприведенной формуле:

$$\eta_2 = \frac{F_{Ed}}{\frac{f_{yw} L_{eff} t_w}{\gamma_{M1}}} \leq 1,0,$$

где F_{Ed} — расчетное значение локальной нагрузки;
 L_{eff} — эффективная длина при определении несущей способности стенки по локальным нагрузкам в соответствии с 6.2(1);
 t_w — толщина листа.

6.2.2.4 Расчетную несущую способность узла на сдвиг можно определить, исходя из распределения внутренних усилий в нем и расчетной несущей способности его основных компонентов на действие этих усилий, см. Таблицу 6.1.

6.2.2.5 Для опорных плит баз колонн, в которых не предусмотрены специальные элементы для восприятия усилий сдвига, такие как жесткие или стержневые анкеры, следует показать, что расчетная несущая способность поверхности трения между плитой и стяжкой фундамента, см. 6.2.2(6), или, в случае болтовых отверстий с нормальным зазором, расчетная несущая способность фундаментных болтов на срез, см. 6.2.2(7), достаточны для восприятия расчетной поперечной силы. Расчетную прочность бетона на смятие жесткими или стержневыми анкерами следует проверять согласно СН РК EN 1992.

6.2.2.6 Расчетную несущую способность на сдвиг поверхности трения между опорной плитой и стяжкой фундамента следует определять по формуле:

$$F_{f,Rd} = C_{f,d} N_{c,Ed}, \quad (6.1)$$

где $C_{f,d}$ — коэффициент трения между опорной плитой и слоем стяжки. Можно использовать следующие значения:

- для стяжки из цементно-песчаного раствора $C_{f,d} = 0,20$;
 - для других типов стяжки коэффициент трения $C_{f,d}$ следует определять по результатам испытаний по установлению показателей строительных материалов при определенных испытательных условиях, например, исследования грунта на строительной площадке или в лаборатории или испытания с новыми строительными материалами;
- $N_{c,Ed}$ — расчетное значение осевой сжимающей силы в колонне.

ПРИМЕЧАНИЕ При загрузении колонны осевой растягивающей силой $F_{f,Rd} = 0$.

6.2.2.7 Расчетную несущую способность фундаментного болта базы колонны на сдвиг $F_{vb,Rd}$ следует принимать равной наименьшей из $F_{1,vb,Rd}$ и $F_{2,vb,Rd}$.

$f_{1vb,Rd}$ — расчетная несущая способность фундаментного болта на срез, см. 3.6.1;

$$F_{2,vb,Rd} = \frac{\alpha_b f_{ub} A_s}{\gamma_{M2}}, \quad (6.2)$$

где $\alpha_b = 0,44 - 0,0003 f_{yb}$;

f_{yb} — предел текучести стали фундаментного болта, где $235 \text{ Н/мм}^2 \leq f_{yb} \leq 640 \text{ Н/мм}^2$.

6.2.2.8 Расчетную несущую способность базы колонны на сдвиг следует определять по формуле:

$$F_{v,Rd} = F_{f,Rd} + n F_{vb,Rd}, \quad (6.3)$$

где n — количество фундаментных болтов в опорной плите.

6.2.2.9 Бетон и арматуру фундамента, а также крепежные устройства следует проектировать с учётом местных и общих эффектов от крепежных устройств.

ПРИМЕЧАНИЕ Требования по проектированию крепежных устройств приведены в технических условиях «Проектирование крепежных устройств для использования в бетоне» (на стадии разработки). В данных технических условиях рассматривается проектирование следующих типов крепежных устройств:

- заделанные в бетон крепежные устройства, такие как, например:
анкерные стержни с головкой;
швеллеры;
- крепежные устройства, установленные после изготовления элемента, такие как, например:
- распорные анкеры;
- анкеры с уширениями на конце;
- винтовые болты;
- зачеканенные прямые анкеры;
- зачеканенные распорные анкеры;
- зачеканенные анкеры с уширениями на конце.

6.2.3 Изгибающие моменты

6.2.3.1 Расчетную несущую способность на изгиб любого узла можно определить, исходя из распределения внутренних усилий в нем и расчетных несущих способностей его основных компонентов на действие этих усилий, см. Таблицу 6.1.

6.2.3.2 Расчетное значение изгибающего момента $M_{j,Rd}$, воспринимаемого сопряжением балки с колонной или стыком балок можно определить по методу, приведенному в 6.2.7, при условии, что осевая сила N_{Ed} в присоединенном элементе не превышает 5 % расчетной несущей способности $N_{pl,Rd}$ его поперечного сечения.

6.2.3.3 Расчетное значение изгибающего момента $M_{j,Rd}$, воспринимаемое базой колонны, можно определить по методу, приведенному в 6.2.8.

6.2.3.4 Во всех узлах размеры сварных швов должны быть такими, чтобы расчетное значение изгибающего момента $M_{j,Rd}$, воспринимаемого узлом, всегда было ограничено расчетной несущей способностью его основных компонентов, а не сварных швов.

6.2.3.5 В сопряжении балки с колонной или в стыке балок, в которых требуется образование пластического шарнира и поворот узла при любой соответствующей расчетной ситуации, сварные швы следует проектировать таким образом, чтобы воспринимать момент, равный, по крайней мере, наименьшей из следующих величин:

а) расчетному значению изгибающего момента, воспринимаемого присоединяемым элементом в пластической стадии $M_{pl,Rd}$;

б) расчетному значению изгибающего момента $M_{j,Rd}$, умноженному на $\alpha = 1,4$ — коэффициент увеличения нагрузок для каркасов, в которых система связей удовлетворяет условию относительно поперечного смещения, приведенному в СН РК EN 1993-1-1, согласно которого, расчет по теории первого порядка может применяться для конструкции, если увеличением соответствующих внутренних сил или моментов или любым другим изменением работы конструкции, вызванными деформациями, можно пренебречь и это условие считается выполненным, если соблюдается следующий критерий:

$$\alpha_{cr} = \frac{F_{cr}}{F_{Ed}} \geq 10 \quad - \text{ для расчета в упругой стадии,}$$

$$\alpha_{cr} = \frac{F_{cr}}{F_{Ed}} \geq 15 \quad - \text{ для расчета в пластической стадии,}$$

где α_{cr} — коэффициент увеличения расчетной нагрузки, при котором будет достигнуто неустойчивое состояние в упругой стадии при статическом расчете;

F_{Ed} — расчетная нагрузка на конструкцию;

F_{cr} — критическая нагрузка при потере общей устойчивости в упругой стадии, определенная на основе начальных упругих жесткостей.

ПРИМЕЧАНИЕ При пластическом расчете в критерии Формулы (5.1) приведено более высокое значение предела для α_{cr} , так как на работу конструкции могут оказывать значительное влияние нелинейные свойства материалов в критическом предельном состоянии (например, при формировании пластических шарниров в раме с перераспределением моментов или при возникновении значительных нелинейных деформаций от полужестких соединений). Для определенных типов рам в Национальном Приложении может быть приведен более низкий предел для α_{cr} при соответствующем обосновании.

$\alpha = 1,7$ — во всех остальных случаях.

6.2.3.6 В болтовом соединении с более чем одним рядом болтов, работающих на растяжение, в качестве упрощения можно пренебречь работой любого ряда болтов при условии, что работой всех других рядов болтов, расположенных ближе к центру сжатия, также пренебрегают.

6.2.4 Эквивалентный Т-образный элемент, работающий на растяжение

6.2.4.1 Общие положения

6.2.4.1.1 В болтовых соединениях эквивалентный Т-образный элемент, работающий на растяжение, можно использовать для моделирования при определении расчетной несущей способности следующих основных компонентов:

- а) изгибаемая полка колонны;
- б) изгибаемый фланец;
- в) изгибаемая уголкового накладке;
- г) изгибаемая опорная плита базы колонны от действия растягивающего усилия.

6.2.4.1.2 Методы моделирования таких основных элементов как полки эквивалентных Т-образных элементов, а также значения e_{min} , l_{eff} и m приведены в 6.2.6.

6.2.4.1.3 Можно допустить, что возможные виды отказа полки эквивалентного Т-образного элемента подобны предполагаемым для соответствующего основного компонента.

6.2.4.1.4 Суммарная эффективная длина $\sum l_{eff}$ эквивалентного Т-образного элемента, см. Рисунок 6.2, должна быть такой, чтобы расчетная несущая способность его полки была эквивалентна расчетной несущей способности основного элемента узла, который ее заменяет

ПРИМЕЧАНИЕ Суммарная эффективная длина Σl_{eff} эквивалентного Т-образного элемента является номинальной и не обязательно соответствует фактической длине основного элемента узла.

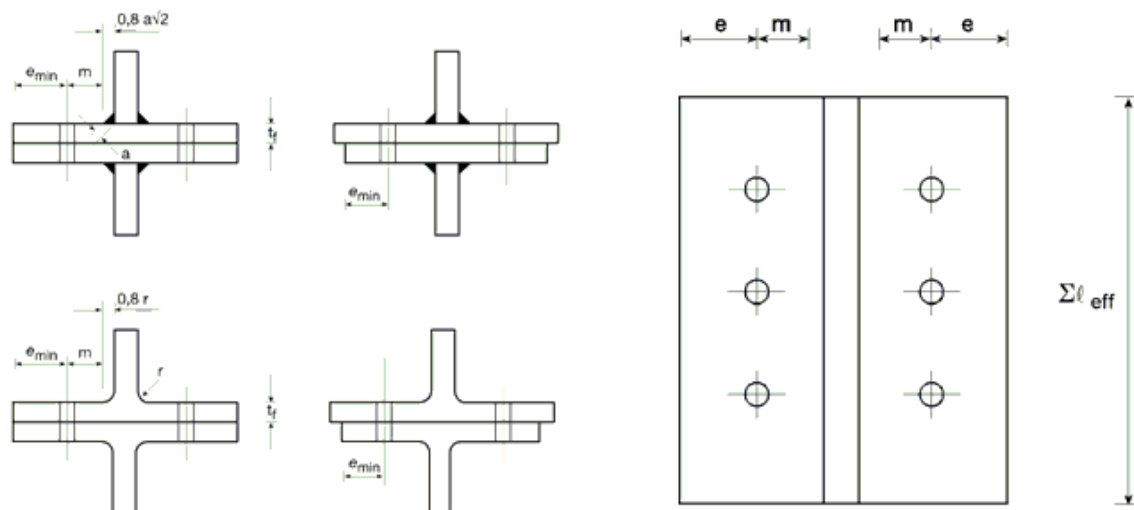


Рисунок 6.2 — Размеры полки эквивалентного Т-образного элемента

6.2.4.1.5 Расчетную несущую способность полки Т-образного элемента на растяжение следует определять согласно Таблице 6.2.

ПРИМЕЧАНИЕ Эффект рычага учтен в скрытом виде при определении расчетной несущей способности на растяжение согласно Таблице 6.2.

6.2.4.1.6 Если возможно появление эффекта рычага, см. Таблицу 6.2, то расчетную несущую способность полки при растяжении Т-образного элемента $F_{T,Rd}$ следует принимать равной наименьшей из трех возможных видов отказа (1, 2 или 3).

6.2.4.1.7 Если возникновение эффекта рычага исключено, то расчетную несущую способность полки при на растяжении Т-образного элемента $F_{T,Rd}$ следует принимать равной наименьшей из двух возможных видов отказа в соответствии с Таблицей 6.2.

Таблица 6.2 — Расчетная несущая способность $F_{T,Rd}$ полки эквивалентного Т-образного элемента

	Возможно появление эффекта рычага, т. е. $L_b \leq L_b^*$		Исключено появление эффекта рычага
Тип 1	Метод 1	Метод 2 (альтернативный)	$F_{T,1-2,Rd} = \frac{2M_{pl,1,Rd}}{m}$
Без опорных контрпланок	$F_{T,1,Rd} = \frac{4M_{pl,1,Rd}}{m}$	$F_{T,1,Rd} = \frac{(8n - 2e_w) \cdot M_{pl,1,Rd}}{2mn - e_w \cdot (m + n)}$	
С опорными контрплан- ками	$F_{T,1,Rd} = \frac{4M_{pl,1,Rd} + 2M_{bp,Rd}}{m}$	$F_{T,1,Rd} = \frac{(8n - 2e_w) \cdot M_{pl,1,Rd} + 4nM_{bp,Rd}}{2mn - e_w \cdot (m + n)}$	
Тип 2	$F_{T,2,Rd} = \frac{2M_{pl,2,Rd} + n \cdot \sum F_{t,Rd}}{m + n}$		
Тип	$F_{T,3,Rd} = \sum F_{t,Rd}$		

Тип 1: полное развитие пластических деформаций в полке.

Тип 2: разрыв болта с развитием пластических деформаций в полке.

Тип 3: разрыв болта.

L_b — удлинение болта длиной, равной общей толщине материала стягиваемых элементов, шайб плюс половине суммы высоты головки болта и гайки; или удлинение фундаментного болта, равное сумме восьми диаметров болта, толщины слоя стяжки, толщины опорной плиты, шайбы и половины высоты гайки;

$$L_b^* = \frac{8,8m^3 A_s n_b}{\sum \ell_{eff,1} t_f^3};$$

$F_{T,Rd}$ — расчетная несущая способность полки при растяжении Т-образного элемента

Q — сила, вызванная эффектом рычага;

$$M_{pl,1,Rd} = 0,25 \cdot \sum \ell_{eff} t_f^2 f_y / \gamma_{M0};$$

$$M_{pl,2,Rd} = 0,25 \cdot \sum \ell_{eff,2} t_f^2 f_y / \gamma_{M0};$$

$$M_{bp,Rd} = 0,25 \cdot \sum \ell_{eff,1} t_{bp}^2 f_{y,bp} / \gamma_{M0};$$

$$n = e_{min} \text{ при } n \leq 1,25m,$$

$F_{t,Rd}$ — расчетная несущая способность болта на растяжение, см. Таблицу 3.4;

$\sum f_{t,Rd}$ — суммарное значение $F_{t,Rd}$, для всех болтов в Т-образном элементе;

$\sum \ell_{eff,1}$ — значение $\sum \ell_{eff}$ для отказа 1-го типа;

$\sum \ell_{eff,2}$ — значение $\sum \ell_{eff}$ для отказа 2-го типа;

$e_{min} m$ и t_f определяются в соответствии с Рисунком 6.2;

$f_{y,bp}$ — предел текучести стали опорной плиты;

t_{bp} — толщина опорной плиты;

$$e_w = d_w / 4;$$

d_w — диаметр шайбы либо головки болта или гайки.

Таблица 6.2 — Расчетная несущая способность $F_{T,Rd}$ полки эквивалентного Т-образного элемента (продолжение)

ПРИМЕЧАНИЕ 1 В сопряжениях балки с колонной на болтах и в стыках балок можно допустить возможность появления эффекта рычага.

ПРИМЕЧАНИЕ 2 В методе 2 усилие от болта, приложенное к полке Т-образного элемента, принято в виде равномерно распределенной нагрузки под шайбой, головкой или гайкой болта, см. Рисунок, а не в виде сосредоточенной силы. Это допущение приводит к более высоким значениям несущей способности $F_{T1,Rd}$ по методу 1, но не влияет на значения F_{T1-2Rd} и значения рассчитанные по методам 2 и 3.

6.2.4.2 Отдельные ряды болтов, группы болтов и группы рядов болтов

6.2.4.2.1 Несмотря на то, что усилия в каждом ряду болтов на полке реального Т-образного элемента обычно равны, когда полка эквивалентного Т-образного элемента используется для моделирования основных компонентов, перечисленных в 6.2.4.1(1), следует учитывать различные значения усилий в каждом отдельном ряду болтов.

6.2.4.2.2 Если для моделирования рядов болтов используется метод эквивалентного Т-образного элемента, необходимо разделить группу болтов на отдельные ряды болтов и использовать эквивалентный Т-образный элемент для моделирования каждого отдельного ряда.

6.2.4.2.3 Если для моделирования рядов болтов используется метод эквивалентного Т-образного элемента, то должны выполняться следующие условия:

а) усилия в каждом ряду болтов не должны превышать расчетной несущей способности, определенной только для этого ряда, рассматривая его изолированно от других рядов;

б) суммарное усилие, действующее в каждой группе рядов болтов, состоящее из двух или более смежных рядов болтов, не должно превышать расчетной несущей способности этой группы рядов болтов.

6.2.4.2.4 При определении расчетной несущей способности на растяжение основного компонента, представленного полкой эквивалентного Т-образного элемента, следует вычислить следующие параметры:

а) расчетную несущую способность ряда болтов, рассматривая его изолированно от других рядов болтов;

б) вклад каждого ряда болтов в несущую способность двух или более смежных рядов группы болтов, определенный при рассмотрении только этих рядов болтов.

6.2.4.2.5 Для отдельного ряда болтов значение $\sum l_{eff}$ следует принимать равным эффективной длине l_{eff} , приведенной в табличной форме в 6.2.6, рассматривая этот ряд изолированно от других рядов болтов.

6.2.4.2.6 Для группы рядов болтов значение $\sum l_{eff}$ следует принимать равным сумме эффективных длин l_{eff} , приведенной в табличной форме в 6.2.6, для каждого соответствующего ряда болтов, рассматривая его как часть группы рядов болтов.

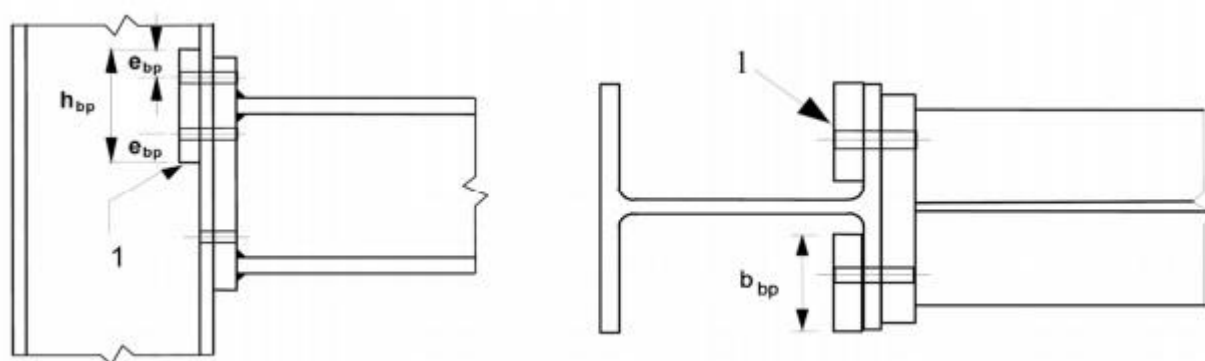
6.2.4.3 Контрпланки

6.2.4.3.1 Контрпланки можно использовать для усиления полки колонны при изгибе, как показано на Рисунке 6.3.

6.2.4.3.2 Каждую контрпланку следует доводить по крайней мере до кромки полки колонны и располагать на расстоянии в пределах 3 мм от закругления кромки полки или от сварного шва.

6.2.4.3.3 Контрпланку следует заводить за наиболее удаленные ряды болтов, работающие на растяжение, как показано на Рисунке 6.3.

6.2.4.3.4 При использовании контрпланок расчетную несущую способность Т-образного элемента $F_{T,Rd}$ следует определять по методу, приведенному в Таблице 6.2.



$$h_{bp} \geq \sum \ell_{eff}, \quad e_{bp} \geq 2d$$

1 — контрпланка

Рисунок 6.3 — Полка колонны с контрпланками

6.2.5 Эквивалентный Т-образный элемент, работающий на сжатие

6.2.5.1 В узлах сопряжения стальных и бетонных элементов можно использовать полку при сжатии эквивалентного Т-образного элемента в качестве модели при определении расчетной несущей способности комбинаций следующих основных компонентов:

- а) изгибаемой стальной опорной плиты под действием реактивного давления на фундамент;
- б) бетона и/или раствора при смятии.

6.2.5.2 Суммарная эффективная длина ℓ_{eff} и суммарная эффективная ширина b_{eff} эквивалентного Т-образного элемента должны быть такими, чтобы его расчетная несущая способность при сжатии была эквивалентна расчетной несущей способности основного компонента узла.

ПРИМЕЧАНИЕ Эффективная длина и эффективная ширина эквивалентного Т-образного элемента являются условными длинами и могут отличаться от реальных значений основного компонента узла.

6.2.5.3 Расчетную несущую способность полки при сжатии Т-образного эквивалентного элемента $F_{C,Rd}$ следует определять по формуле:

$$F_{C,Rd} = f_{jd} b_{eff} l_{eff}, \quad (6.4)$$

где b_{eff} — эффективная ширина полки Т-образного элемента, см. 6.2.5(5) и 6.2.5(6);
 l_{eff} — эффективная длина полки Т-образного элемента, см. 6.2.5(5) и 6.2.5(6);

f_{jd} — расчетное сопротивление смятию материала под опорной плитой, см. 6.2.5.7.

6.2.5.4 Усилия, передаваемые Т-образным элементом, следует принимать равномерно распределенными по эффективной площади, как показано на Рисунках 6.4 а) и б). При этом давление не должно превышать расчетного сопротивления смятию f_{jd} , а значение ширины c не должно превышать

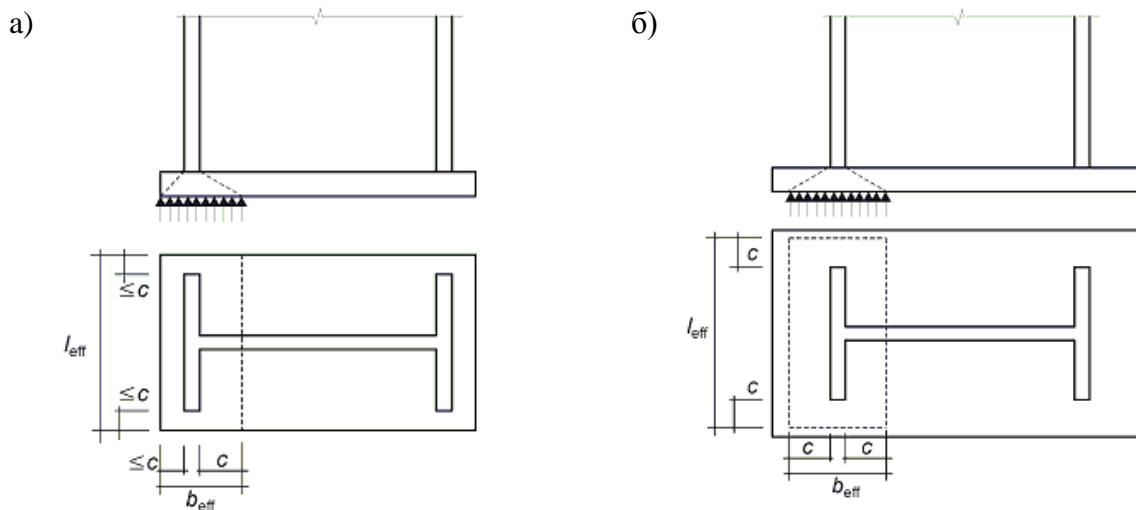
$$c = e[f_y / (3f_{jd}\gamma_{m0})]^{0,5}, \quad (6.5)$$

t — толщина полки Т-образного элемента;

f_y — предел текучести стали Т-образного элемента.

6.2.5.5 Если проекция реальной длины основного компонента, моделируемого Т-образным элементом, меньше c , то эффективную площадь следует принимать по Рисунку 6.4 а).

6.2.5.6 Если проекция реальной длины основного компонента, моделируемого Т-образным элементом, превышает c на любой из сторон, то в расчете учитываются участки площади шириной c , см. Рисунок 6.4 б).



а — эффективная площадь c больше реальных размеров;

б — эффективная площадь c меньше реальных размеров

Рисунок 6.4 — Эффективная площадь эквивалентного Т-образного элемента при сжатии:

6.2.5.7 Расчетное сопротивление смятию f_{jd} следует определять по формуле:

$$f_{jd} = \beta_j F_{Rdu} / (b_{eff} l_{eff}), \quad (6.6)$$

где β_j — коэффициент, учитывающий материал под опорной плитой, значение которого можно принять равным 2/3 при условии, что нормативное сопротивление

материала стяжки не превышает 0,2 нормативного сопротивления бетона фундамента, а ее толщина не более 0,2 наименьшей ширины стальной опорной плиты;

F_{Rdu} —расчетная несущая способность смятию при действии сосредоточенной силы, определяется как для частично нагруженных площадок, принимая площадь нагружения $A_{c0} = b_{eff}l_{eff}$ и необходимость учитывать местное раздробление (раздавливание) (см. ниже) и силы поперечного растяжения (см. 6.5); Для равномерного распределения нагрузки на площадь A_{c0} (см. Рисунок 6.29) сила сопротивления определяется по формуле:

$$F_{Rdu} = A_{c0} f_{cd} \cdot \sqrt{\frac{A_{c1}}{A_{c0}}} \leq 3,0 f_{cd} A_{c0},$$

где A_{c0} — площадь нагружения;

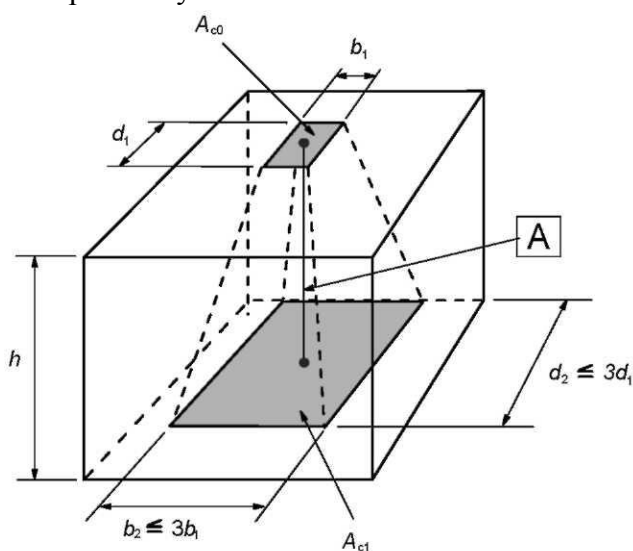
A_{c1} — максимальная расчетная площадь распределения с геометрическим подобием по отношению к A_{c0} и которая должна удовлетворять следующим условиям:

а) высота для распределения нагрузки в направлении нагрузки должна удовлетворять условиям на Рисунке 6.5;

б) центр тяжести площади распределения A_{c1} должен быть расположен на линии, проходящей через центр тяжести площади нагружения A_{c0} ;

в) если на поперечное сечение бетона действует несколько сжимающих сил, то расчетные площади распределения не должны взаимно накладываться.

Значение F_{Rdu} необходимо уменьшать, если нагрузка неравномерно распределена по площади A_{c0} или если поперечные усилия значительны



A – линия действия нагрузки

$h \geq (b_2 - b_1)$ и $h \geq (d_2 - d_1)$

Рисунок 6.5 - Расчетное распределение для частично нагруженных площадок

Арматура железобетонного основания должна обеспечивать восприятие растягивающей силы, возникающей из-за эффекта действия внешних воздействий.

6.2.6 Расчетная несущая способность основных компонентов

6.2.6.1 Участок стенки колонны, работающий на сдвиг

6.2.6.1.1 Методы расчета, приведенные в 6.2.6.1(2) – 6.2.6.1(14), применимы при гибкости стенки $d / t_w \leq 69\varepsilon$.

6.2.6.1.2 Для одностороннего или двустороннего сопряжения балок одинаковой высоты расчетную несущую способность на сдвиг в пластической стадии $V_{wp,Rd}$ неусиленной ребрами жесткости стенки колонны при действии расчетной поперечной силы $V_{wp,Ed}$, см. 5.3(3), следует определять по формуле:

$$V_{wp,Rd} = \frac{0,9f_{y,wc}A_{vc}}{\sqrt{3}M_0}, \quad (6.7)$$

где A_{vc} — площадь сдвига, которая должна определяться согласно требований СН РК EN 1993-1-1 и может быть вычислена 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);

η — устанавливается в Национальном Приложении и для сортов стали до S460 рекомендуется значение $\eta = 1,20$, а для более высоких сортов стали рекомендуется применять $\eta = 1,0$.

6.2.6.1.3 Расчетная несущая способность на сдвиг может быть повышена усилением стенки ребрами жесткости или постановкой накладок на стенку.

6.2.6.1.4 При наличии поперечных ребер жесткости как в сжатой, так и в растянутой зонах стенки, расчетную несущую способность на сдвиг в пластической стадии участка стенки колонны $V_{wp,Rd}$ можно повысить до значения $V_{wp,add,Rd}$, определяемого по формуле:

$$V_{wp,Rd} = \frac{4M_{pl,fc,Rd}}{d_c}, \text{ но } V_{wp,add,Rd} \leq \frac{2M_{pl,fc,Rd} + 2M_{pl,st,Rd}}{d_s}, \quad (6.8)$$

где

d_s — расстояние между осями ребер жесткости;

$M_{pl,fc,Rd}$ — расчетная несущая способность полки колонны на изгиб в пластической стадии;

$M_{pl,st,Rd}$ — расчетная несущая способность ребра жесткости на изгиб в пластической стадии.

ПРИМЕЧАНИЕ В сварных узловых соединениях кромку поперечных ребер жесткости следует выравнивать с кромкой соответствующей полки балки.

6.2.6.1.5 При наличии диагональных ребер жесткости расчетную несущую способность на сдвиг в пластической стадии стенки колонны следует определять по СН РК EN 1993-1-1 согласно которых, расчетное значение поперечной силы V_{Ed} в каждом поперечном сечении должно удовлетворять условию:

$$\frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} \leq 1,0,$$

где $V_{c,Rd}$ — расчетное значение несущей способности поперечного сечения на сдвиг. При расчете в пластической стадии $V_{c,Rd}$ принимается равным расчетному значению несущей способности поперечного сечения на сдвиг в пластической стадии $V_{pl,Rd}$; при упругом расчете $V_{c,Rd}$ принимается равным расчетному значению несущей способности на сдвиг в упругой стадии.

При отсутствии кручения расчетное значение несущей способности на сдвиг в пластической стадии равно

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v \cdot (f_y / \sqrt{3})}{\gamma_{M0}},$$

где A_v — площадь сдвига.

Для элементов подверженных кручению, т. е. при совместном действии поперечной силы и крутящего момента значение несущей способности на сдвиг в пластической

стадии с учетом влияния кручения $V_{pl,Rd}$ должно быть уменьшено до $V_{pl,T,Rd}$, и расчетное значение поперечной силы должно удовлетворять условию:

$$\frac{V_{Ed}}{V_{pl,T,Rd}} \leq 1,0$$

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

— для двутавров

$$V_{pl,T,Rd} = \sqrt{1 - \frac{\tau_{t,Ed}}{1,25 \cdot (f_y / \sqrt{3}) / \gamma_{M0}}} V_{pl,Rd}$$

— для швеллеров

$$V_{pl,T,Rd} = \left[\sqrt{1 - \frac{\tau_{t,Ed}}{1,25 \cdot (f_y / \sqrt{3}) / \gamma_{M0}}} - \frac{\tau_{w,Ed}}{(f_y / \sqrt{3}) / \gamma_{M0}} \right] V_{pl,Rd}$$

— для замкнутых сечений

$$V_{pl,T,Rd} = \left[1 - \frac{\tau_{t,Ed}}{(f_y / \sqrt{3}) / \gamma_{M0}} \right] V_{pl,Rd}.$$

6.2.6.1.6 При совместном действии поперечной силы и крутящего момента значение несущей способности на сдвиг в пластической стадии с учетом влияния кручения $V_{pl,Rd}$ должно быть уменьшено до $V_{pl,T,Rd}$, и расчетное значение поперечной силы должно удовлетворять условию

$$\frac{V_{Ed}}{V_{pl,T,Rd}} \leq 1,0.$$

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

— для двутавров

$$V_{pl,T,Rd} = \sqrt{1 - \frac{\tau_{t,Ed}}{1,25 \cdot (f_y / \sqrt{3}) / \gamma_{M0}}} V_{pl,Rd};$$

— для швеллеров

$$V_{pl,T,Rd} = \left[\sqrt{1 - \frac{\tau_{t,Ed}}{1,25 \cdot (f_y / \sqrt{3}) / \gamma_{M0}}} - \frac{\tau_{w,Ed}}{(f_y / \sqrt{3}) / \gamma_{M0}} \right] V_{pl,Rd};$$

— для замкнутых сечений

$$V_{pl,T,Rd} = \left[1 - \frac{\tau_{t,Ed}}{(f_y / \sqrt{3}) / \gamma_{M0}} \right] V_{pl,Rd}.$$

6.2.6.1.7 При совместное действие изгибающего момента, поперечной и осевой сил расчет проводится в соответствии требованиями приведенными в СН РК EN 1993-1-5 а именно:

- при условии, если $\bar{\eta}_3 \leq 0,5$, в расчете несущей способности изгибающий момент и осевая сила принимаются без изменений с учетом поперечной силы. Если $\bar{\eta}_3 > 0,5$ влияние совместного действия изгибающего момента и поперечной силы в стенке I-образных или коробчатых балок учитывается при выполнении следующего условия

$$\bar{\eta}_1 + \left(1 - \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}}\right) \cdot (2\bar{\eta}_3 - 1)^2 \leq 1,0 \quad \text{при } \bar{\eta}_1 \geq \frac{M_{f,Rd}}{M_{pl,Rd}},$$

где $M_{f,Rd}$ — расчетное значение несущей способности на изгиб в пластической стадии работы сечения, состоящего из эффективной площади поясов;

$M_{pl,Rd}$ — расчетное значение несущей способности на изгиб в пластической стадии работы поперечного сечения, состоящего из эффективной площади поясов и площади сечения стенки независимо от класса сечения:

$$\bar{\eta}_1 = \frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}}; \quad \bar{\eta}_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{bw,Rd}}$$

где $V_{bw,Rd} = \frac{\chi_w f_{yw} h_w t}{\sqrt{3} \gamma_{M1}}$ — составляющая несущей способности стенки.

6.2.6.1.8 Дополнительно должны быть выполнены требования согласно СН РК EN 1993-1-5.

Указанные условия должны учитываться для элементов конструкций при статическом расчете 2-го порядка, если это имеет место.

Вышеприведенные условия должны быть проверены для всех сечений, кроме мест приложения локальной нагрузки, расположенной на расстоянии менее чем $h_w/2$ от опоры с вертикальными элементами жесткости.

Расчетное значение несущей способности на изгиб $M_{f,Rd}$ в пластической стадии работы может быть принято по пределу текучести, по эффективной площади пояса с наименьшим значением отношения $A_f f_y / \gamma_{M0}$ и расстоянию между центрами тяжести поясов.

6.2.6.1.9 Если действует осевая сила N_{Ed} , то значения $M_{pl,Rd}$ и $M_{f,Rd}$ должны быть уменьшены в соответствии с требованиями СН РК EN 1993-1-1. Если осевая сила настолько велика, что вся стенка является сжатой, то осяса коробчатых балок должны быть проверены с принимая $M_{f,Rd}=0$, и τ_{Ed} принимается как среднее значение напряжения при сдвиге в поясе, которое должно быть не менее половины максимальных напряжений сдвига в поясе; в этом случае $\bar{\eta}_1$ вычисляется по формуле:

$$\eta_1 = \frac{N_{Ed}}{f_y A_{eff}} + \frac{M_{Ed} + N_{Ed} e_N}{f_y W_{eff}} \leq 1,0$$

$\gamma_{M0} \qquad \qquad \gamma_{M0}$

где A_{eff} — эффективная площадь поперечного сечения;
 e_N — смещение центра тяжести эффективной площади A_{eff} относительно нейтральной оси;
 M_{Ed} — расчетное значение действующего изгибающего момента;

N_{Ed} — расчетное значение действующей нормальной силы;

W_{eff} — упругий момент сопротивления эффективного сечения;

γ_{M0} — частный коэффициент безопасности.

6.2.6.1.10 Дополнительно отсеки должны быть проверены, используя среднее значение напряжения при сдвиге в отсеке и понижающий коэффициент χ_w с учетом потери устойчивости отсека, при наличии жестких продольных элементов жесткости

6.2.6.1.11 При совместное действие осевой силы с изгибающим моментом влияние действия осевой силы следует учитывать при изгибе в пластической стадии. Для поперечных сечений классов 1 и 2 должно выполняться следующее условие

$$M_{Ed} \leq M_{N,Rd}$$

где $M_{N,Rd}$ — расчетное значение несущей способности на изгиб в пластической стадии, уменьшенное вследствие действия осевой силы N_{Ed} .

Значение $M_{N,Rd}$ для прямоугольных сплошных сечений без отверстий следует принимать равным:

$$M_{N,Rd} = M_{pl,Rd} \cdot \left[1 - (N_{Ed}/N_{pl,Rd})^2 \right].$$

Для двутавровых сечений с двумя осями симметрии или других сечений с полками влияние осевой силы на несущую способность на изгиб относительно оси $y-y$ в пластической стадии учитывать не следует, если выполняются следующие условия

$$N_{Ed} \leq 0,25N_{pl,Rd} \quad N_{Ed} \leq \frac{0,5h_w t_w f_y}{\gamma_{M0}}.$$

Для двутавровых сечений с двумя осями симметрии влияние осевой силы на несущую способность на изгиб относительно оси $z-z$ в пластической стадии учитывать не следует, если выполняется следующее условие

$$N_{Ed} \leq \frac{h_w t_w f_y}{\gamma_{M0}}.$$

Для поперечных сечений, в расчете которых не учитываются отверстия, могут применяться следующие приближенные формулы для прокатных и сварных двутавров с равными полками:

$$M_{N,y,Rd} = M_{pl,y,Rd} \cdot (1-n)/(1-0,5a) \text{ — при } M_{N,y,Rd} \leq M_{pl,y,Rd}, \quad (6.36)$$

$$\text{при } n \leq a: \quad M_{N,z,Rd} \leq M_{pl,z,Rd}; \quad (6.37)$$

$$\text{при } n > a: \quad M_{N,z,Rd} \leq M_{pl,z,Rd} \cdot \left[1 - \left(\frac{n-a}{1-a} \right)^2 \right], \quad (6.38)$$

где $n = N_{Ed}/N_{pl,Rd}$;

$a = (A - 2bt_f)/A$, при $a \leq 0,5$.

При двухосном изгибе можно применять следующее условие:

$$\left[\frac{M_{y,Ed}}{M_{N,y,Rd}} \right]^\alpha + \left[\frac{M_{z,Ed}}{M_{N,z,Rd}} \right]^\beta \leq 1$$

где α и β — параметры, значения которых с запасом можно принимать равными единице, или:

- а) для двутавровых и Н-образных сечений: $\alpha = 2$; $\beta = 5n$ — при $\beta \geq 1$;
- б) для круглых полых сечений: $\alpha = 2$; $\beta = 2$;
- в) для прямоугольных полых сечений: $\alpha = \beta = \frac{1,66}{1-1,13n^2}$ — при $\alpha = \beta \leq 6$,

где $n = N_{Ed} / N_{pl,Rd}$.

6.2.6.1.12 При совместном действии изгибающего момента, поперечной и осевой сил и если расчетное значение усилия сдвига V_{Ed} не превышает 50 % от расчетного значения несущей способности на сдвиг в пластической стадии $V_{pl,Rd}$, то значение несущей способности, определенное по указаниям СН РК EN 1993-1-5, при совместном действии изгибающего момента и осевой силы, снижать не следует, кроме случаев, когда потеря местной устойчивости при сдвиге уменьшает несущую способность сечения, а именно:

а) панели пластин должны быть прямоугольными или непрямоугольные панели пластин, если для угла α_{limit} согласно Рисунку 6.6 справедливо условие $\alpha_{limit} \leq 10^\circ$. Если $\alpha_{limit} > 10^\circ$, то в качестве панели пластины допускается принимать условную прямоугольную панель с большим из двух размеров b_1 и b_2 пластины;

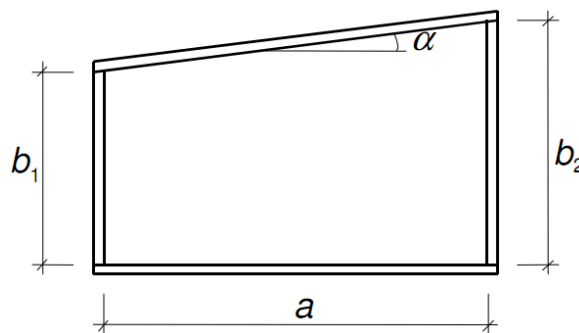


Рисунок 6.6 - Определение угла α

б) имеющиеся элементы жесткости проходят в продольном и/или поперечном направлении;

в) отверстия или вырезы небольшие т. е. диаметр неусиленных отверстий или вырезов не должен превышать $0,05b$, где b — ширина панели пластины;

г) элементы конструкции имеют постоянное поперечное сечение.

д) Для пластин без элементов жесткости с отношением $h_w / t > \frac{72}{\eta} \cdot \varepsilon$ и для пластин с элементами жесткости с отношением $h_w / t > \frac{31}{\eta} \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_\tau}$ должна производиться проверка несущей способности на срез и на опорах должны быть предусмотрены поперечные элементы жесткости, где $\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y [\text{Н/мм}^2]}}$.

6.2.6.1.13 Если V_{Ed} превышает 50 % от $V_{pl,Rd}$, то расчетное значение несущей

способности поперечного сечения при совместном действии момента и осевой силы следует определять по уменьшенному значению предела текучести согласно нижеприведенной формуле:

$$(1-\rho)f_y,$$

где $\rho = \left(\frac{2V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} - 1 \right)^2$, рекомендуется вместо уменьшения предела текучести может

быть уменьшена толщина листа в соответствующей части поперечного сечения.

ПРИМЕЧАНИЕ При двусторонней конфигурации сопряжения балки с колонной без диагональных ребер жесткости на стенке колонны предполагается, что обе балки имеют одинаковую высоту.

6.2.6.1.14 Если стенка колонны усилена накладкой, см. Рисунок 6.7, то площадь сдвига A_{vc} может быть увеличена на $b_s t_{wc}$. Если в дальнейшем устанавливается дополнительная накладка на противоположной стороне стенки, то площадь сдвига увеличивать не следует.

6.2.6.1.15 Постановку накладок на стенку можно также использовать для увеличения вращательной жесткости узла вследствие увеличения жесткости стенки колонны на сдвиг, сжатие или растяжение, см. 6.3.2(1).

6.2.6.1.16 Марка стали накладки стенки должна быть такой же, как и для колонны.

6.2.6.1.17 Ширина накладки на стенки b_s должна быть, по крайней мере, равной расстоянию между радиусами сопряжения полки со стенкой между сварными швами (см. Рисунок 6.7).

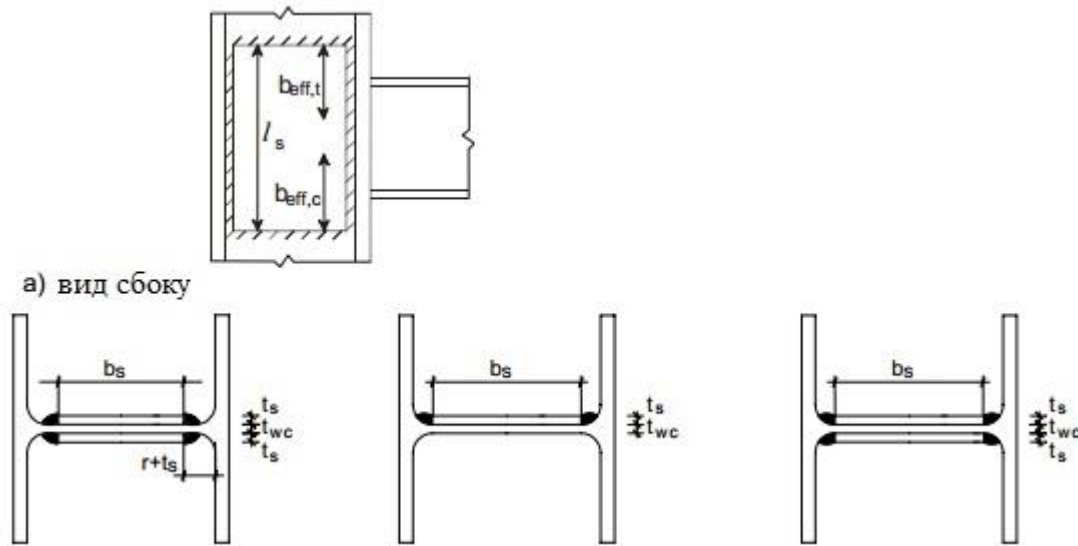
6.2.6.1.18 Длина l_s накладки стенки должна быть, по крайней мере, равной эффективной ширине стенки при растяжении и сжатии, см. Рисунок 6.7.

6.2.6.1.19 Толщина накладки t_s должна быть не менее толщины стенки колонны t_{wc} .

6.2.6.1.20 Сварные швы между накладкой стенки и профилем должны быть рассчитаны на действие расчетных усилий.

6.2.6.1.21 Ширина накладки стенки b_s не должна превышать $40\epsilon t_s$.

6.2.6.1.22 Сварка прерывистыми сварными швами допускается при эксплуатации конструкции в неагрессивной среде.



б) примеры поперечных сечений с продольными сварными швами

Рисунок 6.7 — Примеры расположения накладок стенки

ПРИМЕЧАНИЕ Следует учитывать свариваемость в зоне закругления.

6.2.6.2 Стенка колонны при поперечном сжатии

6.2.6.2.1 Расчетную несущую способность не усиленной ребрами жесткости стенки колонны на действие поперечного сжатия следует определять по формуле:

$$F_{c,wc,Rd} = \frac{\omega k_{wc} b_{eff,c,wc} t_{wc} f_{y,wc}}{\gamma_{M0}}, \text{ но } F_{c,wc,Rd} \leq \frac{\omega k_{wc} b_{eff,c,wc} t_{wc} f_{y,wc}}{\gamma_{M1}} \quad (6.9)$$

где

ω — понижающий коэффициент, учитывающий возможное влияние касательных напряжений в стенке колонны, принимаемый по Таблице 6.3;

$b_{eff,c,wc}$ — эффективная ширина стенки колонны при поперечном сжатии, принимаемая: в сварном соединении:

$$b_{eff,c,wc} = t_{fb} + 2 \cdot \sqrt{2a_b} + 5 \cdot (t_{fc} + s) \quad (6.10)$$

здесь

a_c , r_c и a_b — см. Рисунок 6.6;

в болтовом соединении с опорным фланцем:

$$b_{eff,c,wc} = t_{fb} + 2 \cdot \sqrt{2a_p} + 5 \cdot (t_{fc} + s) + s_p, \quad (6.11)$$

здесь

s_p — длина, полученная сечением под углом 45° толщины опорного фланца (принимаемая равной, по крайней мере, t_p , а если длина выступа фланца за полку достаточна, то до $2t_p$);

в болтовом соединении с поясными уголковыми накладками:

$$b_{eff,c,wc} = 2t_a + 0,6r_a + 5 \cdot (t_{fc} + s), \quad (6.12)$$

здесь

$s = r_c$ — для колонн из прокатного двутавра;

$s = \sqrt{2a_c}$ — для колонн из сварного двутавра;

ρ — понижающий коэффициент, учитывающий потерю местной устойчивости фланца:

$$\text{при } \tilde{\lambda}_p \leq 0,72 \quad \rho = 1,0; \quad (6.13a)$$

$$\text{при } \tilde{\lambda}_p > 0,72 \quad \rho = (\tilde{\lambda}_p - 0,2) / \tilde{\lambda}_p^2, \quad (6.13б)$$

здесь $\tilde{\lambda}_p$ — гибкость фланца:

$$\tilde{\lambda}_p = 0,932 \sqrt{\frac{b_{eff,c,wc} d_{wc} f_{y,wc}}{E t_{wc}^2}}, \quad (6.13в)$$

$d_{wc} = h_c - 2 \cdot (t_{fc} + r_c)$ — для колонн из прокатного двутавра;

$d_{wc} = h_c - 2 \cdot (t_{fc} + \sqrt{2a_c})$ — для колонн из сварного двутавра;

k_{wc} — понижающий коэффициент, принимаемый по 6.2.6.2(2).

Таблица 6.3 — Понижающий коэффициент ω , учитывающий касательные напряжения

Коэффициент трансформации β	Понижающий коэффициент ω
$0 \leq \beta \leq 0,5$	$\omega = 1$
$0,5 < \beta < 1$	$\omega = \omega_1 + 2 \cdot (1 - \beta) \cdot (1 - \omega_1)$
$\beta = 1$	$\omega = \omega_1$
$1 < \beta < 2$	$\omega = \omega_1 + (\beta - 1) \cdot (\omega_2 - \omega_1)$
$\beta = 2$	$\omega = \omega_2$
$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,3 \cdot (b_{eff,c,wc} t_{wc} / A_{vc})^2}}$	$\omega_2 = \frac{1}{\sqrt{1 + 5,2 \cdot (b_{eff,c,wc} t_{wc} / A_{vc})^2}}$
A_{vc} — площадь сдвига колонны, см. 6.2.6.1; β — коэффициент трансформации, см. 5.3(7).	

6.2.6.2.2 Если максимальное продольное сжимающее напряжение $\sigma_{com,Ed}$ от действия на колонну осевой силы и изгибающего момента превышает $0,7f_{y,wc}$ в стенке (в месте примыкания к закруглению полки со стенкой в прокатных профилях или к сварному шву в сварных профилях), то его влияние на расчетную несущую способность стенки колонны на сжатие следует учитывать умножением величины $F_{c,wc,Rd}$, полученной по Формуле (6.9), на понижающий коэффициент k_{wc} :

$$\begin{aligned} & \text{— если } \sigma_{com,Ed} \leq 0,7f_{y,wc}, \text{ то } k_{wc} = 1; \\ & \text{— если } \sigma_{com,Ed} > 0,7f_{y,wc}, \text{ то } k_{wc} = 1,7 - \sigma_{com,Ed} / f_{y,wc}. \end{aligned} \quad (6.14)$$

ПРИМЕЧАНИЕ Обычно понижающий коэффициент k_{wc} принимается равным 1,0, и нет необходимости в снижении несущей способности. Следовательно, в предварительных расчетах, когда неизвестно продольное напряжение, его можно опустить и учесть позже.

6.2.6.2.3 Форму потери устойчивости, сжатой в поперечном направлении не усиленной ребрами жесткости стенки колонны со смещением поясов (см. Рисунок 6.9), как правило, следует предотвращать конструктивными мерами.

6.2.6.2.4 Несущую способность стенки колонны при поперечном сжатии можно повысить постановкой ребер жесткости или накладок.

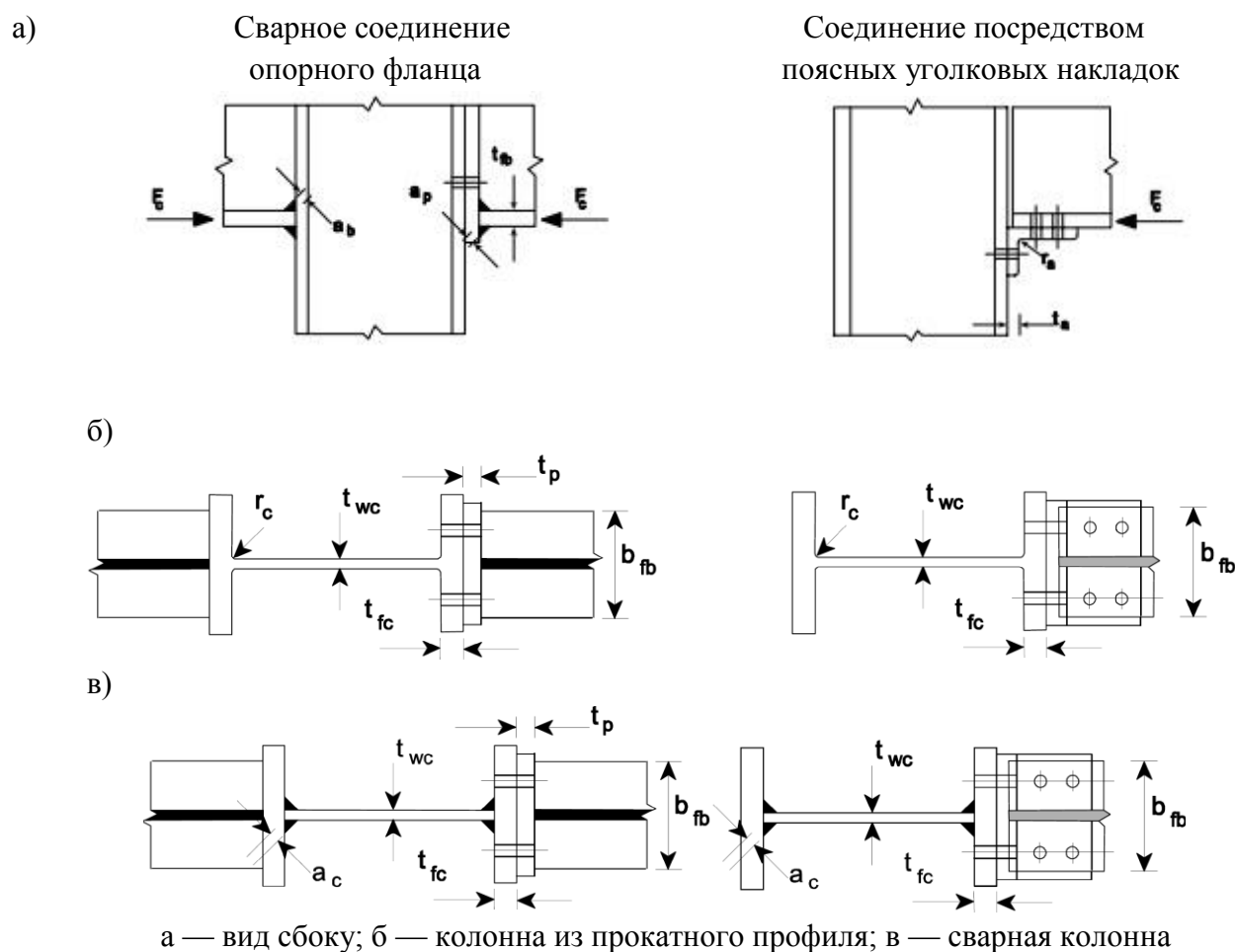


Рисунок 6.8 — К расчету на поперечное сжатие неусиленной стенки колонны

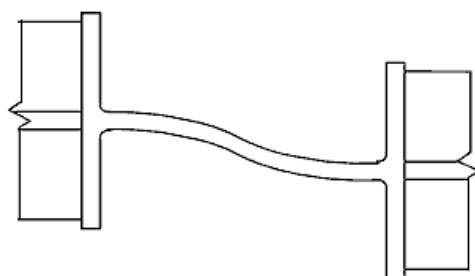


Рисунок 6.9 — Форма потери устойчивости неусиленной стенки колонны со смещением поясов

6.2.6.2.5 Для увеличения расчетной несущей способности стенки колонны при сжатии могут применяться поперечные или диагональные (совместно или вместо поперечных) ребра жесткости.

ПРИМЕЧАНИЕ В сварных соединениях поперечные ребра жесткости следует выравнивать с соответствующей кромкой полки балки. В болтовых соединениях поперечные ребра жесткости в сжатой зоне следует устанавливать по центру сжатия, положение которого показано на Рисунке 6.15.

6.2.6.2.6 Если не усиленная ребрами жесткости стенка колонны усиливается накладками в соответствии с 6.2.6.1, то эффективную толщину стенки можно принять равной $1,5t_{wc}$ — при установке одной накладки и $2,0t_{wc}$ — при установке накладок с двух сторон. При вычислении понижающего коэффициента ω , учитывающего возможное влияние касательных напряжений в стенке колонны, площадь сдвига A_{vc} стенки может быть увеличена только в пределах, допускаемых при определении ее расчетной несущей способности на сдвиг, см. 6.2.6.1(6).

6.2.6.3 Стенка колонны при поперечном растяжении

6.2.6.3.1 Расчетную несущую способность неусиленной ребрами жесткости стенки колонны, подверженной поперечному растяжению, следует определять по формуле:

$$F_{t,wc,Rd} = \frac{\omega b_{eff,t,wc} t_{wc} f_{y,wc}}{\gamma_{M0}}, \quad (6.15)$$

где ω — понижающий коэффициент, учитывающий влияние касательных напряжений в стенке колонны.

6.2.6.3.2 В сварном соединении эффективную ширину $b_{eff,t,wc}$ растянутой стенки колонны следует определять по формуле:

$$b_{eff,t,wc} = t_{fb} + 2 \cdot \sqrt{2a_b} + 5 \cdot (t_{fc} + s), \quad (6.16)$$

где $s = r_c$ — для колонн из прокатного двутавра;

$s = \sqrt{2}a_c$ — для колонн из сварного двутавра, здесь a_c и r_c показаны на Рисунке 6.10;

a_b показано на Рисунке 6.8.

6.2.6.3.3 В болтовых соединениях значение эффективной ширины $b_{eff,t,wc}$ растянутой стенки колонны следует принимать равной эффективной длине эквивалентного Т-образного элемента, моделирующего полку колонны, см. 6.2.6.4.

6.2.6.3.4 Понижающий коэффициент ω , учитывающий возможное влияние касательных напряжений в стенке колонны, следует определять по Таблице 6.3, используя значение $b_{eff,t,wc}$, полученное согласно 6.2.6.3(2) или 6.2.6.3(3).

6.2.6.3.5 Для увеличения расчетной несущей способности стенки колонны на растяжение устанавливают ребра жесткости или накладки на стенку.

6.2.6.3.6 Для увеличения расчетной несущей способности стенки колонны на сжатие

могут применяться поперечные и/или соответствующие диагональные ребра жесткости.

ПРИМЕЧАНИЕ В сварных соединениях края поперечных ребер жесткости обычно выравниваются с кромкой соответствующей полки балки.

6.2.6.3.7 Сварные швы, прикрепляющие диагональные ребра жесткости к полке колонны, должны быть сплошными, герметичными и иметь общую толщину шва, равную толщине ребра жесткости.

6.2.6.3.8 Если не усиленная ребрами жесткости стенка колонны усиливается накладками в соответствии 6.2.6.1, то расчетная несущая способность на поперечное растяжение зависит от толщины продольных сварных швов, присоединяющих эти накладки. Эффективную толщину стенки $t_{w,eff}$ определяют следующим образом:

а) если продольные швы являются стыковыми сварными швами с полным проваром толщиной $a \geq t_s$, то:

- при установке одной накладки на стенку

$$t_{w,eff} = 1,5t_{wc}, \quad (6.17)$$

- при установке двух накладок по обеим сторонам стенки

$$t_{w,eff} = 2,0t_{wc}; \quad (6.18)$$

б) если продольные швы являются угловыми сварными швами толщиной $a \geq t_s/\sqrt{2}$, то как при одной, так и при двух накладках стенки:

- для сталей марок S235, S275 и S355

$$t_{w,eff} = 1,4t_{wc}, \quad (6.19a)$$

- для сталей марок S420 и S460

$$t_{w,eff} = 1,3t_{wc}. \quad (6.19б)$$

6.2.6.3.9 При вычислении понижающего коэффициента ω , учитывающего влияние касательных напряжений в стенке колонны, площадь сдвига A_{vc} стенки, усиленной постановкой накладок, может быть увеличена только в пределах, установленных при определении ее несущей способности на сдвиг, см. 6.2.6.1(б).

6.2.6.4 Полка колонны при поперечном изгибе

6.2.6.4.1 Не подкрепленная полка колонны при болтовом соединении

а) Расчетную несущую способность и тип неподкрепленной полки колонны при поперечном изгибе совместно с присоединяющими ее болтами, работающими на растяжение, следует определять так же, как и для полки эквивалентного Т-образного элемента, см. 6.2.4:

1) для каждого отдельного, изолированного ряда болтов, работающего на растяжение;

2) для каждой группы рядов болтов, работающих на растяжение.

б) Значения e_{min} и m в 6.2.4 следует определять по Рисунку 6.10.

в) Эффективную длину полки Т-образного эквивалентного элемента для отдельных рядов болтов, рассматриваемых изолированно от других рядов, и для групп рядов болтов

следует определять в соответствии с 6.2.4.2, используя значения, приведенные для каждого ряда болтов в Таблице 6.4.

Таблица 6.4 — Эффективные длины неподкрепленной полки колонны

Расположение ряда болтов	Ряд болтов, рассматриваемый изолированно от других рядов болтов		Ряд болтов, рассматриваемый как часть группы рядов болтов	
	Круговое расположение, $l_{eff,cp}$	Не круговое расположение, $l_{eff,nc}$	Круговое расположение, $l_{eff,cp}$	Не круговое расположение, $l_{eff,nc}$
Средний ряд болтов	$2\pi m$	$4m + 1,25e$	$2p$	p
Крайний ряд болтов	Наименьшее из: $2\pi m$ $\pi m + 2e_1$	Наименьшее из: $4m + 1,25e$ $2m + 0,625e + e_1$	Наименьшее из: $\pi m + p$ $2e_1 + p$	Наименьшее из: $2m + 0,625e + 0,5p$ $e_1 + 0,5p$
Тип 1	$l_{eff,1} = l_{eff,nc}$, но $l_{eff,1} \leq l_{eff,cp}$		$\sum l_{eff,1} = \sum l_{eff,nc}$, но $\sum l_{eff,1} \leq \sum l_{eff,cp}$	
Тип 2	$l_{eff,2} = l_{eff,nc}$		$\sum l_{eff,2} = \sum l_{eff,nc}$	

6.2.6.4.2 Подкрепленная полка колонны при болтовом соединении с опорным фланцем или поясной накладкой

а) Для повышения расчетной несущей способности полки на изгиб могут применяться поперечные и/или диагональные ребра жесткости.

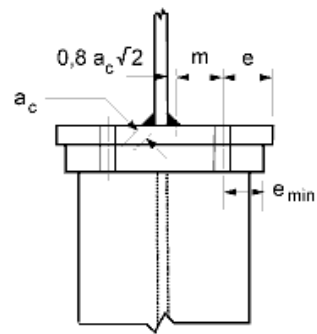
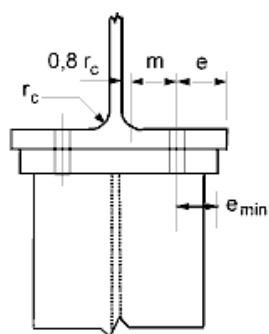
б) Расчетную несущую способность и тип подкрепленной ребрами жесткости полки колонны при поперечном изгибе совместно с прикрепляющими ее болтами, работающими на растяжение, следует определять так же, как и для полки эквивалентного Т-образного элемента, см. 6.2.4:

1) для каждого отдельного, изолированного ряда болтов, работающего на растяжение;

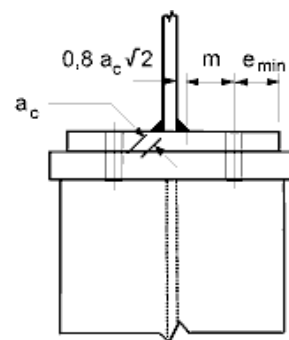
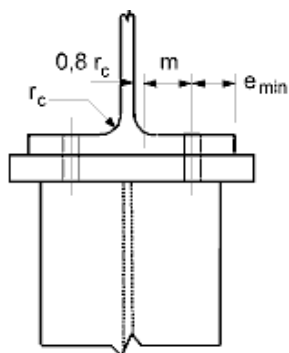
2) для каждой группы рядов болтов, работающих на растяжение.

в) Участки полки колонны (вместе с группами рядов болтов, расположенных по обе стороны от ребра жесткости) следует моделировать в виде полок отдельных эквивалентных Т-образных элементов, см. Рисунок 6.11. Расчетную несущую способность и вид отказа следует определять отдельно для каждого эквивалентного Т-образного элемента.

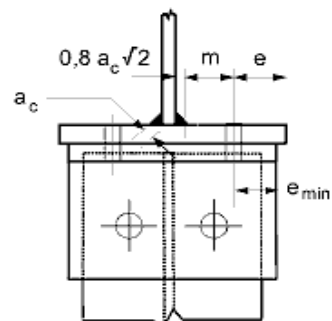
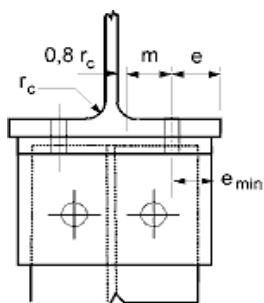
а)



б)

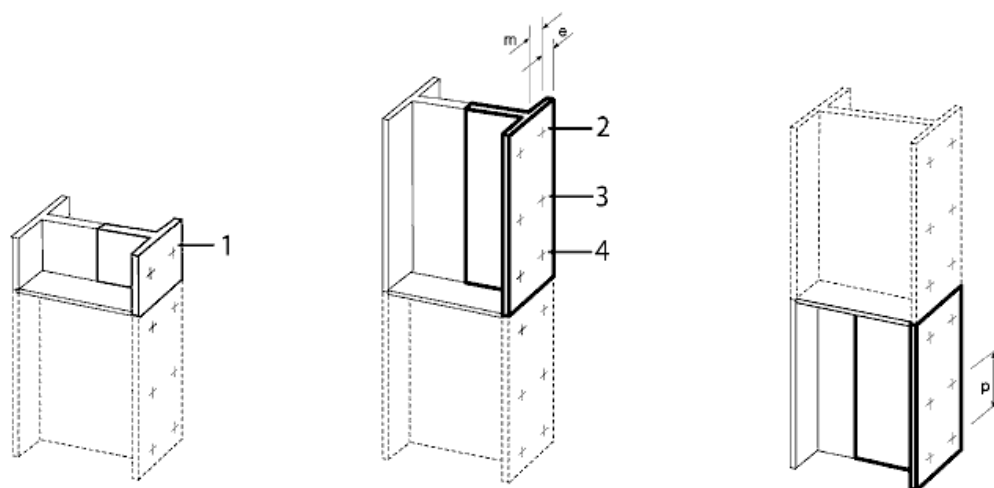


в)



- а — сварной опорный фланец уже, чем полка колонны;
 б — сварной опорный фланец шире, чем полка колонны;
 в — поясные уголковые накладки

Рисунок 6.10 — Определение e , e_{\min} , r_c и m



1 — крайний ряд болтов, примыкающий к ребру жесткости; 2 — крайний ряд болтов; 3 — средний ряд болтов; 4 — ряд болтов, примыкающий к ребру жесткости

**Рисунок 6.11— Моделирование подкрепленной полки колонны
в виде отдельных Т-образных элементов**

г) Значения e_{\min} и m в 6.2.4 следует определять по Рисунку 6.8.

д) Значение эффективной длины отдельной полки Т-образного эквивалентного элемента l_{eff} следует определять в соответствии с 6.2.4.2, используя приведенные в Таблице 6.4 значения для каждого ряда болтов. Значение α из Таблицы 6.5 следует определять по Рисунку 6.13.

е) Ребра жесткости должны соответствовать требованиям 6.2.6.1.

Таблица 6.5 — Эффективные длины подкрепленной стенки колонны

Расположение ряда болтов	Ряд болтов, рассматриваемый изолированно от других рядов болтов		Ряд болтов, рассматриваемый как часть группы рядов болтов	
	Круговое расположение, $l_{\text{eff,cp}}$	Не круговое расположение, $l_{\text{eff,nc}}$	Круговое расположение, $l_{\text{eff,cp}}$	Не круговое расположение, $l_{\text{eff,nc}}$
Ряд болтов, примыкающи й к ребру жесткости	$2\pi m$	αm	$\pi m + p$	$0,5p + \alpha m -$ $-(2m + 0,625e)$
Любой средний ряд болтов	$2\pi m$	$4m + 1,25e$	$2p$	p
Любой крайний ряд болтов	Наименьшее из: $2\pi m$ $\pi m + 2e_1$	Наименьшее из: $4m + 1,25e$ $2m + 0,625e + e_1$	Наименьшее из: $\pi m + p$ $2e_1 + p$	Наименьшее из: $2m + 0,625e + 0,5p$ $e_1 + 0,5p$

Таблица 6.5 — Эффективные длины подкрепленной стенки колонны

(продолжение)

Крайний ряд болтов, примыкающий к ребру жесткости	Наименьшее из: $2\pi m$ $\pi m + 2e_1$	$e_1 + \alpha m - (2m + 0,625e)$	Не рассматривается	Не рассматривается
Тип 1	$l_{\text{eff},1} = l_{\text{eff},nc}$, но $l_{\text{eff},1} \leq l_{\text{eff},cp}$		$\sum l_{\text{eff},1} = \sum l_{\text{eff},nc}$, но $\sum l_{\text{eff},1} \leq \sum l_{\text{eff},cp}$	
Тип 2	$l_{\text{eff},2} = l_{\text{eff},nc}$		$\sum l_{\text{eff},2} = \sum l_{\text{eff},nc}$	
α следует определять по кривым, приведенным на Рисунке 6.13.				

6.2.6.4.3 Неподкрепленная полка колонны, сварное соединение

В сварном узловом соединении расчетную несущую способность $F_{fc,Rd}$ не подкрепленной полки колонны при изгибе, от действия усилий растяжения или сжатия в полке балки, следует определять по формуле:

$$F_{fc,Rd} = b_{eff,b,fc} t_{fb} f_{y,fb} / \gamma_{M0}, \quad (6.20)$$

где

$b_{eff,b,fc}$ — эффективная ширина b_{eff} , определенная в 4.10, где полка балки рассматривается как пластинка.

ПРИМЕЧАНИЕ Требования, приведенные в 4.10(4) и 4.10(6).

6.2.6.5 Опорный фланец при изгибе

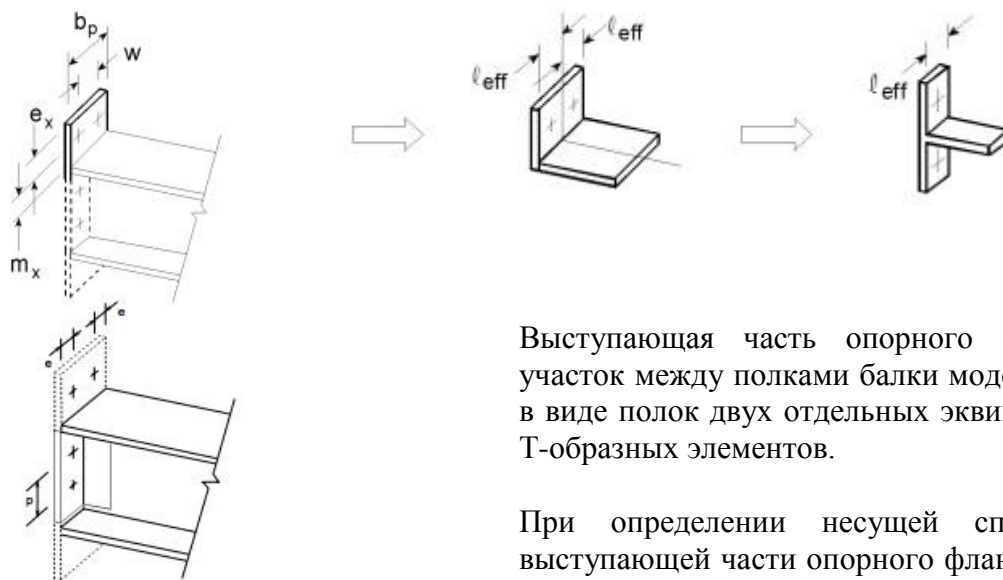
6.2.6.5.1 Расчетную несущую способность и вид отказа опорного фланца при изгибе совместно с присоединяющими его болтами, работающими на растяжение, следует определять так же, как и для полки эквивалентного Т-образного элемента, см. 6.2.4:

а) для каждого отдельного, изолированного ряда болтов, работающего на растяжение;

б) для каждой группы рядов болтов, работающих на растяжение.

6.2.6.5.2 Часть фланца, выступающая над полкой балки, вместе с группами рядов болтов следует моделировать в виде отдельных эквивалентных Т-образных элементов, см. Рисунок 6.12. Расчетную несущую способность и вид отказа следует определять отдельно для каждого эквивалентного Т-образного элемента.

6.2.6.5.3 Значение e_{\min} в 6.2.4 следует определять по Рисунку 6.10 для части опорного фланца, расположенной между полками балки. Для выступающей части опорного фланца значение e_{\min} следует принимать равным e_x , см. Рисунок 6.10.



Выступающая часть опорного фланца и участок между полками балки моделируются в виде полок двух отдельных эквивалентных Т-образных элементов.

При определении несущей способности выступающей части опорного фланца вместо e и m следует использовать e_x и m_x .

Рисунок 6.12 — Моделирование выступающей части опорного фланца в виде отдельных Т-образных элементов

6.2.6.5.4 Значение эффективной длины полки Т-образного эквивалентного элемента l_{eff} следует определять в соответствии с 6.2.4.2, используя приведенные в Таблице 6.6 значения для каждого ряда болтов.

6.2.6.5.5 Значения m и m_x в Таблице 6.6 следует определять по Рисунку 6.12.

Таблица 6.6 — Эффективные длины опорного фланца

Расположение ряда болтов	Ряд болтов, рассматриваемый изолированно от других рядов болтов		Ряд болтов, рассматриваемый как часть группы рядов болтов	
	Круговое расположение, $l_{eff,cp}$	Не круговое расположение, $l_{eff,nc}$	Круговое расположение, $l_{eff,cp}$	Не круговое расположение, $l_{eff,nc}$
Ряд болтов, расположенный за пределами растянутой полки балки	Наименьшее из: $2\pi m_x$ $2\pi m_x + w$ $2\pi m_x + 2e$	Наименьшее из: $4m_x + 1,25e_x$ $e + 2m_x + 0,625e_x$ $0,5b_p$ $0,5w + 2m_x + 0,625e_x$	—	—
Первый ряд болтов, расположенный под растянутой полкой балки	$2\pi m$	αm	$\pi m + p$	$0,5p + \alpha m - (2m + 0,625e)$

Таблица 6.6 — Эффективные длины опорного фланца (продолжение)

Любой средний ряд болтов	$2\pi m$	$4m+1,25e$	$2p$	p
Любой крайний ряд болтов	$2\pi m$	$4m+1,25e$	$\pi m + p$	$2m+0,625e+0,5p$
Тип 1	$l_{\text{eff},1} = l_{\text{eff},nc}$, но $l_{\text{eff},1} \leq l_{\text{eff},cp}$		$\sum l_{\text{eff},1} = \sum l_{\text{eff},nc}$, но $\sum l_{\text{eff},1} \leq \sum l_{\text{eff},cp}$	
Тип 2	$l_{\text{eff},2} = l_{\text{eff},nc}$		$\sum l_{\text{eff},2} = \sum l_{\text{eff},nc}$	
α следует определять по кривым, приведенным на Рисунке 6.13.				

6.2.6.6 Поясные накладки при изгибе

6.2.6.6.1 Расчетную несущую способность на изгиб и тип поясной уголкового накладки совместно с прикрепляющими ее болтами, работающими на растяжение, следует определять так же, как и для полки эквивалентного Т-образного элемента, см. 6.2.4.

6.2.6.6.2 Значение эффективной длины полки Т-образного эквивалентного элемента l_{eff} следует принимать равным $0,5b_a$, где b_a — длина поясной уголкового накладки, см. Рисунок 6.14.

6.2.6.6.3 Значения e_{\min} и m в 6.2.4 следует определять по Рисунку 6.15.

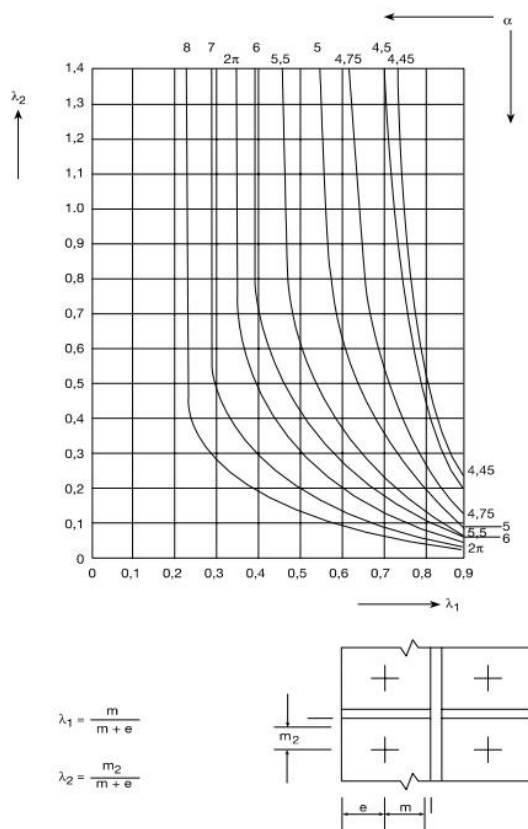


Рисунок 6.13 — Значения α для подкрепленных полок колонны и опорных фланцев

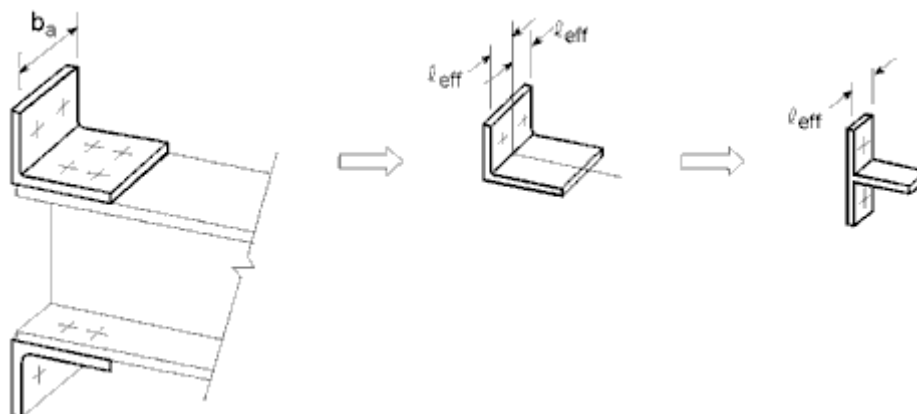
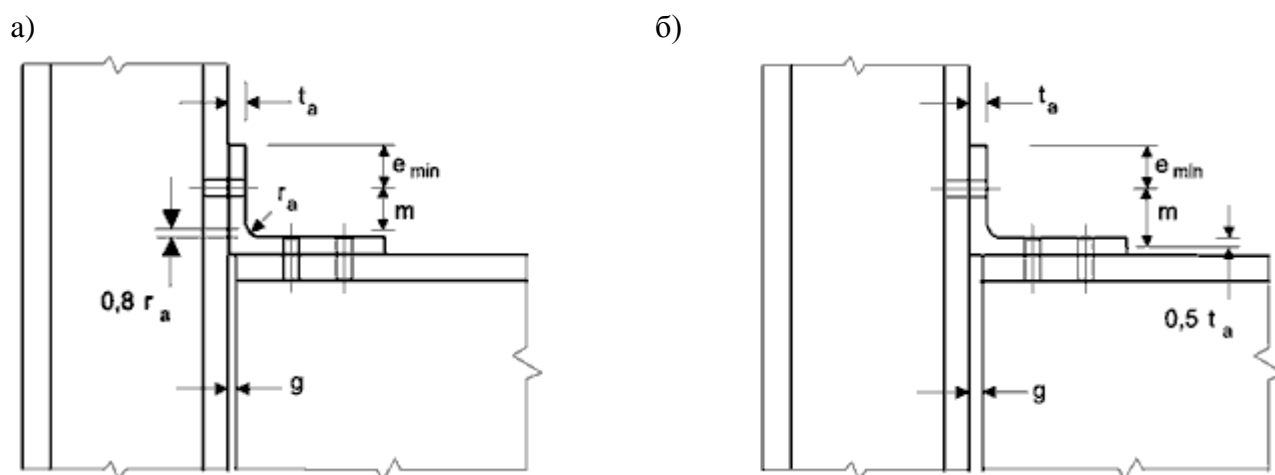


Рисунок 6.14 — Эффективная длина l_{eff} поясной уголковой накладки



ПРИМЕЧАНИЕ 1 Для болтов, прикрепляющих накладку к полке колонны, следует принимать только один ряд.

ПРИМЕЧАНИЕ 2 Количество рядов болтов, прикрепляющих накладку к полке балки, не ограничено.

ПРИМЕЧАНИЕ 3 Длина b_a накладки может отличаться как от ширины полки балки, так и от ширины полки колонны.

а — зазор $g \leq 0,4t_a$; б — зазор $g > 0,4t_a$

Рисунок 6.15 — Размеры e_{min} и m поясной уголковой накладки, прикрепляемой болтами

6.2.6.7 Полка и стенка балки при сжатии

6.2.6.7.1 Результирующее значение расчетного усилия в сжатой полке балки и примыкающей сжатой зоне стенки можно считать действующим в центре сжатия, см.

6.2.7. Расчетную несущую способность на сжатие полки и стенки балки можно определить по следующей формуле:

$$f_{c,fb,Rd} = M_{c,Rd} / (h - t_{fb}), \quad (6.21)$$

где h — высота присоединяемой балки;

$M_{c,Rd}$ — расчетная несущая способность на изгиб поперечного сечения балки, уменьшенная, при необходимости учета сдвига согласно требованиям, приведенных в СН

РК EN 1993-1-1, где расчетное значение несущей способности только при изгибе относительно одной из главных осей поперечного сечения определяется следующим образом:

$$M_{c,Rd} = M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl} f_y}{\gamma_{M0}} \quad \text{— для поперечных сечений классов 1 и 2;}$$

$$M_{c,Rd} = M_{el,Rd} = \frac{W_{el,min} f_y}{\gamma_{M0}} \quad \text{— для поперечных сечений класса 3;}$$

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{eff,min} f_y}{\gamma_{M0}} \quad \text{— для поперечных сечений класса 4,}$$

где: $W_{el,min}$ и $W_{eff,min}$ — минимальные моменты сопротивления соответствующие максимальным напряжением волокнам в упругой стадии, при вычислении которых отверстия для болтов в растянутой полке можно не учитывать, если для нее выполняется нижеприведенное условие:

$$\frac{A_{f,net} 0,9 f_u}{\gamma_{M2}} \geq \frac{A_f f_y}{\gamma_{M0}},$$

где A_f — площадь сечения растянутой полки.

Отверстия в растянутой части стенки учитывать не следует, если вышеприведенное условие удовлетворяется полностью для растянутой зоны, включая растянутую полку и часть растянутой стенки. Отверстия для болтов расположенных в сжатой зоне сечения, за исключением отверстий с большим припуском и овальных отверстий, не учитываются, если в отверстия установлены болты.

6.2.6.7.2 Действию поперечной силы следует принимать во внимание ее влияние на несущую способность на изгиб, если поперечная сила меньше половины несущей способности на сдвиг в пластической стадии, его влиянием на несущую способность на изгиб можно пренебречь, кроме случаев, когда потеря местной устойчивости при сдвиге уменьшает несущую способность поперечного сечения. В остальных случаях уменьшенное значение несущей способности на изгиб следует принимать равным расчетному значению несущей способности поперечного сечения, рассчитанному по уменьшенному значению предела текучести определенному по формуле:

$$(1 - \rho) f_y$$

$$\rho = \left(\frac{2 V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} - 1 \right)^2$$

где и $V_{pl,Rd}$ определяется согласно требований СН РК EN 1993-1-1.

Для балки с вутом значение $M_{c,Rd}$ можно вычислить, пренебрегая промежуточной полкой;

t_{fb} — толщина полки присоединяемой балки.

Если высота балки, включая вут, превышает 600 мм, то влияние стенки балки на расчетную несущую способность на сжатие не должно превышать 20 %.

6.2.6.7.3 Если балка усилена вутами, то они должны отвечать следующим требованиям:

- марка стали вут должна соответствовать марке стали элемента;
- размер полки и толщина стенки вута должны быть не меньше размеров аналогичных элементов балки;
- угол между полкой вута и полкой балки не должен превышать 45°;
- длину жесткой опоры s_s следует принимать равной толщине полки вута, параллельной балке.

6.2.6.7.4 Если балка усилена вутами, расчетную несущую способность стенки балки на сжатие следует определять в соответствии с 6.2.6.2.

6.2.6.8 Стенка балки при растяжении

6.2.6.8.1 В болтовом соединении с опорным фланцем расчетную несущую способность стенки балки на растяжение следует определять по формуле:

$$F_{t,wb,Rd} = b_{eff,t,wb} t_{wb} f_{y,wb} / \gamma_{M0} \quad (6.22)$$

6.2.6.8.2 Эффективную ширину $d_{eff,t,wb}$ растянутой стенки балки следует принимать равной эффективной длине эквивалентного Т-образного элемента, моделирующего опорный фланец при изгибе, вычисленной по 6.2.6.5 при закреплении его отдельным изолированным рядом болтов или группой болтов.

6.2.6.9 Бетон при сжатии, включая стяжку

6.2.6.9.1 Расчетную прочность на смятие соединения опорной плиты базы колонны с фундаментом следует определять с учетом свойств материалов и размеров как стяжки, так и фундамента. Бетонный фундамент следует проектировать в соответствии с 6.2.5(7).

6.2.6.9.2 Расчетную несущую способность $F_{c,Rd}$ сжатого бетона (включая стяжку), вместе с работающей на изгиб опорной плитой, следует определять так же, как и для эквивалентного Т-образного элемента, см. 6.2.5.

6.2.6.10 Опорная плита, изгибаемая от действия сжимающих напряжений

Расчетную несущую способность $F_{c,Rd}$ опорной плиты, изгибаемой от действия сжимающих напряжений фундамента, вместе с бетонной подушкой, на которую опирается база колонны, следует определять так же, как и для эквивалентного Т-образного элемента, см. 6.2.5.

6.2.6.11 Опорная плита, изгибаемая от действия растягивающих усилий

6.2.6.11.1 Расчетную несущую способность $F_{t,Rd}$ и тип опорной плиты, изгибаемой от действия растягивающих усилий, включая фундаментные болты, можно определить используя правила, приведенные в 6.2.6.5.

6.2.6.11.2 При расчете опорных плит эффект рычага учитывать не следует.

6.2.6.12 Фундаментные болты при растяжении

6.2.6.12.1 Фундаментные болты должны быть рассчитаны на действие от расчетных нагрузок. Они должны воспринимать растягивающие усилия, возникающие от отрыва и от действия изгибающих моментов.

6.2.6.12.2 При определении растягивающих усилий в фундаментных болтах от действия изгибающих моментов плечо внутренней пары сил не следует принимать больше расстояния между центром тяжести площади сжатой зоны опорной поверхности и центром тяжести группы болтов в растянутой зоне.

ПРИМЕЧАНИЕ При расчете следует учитывать возможное влияние допусков на расположение фундаментных болтов.

6.2.6.12.3 Расчетное значение несущей способности фундаментных болтов следует принимать наименьшим из расчетной несущей способности на растяжение, см. 3.6, и расчетного усилия анкеровки фундаментного болта в бетоне в соответствии с расчетным напряжением сцепления ограниченного значения, которое зависит от характеристик поверхности арматуры, предела прочности при растяжении бетона и усиления окружающим бетоном, а также в свою очередь зависит от толщины защитного слоя, поперечной арматуры и поперечного давления. Длина, требуемая для развития необходимого растягивающего усилия в анкеровке или в соединении внахлестку, определяется на основе постоянного напряжения сцепления. При использовании табличных данных не требуется производить дополнительную проверку сопротивления срезу и кручению, а также анкеровки

6.2.6.12.4 Для закрепления фундаментного болта в фундаменте следует использовать один из следующих способов анкеровки:

- отгибом (см. Рисунок 6.14 а));
- посредством анкерной пластины (см. Рисунок 6.14 б));
- любым соответствующим приспособлением, заделанным в бетон и обеспечивающим передачу усилия на него;
- любым приспособлением для закрепления, надлежащим образом испытанным и одобренным.

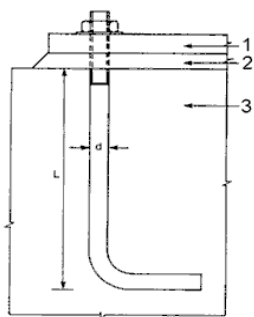
6.2.6.12.5 Если фундаментный болт имеет отгиб, длина анкеровки должна быть такой, чтобы усилие его сцепления с бетоном было выше предела текучести стали болта. Длину анкеровки l_{bd} следует принимать согласно нижеприведенной формуле:

$$l_{bd} = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \alpha_4 \alpha_5 l_{b,rqd} \geq l_{b,min},$$

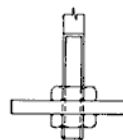
где: α_1 — для учета влияния формы стержней при достаточном защитном слое;
 α_2 — для учета влияния минимальной толщины защитного слоя бетона;
 α_3 — для учета влияния усиления поперечной арматурой;
 α_4 — для учета влияния одного или нескольких приваренных поперечных стержней ($\varnothing_t > 0,6\varnothing$) вдоль расчетной длины анкеровки;
 α_5 — для учета влияния поперечного давления плоскости раскалывания вдоль расчетной длины анкеровки. Данный тип анкеровки не следует использовать для болтов с пределом текучести стали f_{yb} выше 300 Н/мм².

6.2.6.12.6 Для фундаментного болта с анкерной пластиной или другим приспособлением, передающим усилие на бетон, сцепление болта с бетоном не учитывается. В этом случае все усилия передаются на пластину или другие соответствующие приспособления.

а)



б)



1 — опорная плита; 2 — стяжка; 3 — бетонный фундамент
а — анкеровка отгибом; б — анкеровка пластиной

Рисунок 6.14 — Крепление фундаментных болтов

6.2.7 Расчетная несущая способность сопряжений балки с колонной и стыковых соединений

6.2.7.1 Общие положения

6.2.7.1.1 Изгибающий момент от действия расчетных воздействий должен удовлетворять условию:

$$\frac{M_{j,Ed}}{M_{j,Rd}} \leq 1,0 \quad (6.23)$$

6.2.7.1.2 Методы определения расчетной несущей способности узла на изгиб $M_{j,Rd}$, приведенные в 6.2.7, не учитывают действие осевой силы N_{Ed} в присоединенном элементе. Эти методы применимы только в том случае, если осевая сила в присоединенном элементе не превышает 5 % расчетной несущей способности в пластической стадии $N_{pl,Rd}$ его поперечного сечения.

6.2.7.1.3 Если осевая сила N_{Ed} в присоединенном элементе превышает 5 % расчетной несущей способности в пластической стадии $N_{pl,Rd}$, то следует применять, с некоторым запасом, следующий приближенный метод:

$$\frac{M_{j,Ed}}{M_{j,Rd}} + \frac{N_{j,Ed}}{N_{j,Rd}} \leq 1,0, \quad (6.24)$$

где $M_{j,Rd}$ — расчетная несущая способность узла по изгибающему моменту, при отсутствии осевой силы;

$N_{j,Rd}$ — расчетная несущая способность узла по осевой силе, при отсутствии изгибающего момента.

6.2.7.1.4 Расчетную несущую способность сварного узлового соединения следует определять, используя параметры, приведенные на Рисунке 6.15 а).

6.2.7.1.5 Расчетную несущую способность болтового узлового соединения с опорным фланцем, прикрепленным только одним рядом растянутых болтов (или соединения, в котором учитывается только один ряд болтов, работающий на растяжение, см. 6.2.3(6)), следует определять, используя приведенные на Рисунке 6.15 в) параметры.

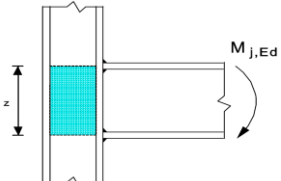
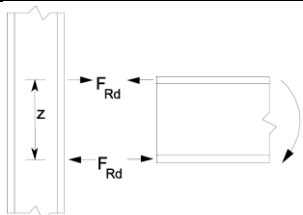
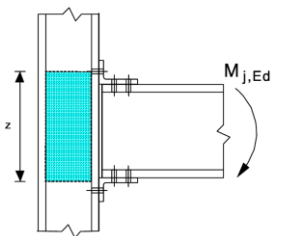
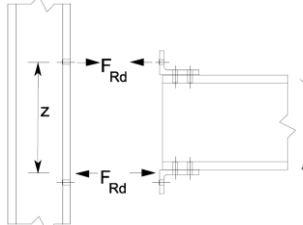
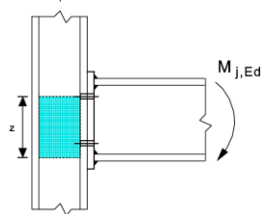
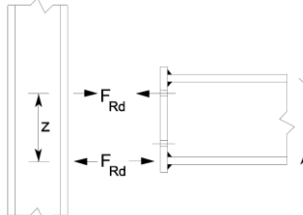
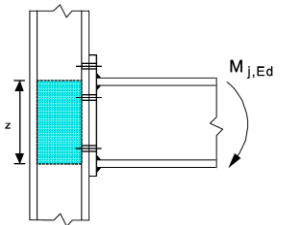
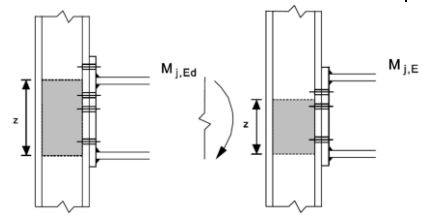
Тип соединения	Расположение центра сжатия	Плечо внутренней пары сил	Распределение усилий
а) Сварное соединение 	По центру толщины сжатой полки	$z = h - t_{fb}$ h — высота присоединяемой балки; t_{fb} — толщина полки балки	
б) Болтовое соединение с поясной уголковой накладкой 	По центру толщины полки поясной уголковой накладки, расположенной на сжатой полке	Расстояние между центром сжатия и рядом болтов, работающих на сжатие	
в) Болтовое соединение с опорным фланцем, прикрепленным одним рядом болтов, работающим на растяжение По центру толщины 	По центру толщины сжатой полки	Расстояние между центром сжатия и рядом болтов, работающих на растяжение	
г) Болтовое соединение с опорным фланцем, прикрепленным только двумя рядами болтов, работающими на растяжение 	Посередине толщины сжатой полки	С запасом значение z можно принять равным расстоянию между центром сжатия и центром расстояния между этими двумя рядами болтов	
д) Другие болтовые соединения с опорным фланцем, прикрепленным двумя и более рядами болтов, работающими на растяжение 	По центру толщины сжатой полки	Приближенно можно принять равным расстоянию между центром сжатия и центром расстояния между двумя наиболее удаленными рядами болтов, работающими на растяжение	Более точное значение может быть определено, принимая плечо внутренней пары сил z равным z_{eg} , вычисленному по методу, приведенному в 6.3.3.1.

Рисунок 6.15 — Расположение центра сжатия, плеча внутренней пары сил z и распределение усилий при определении расчетной несущей способности соединения на изгиб $M_{j,Rd}$

6.2.7.1.6 Расчетную несущую способность болтового узлового соединения с поясными уголковыми накладками следует определять, используя приведенные на Рисунке 6.15 б) параметры.

6.2.7.1.7 Расчетную несущую способность узлового соединения с опорным фланцем, прикрепленным более чем одним рядом растянутых болтов, в общем случае следует определять согласно 6.2.7.2.

6.2.7.1.8 С целью упрощения, расчетную несущую способность узлового соединения с опорным фланцем, прикрепленным двумя рядами растянутых болтов с некоторым запасом, можно определить по расчетной модели, показанной на Рисунке 6.16, при условии, что суммарная несущая способность F_{Rd} не превышает $3,8 F_{t,Rd}$, где F_{Rd} следует определять по Таблице 6.2. В этом случае всю растянутую зону поверхности опорного фланца можно рассматривать как один отдельный основной компонент. Если два ряда болтов расположены приблизительно равноудаленно от каждой стороны полки балки, эту часть опорного фланца следует рассматривать как Т-образный элемент при определении несущей способности ряда болтов $F_{1,Rd}$. Значение $F_{2,Rd}$ можно принять равным $F_{1,Rd}$, и таким образом $F_{Rd} = 2F_{1,Rd}$.

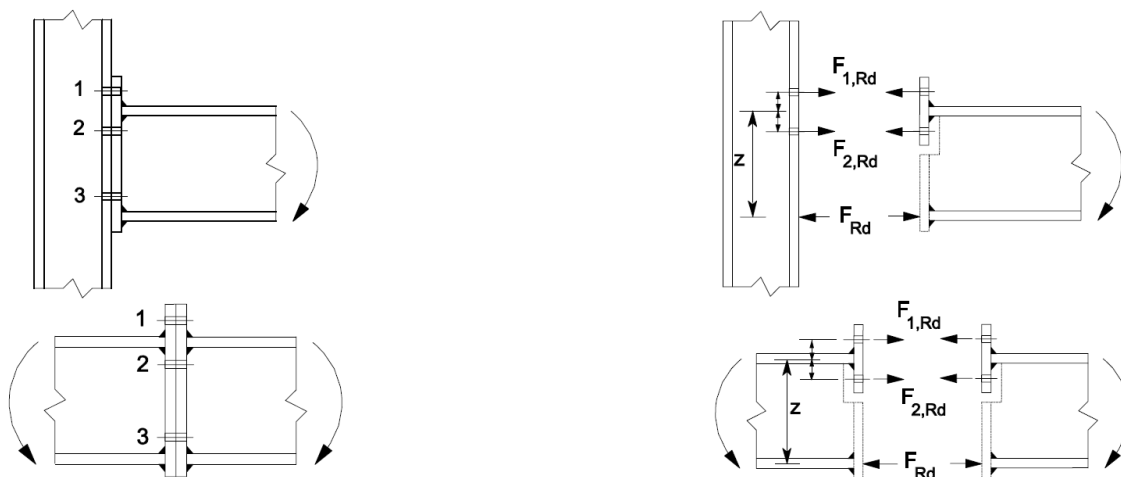


Рисунок 6.16 — Упрощенные модели болтовых узловых соединений с опорными фланцами

6.2.7.1.9 Центр сжатия следует принимать как центр блока напряжений, вызванных сжимающими усилиями. С целью упрощения, положение центра сжатия может быть принято по Рисунку 6.15.

6.2.7.1.10 Стык неразрезного элемента или его части, подверженной растяжению, следует рассчитывать на действие всех моментов и осевых усилий, которым подвержен элемент или его часть в данной точке.

6.2.7.1.11 Стыки должны быть рассчитаны таким образом, чтобы удерживать соединяемые элементы в проектном положении. Силы трения между поверхностями трения не могут рассматриваться в качестве сил, удерживающих соединяемые элементы в проектном положении.

6.2.7.1.12 Всегда, где это возможно, элементы следует располагать так, чтобы нейтральная ось стыковых деталей совпадала с нейтральной осью соединяемого элемента. При наличии эксцентриситета его следует учитывать при определении действующих сил.

6.2.7.1.13 Если опорные части соединяемых элементов не подготовлены для восприятия усилий путем непосредственного контакта, должны быть предусмотрены стыковые детали, обеспечивающие передачу внутренних сил и изгибающих моментов, включая изгибающие моменты от эксцентриситетов приложенных усилий, начальные несовершенства и деформации от эффектов второго рода. Значения внутреннего изгибающего момента не следует принимать менее 25 % от несущей способности более слабого сечения на действие момента относительно обеих осей, а значения поперечной силы в направлении обеих осей — менее 2,5 % от несущей способности более слабого сечения на действие сжимающей нормальной силы.

6.2.7.1.14 Если опорные части соединяемых элементов подготовлены для восприятия усилий непосредственным контактом, то стыковые детали должны обеспечить передачу усилия, равного 25 % от максимального значения сжимающей силы в колонне.

6.2.7.1.15 Выравнивание стыкуемых концов сжатых элементов следует выполнять с помощью накладок или другими способами. Стыковые детали и их крепление должны быть пропорциональны для восприятия усилий в стыке, действующих в любом направлении, перпендикулярном оси элемента. При расчете стыков следует также учитывать эффекты второго рода.

6.2.7.1.16 Стыки в изгибаемых элементах должны удовлетворять следующим условиям:

а) сжатые полки следует рассматривать как сжатые элементы;
 б) растянутые полки следует рассматривать как растянутые элементы;
 в) детали, подверженные сдвигу, следует рассчитывать на совместное воздействие следующих эффектов:

1) поперечной силы в стыке;
 2) момента от эксцентриситета (если он имеет место) центров тяжести групп крепежных деталей, расположенных с одной и с другой стороны стыка;

3) часть момента, деформации и угла поворота, воспринимаемых стенкой или ее частью, независимо от предпосылки о распределении напряжений в примыкающих частях, принятой при расчете элемента или его части.

6.2.7.2 Сопряжения балки с колонной на болтах с опорным фланцем

6.2.7.2.1 Расчетную несущую способность на изгиб $M_{j,Rd}$ сопряжения балки с колонной на болтах с опорным фланцем можно определить по формуле:

$$M_{j,Rd} = \sum_r h_r F_{tr,Rd}, \quad (6.25)$$

где $F_{tr,Rd}$ — эффективная несущая способность на растяжение ряда болтов r ;

h_r — расстояние от ряда болтов r до центра сжатия;

r — номер ряда болтов.

ПРИМЕЧАНИЕ В болтовом узловом соединении с более чем одним рядом болтов, работающих на растяжение, ряды болтов нумеруются, начиная с ряда болтов наиболее удаленного от центра сжатия.

6.2.7.1.2 В болтовых соединениях с опорным фланцем центр сжатия следует считать расположенным на линии, проходящей через середину сжатой полки присоединяемого элемента.

6.2.7.1.3 Эффективную расчетную несущую способность на растяжение $F_{tr,Rd}$ каждого ряда болтов следует определять поочередно, начиная с первого, наиболее удаленного от центра сжатия, затем второго и так далее.

6.2.7.1.4 При определении эффективной расчетной несущей способности на растяжение $F_{tr,Rd}$ ряда болтов r , эффективной расчетной несущей способностью на растяжение всех остальных болтов, расположенных ближе к центру сжатия, следует пренебречь.

6.2.7.1.5 Эффективную расчетную несущую способность на растяжение $F_{tr,Rd}$ ряда болтов r следует принимать равной его расчетной несущей способности на растяжение $F_{t,Rd}$, рассматривая его изолированно от других рядов болтов, см. 6.2.7.2(6), уменьшенной при необходимости выполнения условий, приведенных в 6.2.7.2(7), (8) и (9).

6.2.7.1.6 Значение эффективной расчетной несущей способности на растяжение $F_{tr,Rd}$ ряда болтов r , рассматриваемого изолированно от других рядов, следует принимать равным значению наименьшей несущей способности на растяжение отдельных рядов болтов при расчете следующих основных компонентов:

- стенки колонны при поперечном растяжении $F_{t,wc,Rd}$ см. 6.2.6.3;
- полки колонны при поперечном изгибе $F_{t,fc,Rd}$ см. 6.2.6.4;
- опорного фланца при изгибе $F_{t,ep,Rd}$ см. 6.2.6.5;
- стенки балки при растяжении $F_{t,wp,Rd}$ см. 6.2.6.8.

6.2.7.1.7 Эффективную расчетную несущую способность на растяжение $F_{tr,Rd}$ ряда болтов r следует, при необходимости, уменьшать до значения, меньшего, чем $F_{t,Rd}$, определенного в 6.2.7.2(6), чтобы при учете в расчете всех рядов болтов до ряда r включительно выполнялись следующие условия:

— суммарная расчетная несущая способность $\sum F_{t,Rd} \leq V_{wp,Rd} / \beta$ где r следует определять по 5.3(7), см. 6.2.6.1;

— суммарная расчетная несущая способность $\sum F_{t,Rd}$ не должна превышать наименьшего из следующих двух значений:

— расчетной несущей способности стенки колонны при поперечном сжатии $F_{c,wc,Rd}$ см. 6.2.6.2;

— расчетной несущей способности стенки и полки балки при сжатии $F_{t,fb,Rd}$ см. 6.2.6.7.

6.2.7.1.8 Эффективную расчетную несущую способность на растяжение $F_{tr,Rd}$ ряда болтов r следует, при необходимости, уменьшать до значения, меньшего, чем $F_{t,Rd}$, определенного по 6.2.7.2(6), для того, чтобы сумма расчетных несущих способностей всех рядов болтов до ряда r включительно, относящихся к одной группе, не превышала

расчетной несущей способности этой группы в целом. Необходимо выполнять следующие проверки для основных компонентов:

- стенки колонны при поперечном растяжении $F_{t,wc,Rd}$ см. 6.2.6.3;
- полки колонны при поперечном изгибе $F_{t,fc,Rd}$ см. 6.2.6.4;
- опорного фланца при изгибе $F_{t,ep,Rd}$ см. 6.2.6.5;
- стенки балки при растяжении $F_{t,wp,Rd}$ см. 6.2.6.8.

6.2.7.1.9 Если эффективная расчетная несущая способность на растяжение $F_{tx,Rd}$ одного из предыдущих рядов болтов x больше, чем $1,9F_{t,Rd}$, то эффективную расчетную несущую способность на растяжение $F_{tr,Rd}$ ряда болтов r следует, при необходимости, уменьшать, чтобы удовлетворить условию:

$$F_{tr,Rd} \leq F_{tx,Rd} h_r / h_x, \quad (6.26)$$

где h_x — расстояние между рядом болтов x до центра сжатия;
 x — наиболее удаленный от центра сжатия ряд болтов с расчетной несущей способностью на растяжение выше $1,9F_{t,Rd}$.

ПРИМЕЧАНИЕ В Национальном Приложении может содержаться дополнительная информация по использованию условия (6.26).

6.2.7.1.10 Метод, приведенный в 6.2.7.2(1) – 6.2.7.2(9), может применяться для расчета стыка балок на болтах с приваренными опорными фланцами, см. Рисунок 6.17, исключая аспекты, касающиеся колонн.

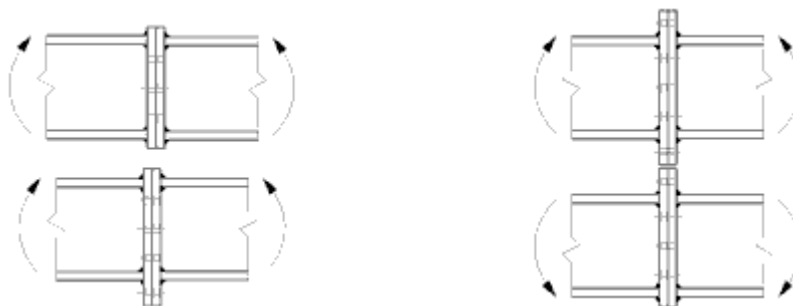


Рисунок 6.17 — Стыки балок на болтах с приваренными опорными фланцами

6.2.8 Расчетная несущая способность баз колонн с опорными плитами

6.2.8.1 Общие положения

6.2.8.1.1 Базы колонн должны быть достаточного размера, иметь достаточную жесткость и прочность для передачи осевых сил, моментов и поперечных сил на фундаменты или другие опорные части, не превышая их несущей способности.

6.2.8.1.2 Расчетную прочность на смятие между опорной плитой базы и фундаментом можно определить, исходя из равномерного распределения сжимающих усилий по площади смятия.

6.2.8.1.3 Для баз колонн, подверженных совместному действию осевой силы и изгибающего момента, можно принять одну из следующих моделей распределения усилий между опорной плитой и фундаментом, в зависимости от соотношения значений приложенной осевой силы и изгибающего момента:

- если осевая сжимающая сила является доминирующей, сжатие может возникнуть под обеими полками колонны, как показано на Рисунке 6.18 а);
- если растягивающее усилие является доминирующим, растяжение может возникнуть под обеими полками колонны, как показано на Рисунке 6.18 б);
- если изгибающий момент является доминирующим, под одной полкой колонны может возникнуть сжатие, а под другой — растяжение, как показано на Рисунках 6.18 в) и 6.18 г).

6.2.8.1.4 Опорные плиты следует рассчитывать, используя соответствующие методы, приведенные в 6.2.8.2 и 6.2.8.3.

6.2.8.1.5 Несущую способность на действие сдвигающей силы между опорной плитой и фундаментом следует проверить одним из следующих способов:

- расчетом несущей способности узла за счет трения между опорной плитой и фундаментом;
- расчетом несущей способности фундаментных болтов на срез;
- расчетом несущей способности на сдвиг части фундамента, прилегающей к опорной плите.

Если фундаментные болты используются для восприятия сдвигающих усилий между опорной плитой и опорой фундамента, то следует также выполнять проверку прочности бетона на смятие. В неармированных бетонных элементах может быть учтен предел прочности при растяжении бетона в предельном состоянии по несущей способности для поперечного усилия, если при помощи расчета или испытаний подтверждено, что хрупкое разрушение может быть исключено и имеется достаточная несущая способность. Для сечения, в котором действуют поперечное усилие V_{Ed} и нормальное усилие N_{Ed} в зоне сжатия A_{cc} , абсолютные значения составляющих расчетного значения напряжения должны быть приняты следующим образом:

$$\sigma_{cp} = \frac{N_{Ed}}{A_{cc}}, \quad \tau_{cp} = k \cdot \frac{V_{Ed}}{A_{cc}}.$$

ПРИМЕЧАНИЕ Значение k , может быть указано в Национальном Приложении. Рекомендуемое значение равно 1,5.

Как правило, необходимо проверить следующее:

$$\tau_{cp} \leq f_{cvt},$$

причем:

$$\text{если } \sigma_{cp} \leq \sigma_{c,lim}, \text{ то } f_{cvt} = \sqrt{f_{ctd,pl}^2 + \sigma_{cp} f_{ctd,pl}};$$

$$\text{если } \sigma_{cp} > \sigma_{c,lim}, \quad f_{cvt} = \sqrt{f_{ctd,pl}^2 + \sigma_{cp} f_{ctd,pl} - \left(\frac{\sigma_{cp} - \sigma_{c,lim}}{2} \right)^2};$$

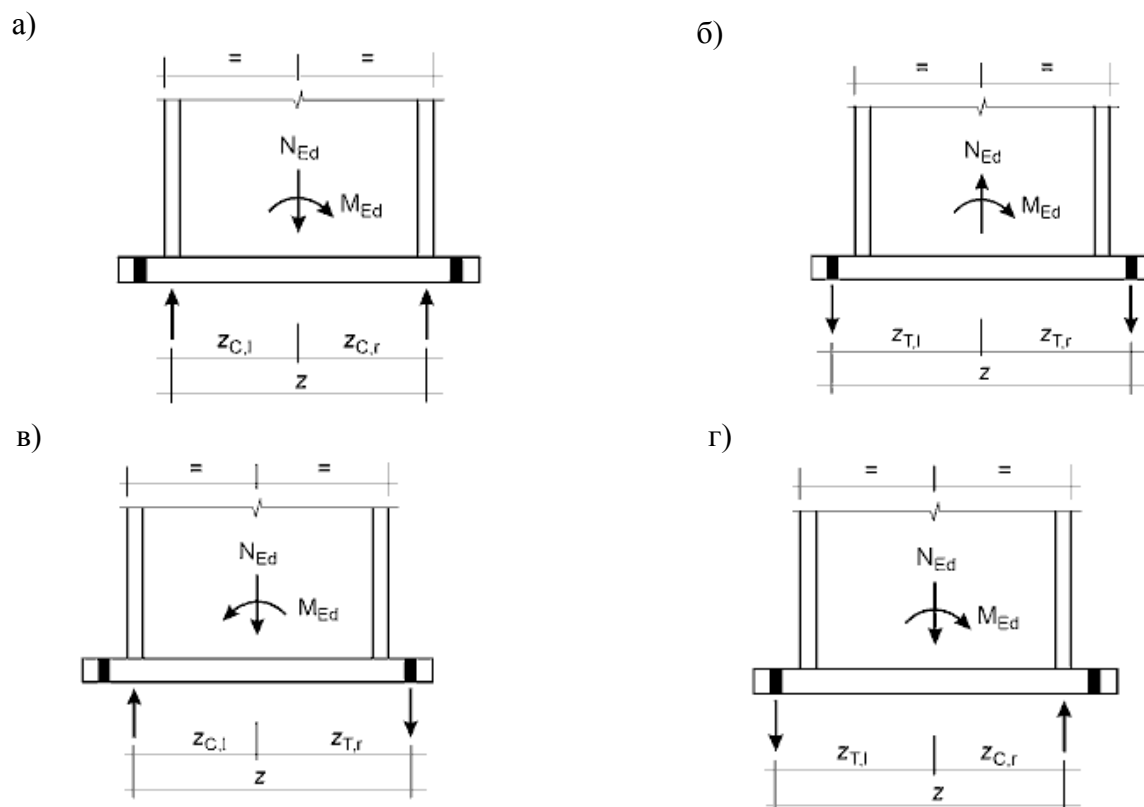
$$\text{где } \sigma_{c,lim} = f_{cd,pl} - 2 \cdot \sqrt{f_{ctd,pl} \cdot (f_{ctd,pl} + f_{cd,pl})},$$

$f_{c,pl}$ — расчетное сопротивление бетона при срезе и сжатии;

$f_{cd,pl}$ — расчетное сопротивление бетона сжатию;

$f_{ctd,pl}$ — расчетное сопротивление бетона растяжению.

Если вышеприведенные способы не подходят, то для передачи усилий сдвига между опорной плитой и фундаментом следует использовать специальные элементы, такие как жесткие упоры или стержневые связи, работающие на сдвиг.

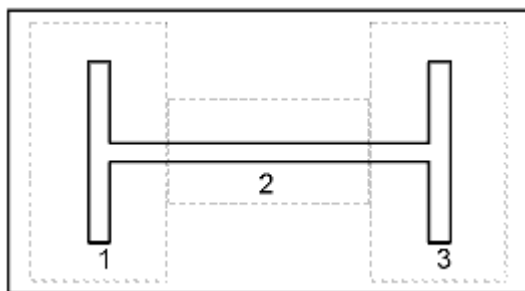


а — крепление базы колонны при наличии определяющей осевой сжимающей силы; б — крепление базы колонны при наличии определяющей осевой растягивающей силы; в — крепление базы колонны при наличии определяющего изгибающего момента; г — крепление базы колонны при наличии определяющего изгибающего момента

Рисунок 6.18 — Определение плеча внутренней пары сил z в базе колонны

6.2.8.2 Базы колонн, подверженные действию осевых сил

6.2.8.2.1 Расчетную несущую способность $N_{j,Rd}$ симметричной опорной плиты базы колонны, подвергающейся центральному сжатию, можно определить, суммируя несущие способности $F_{C,Rd}$ трех отдельных Т-образных элементов, показанных на Рисунке 6.19 (двух Т-образных элементов, расположенных под полками колонны, и одного — под стенкой).



1 — Т-образный элемент 1; 2 — Т-образный элемент 2; 3 — Т-образный элемент 3

Рисунок 6.19 — Т-образные элементы, не перекрывающие друг друга

6.2.8.3 Базы колонн, подверженные действию осевых сил и изгибающих моментов

6.2.8.3.1 Расчетную несущую способность $M_{j,Rd}$ базы колонны, подверженной действию осевой силы и изгибающего момента, следует определять по Таблице 6.7, где работа бетона на сжатие под плитой, расположенной непосредственно под стенкой колонны (Т-образный элемент 2 на Рисунке 6.19), не учитывается. При этом используются следующие параметры:

— $F_{T,l,Rd}$ — расчетная несущая способность узла на растяжение с левой стороны, см. 6.2.8.3(2);

— $F_{T,r,Rd}$ — расчетная несущая способность узла на растяжение с правой стороны, см. 6.2.8.3(3);

— $F_{C,l,Rd}$ — расчетная несущая способность узла на сжатие с левой стороны, см. 6.2.8.3(4);

— $F_{C,r,Rd}$ — расчетная несущая способность узла на сжатие с правой стороны, см. 6.2.8.3(5).

6.2.8.3.2 Расчетную несущую способность узла на растяжение с левой стороны $F_{T,l,Rd}$ следует принимать равной наименьшему значению из несущих способностей следующих основных компонентов:

— растянутой стенки колонны, расположенной под левой полкой колонны, $F_{t,wc,Rd}$, см. 6.2.6.3;

— изгибаемой опорной плиты, расположенной под левой полкой колонны, $F_{t,pl,Rd}$, см. 6.2.6.11.

6.2.8.3.3 Расчетную несущую способность узла на растяжение с правой стороны $F_{T,r,Rd}$ следует принимать равной наименьшему значению из несущих способностей следующих основных компонентов:

— растянутой стенки колонны, расположенной под правой полкой колонны, $F_{t,wc,Rd}$, см. 6.2.6.3;

— изгибаемой опорной плиты, расположенной под правой полкой колонны, $F_{t,pl,Rd}$, см. 6.2.6.11.

6.2.8.3.4 Расчетную несущую способность узла на сжатие с левой стороны $F_{C,1,Rd}$ следует принимать равной наименьшему значению из несущих способностей следующих основных компонентов:

- сжатого бетона, расположенного под левой полкой колонны, $F_{c,pl,Rd}$, 6.2.6.9;
- сжатых левой полки колонны и стенки $F_{c,fc,Rd}$, см. 6.2.6.7.

6.2.8.3.5 Расчетную несущую способность узла на сжатие с правой стороны $F_{C,r,Rd}$ следует принимать равной наименьшему значению из несущих способностей следующих основных компонентов:

- сжатого бетона, расположенного под правой полкой колонны, $F_{c,pl,Rd}$, см. 6.2.6.9;
- сжатых правой полки колонны и стенки $F_{c,fc,Rd}$, см. 6.2.6.7.

6.2.8.3.6 Значения $z_{T,1}$, $z_{C,1}$, $z_{T,r}$, $z_{C,r}$ следует определять согласно 6.2.8.1.

Таблица 6.7 — Расчетная несущая способность по моменту $M_{j,Rd}$ баз колонн

Вид загрузки базы	Плечо внутренней пары сил z	Расчетная несущая способность по моменту $M_{j,Rd}$	
Левая сторона растянута	$z = z_{T,1} + z_{C,r}$	$N_{Ed} > 0$ и $e > z_{T,1}$	$N_{Ed} \leq 0$ и $e \leq -z_{C,r}$
Правая сторона сжата		Наименьшее из значений $\frac{F_{T,1,Rd}z}{z_{C,r}/e + 1}$ и $\frac{-F_{C,r,Rd}}{z_{T,1}/e - 1}$	
Левая сторона растянута	$z = z_{T,1} + z_{T,r}$	$N_{Ed} > 0$ и $0 < e < z_{T,1}$	$N_{Ed} > 0$ и $z_{T,r} < e \leq 0$
Правая сторона растянута	$z = z_{C,1} + z_{T,r}$	Наименьшее из значений $\frac{F_{T,1,Rd}z}{z_{T,r}/e + 1}$ и $\frac{F_{T,r,Rd}z}{z_{T,1}/e - 1}$	Наименьшее из значений $\frac{F_{T,1,Rd}z}{z_{T,r}/e + 1}$ и $\frac{F_{T,1,Rd}z}{z_{T,1}/e - 1}$
Левая сторона сжата	$z = z_{C,1} + z_{T,r}$	$N_{Ed} > 0$ и $e \leq -z_{T,r}$	$N_{Ed} \leq 0$ и $e > z_{C,1}$
Правая сторона растянута		Наименьшее из значений $\frac{-F_{C,1,Rd}z}{z_{T,r}/e + 1}$ и $\frac{F_{T,r,Rd}z}{z_{C,1}/e - 1}$	
Левая сторона сжата	$z = z_{C,1} + z_{C,r}$	$N_{Ed} \leq 0$ и $0 < e < z_{C,1}$	$N_{Ed} \leq 0$ и $z_{C,r} < e \leq z_{C,1}$
Правая сторона сжата		Наименьшее из значений $\frac{-F_{C,1,Rd}z}{z_{C,r}/e + 1}$ и $\frac{F_{C,r,Rd}z}{z_{C,1}/e - 1}$ $\frac{-F_{C,1,Rd}z}{z_{C,r}/e + 1}$ и $\frac{-F_{C,r,Rd}z}{z_{C,1}/e - 1}$	
$M_{Ed} > 0$ соответствует направлению момента по часовой стрелке, $N_{Ed} > 0$ при растяжении. $e = \frac{M_{Ed}}{N_{Ed}} = \frac{M_{Rd}}{N_{Rd}}$			

6.3 Вращательная жесткость

6.3.1 Базовая модель

6.3.1.1. Вращательную жесткость узла следует определять, исходя из изгибных жесткостей его основных компонентов, каждая из которых представлена коэффициентом упругой жесткости k_i , определяемым по 6.3.2.

ПРИМЕЧАНИЕ Эти коэффициенты упругой жесткости предназначены для общего применения.

6.3.1.2 Для болтовых узловых соединений с опорным фланцем, прикрепляемым более чем одним рядом растянутых болтов, коэффициенты жесткости k_i для соответствующих основных компонентов следует определять комбинированием их значений. Для сопряжений балки с колонной и стыков балок следует применять метод, приведенный в 6.3.3, а для баз колонн — метод, приведенный в 6.3.4.

6.3.1.3 В болтовом узловом соединении с опорным фланцем, прикрепленным более, чем одним рядом растянутых болтов, с целью упрощения расчета работой одного из рядов болтов можно пренебречь, при условии, что при расчете не учитывают работу всех остальных рядов болтов, ближайших к центру сжатия. Количество оставшихся рядов болтов не обязательно должно быть таким же, что и при определении расчетной несущей способности соединения на действие изгибающего момента.

6.3.1.4 Если осевая сила, действующая на присоединенный элемент, не превышает 5 % расчетной несущей способности $N_{pl,Rd}$ его поперечного сечения, то вращательную жесткость S_j сопряжения балки с колонной или стыка балок при действии момента $M_{j,Ed}$, меньшего расчетной несущей способности узла на действие изгибающего момента $M_{j,Rd}$, можно с достаточной точностью определить по формуле:

$$S_j = \frac{Ez^2}{\mu \cdot \sum_i \frac{1}{k_i}}, \quad (6.27)$$

где k_i — коэффициент жесткости для основного компонента узла i ;

z — плечо внутренней пары сил, см. 6.2.7;

μ — отношение жесткостей $S_{j,ini} / S_j$, см. 6.3.1(6).

ПРИМЕЧАНИЕ Начальная вращательная жесткость $S_{j,ini}$ определяется по выражению (6.27) при $\mu = 1,0$.

6.3.1.5 Вращательную жесткость S_j базы колонны при действии изгибающего момента $M_{j,Ed}$, меньшего расчетной несущей способности узла на действие изгибающего момента $M_{j,Rd}$, можно с достаточной точностью определить из 6.3.4.

6.3.1.6 Коэффициент жесткости μ следует определять следующим образом:

— если $M_{j,Ed} \leq 2/3 M_{j,Rd}$, то $\mu = 1$; (6.28a)

— если $2/3 M_{j,Rd} < M_{j,Ed} \leq M_{j,Rd}$, то $\mu = (1,5 M_{j,Ed} / M_{j,Rd})^{\psi}$, (6.286)

где коэффициент μ определяется по Таблице 6.8.

Таблица 6.8 — Значения коэффициента μ

Тип соединения	μ
Сварное	2,7
Болтовое с опорным фланцем	2,7
Болтовое с поясной уголковой накладкой	3,1
Соединение опорной плиты базы	2,7

6.3.1.7 Основные компоненты, которые следует учитывать при определении жесткости сварного сопряжения балки с колонной и узлового соединения с поясными уголковыми накладками на болтах, приведены в Таблице 6.9. Основные компоненты болтового соединения с опорным фланцем и опорной плитой приведены в Таблице 6.10. Для обеих таблиц значения коэффициентов k_i для основных компонентов следует определять по Таблице 6.11.

Таблица 6.9 — Узловые сварные соединения и болтовые соединения с поясной уголковой накладкой

Сварное сопряжение балки с колонной		Коэффициенты жесткости k_i , принимаемые в расчете
Одностороннее		$k_1; k_2; k_3$
Двустороннее — при действии моментов, равных по значению и противоположных по направлению		$k_2; k_3$
Двустороннее — при действии неравных по значению моментов		$k_1; k_2; k_3$
Сопряжение балки с колонной на болтах и поясной уголковой накладке		Коэффициенты жесткости k_i , принимаемые в расчете
Одностороннее		$k_1; k_2; k_3; k_4; k_6; k_{10}; k_{11}^*; k_{12}^{**}$
Двустороннее — при действии моментов, равных по значению и противоположных по направлению		$k_2; k_3; k_4; k_6; k_{10}; k_{11}^*; k_{12}^{**}$
Двустороннее — при действии неравных по значению моментов		$k_1; k_2; k_3; k_4; k_6; k_{10}; k_{11}^*; k_{12}^{**}$
Моменты, равные по абсолютной величине и противоположные по направлению	Неравные моменты	* Два коэффициента k_{11} , по одному — для каждой полки. ** Четыре коэффициента k_{12} , по одному — для каждой полки и для каждой накладки
		

Таблица 6.10 — Болтовые соединения фланца и опорной плиты колонны

Сопряжение балки с колонной на болтах и фланце	Количество рядов растянутых болтов	Коэффициенты жесткости k_i , принимаемые в расчете
Одностороннее	Один	$k_1; k_2; k_3; k_4; k_5; k_{10}$
	Два и более	$k_1; k_2; k_{eq}$
Двустороннее — при действии моментов, равных по значению и противоположных по направлению	Один	$k_2; k_3; k_4; k_5; k_{10}$
	Два и более	$k_2; k_{eq}$
Двустороннее — при действии не равных по значению моментов	Один	$k_1; k_2; k_3; k_4; k_5; k_{10}$
	Два и более	$k_1; k_2; k_{eq}$
Стык балок на болтах и фланцами	Количество рядов растянутых болтов	Коэффициенты жесткости k_i , принимаемые в расчете
Двустороннее — при действии моментов, равных по значению и противоположны по направлению	Один	k_5 [слева]; k_5 [справа]; k_{10}
	Два и более	k_{eq}
Соединения опорной плиты базы	Количество рядов растянутых болтов	Коэффициенты жесткости k_i , принимаемые в расчете
Соединения опорной плиты базы	Один	$k_{13}; k_{15}; k_{16}$
	Два и более	$k_{13}; k_{15}$ и k_{16} для каждого ряда болтов

Таблица 6.11 — Коэффициенты жесткости для основных компонентов узлов

Компонент	Коэффициент жесткости k_i	
Участок стенки колонны при сдвиге	Нежесткое одностороннее соединение или двустороннее соединение балок одинаковой высоты	Жесткое соединение
	$k_1 = \frac{0,38A_{vc}}{\beta z}$	$k_1 = \infty$
	z — плечо внутренней пары сил, см. Рисунок 6.15; β — коэффициент трансформации, см. 5.3(7)	
Стенка колонны при сжатии	Нежесткое соединение	Жесткое соединение
	$k_2 = \frac{0,7b_{eff,c,wc}t_{wc}}{d_c}$	$k_2 = \infty$
	$b_{eff,c,wc}$ — эффективная ширина, см. 6.2.6.2	
Стенка колонны при растяжении	Жесткое или нежесткое болтовое соединение с одним рядом болтов или нежесткое сварное соединение	Жесткое сварное соединение
	$k_3 = \frac{0,7b_{eff,t,wc}t_{wc}}{d_c}$	$k_3 = \infty$

Таблица 6.11 — Коэффициенты жесткости для основных компонентов узлов
(продолжение)

Компонент	Коэффициент жесткости k_i	
	$b_{\text{eff},t,wc}$ — эффективная ширина стенки колонны при растяжении, согласно 6.2.6.3. В узле с одним рядом растянутых болтов значение $b_{\text{eff},t,wc}$ следует принимать равным наименьшему из значений эффективных длин l_{eff} (для узла с одним рядом болтов, рассматривая его изолированно от других рядов или как часть группы рядов болтов), приведенных для рассматриваемого ряда болтов в Таблице 6.4 (при неподкрепленной полке колонны) или в Таблице 6.5 (при подкрепленной полке колонны)	
Полка колонны при изгибе (для одного ряда растянутых болтов)	$k_4 = \frac{0,9 l_{\text{eff}}^3 t_{fc}^3}{m^3},$ l_{eff} — наименьшая из эффективных длин (для соединения с одним рядом болтов, рассматривая его изолированно от других рядов или как часть группы рядов болтов), приведенная для рассматриваемого ряда болтов в Таблице 6.4 (при неподкрепленной полке колонны) или по Таблице 6.5 (при подкрепленной полке колонны); m — см. Рисунок 6.8	
Опорный фланец при изгибе (для одного ряда растянутых болтов)	$k_5 = \frac{0,9 l_{\text{eff}}^3 t_p^3}{m^3},$ l_{eff} — наименьшая из эффективных длин (для соединения с одним рядом болтов, рассматривая его изолированно от других рядов или как часть группы рядов болтов), приведенная для рассматриваемого ряда болтов в Таблице 6.6; m — в общем случае определяется по кривым на Рисунке 6.11, но для ряда болтов, расположенного на выступающей части опорного фланца, $m = m_x$, где m_x принимается по Рисунку 6.10	
Поясная накладка при изгибе	$k_6 = \frac{0,9 l_{\text{eff}}^3 t_a^3}{m^3},$ l_{eff} — эффективная длина поясной накладки, определяемая по Рисунку 6.12; m — см. Рисунок 6.13	
Болты при растяжении (для одного ряда болтов)	$k_{10} = 1,6 A_s / L_b$, с предварительным натяжением или без L_b — удлинение болта длиной, равной зажимной длине (общая толщина материала стягиваемых элементов и шайб) плюс полсуммы высоты головки болта и гайки	
Болты при срезе	Без предварительного натяжения	С предварительным натяжением*
	$k_{11} \text{ (или } k_{17}) = \frac{16 n_b d^2 f_{ub}}{E d_{M16}}$	$k_{11} = \infty$
	d_{M16} — номинальный диаметр болта M16; n_b — количество рядов болтов, работающих при срезе.	

Таблица 6.11 — Коэффициенты жесткости для основных компонентов узлов
(продолжение)

Болты при смятии (для каждого компонента j , который сминается болтом)	Без предварительного натяжения	С предварительным натяжением*
	k_{12} (или k_{18}) = $\frac{24n_b k_b k_t d f_u}{E}$	$k_{12} = \infty$
	$k_b = k_{b1}$, но $k_b \leq k_{b2}$ $k_{b1} = 0,25e_b / d + 0,5$, но $k_{b1} \leq 1,25$ $k_{b2} = 0,25p_b / d + 0,375$, но $k_{b2} \leq 1,25$ $k_t = 1,5t_j / d_{M16}$, но $k_t \leq 2,5$	e_b —расстояние от ряда болтов до свободного края пластины вдоль усилия; f_u —временное сопротивление стали пластины на растяжение; p_b — шаг рядов болтов вдоль усилия; t_j —толщина рассматриваемого компонента
Бетон (включая стяжку) при сжатии	$k_{13} = \frac{E_c \cdot \sqrt{b_{eff} l_{eff}}}{1,275E}$, b_{eff} — эффективная ширина полки Т-образного элемента, см. 6.2.5(3); l_{eff} — эффективная длина полки Т-образного элемента, см. 6.2.5(3)	
Пластина, изгибаемая под действием сжимающего усилия	$k_{14} = \infty$ Этот коэффициент уже учтен при вычислении коэффициента жесткости k_{13}	
Опорная плита базы колонны, изгибаемая от действия реактивного давления фундамента	С учетом усилий от эффекта рычага**	Без учета усилий от эффекта рычага**
	$k_{15} = \frac{0,85l_{eff} t_3^3}{m^3}$	$k_{15} = \frac{0,425l_{eff} t_3^3}{m^3}$
	l_{eff} — эффективная длина полки Т-образного элемента, см. 6.2.5(3); t_p — толщина опорной плиты базы; m — см. Рисунок 6.8	
Фундаментные болты при растяжении	С учетом усилий от эффекта рычага**	Без учета усилий от эффекта рычага**
	$k_{16} = 1,6 A_s / L_b$	$k_{16} = 2,0 A_s / L_b$
	L_b — удлинение фундаментного болта, равное сумме восьми номинальных диаметров болта, толщины слоя стяжки, толщины опорной плиты, шайбы и половины высоты гайки	

Таблица 6.11 — Коэффициенты жесткости для основных компонентов узлов
(продолжение)

*	При условии, что болты рассчитаны таким образом, чтобы исключить сдвиг между соединяемыми элементами при заданном уровне нагрузки.
**	Усилия от эффекта рычага могут возникнуть, если $L_b \leq \frac{8,8m^3 A_s}{l_{\text{eff}} t^3}.$
ПРИМЕЧАНИЕ 1 При вычислении b_{eff} и l_{eff} расстояние c следует принимать равным 1,25 толщины опорной плиты.	
ПРИМЕЧАНИЕ 2 Допускается, что контрплиты не влияют на вращательную жесткость S_j узла.	
ПРИМЕЧАНИЕ 3 Для сварных швов (k_{19}) коэффициент жесткости следует принимать равным бесконечности. Этот компонент не следует учитывать при определении вращательной жесткости S_j .	
ПРИМЕЧАНИЕ 4 Для полки и стенки балки при сжатии (k_7), стенки балки при растяжении (k_8), плиты при растяжении или сжатии (k_9), балок с вутами (k_{20}) коэффициенты жесткости следует принимать равными бесконечности. Эти компоненты не следует учитывать при расчете вращательной жесткости S_j .	
ПРИМЕЧАНИЕ 5 При усилении стенки накладками, коэффициенты жесткости для соответствующих основных компонентов узлов $k_1 - k_3$ должны быть увеличены следующим образом:	
— для участка стенки колонны, работающего на сдвиг, коэффициент k_1 должен определяться с использованием увеличенной площади сдвига A_{vc} , определяемой по 6.2.6.1(6);	
— для стенки колонны при сжатии коэффициент k_2 должен определяться с использованием эффективной толщины стенки, определяемой по 6.2.6.2(6);	
— для стенки колонны при растяжении коэффициент k_3 должен определяться с использованием эффективной толщины стенки, определяемой по 6.2.6.3(8).	

6.3.1.8 Для определения жесткости сопряжения балки с колонной с опорным фланцем следует применять следующую процедуру. Значения коэффициента эквивалентной жесткости k_{eq} и эквивалентного плеча внутренней пары сил z_{eq} сопряжения определяют по 6.3.3. Используя коэффициенты жесткости k_{eq} (для сопряжения) и k_1 (для стенки колонны, работающей на сдвиг), а также плечо внутренней пары сил z , принимаемое равным эквивалентному плечу внутренней пары сил z_{eq} , определяют жесткость сопряжения, согласно 6.3.1(4).

6.3.2 Коэффициенты жесткости для основных компонентов узлов

Коэффициенты жесткости для основных компонентов узлов следует определять по Таблице 6.11.

6.3.3 Узлы с опорными фланцами, прикрепляемыми двумя и более рядами растянутых болтов

6.3.3.1 Общий метод

6.3.3.1.1 Для всех основных компонентов узлов с опорным фланцем, прикрепляемым двумя и более рядами растянутых болтов, применяют общий эквивалентный коэффициент жесткости k_{eq} , определяемый по формуле:

$$k_{eq} = \frac{\sum_r k_{eff,r} h_r}{z_{eq}}, \quad (6.29)$$

где h_r — расстояние между рядом болтов r и центром сжатия;

$k_{eff,r}$ — эффективный коэффициент жесткости для ряда болтов r , учитывающий коэффициенты жесткости k_i для основных компонентов, перечисленных в 6.3.3.1(4) или 6.3.3.1(5);

z_{eq} — эквивалентное плечо внутренней пары сил, см. 6.3.3.1(3).

6.3.3.1.2 Эффективный коэффициент жесткости $k_{eff,r}$ для ряда болтов r следует определять по формуле:

$$k_{eff,r} = \frac{1}{\sum_i \frac{1}{k_{i,r}}}, \quad (6.30)$$

где $k_{i,r}$ — коэффициент жесткости компонента i относящегося к ряду болтов r .

6.3.3.1.3 Эквивалентное плечо внутренней пары сил z_{eq} следует определять по формуле:

$$z_{eq} = \frac{\sum_r k_{eff,r} h_r^2}{\sum_r k_{eff,r} h_r}. \quad (6.31)$$

6.3.3.1.4 В сопряжении балки с колонной с опорным фланцем значение k_{eq} следует определять на основе коэффициентов жесткости k_i (и заменять их) следующих основных компонентов:

- стенки колонны при растяжении (k_3);
- полки колонны при изгибе (k_4);
- опорного фланца при изгибе (k_5);
- болтов при растяжении (k_{10}).

6.3.3.1.5 В стыке балок с опорными фланцами на болтах значение k_{eq} следует определять на основе коэффициентов жесткости k_i (и заменять их) следующих основных компонентов:

- опорных фланцев при изгибе (k_5);
- болтов при растяжении (k_{10}).

6.3.3.2 Упрощенный метод для выступающих опорных фланцев с двумя рядами растянутых болтов

6.3.3.2.1 В соединениях с выступающим опорным фланцем с двумя рядами растянутых болтов (один ряд расположен в выступающей части опорного фланца, а другой — между полками балки, см. Рисунок 6.20), для учета совместной работы обоих рядов можно использовать модифицированные значения коэффициентов жесткости соответствующих основных компонентов. Каждое из этих модифицированных значений следует принимать равным удвоенному значению коэффициента жесткости для одного ряда болтов, расположенного в выступающей части опорного фланца.

ПРИМЕЧАНИЕ Эта приближенная предпосылка приводит к незначительному занижению значения вращательной жесткости.

6.3.3.2.2 При использовании этого упрощенного метода значение плеча внутренней пары сил z принимают равным расстоянию между центром сжатия и серединой расстояния между рядами растянутых болтов, см. Рисунок 6.20.

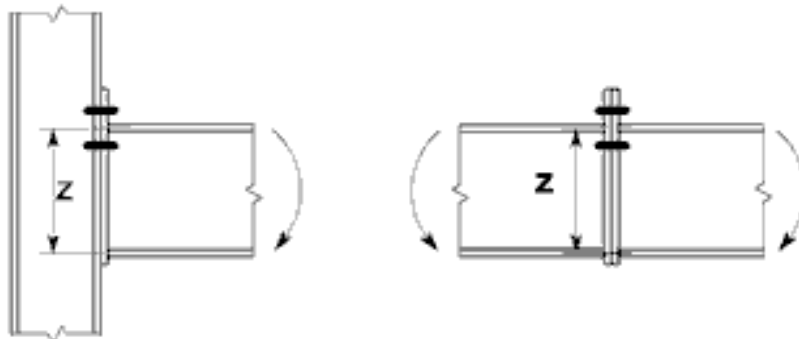


Рисунок 6.20 — Плечо внутренней пары сил z для упрощенного метода

6.3.4 Базы колонн

6.3.4.1 Вращательную жесткость S_j базы колонны, подверженной совместному действию осевой силы и изгибающего момента, следует определять по методу, приведенному в Таблице 6.12. В этом методе используются следующие коэффициенты жесткости:

$k_{T,l}$ — коэффициент жесткости при растяжении левой стороны узла, равный сумме коэффициентов жесткости k_{15} и k_{16} (приведенных в Таблице 6.11) и принимаемый для левой стороны узла;

$k_{T,r}$ — коэффициент жесткости при растяжении правой стороны узла, равный сумме коэффициентов жесткости k_{15} и k_{16} (приведенных в Таблице 6.11) и принимаемый для правой стороны узла;

$k_{C,l}$ — коэффициент жесткости при сжатии левой стороны узла, равный коэффициенту жесткости k_{13} (приведенному в Таблице 6.11) и принимаемый для левой стороны узла;

$k_{C,r}$ — коэффициент жесткости при сжатии правой стороны узла, равный коэффициенту жесткости k_{13} (приведенному в Таблице 6.11) и принимаемый для правой стороны узла.

6.3.4.2 Значения $z_{T,1}$, $z_{C,1}$, $z_{T,r}$, $z_{C,r}$ следует принимать согласно 6.2.8.1.

Таблица 6.12 — Вращательная жесткость S_j баз колонн

Вид загрузки	Плечо внутренней пары сил z	Вращательная жесткость $S_{j,ini}$	
Левая сторона растянута	$z = z_{T,1} + z_{C,r}$	$N_{Ed} > 0$ и $e > z_{T,1}$	$N_{Ed} \leq 0$ и $e \leq -z_{C,r}$
Правая сторона сжата		$\frac{Ez^2}{\mu \cdot (1/k_{T,1} + 1/k_{C,r})} \cdot \frac{e}{e + e_k}$, где $e_k = \frac{z_{C,r}k_{C,r} - z_{T,1}k_{T,1}}{k_{T,1} + k_{C,r}}$	
Левая сторона растянута	$z = z_{T,1} + z_{T,r}$	$N_{Ed} > 0$ и $0 < e < z_{T,1}$	$N_{Ed} > 0$ и $-z_{T,r} < e \leq 0$
Правая сторона растянута		$\frac{Ez^2}{\mu \cdot (1/k_{T,1} + 1/k_{T,r})} \cdot \frac{e}{e + e_k}$, где $e_k = \frac{z_{T,r}k_{T,r} - z_{T,1}k_{T,1}}{k_{T,1} + k_{T,r}}$	
Левая сторона сжата	$z = z_{C,1} + z_{T,r}$	$N_{Ed} > 0$ и $e \leq -z_{T,r}$	$N_{Ed} \leq 0$ и $e > z_{C,1}$
Правая сторона растянута		$\frac{Ez^2}{\mu \cdot (1/k_{C,1} + 1/k_{T,r})} \cdot \frac{e}{e + e_k}$, где $e_k = \frac{z_{T,r}k_{T,r} - z_{C,1}k_{C,1}}{k_{C,1} + k_{T,r}}$	
Левая сторона сжата	$z = z_{C,1} + z_{C,r}$	$N_{Ed} \leq 0$ и $0 < e < z_{C,1}$	$N_{Ed} \leq 0$ и $z_{C,r} < e \leq 0$
Правая сторона сжата		$\frac{Ez^2}{\mu \cdot (1/k_{C,1} + 1/k_{C,r})} \cdot \frac{e}{e + e_k}$, где $e_k = \frac{z_{C,r}k_{C,r} - z_{C,1}k_{C,1}}{k_{C,1} + k_{C,r}}$	
$M_{Ed} > 0$ соответствует направлению момента по часовой стрелке, $N_{Ed} > 0$ при растяжении, μ — см. 6.3.1(6). $e = \frac{M_{Ed}}{N_{Ed}} = \frac{M_{Rd}}{N_{Rd}}$			

6.4 Вращательная способность

6.4.1 Общие положения

6.4.1.1 В случае проведения жестко-пластического статического расчета, узел в месте образования пластического шарнира должен иметь достаточную вращательную способность.

6.4.1.2 Вращательную способность болтового или сварного узлового соединения следует определять, используя положения, приведенные в 6.4.2 или 6.4.3. Методы расчета, приведенные в этих пунктах, применимы только для сталей S235, S275, S355 и для узлов, в которых расчетное значение осевой силы N_{Ed} , действующей в присоединяемом элементе,

не превышает 5 % расчетной несущей способности в пластической стадии $N_{pl,Rd}$ его поперечного сечения.

6.4.1.3 В качестве альтернативы 6.4.2 и 6.4.3, вращательную способность узла проверять не следует при условии, что расчетная несущая способность $M_{j,Rd}$ узлового соединения, по крайней мере, в 1,2 раза выше расчетной несущей способности в пластической стадии $M_{pl,Rd}$ поперечного сечения присоединяемого элемента.

6.4.1.4 В случаях, не предусмотренных в 6.4.2 и 6.4.3, вращательную способность можно определить по результатам испытаний по непосредственному определению несущей способности или эксплуатационной пригодности несущих конструкций, или их элементов для определенных условий нагрузок. Такие испытания могут, например, проводиться для пожарной нагрузки, нагрузок, приводящих к явлениям усталости, или нагрузок от ударов. В качестве альтернативы можно использовать соответствующие расчетные модели, но при условии, что они основаны на результатах следующих испытаний:

а) испытания по установлению показателей строительных материалов при определенных испытательных условиях, например, исследования грунта на строительной площадке или в лаборатории или испытания с новыми строительными материалами;

б) испытания по уменьшению погрешностей при воздействиях или при вызванных ими влияниях, например, аэродинамические испытания или испытания по определению волновых нагрузок или нагрузок от потоков;

в) испытания по уменьшению погрешностей определенных величин моделей сопротивления, например, испытания элементов конструкции или испытания групп элементов конструкции (например, конструкции кровель и перекрытий);

г) контрольные испытания по проверке качества поставляемых изделий или соответствия показателей изделий, например, испытание канатов для мостов или испытание бетонных кубиков;

д) испытания во время производства работ для подтверждения показателей после монтажа, например, испытание опор или испытание усилия канатов во время производства работ;

е) контрольные испытания для более точного определения показателей несущей конструкции или ее частей после изготовления, например, для определения упругой деформации, собственных колебаний или амортизации;

6.4.2 Болтовые узловые соединения

6.4.2.1 Сопряжение балки с колонной, расчетная несущая способность которого $M_{j,Rd}$ зависит от расчетной несущей способности участка стенки колонны на сдвиг, можно считать обладающим достаточной вращательной способностью при пластическом статическом расчете, при условии, что $d/t_w \leq 69\epsilon$.

6.4.2.2 Узел с опорным фланцем или поясной уголкового накладкой, прикрепляемых на болтах, можно считать обладающим достаточной вращательной способностью при пластическом статическом расчете, если выполняются следующие условия:

а) расчетная несущая способность на изгиб зависит от расчетной несущей способности:

- полки колонны при изгибе,
- опорного фланца балки или растянутой поясной накладки при изгибе;

б) толщина t полки колонны, опорного фланца балки или растянутой поясной накладки (не обязательно того же основного компонента, упомянутого в условии а)) удовлетворяет условию

$$t \leq 0,36d \cdot \sqrt{f_{ub}/f_y}, \quad (6.32)$$

где f_y — предел текучести стали соответствующего основного компонента.

6.4.2.3 Не допускается считать, что болтовое узловое соединение обладает достаточной вращательной способностью при пластическом статическом расчете, если его расчетная несущая способность $M_{j,Rd}$ зависит от расчетной несущей способности болтов на срез.

6.4.3 Сварные узловые соединения

6.4.3.1 Можно считать, что сварное сопряжение балки с колонной обладает вращательной способностью ϕ_{Cd} не меньшей, чем полученное по нижеследующей формуле при условии, что стенка колонны подкреплена при сжатии, но не подкреплена при растяжении, и ее расчетная несущая способность по моменту не зависит от расчетной несущей способности участка стенки колонны на сдвиг, см. 6.4.2(1):

$$\phi_{Cd} = 0,25 h_c / h_b, \quad (6.33)$$

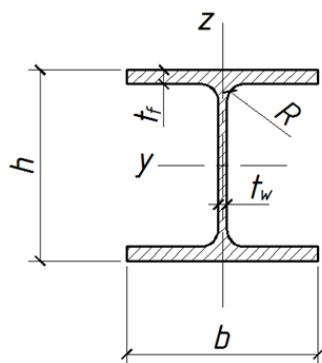
где h_b — высота балки;

h_c — высота колонны.

6.4.3.2 Можно считать, что сварное сопряжение балки с колонной, рассчитанное с учетом требований настоящего раздела, обладает вращательной способностью, соответствующей углу поворота не менее 0,015 рад.

ПРИМЕР 19 Расчет по определению толщины опорной металлической плиты размерами 440×440 мм под колонну из прокатного профиля НЕВ 260

Исходные данные: определить толщину опорной металлической плиты размерами 440×440 мм под колонну из прокатного профиля НЕВ 260. Сопряжение колонны с фундаментом — шарнирное. На колонну действует осевое сжимающее усилие $N_{Ed} = 1253$ кН. Фундамент и подливка под колонну изготовлены из бетона марки C25/30 с номинальной прочностью на сжатие $f_{ck} = 30$ МПа = 30 Н/мм². Колонна и опорная плита изготовлена из стали марки S275 с номинальным пределом текучести $f_y = 275$ Н/мм².



- высота $h = 260,0\text{мм}$
- ширина $b = 260,0\text{мм}$
- толщина стенки $t_w = 10,0\text{мм}$
- толщина полки $t_f = 17,5\text{мм}$
- радиус закругления $r = 24,0\text{мм}$
- высота стенки $d = 177,0\text{мм}$
- площадь поперечного сечения $A = 11840\text{мм}^2$
- периметр сечения $P = 1500\text{мм}$

Рисунок 1 - Геометрические характеристики

2 Определение геометрических характеристик

Точных указаний по расчету сопряжения колонны с бетонным фундаментом через стальную опорную плиту в СН РК EN 1993-1-8 не дается.

Расчет ведется по указаниям Пункта 6.2.5 СН РК EN 1993-1-8, но с учетом того, что на сжатие работает не только эквивалентный Т-образный элемент, а все сечение двутавра.

Эффективная площадь передачи нагрузки с колонны на фундамент через опорную плиту определяется из условия прочности бетона при сжатии (см. Пункт 3.1.6 СН РК EN 1992-1-1).

Расчетное сопротивление бетона на сжатие определяется по Формуле (3.15) СН РК EN 1992-1-1:

$$f_{cd} = \frac{\alpha_{cc} f_{ck}}{\gamma_c} \quad (3.15)$$

где α_{cc} - коэффициент, учитывающий влияние длительных эффектов на прочность и неблагоприятных эффектов в результате неблагоприятного способа приложения нагрузки равный по НП 2.12.СН РК EN 1992-1-1:

$$\alpha_{cc} = 1,0$$

γ_c - коэффициент, учитывающий влияние длительных эффектов на прочность и неблагоприятных эффектов в результате неблагоприятного способа приложения нагрузки, равный по Таблице 2.1N СН РК EN 1992-1-1:

$$\gamma_c = 1,5$$

f_{ck} - характеристическая цилиндрическая прочность при сжатии, определяемая по Таблице 3.1 СН РК EN 1992-1-1:

$$f_{ck} = 30\text{МПа}$$

Значит,

$$f_{cd} = \frac{\alpha_{cc} f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{1,0 \cdot 30}{1,5} = 20\text{МПа}$$

Эффективная площадь передачи сжимающего усилия с колонны на бетон через опорную пластину:

$$A_{eff} = \frac{N_{Ed}}{f_{cd}} = \frac{1253 \cdot 10^3}{16} = 78310\text{мм}^2$$

Ширина с определяется из равенства:

$$A_{eff} = 4c^2 + P \cdot c + A$$

$$78310 = 4c^2 + 1500c + 11840$$

Значит,

$$c = 40\text{мм}$$

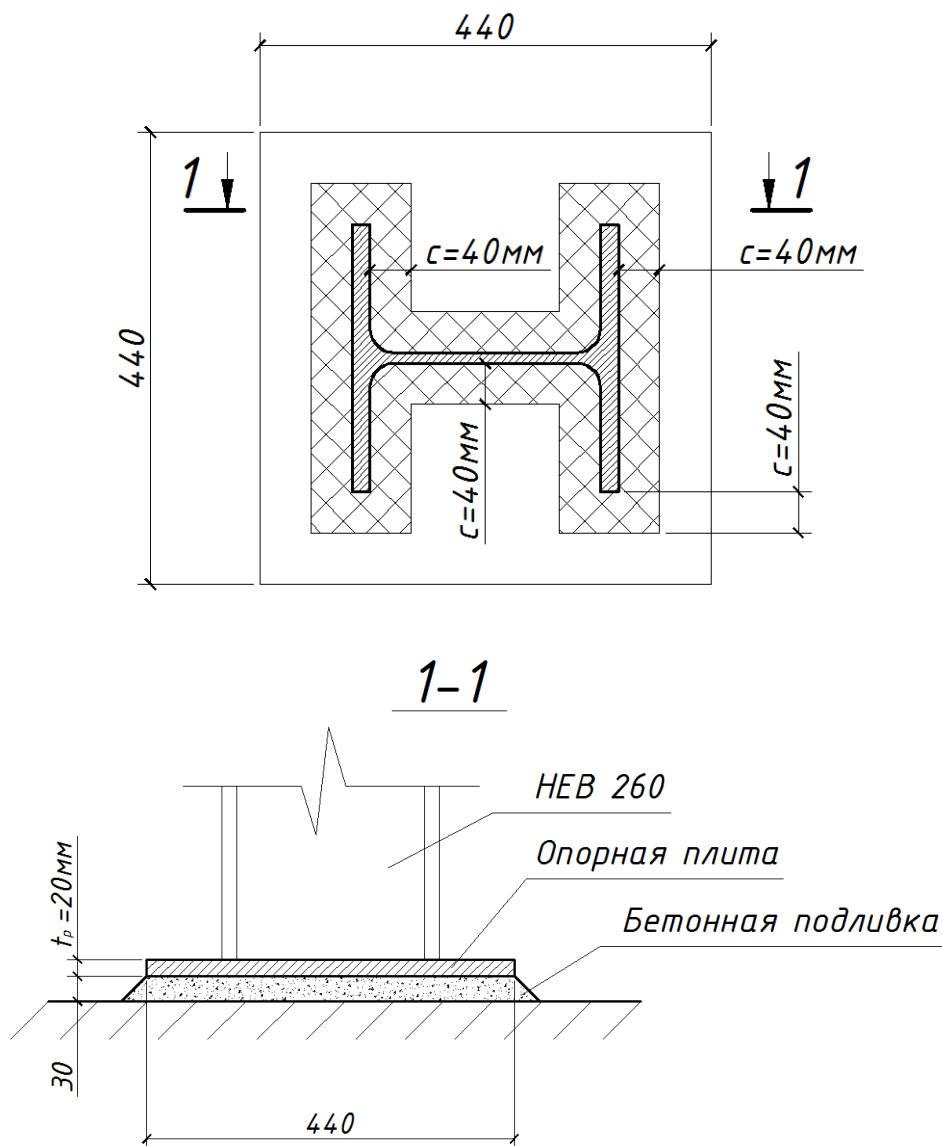


Рисунок 1 - Опорная часть колонны

Расчет толщины опорной металлической плиты ведется согласно указаниям Пункта 6.2.5(4) по Формуле (6.5) СН РК EN 1993-1-8:

$$c = t \sqrt{\left(\frac{f_y}{3f_{jd} \cdot \gamma_{M0}} \right)} \quad (6.5)$$

Используя Формулу (6.6) СН РК EN 1993-1-8, получаем:

$$t = c \sqrt{\left(\frac{3f_{cd}}{f_y \cdot \gamma_{M0}} \right)}$$

где c - ширина, равная:

$$c = 40 \text{ мм}$$

f_y - номинальный предел текучести, равный:

$$f_y = 275 \text{ Н/мм}^2 = 275 \text{ МПа};$$

f_{cd} - расчетная прочность бетона, равная:

$$f_{cd} = \frac{\alpha_{cc} f_{ck}}{\gamma_c} = \frac{1,0 \cdot 30}{1,5} = 20 \text{ МПа}$$

γ_{M0} - частный коэффициент безопасности, равный по НП.2.13 СН РК EN 1993-1-1:

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

Значит, толщина опорной плиты равна:

$$t = c \sqrt{\left(\frac{3f_{cd}}{f_y \cdot \gamma_{M0}} \right)} = 40 \sqrt{\left(\frac{3 \cdot 20}{275 \cdot 1,0} \right)} = 18,9 \text{ мм}$$

Принимается толщина $t_p = 20 \text{ мм}$, для которой номинальный предел текучести равен 275 МПа (по Таблице 3.1 СН РК EN 1993-1-1 для толщины листа стали $t \leq 40 \text{ мм}$).

7 УЗЛЫ СОПРЯЖЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ЗАМКНУТОГО ПРОФИЛЯ

7.1 Общие положения

7.1.1 Область применения

7.1.1.1 В настоящем разделе приведены подробные правила для определения расчетной статической несущей способности плоских и пространственных узлов решетчатых конструкций из круглых, квадратных и прямоугольных труб, а также плоских узлов решетчатых конструкций с сочетанием труб и открытых профилей.

7.1.1.2 Расчетные значения статической несущей способности узлов выражены через максимальные значения расчетной несущей способности стержней решетки по осевой силе и/или изгибающему моменту.

7.1.1.3 Данные правила применения могут быть использованы для замкнутых профилей как горячего (по EN 10210), так и холодного (по EN 10219) деформирования, если размеры их поперечных сечений удовлетворяют требованиям настоящего раздела.

7.1.1.4 Значение номинального предела текучести стали замкнутых профилей горячего и холодного деформирования не должно превышать 460 Н/мм². Значение расчетной несущей способности элемента с номинальным пределом текучести стали выше 355 Н/мм² следует снижать умножением на понижающий коэффициент 0,9.

7.1.1.5 Номинальная толщина стенки замкнутых профилей должна быть не менее 2,5 мм.

7.1.1.6 Номинальная толщина стенки пояса из замкнутого профиля не должна быть больше 25 мм, если не предусмотрены специальные меры для обеспечения соответствующих свойств материала по толщине.

7.1.1.7 Оценку усталостной прочности следует выполнять в соответствии с СН РК EN 1993-1-9:

- 1) Оценка сопротивления усталости должна производиться с применением:
 - метода работоспособности с повреждениями;
 - метода безопасного ресурса.

2) Метод работоспособности с повреждениями должен гарантировать достоверность того, что конструкция будет удовлетворительно работать в течение ее проектной долговечности, при условии, что запланированные осмотр и режим обслуживания для обнаружения и исправления усталостных повреждений выполняются в течение срока проектной долговечности конструкции.

ПРИМЕЧАНИЕ 1 Метод работоспособности с повреждениями может применяться, когда в момент усталостного разрушения возможно перераспределение усилий между составляющими элементами конструкции.

ПРИМЕЧАНИЕ 2 В Национальном Приложении могут содержаться предусмотренные программы контроля.

ПРИМЕЧАНИЕ 3 Конструкции, оцениваемые в данной части, считаются работоспособными с повреждениями, если материал конструкций выбран согласно СН РК EN 1993-1-10 и проводится их регулярное обслуживание.

3) Метод безопасного ресурса должен обеспечивать достоверный уровень того, что конструкция будет удовлетворительно работать за время ее проектной долговечности без необходимости регулярных обследований в процессе эксплуатации на предмет усталостного повреждения. Метод безопасного ресурса должен применяться в случаях, когда образование локальной трещины в одной детали быстро приводит к разрушению элемента или всей конструкции.

4) Для оценки усталости согласно настоящей части, требуемая надежность может быть достигнута корректировкой частного коэффициента безопасности для сопротивления усталости γ_{mf} , учитывающего последствия разрушения и принятые требования проекта.

5) Сопротивление усталости определяется рассмотрением элемента конструкции в целом, с учетом его металлургических факторов и геометрических параметров сечения. В подверженных усталости элементах, представленных в настоящей части, также указывается вероятное место зарождения трещины.

6) Методы оценки сопротивления усталости, приведенные в настоящем техническом кодексе, определяются параметрами кривых сопротивления усталости для:

- стандартных элементов - соответствующими номинальными напряжениями;
- рекомендуемых сварных соединений - соответствующими локальными напряжениями.

7) Требуемая надежность может быть получена следующими способами:

а) методом работоспособности с повреждениями:

б) выбором элементов, материалов и уровней напряжения, так чтобы при образовании трещины в результате были низкая скорость распространения трещины и большая критическая длина трещины;

- назначением нескольких программ нагружения;
- установкой деталей, останавливающих трещины;
- установкой деталей, легко контролируемых в процессе регулярных осмотров;

б) методом безопасного ресурса: выбором элементов и уровней напряжения, обеспечивающим усталостную долговечность, достаточную, чтобы получить значения β ,

равные таковым для проверок предельного состояния в конце проектного времени эксплуатации.

ПРИМЕЧАНИЕ 1 Национальное Приложение может принимать другие методы оценки определения предельных состояний, а также назначать численные значения для γ_{mf} . Рекомендованные значения γ_{mf} приведены в Таблице 7.1 настоящего пособия.

Таблица 7.1 - Рекомендованные значения частных коэффициентов безопасности для сопротивления усталости

Метод оценки	Последствия разрушения	
	Малые последствия	Большие последствия
Работоспособности при повреждениях	1,00	1,15
Безопасного ресурса	1,15	1,35

7.1.1.8 Рассматриваемые типы узлов приведены на Рисунке 7.1.

7.1.2 Условия применения

7.1.2.1 Правила применения для узлов из замкнутых профилей могут применяться только в том случае, если выполняются условия, приведенные в Пунктах 7.1.2.2 – 7.1.2.8 настоящего пособия.

7.1.2.2 Сжатые элементы должны удовлетворять требованиям, приведенным в СН РК EN 1993-1-1 для сечений классов 1 или 2, при условии чистого изгиба. Различают четыре класса поперечных сечений:

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;

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

7.1.2.3 Углы θ_i между стержнями решетки и поясом, а также между смежными стержнями решетки, должны удовлетворять условию $\theta_i \geq 30^\circ$.

7.1.2.4 Торцы соединяемых элементов в узле должны быть подготовлены таким образом, чтобы не изменялась форма их поперечных сечений. Соединения элементов со сплюснутыми или срезанными концами в настоящем разделе не рассматриваются.

7.1.2.5 В узлах с зазором между стержнями решетки для наложения сварных швов должным образом величина зазора должна быть не менее $(t_1 + t_2)$.

7.1.2.6 В узлах с пересечением стержней решетки значение нахлеста должно быть достаточной для того, чтобы соединение стержней обеспечивало передачу усилия сдвига

от одного стержня решетки к другому. В любом случае коэффициент λ_{ov} , характеризующий значение нахлеста, должен быть более 25 %.

7.1.2.7 Если стержни решетки, соединяемые внахлестку, имеют разную толщину и/или изготовлены из сталей разных марок, то должен подрезаться стержень с меньшим значением $t_i f_i$.

7.1.2.8 Если стержни решетки, соединяемые внахлестку, имеют разную ширину, то должен подрезаться более узкий стержень.

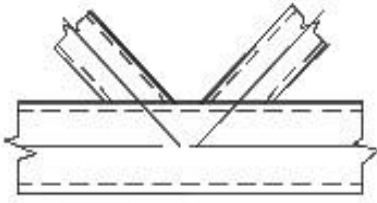
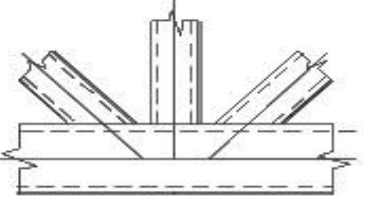
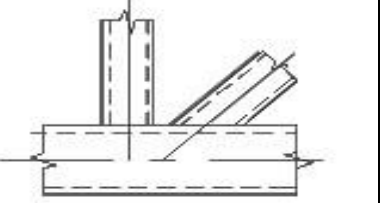
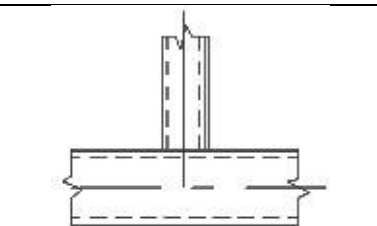
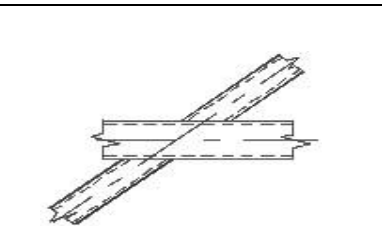
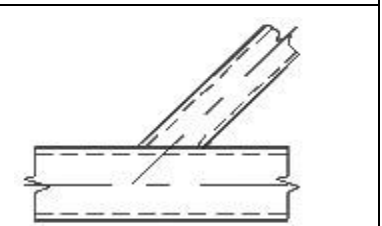
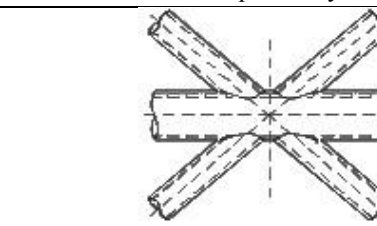
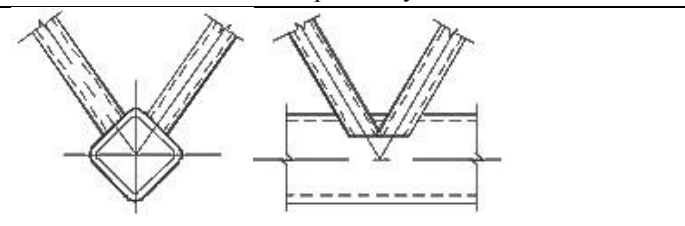
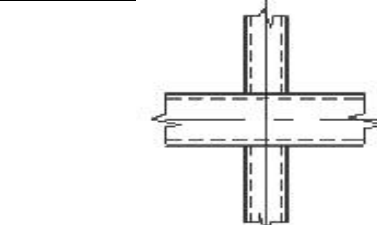
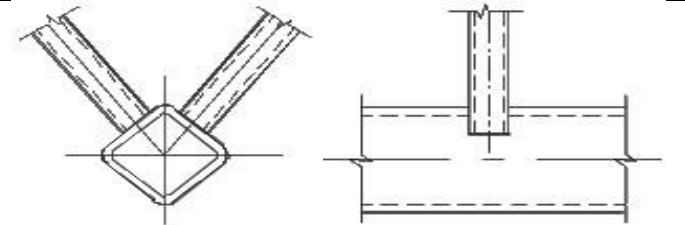
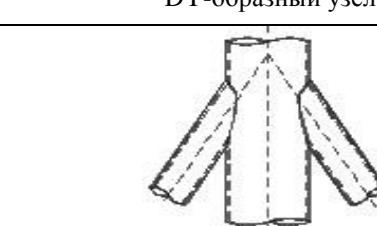

К-образный узел	КТ-образный узел	N-образный узел
		
T-образный узел	X-образный узел	Y-образный узел
		
DK-образный узел	KK-образный узел	
		
X-образный узел	KK-образный узел	
		
DY-образный узел	XX-образный узел	
		

Рисунок 7.1 - Типы узлов решетчатых конструкций из замкнутых профилей

7.2 Расчет

7.2.1 Общие положения

7.2.1.1 Расчетные значения внутренних осевых сил в стержнях решетки и в поясах в предельном состоянии по несущей способности не должны превышать расчетных значений несущих способностей элементов, определяемых согласно СН РК EN 1993-1-1:

а) Несущая способность центрально-растянутых элементов:

1) для сечений с отверстиями для болтов расчетное значение несущей способности на растяжение $N_{t,Rd}$ следует принимать наименьшим из:

- расчетного значения несущей способности поперечного сечения брутто в пластической стадии:

$$N_{pl,Rd} = \frac{Af_y}{\gamma_{M0}}; \quad (6.6)$$

- расчетного значения несущей способности поперечного сечения нетто в пластической стадии при наличии отверстий для болтов:

$$N_{u,Rd} = \frac{0,9A_{net}f_u}{\gamma_{M2}}; \quad (6.7)$$

2) если требуется определить предельное значение, см. СН РК EN 1998, то расчетное значение несущей способности в пластической стадии $N_{pl,Rd}$ (как приведено в 6.2.3(2)а)) должно быть меньше расчетного значения несущей способности поперечного сечения нетто с отверстиями для болтов $N_{u,Rd}$ (как приведено в 6.2.3(2)б)).

б) Несущая способность центрально-сжатых элементов

1) расчетное значение несущей способности поперечного сечения при равномерном сжатии $N_{c,Rd}$ следует определять по формулам:

$$N_{c,Rd} = \frac{Af_y}{\gamma_{M0}} \quad \text{для поперечных сечений класса 1, 2 или 3}; \quad (6.10)$$

$$N_{c,Rd} = \frac{A_{eff}f_u}{\gamma_{M0}} \quad \text{для поперечных сечений класса 4}. \quad (6.11)$$

в) Несущая способность элементов, подверженных действию осевой силы с изгибом:

1) поперечные сечения классов 1 и 2

При действии осевой силы следует учитывать ее влияние на несущую способность на изгиб в пластической стадии.

Для поперечных сечений классов 1 и 2 должно выполняться следующее условие:

$$M_{Ed} \leq M_{N,Rd}; \quad (6.31)$$

где $M_{N,Rd}$ - расчетное значение несущей способности на изгиб в пластической стадии, уменьшенное вследствие действия осевой силы N_{Ed} .

Для прямоугольных сплошных сечений без отверстий $M_{N,Rd}$ следует принимать равным:

$$M_{N,Rd} = M_{pl,Rd} \cdot \left[1 - (N_{Ed}/N_{pl,Rd})^2 \right]. \quad (6.32)$$

Для двутавровых сечений с двумя осями симметрии или других сечений с полками влияние осевой силы на несущую способность на изгиб относительно оси $y-y$ в пластической стадии учитывать не следует, если выполняются следующие условия:

$$N_{Ed} \leq 0,25N_{pl,Rd} \quad (6.33)$$

и
$$N_{Ed} \leq \frac{0,5h_w t_w f_y}{\gamma_{M0}} \quad (6.34)$$

Для двутавровых сечений с двумя осями симметрии влияние осевой силы на несущую способность на изгиб относительно оси $z-z$ в пластической стадии учитывать не следует, если выполняется следующее условие:

$$N_{Ed} \leq \frac{h_w t_w f_y}{\gamma_{M0}}. \quad (6.35)$$

Для поперечных сечений, в расчете которых не учитываются отверстия, могут применяться следующие приближенные формулы для прокатных и сварных двутавров с равными полками:

$$M_{N,y,Rd} = M_{pl,y,Rd} \cdot \frac{(1-n)}{(1-0,5a)} - M_{N,y,Rd} \leq M_{pl,y,Rd}; \quad (6.36)$$

при $n \leq a$: $M_{N,z,Rd} \leq M_{pl,z,Rd}; \quad (6.37)$

при $n > a$: $M_{N,y,Rd} \leq M_{pl,y,Rd} \cdot \left[1 - \left(\frac{n-a}{1-a} \right)^2 \right]; \quad (6.38)$

где
$$n = \frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}};$$

$$a = \frac{(A - 2bt_f)}{A}, \quad \text{при } a \leq 0,5.$$

Для поперечных сечений, в расчете которых не учитываются отверстия, могут применяться следующие приближенные формулы для прямоугольных замкнутых сечений из листового проката постоянной толщины и для сварных коробчатых сечений с равными полками и стенками:

$$M_{N,y,Rd} = M_{pl,y,Rd} \cdot \frac{(1-n)}{(1-0,5a_w)} - \text{при } M_{N,y,Rd} \leq M_{pl,y,Rd}; \quad (6.39)$$

$$M_{N,z,Rd} = M_{pl,z,Rd} \cdot \frac{(1-n)}{(1-0,5a_f)} - \text{при } M_{N,z,Rd} \leq M_{pl,z,Rd}; \quad (6.40)$$

где
$$a_w = \frac{(A - 2bt)}{A}, \quad \text{при } a_w \leq 0,5 \quad - \text{ для прямоугольных замкнутых сечений};$$

$$a_w = \frac{(A - 2bt_f)}{A}, \quad \text{при } a_w \leq 0,5 \quad - \text{ для сварных коробчатых сечений};$$

$$a_f = \frac{(A - 2ht)}{A}, \quad \text{при } a_f \leq 0,5 \quad - \text{ для прямоугольных замкнутых сечений};$$

$$a_f = \frac{(A - 2ht_w)}{A}, \quad \text{при } a_f \leq 0,5 \quad - \text{ для сварных коробчатых сечений}.$$

При двухосном изгибе можно применять следующее условие:

$$\left[\frac{M_{y,Ed}}{M_{N,y,Rd}} \right]^\alpha + \left[\frac{M_{z,Rd}}{M_{N,z,Rd}} \right]^\beta \leq 1,0; \quad (6.41)$$

где α и β - параметры, значения которых с запасом можно принимать равными единице, или:

- для двутавровых и Н-образных сечений: $\alpha = 2$; $\beta = 5n$, при $\beta \geq 1$;

- для круглых полых сечений: $\alpha = 2$; $\beta = 2$;

- для прямоугольных полых сечений: $\alpha = \beta = \frac{1,66}{1-1,13n^2}$

при $\alpha = \beta \leq 6$,

где $n = N_{Ed}/N_{pl,Rd}$.

2) поперечные сечения класса 3

При отсутствии поперечной силы, максимальные продольные напряжения в сечениях класса 3 должны удовлетворять условию:

$$\sigma_{x,Ed} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M0}}; \quad (6.42)$$

где $\sigma_{x,Ed}$ - расчетное значение локальных продольных напряжений от действия момента и осевой силы с учетом отверстий для болтов в необходимых случаях, см. 6.2.3, 6.2.4 и 6.2.5.

3) поперечные сечения класса 4

При отсутствии поперечной силы, максимальные продольные напряжения $\sigma_{x,Ed}$ в сечениях класса 4, рассчитанные с учетом эффективных поперечных сечений (см. 5.5.2(2)), должны удовлетворять условию:

$$\sigma_{x,Ed} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M0}}; \quad (6.43)$$

где $\sigma_{x,Ed}$ - расчетные значения местных продольных напряжений от действия момента и осевой силы с учетом отверстий для болтов в необходимых случаях, см. 6.2.3, 6.2.4 и 6.2.5.

Должно выполняться следующее условие:

$$\frac{N_{Ed}}{A_{eff}f_y/\gamma_{M0}} + \frac{M_{y,Ed} + N_{Ed}e_{N,y}}{W_{eff,y,min}f_y/\gamma_{M0}} + \frac{M_{z,Ed} + N_{Ed}e_{N,y}}{W_{eff,z,min}f_y/\gamma_{M0}} \leq 1,0; \quad (6.44)$$

где A_{eff} - эффективная площадь поперечного сечения при действии равномерного сжатия;

$W_{eff,min}$ - минимальный момент сопротивления (соответствующий волокнам с максимальными упругими напряжениями) эффективного поперечного сечения относительно соответствующей оси;

e_N - смещение нейтральной оси эффективной площади A_{eff} относительно центра тяжести поперечного сечения брутто, когда поперечное сечение подвергается только сжатию, см. 6.2.2.5(4).

Знаки N_{Ed} , $M_{y,Ed}$, $M_{z,Ed}$ и $\Delta M_i = N_{Ed} e_{N,y}$ зависят от сочетания соответствующих нормальных напряжений.

7.2.1.2 Расчетные значения внутренних осевых сил в стержнях решетки в предельном состоянии по несущей способности не должны также превышать расчетных значений несущих способностей узлов, приведенных для соответствующего случая в Пунктах 7.4, 7.5, 7.6 или 7.7 настоящего пособия.

7.2.1.3 Напряжения $\sigma_{0,Ed}$ или $\sigma_{p,Ed}$, возникающие в поясах в месте сопряжения, следует определять по формулам:

$$\sigma_{0,Ed} = \frac{N_{0,Ed}}{A_0} + \frac{M_{0,Ed}}{W_{el,0}}, \quad (7.1)$$

$$\sigma_{p,Ed} = \frac{N_{p,Ed}}{A_0} + \frac{M_{0,Ed}}{W_{el,0}}, \quad (7.2)$$

где $N_{p,Ed} = N_{0,Ed} - \sum_{i>0} N_{i,Ed} \cos \theta_i$

7.2.2 Виды отказа узлов сопряжения элементов замкнутого профиля

7.2.2.1 Расчетные значения несущих способностей узлов сопряжения элементов замкнутого профиля или сопряжения элементов замкнутого и открытого профилей должны основываться на следующих видах отказа:

а) местный изгиб (продавливание) лицевой поверхности пояса (пластическое разрушение лицевой поверхности пояса) или пластическая деформация пояса (пластическое разрушение поперечного сечения пояса);

б) деформация боковой поверхности пояса (или деформация стенки пояса) вследствие текучести, раздавливания или потери устойчивости (выпучивание или продольный изгиб боковой поверхности, или стенки пояса) под сжатым стержнем решетки;

в) сдвиг (срез) сечения пояса;

г) вырывание лицевой поверхности пояса из замкнутого профиля (возникновение трещины в поясе, инициирующей отрыв стержня решетки от пояса);

д) потеря несущей способности стержня решетки с уменьшенной эффективной шириной сечения (образование трещины в сварном шве или в стержнях решетки);

е) потеря местной устойчивости стенки стержня решетки или пояса из замкнутого профиля в месте их сопряжения.

ПРИМЕЧАНИЕ Выражения, выделенные жирным шрифтом, предназначены для описания различных видов отказа в Таблицах 7.4 – 7.7.

7.2.2.2 На Рисунке 7.2 показаны виды отказа узлов сопряжения стержней решетки из круглых труб с поясом из круглых труб.

7.2.2.3 На Рисунке 7.3 показаны виды отказа узлов сопряжения стержней решетки из прямоугольных труб с поясом из прямоугольных труб.

Вид отказа	При действии осевой силы	При действии изгибающего момента
а		
б		
в		
г		
д		
е		

Рисунок 7.2 — Виды отказов узлов сопряжения элементов из круглых труб

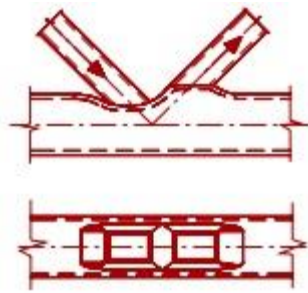
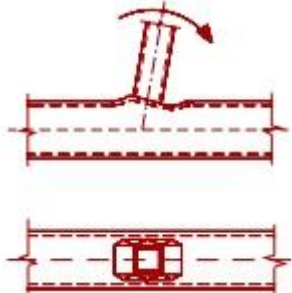
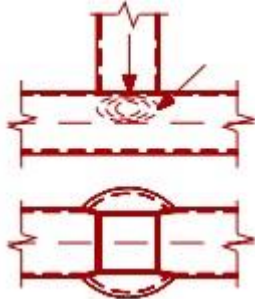
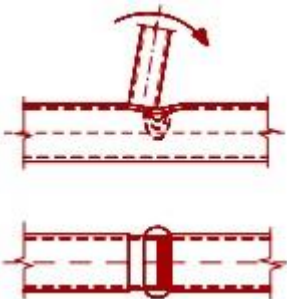
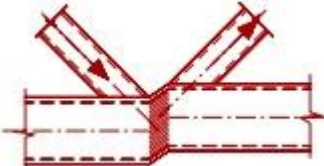

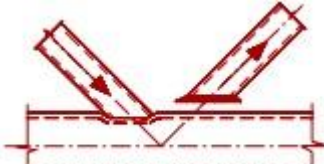


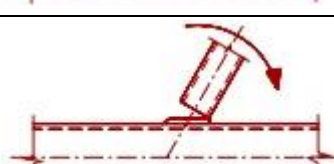
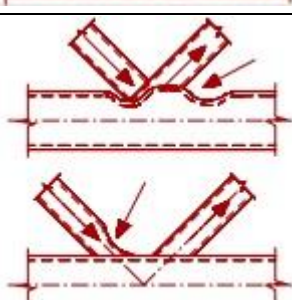
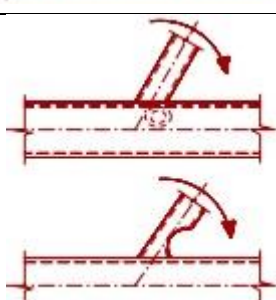
Вид отказа	При действии осевой силы	При действии изгибающего момента
а		
б		
в		
г		
д		
е		

Рисунок 7.3 — Виды отказов узлов сопряжения стержней решетки и поясов из прямоугольных труб

7.2.2.4 На Рисунке 7.4 показаны виды отказа узлов сопряжения стержней решетки из круглых или прямоугольных труб с поясом из двутавров.

7.2.2.5 Несмотря на то, что несущая способность узлов со сварными швами, выполненными должным образом, обычно выше при растяжении, чем при сжатии, расчетная несущая способность узла обычно основывается на несущей способности стержня решетки на сжатие во избежание возникновения чрезмерной местной деформации или снижения вращательной или деформационной способности, которые могут возникнуть в противном случае.

Вид отказа	При действии осевой силы	При действии изгибающего момента
а	—	—
б		
в		
г	—	—
д		
е		

Рисунок 7.4 — Виды отказов узлов сопряжения стержней решетки из прямоугольных или круглых труб с поясами из двутавров

7.3 Сварные швы

7.3.1 Расчетная несущая способность

7.3.1.1 Сварные швы, прикрепляющие стержни решетки к поясам, должны иметь достаточную несущую способность, позволяющую учесть неравномерное распределение напряжений и достаточную деформационную способность, позволяющую учесть перераспределение изгибающих моментов.

7.3.1.2 В сварных узлах замкнутые профили следует приваривать по всему периметру посредством стыковых швов или угловых швов либо их комбинаций. Однако в узлах с частичным нахлестом нет необходимости приваривать скрытую часть соединения при условии, что осевые силы в стержнях решетки таковы, что их составляющие, перпендикулярные оси пояса, различаются не более чем на 20 %.

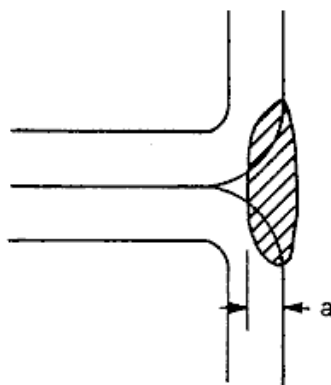
7.3.1.3 Детали типичных сварных швов приведены в ссылочных стандартах группы 7 (см. Пункт 1.2.7 настоящего пособия).

7.3.1.4 Расчетная несущая способность сварного шва, отнесенная к единице длины периметра стержня решетки, как правило, должна быть не меньше расчетной несущей способности его поперечного сечения, отнесенной к единице длины периметра.

7.3.1.5 Требуемую высоту сварного шва следует определять согласно Разделу 4 настоящего пособия.

7.3.1.6 Положением Пункта 7.3.1.4 настоящего пособия можно пренебречь, если меньший размер сварного шва соответствует требованиям по прочности, деформационной и вращательной способности, учитывая возможность того, что только часть его длины является эффективной.

7.3.1.7 Для замкнутых профилей прямоугольного сечения расчетную высоту сварного шва с конусным зазором следует определять по Рисунку 7.5.



**Рисунок 7.5 — Расчетная высота сварного шва
при сварке замкнутых профилей прямоугольного сечения**

7.3.1.8 При сварке в холоднодеформированных зонах см. Пункт 4.14 настоящего пособия.

7.4 Сварные узлы сопряжения элементов из круглых труб

7.4.1 Общие положения

7.4.1.1 Расчетные значения несущей способности сварных узлов сопряжения стержней решетки и поясов из круглых труб могут быть определены по Пункту 7.4.2 и 7.4.3 настоящего пособия при условии, что геометрические параметры узлов соответствуют области применения, указанной в Таблице 7.1.

7.4.1.2 Для узлов, соответствующих области применения, указанной в Таблице 7.1, следует рассматривать только разрушение лицевой поверхности пояса и вырывание полки пояса. Расчетное значение несущей способности узла следует принимать равным наименьшему из значений, соответствующих этим двум критериям.

7.4.1.3 Для узлов, не соответствующих области применения, указанной в Таблице 7.1, следует рассматривать все виды отказов, приведенные в Пункте 7.2.2 настоящего пособия. Кроме того, следует учитывать дополнительные моменты, обусловленные вращательной жесткостью узлов.

Таблица 7.1 — Область применения сварных швов, прикрепляющие стержни решетки из круглых труб к поясам из круглых труб

$0,2 \leq d_i / d_0 \leq 1,0$
Сечение класса 2 и $10 \leq d_0/t_0 \leq 50$ в общем случае, но $10 \leq d_0/t_0 \leq 40$ — для X-образных узлов
Сечение класса 2 и
$\lambda_{ov} \geq 25\%$
$g \geq t_1 + t_2$

7.4.2 Плоские узлы

7.4.2.1 В узлах сопряжения стержней решетки, подверженных действию только осевых сил, расчетное значение внутренней осевой силы $N_{i,Ed}$ не должно превышать расчетной несущей способности сварного узла $N_{i,Rd}$, определяемой по Таблицам 7.2, 7.3 или 7.4.

7.4.2.2 Узлы сопряжения стержней решетки, подверженных совместному действию осевой силы и изгибающего момента, должны удовлетворять условию

$$\frac{N_{i,Ed}}{N_{i,Rd}} + \left[\frac{M_{ip,i,Ed}}{M_{ip,i,Rd}} \right]^2 + \frac{M_{op,i,Ed}}{M_{op,i,Rd}} \leq 1, \quad (7.3)$$

где

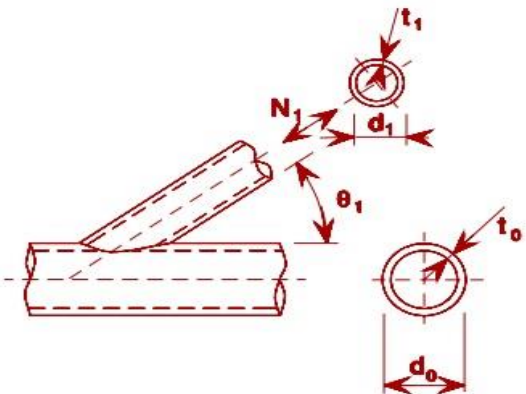
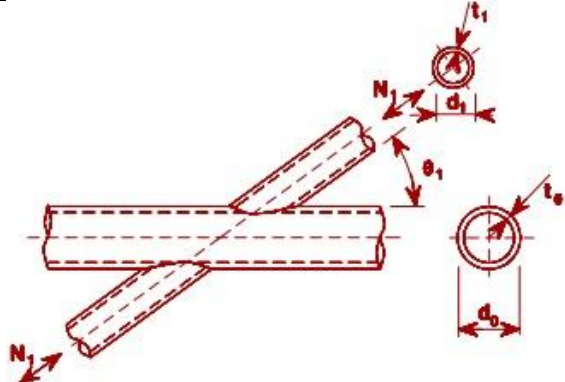
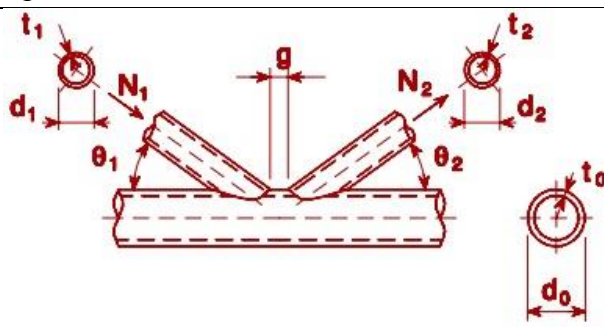
$M_{ip,i,Rd}$ — расчетная несущая способность на действие изгибающего момента в плоскости узла;

$M_{ip,i,Ed}$ — расчетное значение внутреннего изгибающего момента в плоскости узла;

$M_{op,i,Rd}$ — расчетная несущая способность на действие изгибающего момента из плоскости узла;

$M_{op,i,Ed}$ — расчетное значение внутреннего изгибающего момента из плоскости узла.

Таблица 7.2 — Расчетные значения несущей способности по осевой силе сварных узлов сопряжения стержней решетки из круглых труб с поясом из круглых труб

Продавливание лицевой поверхности пояса — Т- и Y-образные узлы	
	$N_{1,Rd} = \frac{\gamma^{0,5} k_p f_{y0} t_0^2}{\sin \theta_1} \cdot (2,8 + 14,2 \beta^2) / \gamma_{M5}$
Продавливание лицевой поверхности пояса — X-образные узлы	
	$N_{1,Rd} = \frac{k_p f_{y0} t_0^2}{\sin \theta_1} \cdot \frac{5,2}{(1 - 0,81 \beta)} / \gamma_{M5}$
Продавливание лицевой поверхности пояса — К- и N-образные узлы с нахлестом или зазором	
	$N_{1,Rd} = \frac{k_g k_p f_{y0} t_0^2}{\sin \theta_1} \cdot \left(1,8 + 10,2 \cdot \frac{d_1}{d_0} \right) / \gamma_{M5}$ $N_{2,Rd} = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} N_{1,Rd}$
Вырывание лицевой поверхности пояса — К-, N- и КТ-образные узлы с зазором и Т-, Y- и X-образные узлы всех типов [i = 1, 2 или 3]	
Если $d_i \leq d_0 - 2t_0$: $d_i \leq d_0 - 2t_0$: $N_{i,Rd} = \frac{f_{y0}}{\sqrt{3}} t_0 \pi d_i \frac{1 + \sin \theta_i}{2 \sin^2 \theta_i} / \gamma_{M5}$	
Коэффициенты k_g и k_p	
$k_g = \gamma^{0,2} \cdot \left(1 + \frac{0,024 \gamma^{1,2}}{1 + \exp(0,5g/t_0 - 1,33)} \right)$ (см. Рисунок 7.6)	
При $n_p > 0$ (сжатие) , $k_p = 1 - 0,3n_p \cdot (1 + n_p)$, но $k_p \leq 1,0$ При $n_p \leq 0$ (растяжение) $k_p = 1,0$	

**Таблица 7.3 - Расчетные значения несущей способности сварных узлов
сопряжения фасонки со стержнями из круглых труб**

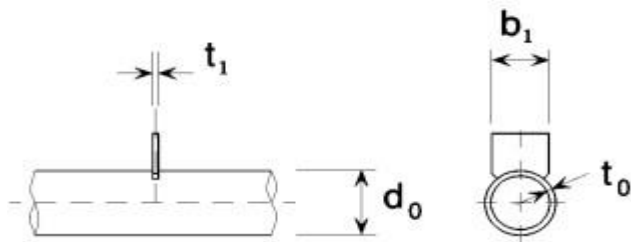
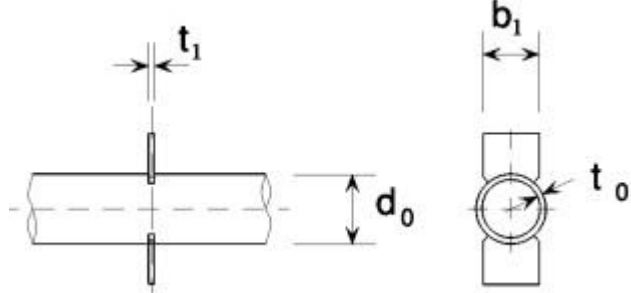
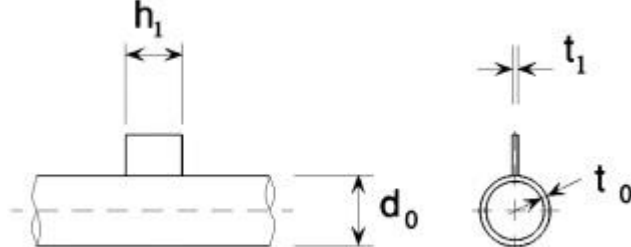
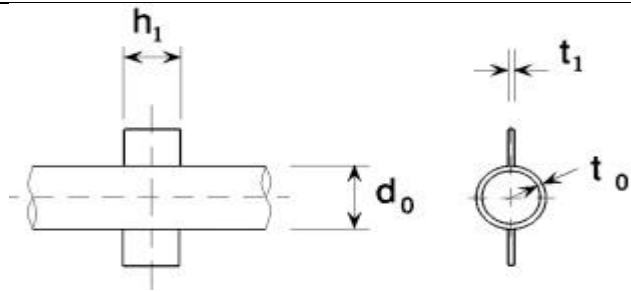
Продавливание лицевой поверхности	
	$N_{1,Rd} = k_p f_{y0} t_0^2 \cdot (4 + 20\beta^2) / \gamma_{M5}$ $M_{ip,1,Rd} = 0$ $M_{op,1,Rd} = 0,5b_1 N_{1,Rd}$
	$N_{1,Rd} = \frac{5k_p f_{y0} t_0^2}{1 - 0,81\beta} / \gamma_{M5}$ $M_{ip,1,Rd} = 0$ $M_{op,1,Rd} = 0,5b_1 N_{1,Rd}$
	$N_{1,Rd} = 5k_p f_{y0} t_0^2 \cdot (1 + 0,25\eta) / \gamma_{M5}$ $M_{ip,1,Rd} = h_1 N_{1,Rd}$ $M_{op,1,Rd} = 0$ <p align="center"><i>j</i></p>
	$N_{1,Rd} = 5k_p f_{y0} t_0^2 \cdot (1 + 0,25\eta) / \gamma_{M5}$ $M_{ip,1,Rd} = h_1 N_{1,Rd}$ $M_{op,1,Rd} = 0$
Вырывание лицевой поверхности пояса	
$\sigma_{max} t_1 = (N_{Ed}/A + M_{Ed}/w_{el}) t_1 \leq 2t_0 \cdot (f_{y0} / \sqrt{3}) / \gamma_{M5}$	
Область применения	Коэффициент k_p
В дополнение к области применения, приведенной в Таблице 7.1: $\beta \geq 0,4$ и $\eta \leq 4$, где $\beta = b_1/d_0$ и $\eta = \frac{h_1}{d_0}$	При $n_p > 0$ (сжатие) $k_p = 1 - 0,3n_p \cdot (1 + n_p)$, но $k_p \leq 1,0$ При $n_p \leq 0$ (растяжение) $k_p = 1,0$

Таблица 7.4 - Расчетные значения несущей способности сварных узлов сопряжения стержней из двутавров или прямоугольных труб с элементами из круглых труб

Продавливание лицевой поверхности пояса	
	$N_{1,Rd} = k_p f_{y0} t_0^2 \cdot (4 + 20\beta^2) \cdot (1 + 0,25\eta) / \gamma_{M5}$ $M_{ip,1,Rd} = h_1 N_{1,Rd} / (1 + 0,25\eta)$ $M_{op,1,Rd} = 0,5 b_1 N_{1,Rd}$
	$N_{1,Rd} = \frac{5k_p f_{y0} t_0^2}{1 - 0,81\beta} \cdot (1 + 0,25\eta) / \gamma_{M5}$ $M_{ip,1,Rd} = h_1 N_{1,Rd} / (1 + 0,25\eta)$ $M_{op,1,Rd} = 0,5 b_1 N_{1,Rd}$
	$N_{1,Rd} = k_p f_{y0} t_0^2 \cdot (4 + 20\beta^2) \cdot (1 + 0,25\eta) / \gamma_{M5}$ $M_{ip,1,Rd} = h_1 N_{1,Rd}$ $M_{op,1,Rd} = 0,5 b_1 N_{1,Rd}$
	$N_{1,Rd} = \frac{5k_p f_{y0} t_0^2}{1 - 0,81\beta} \cdot (1 + 0,25\eta) / \gamma_{M5}$ $M_{ip,1,Rd} = h_1 N_{1,Rd}$ $M_{op,1,Rd} = 0,5 b_1 N_{1,Rd}$
Вырывание лицевой поверхности пояса	
<p>Узлы стержней из двутавров:</p> $\sigma_{max} t_1 = (N_{Ed}/A + M_{Ed} / w_{el}) t_1 \leq 2 t_0 \cdot (f_{y0} / \sqrt{3}) / \gamma_{M5}$ <p>Узлы стержней из прямоугольных труб:</p> $\sigma_{max} t_1 = (N_{Ed}/A + M_{Ed} / w_{el}) t_1 \leq t_0 \cdot (f_{y0} / \sqrt{3}) / \gamma_{M5}$	
Область применения	Коэффициент k_p
В дополнение к области применения, приведенной в Таблице 7.1: $\beta \geq 0,4$ и $\eta \leq 4$, где $\beta = b_1/d_0$ и $\eta = h_1/d_0$	<p>При $n_p > 0$ (сжатие)</p> $k_p = 1 - 0,3 n_p \cdot (1 + n_p), \text{ но } k_p \leq 1,0$ <p>При $n_p \leq 0$ (растяжение)</p> $k_p = 1,0$

7.4.2.3 За расчетное значение внутреннего момента $M_{i,Ed}$ может быть принято значение момента в точке пересечения оси стержня решетки с лицевой поверхностью пояса.

7.4.2.4 Расчетные значения несущей способности по моменту в плоскости и из плоскости узла $M_{i,Rd}$ следует определять по Таблицам 7.3, 7.4 или 7.5 для соответствующего случая.

7.4.2.5 Сварные узлы особого типа, приведенные в Таблице 7.6, должны удовлетворять расчетным критериям, установленным для каждого типа.

7.4.2.6 Значения коэффициента k_g , используемого в Таблице 7.2 для К-, N- и КТ-образных узлов, приведены на Рисунке 7.6. Коэффициент k_g применяется как для узлов с зазором, так и для узлов с нахлестом, адаптируя g одновременно для зазора и нахлеста и используя отрицательное значение величины g для представления нахлеста q , показанного на Рисунке 1.3 б).

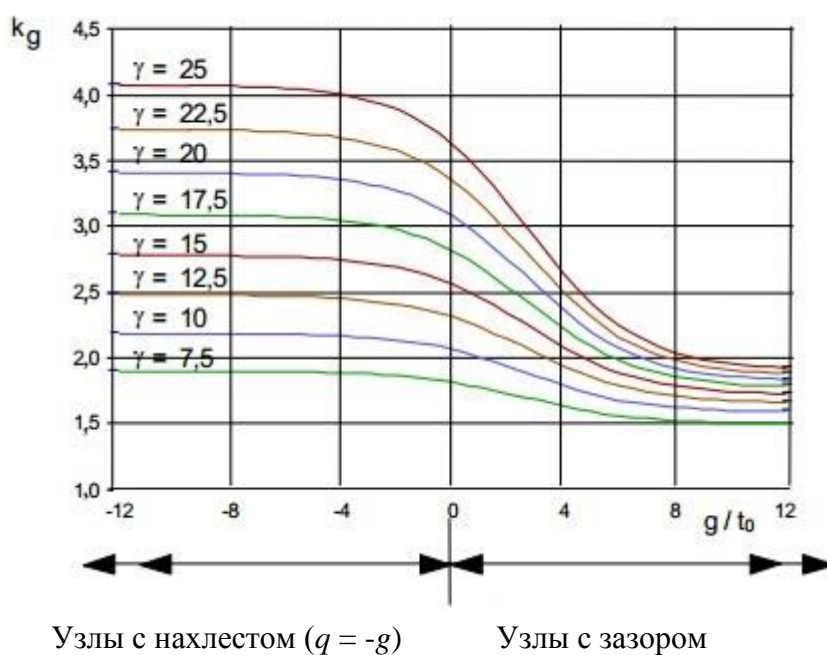


Рисунок 7.6 — Значения коэффициента k_g для Таблицы 7.2

Таблица 7.5 - Расчетные значения несущей способности по моменту сварных узлов сопряжения стержней решетки и поясов из круглых труб

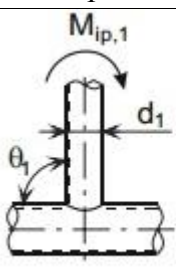
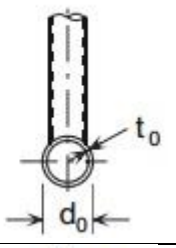

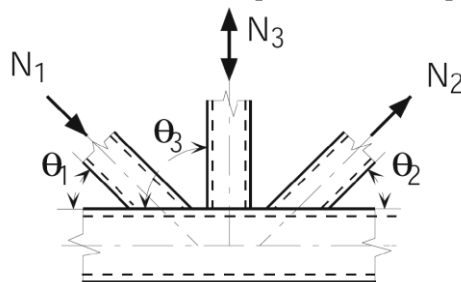
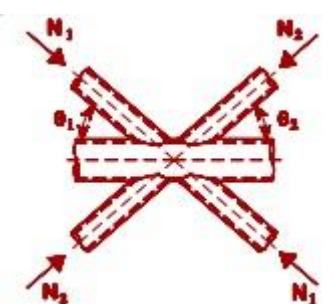
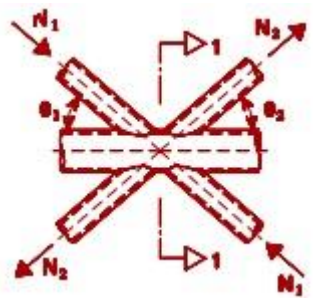
Продавливание лицевой поверхности пояса — Т-, Х- и Y-образные узлы	
 	$M_{ip,1,Rd} = 4,85 \cdot \frac{f_{yo} t_0^2 d_1}{\sin \theta_1} \cdot \sqrt{\gamma \beta k_p / \gamma_{M5}}$
	$M_{op,1,Rd} = \frac{f_{yo} t_0^2 d_1}{\sin \theta_1} \cdot \frac{2,7}{1 - 0,81 \beta} \cdot k_p / \gamma_{M5}$
Вырывание лицевой поверхности пояса — К- и N-образные узлы с зазором и Т-, Y- и Х-образные узлы всех типов	
Если $d_1 \leq d_0 - 2t_0$:	
$M_{ip,1,Rd} = \frac{f_{yo} t_0^2 d_1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{1 + 0,81 \beta}{4 \sin^2 \theta_1} / \gamma_{M5}:$ $M_{op,1,Rd} = \frac{f_{yo} t_0^2 d_1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{3 + \sin \theta_1}{4 \sin^2 \theta_1} \gamma_{M5}$	
Коэффициент k_p	
При $n_p > 0$ (сжатие)	
$k_p = 1 - 0,3 n_p \cdot (1 + n_p), \text{ но } k_p \leq 1,0$	
При $n_p \leq 0$ При:	
$n_p \leq 0$ (растяжение) $k_p = 1,0$	

Таблица 7.6 - Критерии расчета особых типов сварных узлов сопряжения стержней решетки и поясов из круглых труб

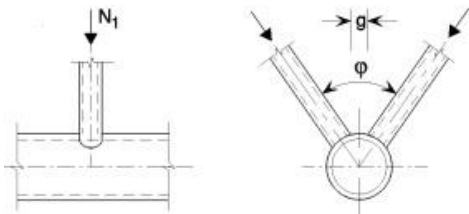
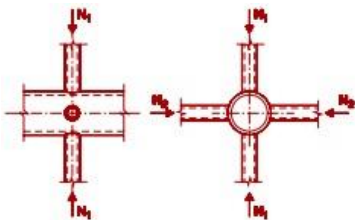
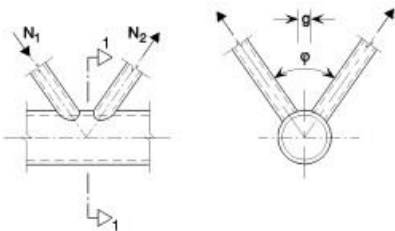
Тип узла	Критерий
<p>Стержни могут быть растянуты или сжаты, но усилия должны действовать в одном направлении для обоих стержней</p> 	$N_{1,Ed} \leq N_{1,Rd},$ <p>где $N_{1,Rd}$ принимается равным значению $N_{1,Rd}$ для Х-образного узла по Таблице 7.2</p> $N_{1,Ed} \sin \theta_2 \leq N_{1,Rd} \sin \theta_1$
<p>Стержень 1 всегда сжат, а стержень 2 всегда растянут</p> 	$N_{1,Ed} \sin \theta_1 + N_{3,Ed} \sin \theta_3 \leq N_{1,Rd} \sin \theta_1,$ $N_{1,Ed} \sin \theta_2 \leq N_{1,Rd} \sin \theta_1$ <p>где $N_{1,Rd}$ принимается равным $N_{1,Rd}$ для К-образного узла по Таблице 7.2, заменяя отношение</p> $\frac{d_1}{d_0}$ <p>отношением</p> $\frac{d_1 + d_2 + d_3}{3d_0}$
<p>Все стержни решетки должны быть всегда сжаты или растянуты</p> 	$N_{1,Ed} \sin \theta_1 + N_{3,Ed} \sin \theta_2 \leq N_{x,Rd} \sin \theta_x,$ <p>где $N_{x,Rd}$ принимается равным $N_{x,Rd}$ для Х-образного узла по Таблице 7.2, где $N_{x,Rd} \sin \theta_x$ равно наибольшему из двух и $N_{1,Ed} \sin \theta_1$ и $N_{2,Ed} \sin \theta_2$</p>
<p>Стержень 1 всегда сжат, а стержень 2 всегда растянут</p> 	$N_{i,Ed} \leq N_{i,Rd}$ <p>где $N_{i,Rd}$ принимается равным $N_{i,Rd}$ для К-образного узла по Таблице 7.2 при условии, что в узле с зазором сечение 1-1 пояса удовлетворяет условию</p> $\frac{N_{0,Ed}}{N_{pl,0,Rd}} + \frac{V_{0,Ed}}{V_{pl,0,Rd}} \leq 1,0$

7.4.3 Пространственные узлы

7.4.3.1 В каждой плоскости пространственного узла должны соблюдаться расчетные критерии, приведенные в Пункте 7.4.2 настоящего пособия, при пониженных значениях расчетных несущих способностей, определяемых согласно Пункту 7.4.3.2 настоящего пособия.

7.4.3.2 Расчетные значения несущей способности каждой плоскости пространственного узла следует принимать равными несущим способностям соответствующих плоских узлов, вычисленных согласно Пункту 7.4.2 настоящего пособия с понижающим коэффициентом μ (см. Таблицу 7.7), используя соответствующее усилие в поясе для определения коэффициента K_p .

Таблица 7.7 - Понижающие коэффициенты для пространственных узлов

Тип узла	Понижающий коэффициент μ
ТТ-образный узел, $60^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$	
Стержень 1 может быть растянут или сжат 	$\mu = 1,0$
ХХ-образный узел	
Стержни 1 и 2 могут быть растянуты или сжаты. Значение $N_{2,Ed}/N_{1,Ed}$ отрицательно, если один стержень растянут, а другой сжат 	$\mu = 1 + 0,33N_{2,Ed}/N_{1,Ed},$ с учетом знака $N_{1,Ed}$ и $N_{2,Ed}$, где $ N_{2,Ed} \leq N_{1,Ed} $
КК-образный узел, $60^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$	
Стержень 1 всегда сжат, а стержень 2 всегда растянут 	$\mu = 0,9$ при условии, что в узле с зазором сечение 1 – 1 пояса удовлетворяет условию $\left[\frac{N_{0,Ed}}{N_{pl,0,Rd}} \right]^2 + \left[\frac{V_{0,Ed}}{V_{pl,0,Rd}} \right]^2 \leq 1,0$

ПРИМЕР 20 Расчет Т-образного узла сопряжения элементов из круглых труб

Исходные данные: выполнить расчет несущей способности Т-образного узла фермы. Т-образный узел - сопряжение нижнего пояса фермы со стойкой. Нижний пояс представляет собой прокатный профиль круглого замкнутого сечения - труба сечением 219×10мм, стойка - круглая труба сечением 168×5мм.

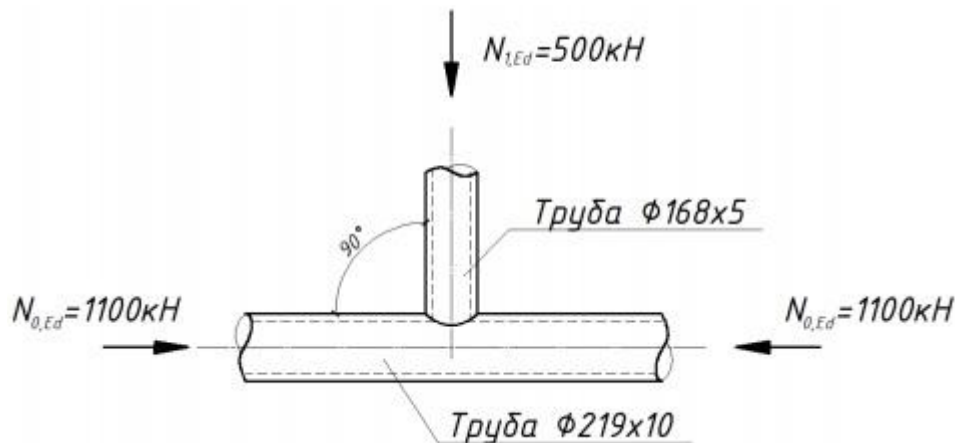
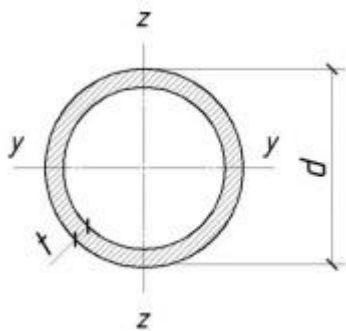


Рисунок 1 - Схема нагружения узла фермы продольными сжимающими силами



Круглая труба 219 × 10мм:

- диаметр $d_0 = 219\text{мм}$;
- толщина стенки $t_1 = 10\text{мм}$;
- площадь поперечного сечения $A_0 = 6560\text{мм}^2$.

Круглая труба 168 × 5мм:

- высота $d_1 = 168\text{мм}$;
- толщина стенки $t_1 = 5\text{мм}$;
- площадь поперечного сечения $A_1 = 2560\text{мм}^2$.

Рисунок 2 - Геометрические характеристики

2 Определение характеристик узла

2.1 Определение класса сечения

2.1.1 Круглая труба сечением 219×10мм

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

$$\varepsilon = \sqrt{235/f_y} = \sqrt{235/355} = 0,81$$

Отношение диаметра трубы к толщине стенки:

$$d/t = d_0/t_0 = 219/10 = 21,9$$

По Таблице 5.2 СН РК EN 1993-1-1 предельно допустимое значение для сечений класса 1:

$$\begin{aligned} d/t &\leq 50\varepsilon^2 \\ 50\varepsilon^2 &= 50 \cdot 0,81^2 = 32,8 \end{aligned}$$

$$21,9 < 32,80 \rightarrow \text{сечение класса 1}$$

2.1.2 Круглая труба сечением 168×5мм

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

$$\varepsilon = \sqrt{235/f_y} = \sqrt{235/355} = 0,81$$

Отношение диаметра трубы к толщине стенки:

$$d/t = d_1/t_2 = 168/5 = 33,6$$

По Таблице 5.2 СН РК EN 1993-1-1 предельно допустимое значение для сечений класса 2:

$$d/t \leq 70\varepsilon^2$$

$$70\varepsilon^2 = 70 \cdot 0,81^2 = 45,93$$

$$33,6 < 45,93 \rightarrow \text{сечение класса 2}$$

Поперечное сечение круглой трубы 219×12,5мм относится к 1 классу, а поперечное сечение круглой трубы 168×5мм относится к 2 классу, что удовлетворяет требованиям Пункта 7.1.2(2) СН РК EN 1993-1-8.

2.2 Определение основных физико-механических характеристик узла

В данном примере рассматривается узел сопряжения решетчатой конструкции из круглых труб. Требования и расчет узлов сопряжения элементов из круглых труб описаны в Пункте 7.4 СН РК EN 1993-1-8.

Узел состоит из двух профилей: круглая труба сечением 219×10мм (нижний пояс фермы, см. Рисунок 1) и круглая труба сечением 168×5мм (стойка фермы, см. Рисунок 1). Нижний пояс испытывает действие сжимающей силы $N_{0,Ed} = 1100\text{кН}$, а стойка - сжимающей силы $N_{1,Ed} = 500\text{кН}$.

Номинальные толщины стенок использованных в примере круглых труб удовлетворяют требованиям Пунктов 7.1.1(5) и 7.1.1(6) СН РК EN 1993-1-8.

Толщина стенки поперечного сечения стойки $t_1 = 5\text{мм}$ больше минимального требуемого значения $t = 2,5\text{мм}$ и меньше максимального значения $t = 25\text{мм}$.

Толщина стенки поперечного сечения верхнего пояса фермы $t_0 = 10\text{мм}$ больше минимального требуемого значения $t = 2,5\text{мм}$ и меньше максимального значения $t = 25\text{мм}$.

Все элементы выполнены из стали марки S355 с номинальным пределом текучести $f_y = 355\text{Н/мм}^2$, что ниже максимального требуемого значения номинального предела текучести $f_y = 460\text{Н/мм}^2$ (см. Пункт 7.1.1(4) СН РК EN 1993-1-8).

2.3 Определение основных геометрических характеристик узла

Согласно Рисунку 7.1 СН РК EN 1993-1-8 узел, разбираемый в данном примере, классифицируется как Т-образный узел с углом $\theta_1 = 90^\circ$ между стойкой и нижним поясом фермы. Угол $\theta_1 = 90^\circ$ соответствует требованиям Пункта 7.1.2(3) СН РК EN 1993-1-8, так как:

$$\theta_1 = 90^\circ > 30^\circ.$$

Необходимо также проверить требования геометрии узла по Таблице 7.1 СН РК EN 1993-1-8 для Т-образного узла сопряжения решетчатой конструкции из круглых труб (класс поперечного сечения - класс 1 или 2). Расчеты сведены в Таблицу 1.

Таблица 1 - Расчет требований по Таблице 7.1 СН РК EN 1993-1-8

Требования по таблице 7.1 СН РК EN 1993-1-8	Расчет геометрических характеристик К-образного узла сопряжения фермы
$0,2 \leq d_1/d_0 \leq 1,0$	$d_1/d_0 = 168/219 = 0,77$ $0,2 < 0,77 < 1,0$
$10 \leq d_0/t_0 \leq 50$	$d_0/t_0 = 219/10 = 21,9$ $10 < 21,9 < 50$
$10 \leq d_1/t_1 \leq 50$	$d_1/t_1 = 168/5 = 33,66$ $10 < 33,66 < 50$

Согласно Пункту 7.4.1(2) СН РК EN 1993-1-8, для узлов, соответствующих области применения, указанной в Таблице 7.1 СН РК EN 1993-1-8, необходимо рассматривать только разрушение лицевой поверхности пояса и вырывание полки пояса. Расчетное значение несущей способности узла следует принимать по наименьшему из значений, соответствующих данным двум критериям.

3 Определение несущей способности элементов узла

3.1 Несущая способность при продавливании лицевой поверхности пояса

Расчёт узла сопряжения из круглых труб по осевой сжимающей силе:

$$N_{1,Ed} = 500 \text{ кН}$$

Расчёт выполняется по Таблице 7.2 СН РК EN 1993-1-8. Для Т-образного плоского узла сопряжения из круглых труб расчетная несущая способность при продавливании лицевой поверхности пояса определяется по Формуле из Таблицы 7.2 СН РК EN 1993-1-8:

$$N_{1,Ed} = \frac{\gamma^{0,2} k_p f_{y0} t_0^2}{\sin \theta_1} \cdot (2,8 + 14,2 \beta^2) / \gamma_{M5}$$

где k_p - коэффициент, определяемый по Таблице 7.2 СН РК EN 1993-1-8;

γ - параметр, определяемый по формуле:

$$\gamma = \frac{d_0}{2t_0} = \frac{219,1}{2 \cdot 10} = 10,95;$$

f_{y0} - номинальный предел текучести стали нижнего пояса фермы, равный:

$$f_y = 355 \text{ Н/мм}^2;$$

t_0 - толщина стенки верхнего пояса фермы, равная:

$$t_0 = 10 \text{ мм};$$

β - отношение диаметров сопряженных элементов узла, определяемое по Формуле из Пункта 1.5(6) СН РК EN 1993-1-8:

$$\beta = \frac{d_1}{d_0} = \frac{168}{219} = 0,768;$$

θ_1 - угол между сопряженными элементами узла, равный:

$$\theta_1 = 90^\circ;$$

γ_{M5} - частный коэффициент безопасности, определяемый по примечанию Пункта 2.2 СН РК EN 1993-1-8, равный:

$$\gamma_{M5} = 1,0.$$

Коэффициент k_p определяется по Таблице 7.2 СН РК EN 1993-1-8. Так как, все сопряженные узлы подвержены сжатию, то коэффициент k_p - минимальное значение из двух величин: $1 - 0,3n_p \cdot (1 + n_p)$ и 1,0. То есть:

$$k_n = \min[1 - 0,3n_p \cdot (1 + n_p); 1,0],$$

где n_p - коэффициент использования сечения пояса определяемый по Формуле из Пункта 1.5(5) СН РК EN 1993-1-8:

$$n_p = \frac{\frac{\sigma_{p,Ed}}{f_{yo}}}{\gamma_{M5}} = \frac{\frac{\left(\frac{N_{0,Ed}}{A_0}\right)}{f_{yo}}}{\gamma_{M5}} = \frac{\left(\frac{1018 \cdot 10^3}{6569}\right)}{355} = 0,436$$

Следовательно,

$$1 - 0,3n_p \cdot (1 + n_p) = 1 - 0,3 \cdot 0,436 \cdot (1 + 0,436) = 0,81$$

$$k_p = \min[0,81; 1,0] = 0,81$$

Расчетная несущая способность по осевой силе из условия местного изгиба лицевой поверхности в зоне примыкания элемента решётки:

$$\begin{aligned} N_{1,Ed} &= \frac{\gamma^{0,2} k_p f_{yo} t_0^2}{\sin \theta_1} \cdot (2,8 + 14,2\beta^2) / \gamma_{M5} = \\ &= \frac{10,95^{0,2} \cdot 0,81 \cdot 355 \cdot 10^2}{\sin 90^\circ} (2,8 + 14,2 \cdot 0,768) / 1 \\ N_{1,Rd} &= 636 \text{ кН} \end{aligned}$$

Расчётная несущая способность по осевой силе из условия местного изгиба лицевой поверхности в зоне примыкания элемента решётки обеспечена, так как:

$$\frac{N_{1,Ed}}{N_{1,Rd}} = \frac{500}{636} = 0,78 < 1,0$$

Условие выполняется.

3.2 Несущая способность при вырывании лицевой поверхности пояса

Расчёт несущей способности при вырывании лицевой поверхности пояса выполняется по Таблице 7.2 СН РК EN 1993-1-8, так как соблюдается условие:

$$d_1 \leq d_0 - 2t_0$$

$$d_1 = 168,3 \text{ мм} \leq d_0 - 2t_0 = 219,1 - 2 \cdot 10 = 199,1 \text{ мм}$$

Для Т-образного плоского узла сопряжения из круглых труб расчетная несущая способность при вырывании лицевой поверхности пояса определяется по Формуле из Таблицы 7.2 СН РК EN 1993-1-8:

$$N_{1,Ed} = \frac{f_{yo}}{\sqrt{3}} \cdot t_0 \cdot \pi \cdot d_1 \cdot \frac{1 + \sin \theta_1}{2 \sin^2 \theta_1} / \gamma_{M5}$$

где f_{yo} - номинальный предел текучести стали нижнего пояса фермы, равный:

$$f_y = 355 \text{ Н/мм}^2;$$

t_0 - толщина стенки сечения нижнего пояса фермы, равная:

$$t_0 = 10 \text{ мм};$$

d_1 - диаметр сечения стойки, равный:

$$d_1 = 168,3 \text{ мм};$$

θ_1 - угол между сопряженными элементами узла, равный:

$$\theta_1 = 90^\circ;$$

γ_{M5} - частный коэффициент безопасности, определяемый по примечанию Пункта 2.2 СН РК EN 1993-1-8, равный:

$$\gamma_{M5} = 1,0.$$

Значит,

$$N_{1,Ed} = \frac{f_{y0}}{\sqrt{3}} \cdot t_0 \cdot \pi \cdot d_1 \cdot \frac{1 + \sin \theta_1}{2 \sin^2 \theta_1} / \gamma_{M5} =$$

$$N_{1,Rd} = \frac{355}{\sqrt{3}} \cdot 10 \cdot \pi \cdot 168,3 \cdot \frac{1 + \sin 90^\circ}{2 \sin^2 90^\circ} / 1,0 = 1083,1 \text{ кН}$$

Расчётная несущая способность по осевой силе из условия вырывания лицевой поверхности пояса в зоне примыкания элемента решётки обеспечена, так как:

$$\frac{N_{1,Ed}}{N_{1,Rd}} = \frac{500}{1083} = 0,46 < 1,0$$

Условие выполняется. Предоставить обстоятельствам

ПРИМЕР 21. Расчета К-образного узла сопряжения элементов из круглых труб

Исходные данные: выполнить расчет несущей способности К-образного узла фермы. К-образный узел - сопряжение нижнего пояса фермы с двумя диагоналями. Нижний пояс представляет собой прокатный профиль замкнутого сечения - круглая труба сечением 219×12,5мм, левая диагональ - круглая труба сечением 140×5мм, правая диагональ - круглая труба сечением 114×4мм.

Угол сопряжения диагоналей с нижним поясом фермы составляет $\theta_1 = \theta_2 = 45^\circ$. Зазор сопряжения диагоналей к нижнему поясу фермы $g = 40$ мм.

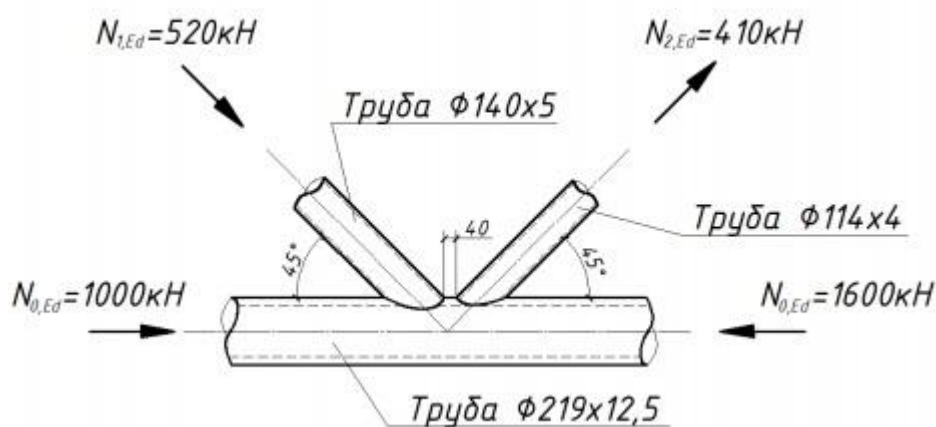


Рисунок 1 - Схема нагружения узла фермы

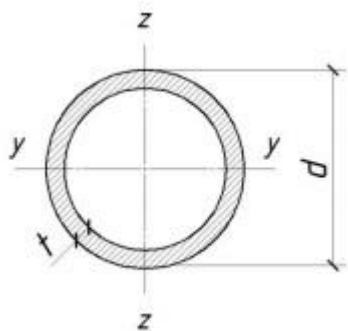
2 Определение характеристик узла

2.1 Определение класса поперечного сечения

2.1.1 Круглая труба сечением 219×12,5мм

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

$$\varepsilon = \sqrt{235/f_y} = \sqrt{235/355} = 0,81$$



Круглая труба 219×12,5мм:

- диаметр $d_0 = 219\text{мм}$;
- толщина стенки $t_0 = 12,5\text{мм}$;
- площадь поперечного сечения $A_0 = 8109\text{мм}^2$.

Круглая труба 140×5мм:

- высота $d_1 = 140\text{мм}$;
- толщина стенки $t_1 = 5\text{мм}$;
- площадь поперечного сечения $A_1 = 2121\text{мм}^2$.

Круглая труба 114×4мм:

- высота $d_2 = 114\text{мм}$;
- толщина стенки $t_2 = 4\text{мм}$;
- площадь поперечного сечения $A_2 = 1382\text{мм}^2$.

Рисунок 2 - Геометрические характеристики

Отношение диаметра трубы к ее толщине:

$$\frac{d}{t} = \frac{d_0}{t_0} = \frac{219}{12,5} = 17,52$$

По Таблице 5.2 СН РК EN 1993-1-1 предельно допустимое значение для сечений класса 1:

$$\frac{d}{t} \leq 50\epsilon^2$$

$$50\epsilon^2 = 50 \cdot 0,81^2 = 32,8$$

$$17,52 < 32,80 \rightarrow \text{сечение класса 1}$$

2.1.2 Круглая труба сечением 140×5мм

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

$$\epsilon = \sqrt{235/f_y} = \sqrt{235/355} = 0,81$$

Отношение диаметра трубы к ее толщине:

$$d/t = d_1/t_2 = 140/5 = 28,0$$

По Таблице 5.2 СН РК EN 1993-1-1 1 предельно допустимое значение для сечений класса 1:

$$\frac{d}{t} \leq 50\epsilon^2$$

$$50\epsilon^2 = 50 \cdot 0,81^2 = 32,8$$

$$28,0 < 32,80 \rightarrow \text{сечение класса 1}$$

Все поперечные сечения (круглых труб сечением 219×12,5мм и сечением 140×5мм) относятся к 1 классу сечения, что удовлетворяет требованиям Пункта 7.1.2(2) СН РК EN 1993-1-8.

2.2 Определение основных физико-механических характеристик узла

В данном примере рассматривается узел сопряжения решетчатой конструкции из замкнутых профилей круглого сечения. Требования и расчет узлов сопряжения элементов круглого замкнутого профиля описаны в Пункте 7.4 СН РК EN 1993-1-8.

Узел состоит из трех профилей: круглых труб сечением 219×12,5мм (нижний пояс фермы, см. Рисунок 1), сечением 140×5мм и сечением 114×4мм. Нижний пояс испытывает действие сжимающей силы $N_{0,Ed} = 1000\text{кН}$, левая диагональ - сжимающей силы $N_{1,Ed} = 520\text{кН}$, а правая диагональ - растягивающей силы $N_{2,Ed} = 410\text{кН}$.

Номинальные толщины стенок использованных в примере круглых труб удовлетворяют требованиям Пунктов 7.1.1(5) и 7.1.1(6) СН РК EN 1993-1-8.

Толщина стенки поперечного сечения диагоналей $t_1 = 5\text{мм}$ и $t_2 = 4\text{мм}$ больше минимального требуемого значения $t = 2,5\text{мм}$ и меньше максимального значения $t = 25\text{мм}$.

Толщина стенки поперечного сечения нижнего пояса фермы $t_0 = 12,5\text{мм}$ больше минимального требуемого значения $t = 2,5\text{мм}$ и меньше максимального значения $t = 25\text{мм}$.

Все элементы выполнены из стали марки S355 с номинальным пределом текучести $f_y = 355\text{Н/мм}^2$, что ниже максимального требуемого значения номинального предела текучести $f_y = 460\text{Н/мм}^2$ (см. Пункт 7.1.1(4) СН РК EN 1993-1-8).

2.3 Определение основных геометрических характеристик узла

Согласно Рисунку 7.1 СН РК EN 1993-1-8, узел, разбираемый в данном примере, классифицируется как К-образный узел с углами $\theta_1 = 45^\circ$ (между левой диагональю и поясом фермы) и $\theta_2 = 45^\circ$ (между правой диагональю и поясом фермы). Значения углов соответствует требованиям Пункта 7.1.2(3) СН РК EN 1993-1-8, так как:

$$\theta_1 = \theta_2 = 45^\circ > 30^\circ.$$

Условия геометрии узла сопряжения требуют проверки выражения:

$$\begin{aligned} -0,55h_0 &\leq e \leq 0,25h_0 \\ -0,55h_0 &= -0,55 \cdot 219 = -120,45\text{мм} \text{ и } 0,25h_0 = 0,25 \cdot 219 = 54,75\text{мм} \\ -120,45\text{мм} &< 0\text{мм} < 54,75\text{мм} \text{ (условие выполняется)} \end{aligned}$$

Согласно Пункту 7.1.2(5) СН РК EN 1993-1-1, величина зазора между стержнями решетки в узле сопряжения должна быть не менее:

$$\begin{aligned} g &\geq t_1 + t_2 \\ 40\text{мм} &> 5 + 4 = 9\text{мм} \text{ (условие выполняется)}. \end{aligned}$$

Необходимо также проверить требования геометрии узла по Таблице 7.1 СН РК EN 1993-1-8 для К-образного узла сопряжения решетчатой конструкции из замкнутых профилей (класс поперечного сечения - класс 1) с зазором между диагоналями. Расчеты сведены в Таблицу 1.

Таблица 1 - Расчет требований по Таблице 7.1 СН РК EN 1993-1-8

Требования по таблице 7.1 СН РК EN 1993-1-8	Расчет геометрических характеристик К-образного узла сопряжения фермы
$0,2 \leq \frac{d_i}{d_0} \leq 1,0$	$d_1/d_0 = 140/219 = 0,64$ $0,2 < 0,64 < 1,0$
$10 \leq \frac{d_0}{t_0} \leq 50$	$d_0/t_0 = 219/12,5 = 17,52$ $10 < 17,52 < 50$
$10 \leq \frac{d_1}{t_1} \leq 50$	$d_1/t_1 = 140/5 = 28$ $10 < 28 < 50$

Согласно Пункту 7.4.1(2) СН РК EN 1993-1-8, для узлов, соответствующих области применения, указанной в Таблице 7.1 СН РК EN 1993-1-8, необходимо рассматривать только разрушение лицевой поверхности пояса и вырывание полки пояса. Расчетное значение несущей

способности узла следует принимать по наименьшему из значений, соответствующих данным двум критериям.

3 Определение несущей способности по осевой силе

3.1 Несущая способность при продавливании лицевой поверхности пояса

3.1.1 Сжатый стержень

Расчёт узла сопряжения из квадратных труб по осевой сжимающей силе:

$$N_{1,Ed} = 520 \text{ кН}$$

Расчёт выполняется по Таблице 7.2 СН РК EN 1993-1-8. Для К-образного плоского узла сопряжения из круглых труб расчетная несущая способность при продавливании лицевой поверхности пояса определяется по Формуле из Таблицы 7.2 СН РК EN 1993-1-8:

$$N_{1,Ed} = \frac{k_g k_p f_{y0} t_0^2}{\sin \theta_1} \cdot \left(1,8 + 10,2 \frac{d_1}{d_0} \right) / \gamma_{M5}$$

где k_p и k_g - коэффициенты, определяемые по Таблице 7.2 СН РК EN 1993-1-8;

f_{y0} - номинальный предел текучести стали нижнего пояса фермы, равный:

$$f_y = 355 \text{ Н/мм}^2;$$

t_0 - толщина стенки сечения нижнего пояса фермы, равная:

$$t_0 = 120,5 \text{ мм};$$

β - отношение диаметров сопряженных элементов узла, определяемое по Формуле из Пункта 1.5(6) СН РК EN 1993-1-8:

$$\beta = \frac{d_1}{d_0} = \frac{140}{219} = 0,64$$

θ_1 - угол между сопряженными элементами узла, равный:

$$\theta_1 = 90^\circ;$$

γ_{M5} - частный коэффициент безопасности, определяемый по примечанию Пункта 2.2 СН РК EN 1993-1-8, равный:

$$\gamma_{M5} = 1,0.$$

Коэффициент k_p определяется по формуле из Таблицы 7.2 СН РК EN 1993-1-8:

$$k_g = \gamma^{0,2} \left(1 + \frac{0,024 \gamma^{1,2}}{1 + \exp(0,5g/t_0 - 1,33)} \right)$$

$$\gamma = \frac{d_0}{2t_0} = \frac{219}{2 \cdot 12,5} = 8,76$$

Значит,

$$k_g = 8,76^{0,2} \left(1 + \frac{0,024 \cdot 8,76^{1,2}}{1 + \exp(0,5 \cdot 40/12,5 - 1,33)} \right) = 1,76$$

Коэффициент k_p определяется по Таблице 7.2 СН РК EN 1993-1-8. Так как, все сопряженные узлы подвержены сжатию, то коэффициент k_p - минимальное значение из двух величин: $1 - 0,3n_p \cdot (1 + n_p)$ и 1,0. То есть:

$$k_n = \min[1 - 0,3n_p \cdot (1 + n_p); 1,0],$$

где n_p - коэффициент использования сечения пояса определяемый по Формуле из Пункта 1.5(5) СН РК EN 1993-1-8:

$$n_p = \frac{\frac{\sigma_{p,Ed}}{f_{yo}}}{\gamma_{M5}} = \frac{\frac{\left(\frac{N_{0,Ed}}{A_0}\right)}{f_{yo}}}{\gamma_{M5}} = \frac{\left(\frac{1000 \cdot 10^3}{8110}\right)}{355} = \frac{1,0}{1,0} = 0,347$$

Следовательно,

$$1 - 0,3n_p \cdot (1 + n_p) = 1 - 0,3 \cdot 0,347 \cdot (1 + 0,347) = 0,86$$

$$k_p = \min[0,86; 1,0] = 0,86$$

Расчетная несущая способность по осевой силе из условия продавливания лицевой поверхности пояса в зоне примыкания элемента решётки:

$$N_{1,Ed} = \frac{k_g k_p f_{yo} t_0^2}{\sin \theta_1} \cdot \left(1,8 + 10,2 \frac{d_1}{d_0}\right) / \gamma_{M5}$$

$$N_{1,Rd} = \frac{1,76^{0,2} \cdot 0,86 \cdot 355 \cdot 12,5^2}{\sin 45^\circ} (1,8 + 10,2 \cdot 0,64) / 1 = 985 \text{ кН}$$

Расчётная несущая способность по осевой силе из условия продавливания лицевой поверхности пояса в зоне примыкания элемента решётки обеспечена, так как:

$$\frac{N_{1,Ed}}{N_{1,Rd}} = \frac{520}{985} = 0,53 < 1,0$$

Условие выполняется.

3.1.2 Растянутый стержень

Расчёт выполняется по Таблице 7.2 СН РК EN 1993-1-8. Для К-образного плоского узла сопряжения из круглых труб расчетная несущая способность определяется по Формуле из Таблицы 7.2 СН РК EN 1993-1-8:

$$N_{2,Rd} = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} \cdot N_{1,Rd} = \frac{\sin 45}{\sin 45} \cdot 985 = 985 \text{ кН}$$

Проверка условия прочности:

$$\frac{N_{2,Ed}}{N_{2,Rd}} = \frac{410}{985} = 0,42 < 1,0$$

Условие выполняется.

3.2 Несущая способность при вырывании лицевой поверхности пояса

Расчёт выполняется по Таблице 7.2 СН РК EN 1993-1-8, так как соблюдается условие:

$$d_i \leq d_0 - 2t_0$$

$$d_1 = 140 \leq d_0 - 2t_0 = 219 - 2 \cdot 12,5 = 194 \text{ мм}$$

Для Т-образного плоского узла сопряжения из круглых труб расчетная несущая способность при вырывании лицевой поверхности пояса определяется по Формуле из Таблицы 7.2 СН РК EN 1993-1-8:

$$N_{1,Ed} = \frac{f_{yo}}{\sqrt{3}} \cdot t_0 \cdot \pi \cdot d_1 \cdot \frac{1 + \sin \theta_1}{2 \sin^2 \theta_1} / \gamma_{M5}$$

где f_{yo} - номинальный предел текучести стали нижнего пояса фермы, равный:

$$f_y = 355 \text{ Н/мм}^2;$$

t_0 - толщина стенки сечения нижнего пояса фермы, равная:

$$t_0 = 12,5 \text{ мм};$$

d_1 - диаметр сечения стойки, равный:

$$d_1 = 140 \text{ мм};$$

θ_1 - угол между сопряженными элементами узла, равный:

$$\theta_1 = 45^\circ;$$

γ_{M5} - частный коэффициент безопасности, определяемый по примечанию Пункта 2.2 СН РК EN 1993-1-8, равный:

$$\gamma_{M5} = 1,0.$$

Значит,

$$\begin{aligned} N_{1,Ed} &= \frac{f_{yo}}{\sqrt{3}} \cdot t_0 \cdot \pi \cdot d_1 \cdot \frac{1 + \sin \theta_1}{2 \sin^2 \theta_1} / \gamma_{M5} = \\ &= \frac{355}{\sqrt{3}} \cdot 12,5 \cdot \pi \cdot 140 \cdot \frac{1 + \sin 45^\circ}{2 \sin^2 45^\circ} / 1,0 \\ N_{1,Rd} &= 1923 \text{ кН} \end{aligned}$$

Расчётная несущая способность при вырывании лицевой поверхности пояса в зоне примыкания элемента решётки обеспечена, так как:

$$\frac{N_{1,Ed}}{N_{1,Rd}} = \frac{520}{1923} = 0,27 < 1,0$$

Условие выполняется.

7.5 Сварные узлы сопряжения стержней решетки из круглых или прямоугольных труб с поясами из прямоугольных труб

7.5.1 Общие положения

7.5.1.1 Расчетные значения несущей способности сварных узлов сопряжения стержней решетки из круглых или прямоугольных труб с поясами из прямоугольных труб могут быть определены согласно Пунктам 7.5.2 и 7.5.3 настоящего пособия при условии, что геометрические параметры узлов соответствуют области применения, указанной в Таблице 7.8.

7.5.1.2 Для узлов, соответствующих области применения, указанной в Таблице 7.8, необходимо учитывать только те расчетные критерии, которые приведены в соответствующей таблице. Расчетное значение несущей способности узла следует принимать по наименьшему из значений, соответствующих всем рассматриваемым критериям.

7.5.1.3 Для узлов, не соответствующих области применения, указанной в Таблице 7.8, следует учитывать все виды критериев, приведенные в Пункте 7.2.2 настоящего пособия. Кроме того, следует учитывать дополнительные моменты в узлах, обусловленные вращательной жесткостью узлов.

Таблица 7.8 - Область применения сварных узлов сопряжения стержней решетки из круглых или прямоугольных труб с поясами из прямоугольных труб

Тип узла	Параметры узла [$i = 1$ или $2, j =$ перекрываемый стержень решетки]					
	b_i/b_0 или d_i/b_0	b_i/t_i и h_i/t_i или d_i/t_i		h_0/b_0 или h_i/b_i	b_0/t_0 или h_0/t_0	С зазором или нахлестом b_i/b_j
		Сжатие	Растяжение			
Т, Y или X	$b_i/b_0 \geq 0,25$	$b_i/t_i \leq 35$ и $h_i/t_i \leq 35$	$b_i/t_i \leq 35$ и $h_i/t_i \leq 35$	$\geq 0,5$, но $\leq 2,0$	≤ 35 и сечение класса 2	-
К с зазором N с зазором	$b_i/b_0 \geq 0,35$ и $\geq 0,1 + 0,01b_0/t_0$	и сечение класса 2			≤ 35 и сечение класса 2	$g/b_0 \geq 0,5 \cdot (1-\beta)$, но $\leq 1,5 \cdot (1-\beta)^{1)}$ и как минимум, $g \geq t_1 + t_2$
К с нахлестом N с нахлестом	$b_i/b_0 \geq 0,25$	Сечение класса 1			Сечение класса 2	$\lambda_{ov} \geq 25 \%$, но $\lambda_{ov} \leq 100 \%^{2)}$ и $b_i/b_j \geq 0,75$
Стержень решетки круглого сечения	$d_i/b_0 \geq 0,4$, но $\leq 0,8$	Сечение класса 1	$d_i/t_i \leq 50$	Как указано выше, но d_i заменяется на b_i и d_j заменяется на b_j		

¹⁾Если $g/b_0 > 1,5 \cdot (1-\beta)$ и $g/b_0 > t_1 + t_2$, узел рассматривается как два Т- или Y-образных узла.

²⁾Величина нахлеста может быть увеличена, чтобы обеспечить приварку торца перекрываемого стержня решетки (стержня с подрезкой) к поясу.

7.5.2 Плоские узлы

7.5.2.1 Неусиленные узлы

7.5.2.1.1 В соединениях стержней решетки, подверженных действию только осевых сил, расчетное значение внутренней осевой силы $N_{i,Ed}$ не должно превышать расчетной несущей способности сварного узла $N_{i,Rd}$, определяемой согласно Пунктам 7.5.2.1.2 или 7.5.2.1.4 настоящего пособия.

7.5.2.1.2 Расчетная несущая способность по осевой силе сварных узлов сопряжения стержней решетки из квадратных или круглых труб с поясами из квадратных труб могут быть определены по Формулам Таблицы 7.10 при условии, что геометрические параметры узлов соответствуют области применения, указанной в Таблице 7.8, и выполняются дополнительные условия, приведенные в Таблице 7.9.

7.5.2.1.3 Для узлов, соответствующих области применения, указанной в Таблице 7.9, следует рассматривать только местный изгиб (продавливание лицевой поверхности пояса) и потерю местной устойчивости стержня решетки с уменьшенной эффективной шириной.

Расчетную несущую способность узла по осевой силе следует принимать по наименьшему из значений, соответствующих этим двум критериям.

ПРИМЕЧАНИЕ Определение расчетной несущей способности по осевой силе узлов сопряжения стержней решетки из труб с поясами из квадратных труб может быть упрощено, пренебрегая критериями расчета, которые не могут быть критическими в области применения, указанной в Таблице 7.9.

7.5.2.1.4 Расчетная несущая способность по осевой силе неусиленных сварных узлов сопряжения стержней решетки из прямоугольных или круглых труб с поясом из прямоугольных труб может быть определена по Формулам Таблиц 7.10, 7.11, 7.12 или 7.13 при условии, что геометрические параметры узлов соответствуют области применения, указанной в Таблице 7.8. Усиленные узлы рассмотрены в Пунктах 7.5.2.2 настоящего пособия.

Таблица 7.9 - Дополнительные условия при использовании Таблицы 7.10

Тип стержня решетки	Тип узла	Параметры узла	
Квадратная труба	Т, Y или X	$b_i / b_0 \geq 0,85$	Квадратная труба
	К или N с нахлестом	$0,6 \leq \frac{b_1 + b_2}{2b_1} \leq 1,3$	
Круглая труба	Т, Y или X		Круглая труба
	К или N с нахлестом	$0,6 \leq \frac{d_1 + d_2}{2d_1} \leq 1,3$	

Таблица 7.10 — Расчетная несущая способность по осевой силе сварных узлов сопряжения стержней из квадратных или круглых труб

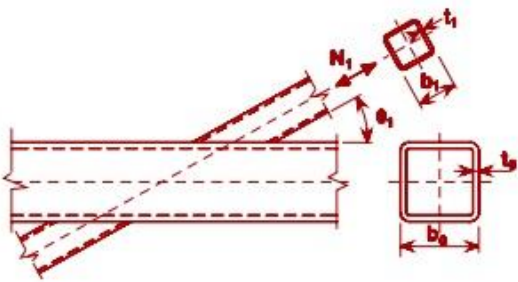
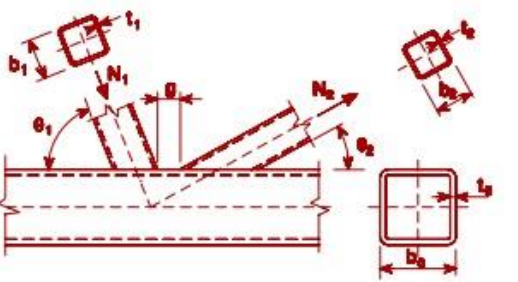
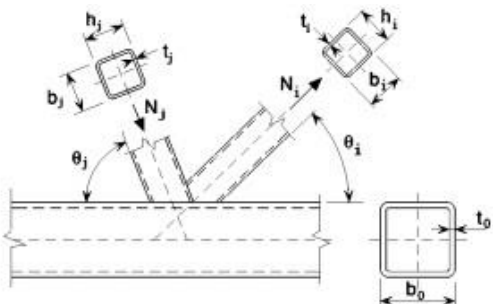
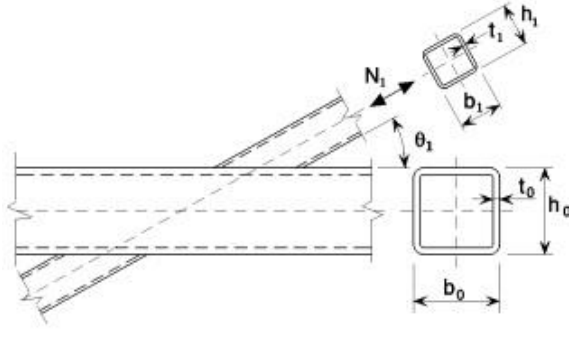
Тип узла	Расчетная несущая способность, вид отказа [$i = 1$ или $2, j =$ перекрывааемый стержень решетки]
Т, Y и X	Местный изгиб лицевой поверхности пояса $\beta \leq 0,85$
	$N_{1,Rd} = \frac{k_n f_{y0} t_0^2}{(1-\beta) \cdot \sin \theta_1} \cdot \left(\frac{2\beta}{\sin \theta_1} + 4 \cdot \sqrt{1-\beta} \right) / \gamma_{M5}$
К и N с зазором	Местный изгиб лицевой поверхности пояса $\beta \leq 1,0$
	$N_{i,Rd} = \frac{8,9 \gamma^{0,5} k_n f_{y0} t_0^2}{\sin \theta_i} \cdot \left(\frac{b_1 + b_2}{2b_0} \right) / \gamma_{M5}$
К и N с нахлестом*	Потеря несущей способности стержня решетки $25\% \leq \lambda_{0V} < 50\%$
Стержни i и j могут быть сжаты или растянуты, но один из них должен быть растянут, а другой — сжат	$N_{i,Rd} = f_{yi} t_i \cdot \left(b_{eff} + b_{e,ov} + 2h_i \frac{\lambda_{ov}}{50} - 4t_i \right) / \gamma_{M5}$
	Потеря несущей способности стержня b решетки $50\% \leq \lambda_{0V} \leq 80\%$
	$N_{i,Rd} = f_{yi} t_i \cdot \left[b_{eff} + b_{e,ov} + 2h_i - 4t_i \right] / \gamma_{M5}$
	Потеря несущей способности стержня решетки $\lambda_{0V} \geq 80\%$
	$N_{i,Rd} = f_{yi} t_i \cdot \left[b_i + b_{e,ov} + 2h_i - 4t_i \right] / \gamma_{M5}$

Таблица 7.10 - Расчетная несущая способность по осевой силе сварных узлов сопряжения стержней из квадратных или круглых труб
(продолжение)

Тип узла	Расчетная несущая способность, вид отказа [$i = 1$ или $2, j =$ перекрываемый стержень решетки]
Параметры b_{eff} , $b_{e,ov}$ и k_n	
$b_{eff} = \frac{10}{b_0/t_0} \cdot \frac{f_{y0}t_0}{f_{yi}t_i} \cdot b_i, \text{ но } b_{eff} \leq b_i$	При $n > 0$ (сжатие) $k_n = 1,3 - \frac{0,4n}{\beta}, \text{ но } k_n \leq 1,0$ При $n \leq 0$ (растяжение). $k_n = 1,0$
$b_{e,ov} = \frac{10}{b_j/t_j} \cdot \frac{f_{yj}t_j}{f_{yi}t_i} \cdot b_i, \text{ но } b_{e,ov} \leq b_i$	
Для стержней решетки из круглых труб значение несущей способности умножается на $\pi/4$; b_1 и h_1 заменяют на d_1 , а b_2 и h_2 заменяют на d_2 .	
* Следует проверять только перекрывающий стержень решетки i . Эффективность перекрываемого стержня решетки j (т. е. расчетная несущая способность узла, деленная на расчетную несущую способность стержня решетки в пластической стадии) следует принимать равной эффективности перекрывающего стержня решетки	

Таблица 7.11 — Расчетная несущая способность по осевой силе сварных Т-, Х- и Y-образных узлов сопряжения стержней решетки из прямоугольных или круглых труб с поясами из прямоугольных труб

Тип узла	Расчетная несущая способность, вид отказа [$i = 1$]
	Местный изгиб лицевой поверхности пояса $\beta \leq 0,85$
	$N_{1,Rd} = \frac{k_n f_{y0} t_0^2}{(1 - \beta) \cdot \sin \theta_1} \cdot \left(\frac{2\eta}{\sin \theta_1} + 4 \cdot \sqrt{1 - \beta} \right) / \gamma_{M5}$
	Деформация стенки пояса ¹⁾ $\beta = 0,85$ ²⁾
	$N_{1,Rd} = \frac{f_b t_0}{\sin \theta_1} \cdot \left(\frac{2h_1}{\sin \theta_1} + 10t_0 \right) / \gamma_{M5}$
	Потеря несущей способности стержня решетки $\beta \leq 0,85$
	Вырывание лицевой поверхности пояса $0,85 \leq \beta \leq (1 - 1/\gamma)$
	$N_{1,Rd} = \frac{f_{y0} t_0}{\sqrt{3 \sin \theta_1}} \cdot \left(\frac{2h_1}{\sin \theta_1} + 2b_{e,p} \right) / \gamma_{M5}$
<p>¹⁾ Для Х-образных узлов при $\theta \leq 90^\circ$ используется наименьшее из этих значений. Значение расчетной несущей способности соответствующей деформации боковой поверхности пояса принимается по Таблице 7.12 как для К- и N-образных узлов с зазором.</p> <p>²⁾ При $0,85 \leq \beta \leq 1,0$ используется линейная интерполяция между значением расчетной несущей способности, соответствующей местному изгибу лицевой поверхности пояса при $\beta = 0,85$ и значением несущей способности, которое предопределяет деформацию боковой поверхности пояса при $\beta = 1,0$ (потеря устойчивости боковой стенки пояса или сдвиг стенки пояса).</p>	
Для стержней решетки из круглых труб значение несущей способности умножается на $\pi/4$; b_1 и h_1 заменяют на d_1 , а b_2 и h_2 заменяют на d_2	
<p>При растяжении $f_b = f_{y0}$</p> <p>При сжатии:</p> <p>$f_b = \chi f_{y0}$ (Т- и Y-образные узлы); $f_b = 0,8 \chi f_{y0} \sin \theta_1$ (Х-образные узлы),</p> <p>где χ — понижающий коэффициент для плоской формы потери устойчивости, полученный по EN 1993-1-1 с использованием соответствующей кривой потери устойчивости и значения условной гибкости $\bar{\lambda}$, определяемой по формуле:</p> $\lambda = 3,46 \cdot \frac{\left(\frac{h_0}{t_0} - 2 \right) \sqrt{\frac{1}{\sin \theta_1}}}{\pi \sqrt{\frac{E}{f_{y0}}}}$	$b_{eff} = \frac{10}{b_0/t_0} \cdot \frac{f_{y0} t_0}{f_{yt} t_1} b_1, \text{ но } b_{eff} \leq b_1$
	$b_{e,p} = \frac{10}{b_0 t_0} \cdot b_1, \text{ но } b_{e,p} \leq b_1$
	<p>При $n > 0$ (сжатие)</p> $k_n = 1,3 - \frac{0,4n}{\beta}, \text{ но } k_n \leq 1,0$ <p>При $n \leq 0$ (растяжение)</p> $k_n = 1,0$

7.5.2.1.5 Узлы сопряжения стержней решетки, подверженных совместному действию осевой силы и изгибающего момента, должны удовлетворять следующему условию:

$$\frac{N_{i,Ed}}{N_{i,Rd}} + \frac{M_{ip,i,Ed}}{M_{ip,i,Rd}} + \frac{M_{op,i,Ed}}{M_{op,i,Rd}} \leq 1,0, \quad (7.4)$$

где

$M_{ip,i,Rd}$ — расчетная несущая способность на действие изгибающего момента в плоскости узла;

$M_{ip,i,Ed}$ — расчетный внутренний изгибающий момент в плоскости узла;

$M_{op,i,Rd}$ — расчетная несущая способность на действие изгибающего момента из плоскости узла;

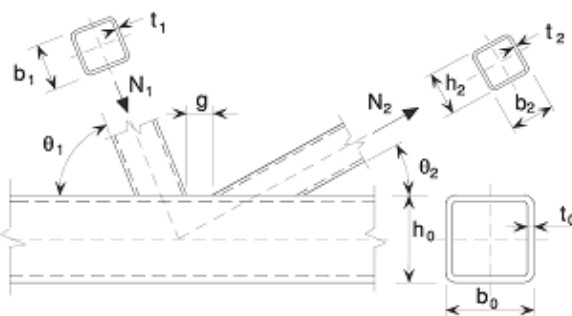
$M_{op,i,Ed}$ — расчетный внутренний изгибающий момент из плоскости узла.

7.5.2.1.6 За расчетное значение внутреннего момента $M_{i,Ed}$ может быть принято значение момента в точке пересечения оси стержня решетки с лицевой поверхностью пояса.

7.5.2.1.7 Расчетные значения несущей способности неусиленных узлов на изгиб в плоскости и из плоскости узла $M_{i,Rd}$ следует определять по Таблицам 7.13 или 7.14. Усиленные узлы см. в Пункте 7.5.2.2 настоящего пособия.

7.5.2.1.8 Сварные узлы сопряжения особого типа, приведенные в Таблицах 7.15 и 7.16, должны удовлетворять соответствующим расчетным критериям, установленным в таблице для каждого типа.

Таблица 7.12 - Расчетная несущая способность по осевой силе сварных К- и N-образных узлов сопряжения стержней решетки из прямоугольных или круглых труб с поясами из прямоугольных труб

Тип узла	Расчетная несущая способность, вид отказа [<i>i</i> = 1 или 2]
К и N с зазором	Местный изгиб лицевой поверхности пояса
	$N_{i,Rd} = \frac{8,9k_n f_{y0} t_0^2 \sqrt{\gamma}}{\sin \theta_1} \cdot \left(\frac{b_1 + b_2 + h_1 + h_2}{4b_0} \right) / \gamma_{M5}$
	Сдвиг (срез) сечения пояса
	$N_{i,Rd} = \frac{f_{y0} A_v}{\sqrt{3} \sin \theta_1} / \gamma_{M5}$
	$N_{0,Rd} = \left[(A_0 - A_v) \cdot f_{y0} + A_v f_{y0} \cdot \sqrt{1 - (V_{Ed} / V_{pl,Rd})^2} \right] / \gamma_{M5}$
	Потеря несущей способности стержня решетки
	$N_{i,Rd} = f_{yi} t_i \cdot (2h_i - 4t_i + 2b_{eff}) / \gamma_{M5}$
	Вырывание лицевой поверхности пояса $0,85 \leq \beta \leq (1 - 1/\gamma)$
	$N_{i,Rd} = \frac{f_{y0} t_0}{\sqrt{3} \sin \theta_1} \cdot \left(\frac{2h_i}{\sin \theta_1} + b_i + b_{e,p} \right) / \gamma_{M5}$
К и N с нахлестом	По Таблице 7.10
Для стержней решетки из круглых труб значения несущей способности умножаются на $\pi/4$; b_1 и h_1 заменяют на d_1 , а b_2 и h_2 заменяют на d_2	
<p>Для стержней решетки из прямоугольных труб</p> $A_v = (2h_0 + \alpha b_0) \cdot t_0$ $\alpha = \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{4g^2}{3t_0^2}}}$ <p>где g - зазор, см. Рисунок 1.3 а). Для стержней решетки из круглых труб $\alpha = 0$</p>	$b_{eff} = \frac{10}{b_0/t_0} \cdot \frac{f_{y0} t_0}{f_{yi} t_i} \cdot b_i, \text{ но } b_{eff} \leq b_i$
	$b_{e,p} = \frac{10}{b_0/t_0} \cdot b_i, \text{ но } b_{e,p} \leq b_i$
	<p>При $n > 0$ (сжатие)</p> $k_n = 1,3 - \frac{0,4n}{\beta}, \text{ но } k_n \leq 1,0$ <p>При $n \leq 0$ (растяжение) $k_n = 1,0$.</p>

7.5.2.2 Усиленные узлы

7.5.2.2.1 Могут применяться различные типы усиления узлов. Тип усиления зависит от вида отказа, который предопределяет несущую способность узла при отсутствии усиления.

7.5.2.2.2 Поясные накладки в узле могут применяться для повышения несущей способности на местный изгиб лицевой поверхности пояса, несущей способности на вырывание лицевой поверхности пояса или несущей способности стержня решетки с уменьшенной эффективной шириной.

7.5.2.2.3 Двусторонние боковые накладки в узле могут применяться для повышения несущей способности по деформации боковой поверхности пояса или несущей способности сечения пояса на сдвиг (срез).

7.5.2.2.4 Во избежание частичного нахлеста стержней решетки в К- и N-образных узлах, эти стержни могут быть приварены к вертикальному ребру жесткости.

7.5.2.2.5 Можно также использовать любые сочетания этих трех типов усиления узлов.

7.5.2.2.6 Марка стали элементов усиления должна быть не ниже марки стали пояса.

7.5.2.2.7 Расчетную несущую способность усиленных узлов следует определять по Таблицам 7.17 и 7.18.

Таблица 7.13 - Расчетная несущая способность сварных узлов сопряжения фасонки или стержня из двутавра со стержнями из прямоугольных труб

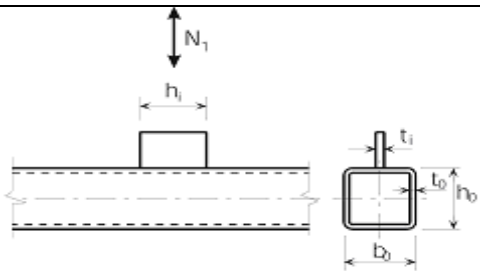
Поперечная фасонка	Потеря несущей способности стержня решетки [$i = 1$]
	$N_{1,Rd} = f_{y1} t_1 b_{eff} / \gamma_{M5} *$
	Раздавливание боковой поверхности прямоугольной трубы при $b_1 \geq b_0 - 2t_0$
	$N_{1,Rd} = f_{y0} t_0 \cdot (2t_1 + 10t_0) / \gamma_{M5}$
	Вырывание лицевой поверхности прямоугольной трубы при $b_1 \leq b_0 - 2t_0$
	$N_{1,Rd} = \frac{f_{y0} t_0}{\sqrt{3}} \cdot (2t_1 + 2b_{e,p}) / \gamma_{M5}$
Продольная фасонка	Местный изгиб лицевой поверхности прямоугольной трубы
 <p>$t_1/b_0 \leq 0,2$</p>	$N_{1,Rd} = \frac{k_m f_{y0} t_0^2}{1 - t_1/b_0} \cdot (h_1/b_0 + 4 \cdot \sqrt{1 - t_1/b_0}) / \gamma_{M5}$
Двутавр	
	<p>При $\eta < 2 \cdot \sqrt{1 - \beta}$ значение $N_{1,Rd}$ для двутавра в случае примыкания к поясу с некоторым запасом можно принять равным расчетной несущей способности двух поперечных фасонки, равных по размерам полкам двутавра, определяемой как указано выше. Если $\eta < 2 \cdot \sqrt{1 - \beta}$, следует применять линейную интерполяцию между расчетными несущими способностями узла с одной и двумя фасонками.</p> <p>$M_{ip,1,Rd} = N_{1,Rd} \cdot (h_1 - t_1)$</p>
Область применения	
Дополнительные ограничения к приведенным в Таблице 7.8:	
$0,5 \leq \beta \leq 1,0$	
$b_0 / t_0 \leq 30$	
Параметры b_{eff} , $b_{e,p}$ и k_m	
$b_{eff} = \frac{10}{b_0/t_0} \cdot \frac{f_{y0} t_0}{f_{y1} t_1} \cdot b_1$, но $b_{eff} \leq b_i$	При $n > 0$ (сжатие)
	$k_m = 1,3 \cdot (1 - n)$, но $k_m \leq 1,0$
$b_{e,p} = \frac{10}{b_0/t_0} \cdot b_1$, но $b_{e,p} \leq b_i$	При $n \leq 0$ (растяжение) $k_m = 1,0$
* Угловые сварные швы следует проектировать в соответствии с 4.10.	

Таблица 7.14 - Расчетная несущая способность на изгиб сварных узлов сопряжения стержней решетки прямоугольных труб с поясами из прямоугольных труб

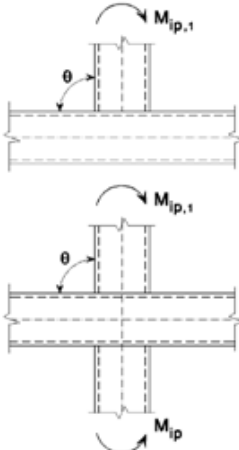
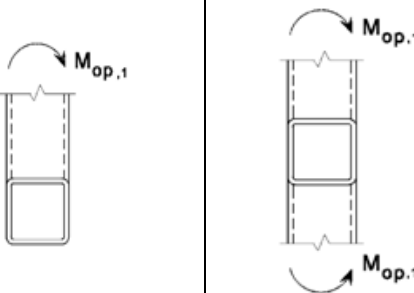
Т- и Х-образные узлы		Расчетная несущая способность, вид отказа
Моменты, действующие в плоскости ($\theta = 90^\circ$)		Местный изгиб лицевой поверхности пояса $\beta \leq 0,85$
		$M_{ip,1,Rd} = k_n f_{y0} t_0^2 h_1 \cdot \left(\frac{1}{2\eta} + \frac{2}{\sqrt{1-\beta}} + \frac{\eta}{1-\beta} \right) / \gamma_{M5}$
		Раздавливание боковой стенки пояса $0,85 \leq \beta \leq 1,0$
		$M_{ip,1,Rd} = 0,5 f_{yk} t_0 \cdot (h_1 + 5t_0) / \gamma_{M5},$ $f_{yk} = f_{y0} \quad \text{- для Т-образных узлов;}$ $f_{yk} = 0,8 f_{y0} \quad \text{- для Х-образных узлов}$
		Потеря несущей способности стержня решетки $0,85 \leq \beta \leq 1,0$
		$M_{ip,1,Rd} = f_{y1} \cdot (W_{pl,1} - (1 - b_{eff}/b_1) \cdot b_1 h_1 t_1) / \gamma_{M5}$
Моменты, действующие из плоскости ($\theta = 90^\circ$)		Местный изгиб лицевой поверхности пояса $\beta \leq 0,85$
		$M_{op,1,Rd} = k_n f_{y0} t_0^2 \cdot \left(\frac{h_1 \cdot (1+\beta)}{2 \cdot (1-\beta)} + \sqrt{\frac{2b_0 b_1 \cdot (1+\beta)}{1-\beta}} \right) / \gamma_{M5}$
		Раздавливание боковой стенки пояса $0,85 \leq \beta \leq 1,0$
		$M_{op,1,Rd} = f_{yk} t_0 \cdot (b_0 - t_0) \cdot (h_1 + 5t_0) / \gamma_{M5},$ $f_{yk} = f_{y0} \quad \text{- для Т-образных узлов;}$ $f_{yk} = 0,8 f_{y0} \quad \text{- для Х-образных узлов}$
		Искривление пояса (только для Т-образных узлов)*
		$M_{op,1,Rd} = 2 f_{y0} t_0 \cdot (h_1 t_0 + \sqrt{b_0 h_0 t_0 \cdot (b_0 + h_0)}) / \gamma_{M5}$
		Потеря несущей способности стержня решетки $0,85 \leq \beta \leq 1,0$
		$M_{op,1,Rd} = f_{y1} \cdot (W_{pl,1} - 0,5 \cdot (1 - b_{eff}/b_1)^2 \cdot b_1^2 t_1) / \gamma_{M5}$

Таблица 7.15 - Расчетные критерии для особых типов сварных узлов сопряжений стержней решетки из прямоугольных труб с поясом из прямоугольных труб

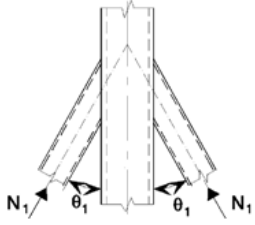
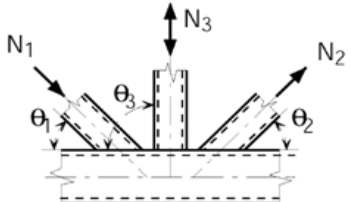
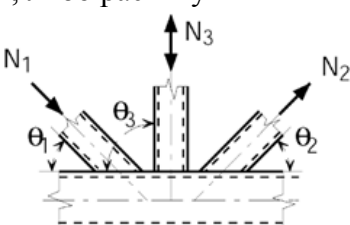
Тип узла	Критерий
<p>Стержни могут быть растянутыми или сжатыми, но усилия в обоих стержнях должны действовать в одном направлении</p> 	$N_{i,Ed} \leq N_{i,Rd},$ <p>где значение $N_{i,Rd}$ принимается равным $N_{1,Rd}$ для Х-образного узла по Таблице 7.11</p>
<p>Стержень 1 всегда сжат, а стержень 2 всегда растянут</p> 	$N_{1,Ed} \sin \theta_1 + N_{3,Ed} \sin \theta_3 \leq N_{1,Rd} \sin \theta_1,$ $N_{2,Ed} \sin \theta_2 \leq N_{1,Rd} \sin \theta_1,$ <p>где значение $N_{1,Rd}$ принимается равным $N_{1,Rd}$ для К-образного узла по Таблице 7.12,</p> <p>заменяя отношение $\frac{b_1 + b_2 + h_1 + h_2}{4b_0}$</p> <p>отношением $\frac{b_1 + b_2 + b_3 + h_1 + h_2 + h_3}{6b_0}$</p>
<p>Все стержни решетки должны всегда быть либо сжаты, либо растянуты</p> 	$N_{1,Ed} \sin \theta_1 + N_{3,Ed} \sin \theta_2 \leq N_{x,Rd} \sin \theta_x,$ <p>где значение $N_{x,Rd}$ принимается равным $N_{x,Rd}$ для К-образного узла по Таблице 7.11. Значение $N_{x,Rd} \sin \theta_x$ принимается по наибольшему из значений $N_{1,Rd} \sin \theta_1$ и $N_{2,Rd} \sin \theta_2$</p>

Таблица 7.15 - Расчетные критерии для особых типов сварных узлов сопряжений стержней решетки из прямоугольных труб с поясом из прямоугольных труб (продолжение)

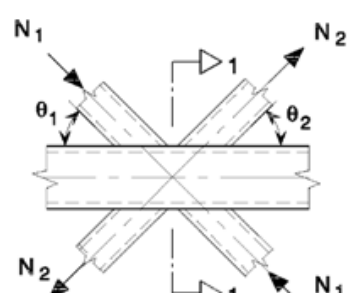
Тип узла	Критерий
<p>Стержень 1 всегда сжат, а стержень 2 всегда растянут</p> 	$N_{i,Ed} \leq N_{i,Rd},$ <p>где значение $N_{i,Rd}$ принимается равным $N_{i,Rd}$ для К-образного узла по Таблице 7.12 при условии, что в узле с зазором сечение 1-1 пояса удовлетворяет условию</p> $\left[\frac{N_{0,Ed}}{N_{pl,0,Rd}} \right]^2 + \left[\frac{V_{0,Ed}}{V_{pl,0,Rd}} \right]^2 \leq 1,0$

Таблица 7.16 - Расчетные критерии для сварных узлов с изломом и узлов с изогнутым поясом при сопряжении элементов из прямоугольных труб

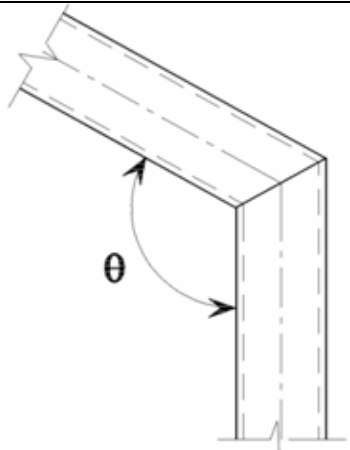
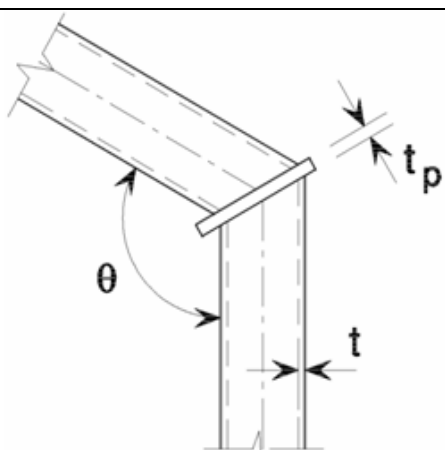
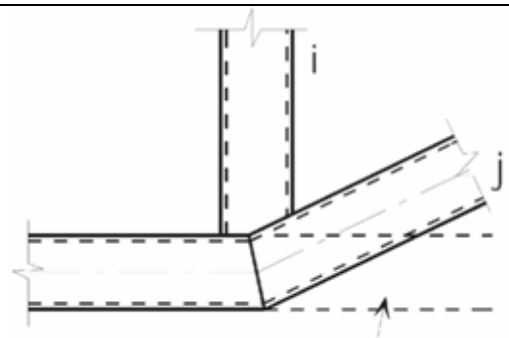
Тип узла	Критерий
Сварные узлы с изломом	
	<p>Сечение должно относиться к классу 1 при чистом изгибе, см. EN 1993-1-1</p> $N_{Ed} \leq 0,2N_{pl,Rd} \text{ и } \frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} + \frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}} \leq k,$ <p>Если $\theta \leq 90^\circ$</p> $k = \frac{3 \cdot \sqrt{b_0 / h_0}}{[b_0 / h_0]^{0,8}} + \frac{1}{1 + 2b_0 / h_0}.$ <p>Если $90^\circ < \theta \leq 180^\circ$</p> $k = 1 - \left(\sqrt{2} \cdot \cos(\theta/2) \right) \cdot (1 - k_{90}),$ <p>где k_{90} — значение k при $\theta = 90^\circ$</p>
	$t_p \geq 1,5t \text{ и } \geq 10mm$ $\frac{N_{Ed}}{N_{pl,Rd}} + \frac{M_{Ed}}{M_{pl,Rd}} \leq 1,0$
 <p>Воображаемое продолжение пояса</p>	$N_{i,Ed} \leq N_{i,Rd}$ <p>где значение $N_{i,Rd}$ принимается равным $N_{i,Rd}$ для К- или N-образных узлов с нахлестом по Таблице 7.12</p>

Таблица 7.17 - Расчетная несущая способность усиленных сварных Т-, Y- и X-образных узлов сопряжения стержней решетки из прямоугольных или круглых труб с поясами из прямоугольных труб

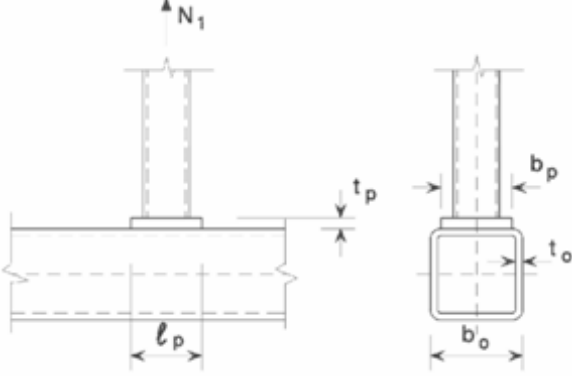
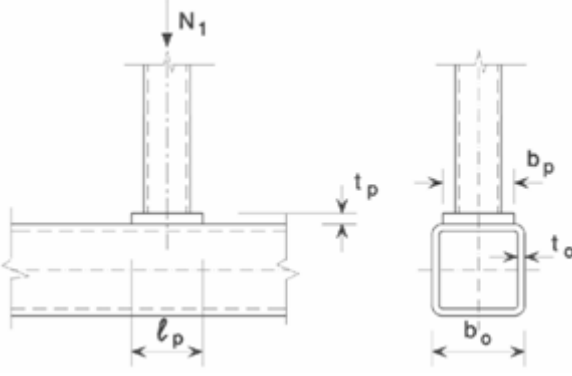
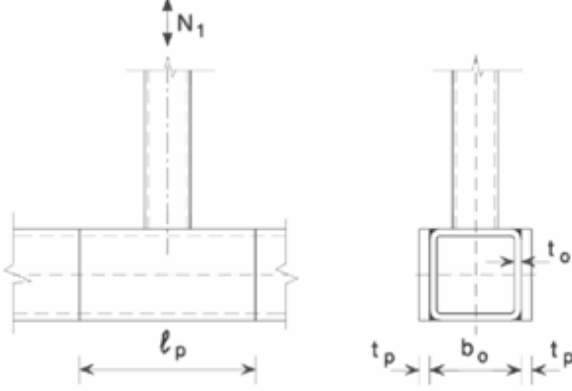
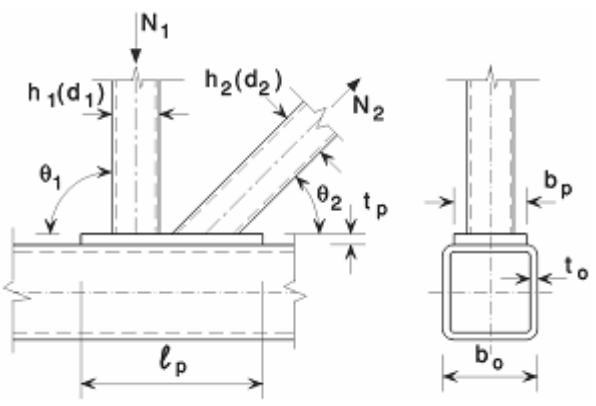
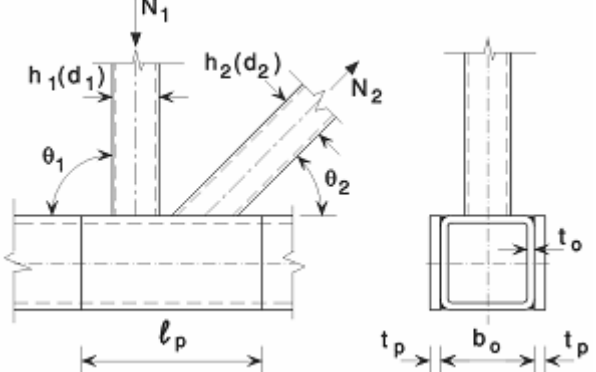
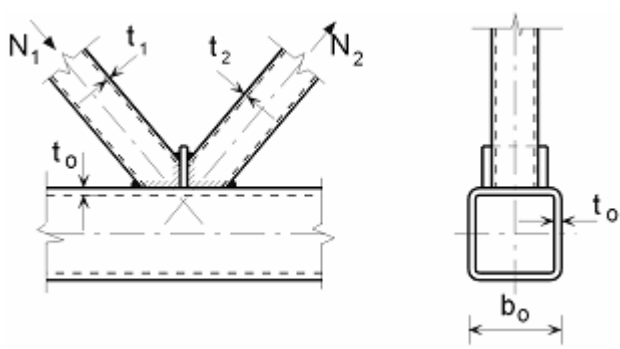
Тип узла	Расчетная несущая способность, вид отказа [$i = 1$]
Узел, усиленный поясными накладками для предотвращения местного изгиба лицевой поверхности пояса, потери несущей способности стержня решетки или вырывания лицевой поверхности пояса	
Растяжение, $\beta_p \leq 0,85$	
	$\ell_p \geq \frac{h_1}{\sin\theta_1} + \sqrt{b_p \cdot (b_p - b_1)}$ $\ell_p \geq 1,5h_1 / \sin\theta_1$ <p>и $b_p \geq b_0 - 2t_0$:</p> $N_{1,Rd} = \frac{f_{yp} t_p^2}{(1 - b_1/b_p) \cdot \sin\theta_1} \cdot \left(\frac{2h_1/b_p}{\sin\theta_1} + 4\sqrt{1 - b_1/b_p} \right).$
Сжатие, $\beta_p \leq 0,85$	
	$\ell_p \geq \frac{h_1}{\sin\theta_1} + \sqrt{b_p(b_p - b_1)},$ $\ell_p \geq 1,5h_1 / \sin\theta_1$ <p>и $b_p \geq b_0 - 2t_0$.</p> <p>Значение $N_{i,Rd}$ принимается равным $N_{i,Rd}$ для Т-, X- или Y-образных узлов по Таблице 7.11, принимая $k_n = 1,0$ и заменяя t_0 на t_p, только при местном изгибе лицевой поверхности пояса, потере несущей способности стержня решетки и при вырывании лицевой поверхности пояса</p>
Узел, усиленный боковыми накладками для предотвращения потери местной устойчивости стенки или сдвига (срезе) сечения пояса	
	$\ell_p \geq 1,5h_1 / \sin\theta_1$ <p>Значение $N_{i,Rd}$ принимается равным $N_{i,Rd}$ для Т-, X- или Y-образного узла по Таблице 7.11, заменяя t_0 на $(t_0 + t_p)$, только при потере местной устойчивости стенки и сдвиге (срезе) сечения пояса</p>

Таблица 7.18 - Расчетная несущая способность усиленных сварных К- и N-образных узлов сопряжения стержней решетки из прямоугольных или круглых труб с поясами из прямоугольных труб

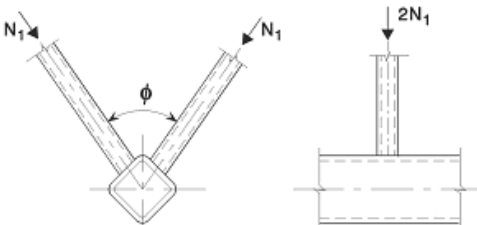
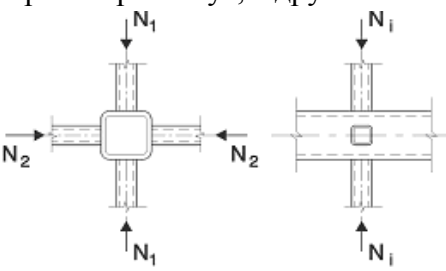
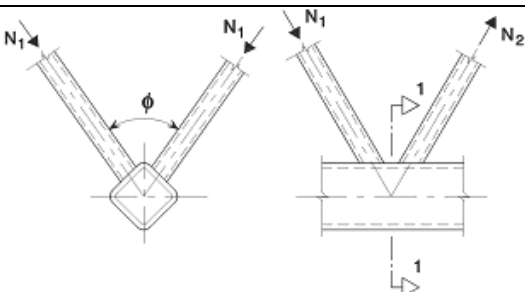
Тип узла	Расчетная несущая способность, вид отказа [i = 1 или 2]
Узел, усиленный поясными накладками для предотвращения местного изгиба лицевой поверхности пояса, потери несущей способности стержня решетки или вырывания лицевой поверхности пояса	
	$\ell_p \geq 1,5 \cdot \left(\frac{h_1}{\sin \theta_1} + g + \frac{h_2}{\sin \theta_2} \right),$ $b_p \geq b_0 - 2t_0$ $t_p \geq 2t_1 \text{ и } t_p \geq 2t_2$ <p>Значение $N_{i,Rd}$ принимается равным $N_{i,Rd}$ для К- и N-образных узлов по Таблице 7.12, заменяя t_0 на t_p, только при местном изгибе лицевой поверхности пояса, потере несущей способности стержня решетки и при вырывании лицевой поверхности пояса</p>
Узел, усиленный двусторонними боковыми накладками для предотвращения сдвига (среза) стенки пояса	
	$\ell_p \geq 1,5 \left(\frac{h_1}{\sin \theta_1} + g + \frac{h_2}{\sin \theta_2} \right).$ <p>Значение $N_{i,Rd}$ принимается равным $N_{i,Rd}$ для К- и N-образных узлов по Таблице 7.12, заменяя t_0 на $(t_0 + t_p)$, только при потере местной устойчивости стенки и сдвиге (срезе) сечения пояса</p>
Узел, усиленный разделяющей пластиной между стержнями решетки в случае недостаточного нахлеста	
	$t_p \geq 2t_1 \text{ и } t_p \geq 2t_2$ <p>Значение $N_{i,Rd}$ принимается равным $N_{i,Rd}$ для К- и N-образных узлов с нахлестом по Таблице 7.12, принимая $\lambda_{ov} < 80 \%$, заменяя b_j, t_j и f_{yj} на b_p, t_p и f_{yp} в выражении для $b_{e,ov}$, приведенном в Таблице 7.10</p>

7.5.3 Пространственные узлы

7.5.3.1 В каждой плоскости пространственного узла должны соблюдаться расчетные критерии, приведенные в Пункте 7.5.2 настоящего пособия, с использованием пониженных значений расчетных несущих способностей, определяемых согласно Пункту 7.5.3.2 настоящего пособия.

7.5.3.2 Расчетные значения несущей способности каждой плоскости пространственного узла следует определять с соответствующим понижающим коэффициентом μ (см. Таблицу 7.19) к несущей способности соответствующего плоского узла, вычисленной согласно Пункту 7.5.2 настоящего пособия, используя соответствующее усилие в поясе пространственного узла.

Таблица 7.19 - Понижающие коэффициенты для пространственных узлов

Тип узла	Понижающий коэффициент μ
ТТ-образный узел, $60^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$	
<p>Стержень 1 может быть растянут или сжат</p> 	$\mu = 0,9$
ХХ-образный узел	
<p>Стержни 1 и 2 могут быть растянуты или сжаты. Значение $N_{2,Ed}/N_{1,Ed}$ отрицательно, если один стержень растянут, а другой — сжат</p> 	$\mu = 0,9 \cdot \left(1 + 0,33 N_{2,Ed} / N_{1,Ed}\right)$ <p>с учетом знака $N_{1,Ed}$ и $N_{2,Ed}$, где $N_{2,Ed} \leq N_{1,Ed}$</p>
КК-образный узел $60^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$	
	$\mu = 0,9$ <p>при условии, что в узле с зазором сечение 1–1 пояса удовлетворяет условию</p> $\left[\frac{N_{0,Ed}}{N_{pl,0,Rd}} \right]^2 + \left[\frac{V_{0,Ed}}{V_{pl,0,Rd}} \right]^2 \leq 1,0$

ПРИМЕР 22. Расчет Т-образного узла сопряжения стержней решетки из квадратных труб с поясами из квадратных труб

Исходные данные: выполнить расчет несущей способности Т-образного узла фермы. Т-образный узел - сопряжение верхнего пояса фермы с раскосом. Верхний пояс представляет собой прокатный профиль квадратного замкнутого сечения - квадратная труба сечением 120×5мм, раскос - квадратная труба сечением 80×4мм.

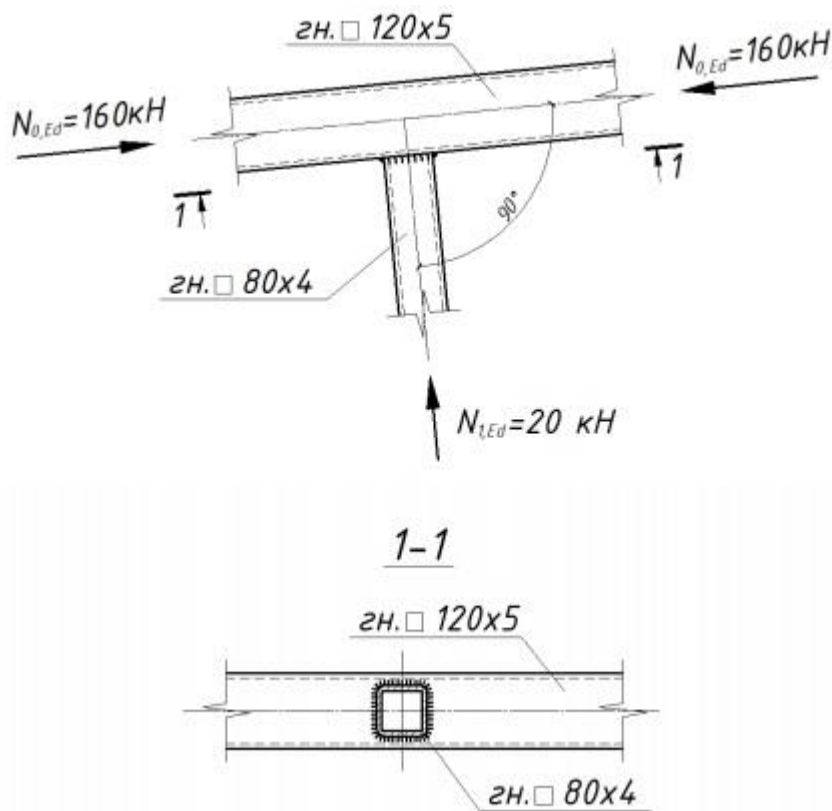
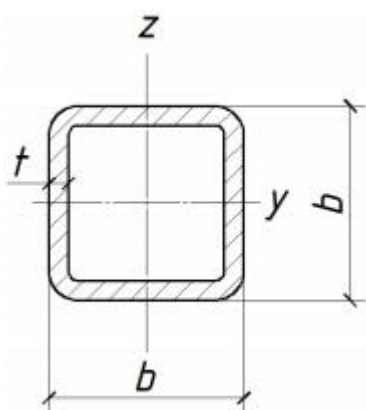


Рисунок 1 - Схема нагружения узла фермы продольными сжимающими силами



Квадратная труба 120×5мм:

- высота $h_0 = 120\text{мм}$;
- ширина $b_0 = 120\text{мм}$;
- толщина стенки $t_0 = 5\text{мм}$;
- площадь поперечного сечения $A_0 = 2270\text{мм}^2$.

Квадратная труба 80×4мм:

- высота $h_1 = 80\text{мм}$;
- ширина $b_1 = 80\text{мм}$;
- толщина стенки $t_1 = 4\text{мм}$;
- площадь поперечного сечения $A_1 = 1200\text{мм}^2$.

Рисунок 2 - Геометрические характеристики

2 Определение характеристик узла

2.1 Определение основных физико-механических характеристик узла

В данном примере рассматривается узел сопряжения решетчатой конструкции из замкнутых профилей. Требования и расчет узлов сопряжения элементов замкнутого профиля описаны в Пункте 7 СН РК EN 1993-1-8.

Узел состоит из двух профилей: квадратных труб сечением 120×5мм (верхний пояс фермы, см. Рисунок 1) и сечением 80×4мм (раскос фермы, см. Рисунок 1). Верхний пояс испытывает действие сжимающей силы $N_{0,Ed} = 185\text{кН}$, а раскос - сжимающей силы $N_{1,Ed} = 20\text{кН}$, изгибающего момента в плоскости узла $M_{ip,1} = 1,0\text{кНм}$ и изгибающего момента из плоскости узла $M_{op,1} = 1,0\text{кНм}$. Оба поперечных сечения (квадратных труб сечением 120×5мм и сечением 80×4мм) относятся к 1 классу сечения, что удовлетворяет требованиям Пункта 7.1.2(2) СН РК EN 1993-1-8.

Номинальные толщины стенок использованных в примере квадратных труб удовлетворяют требованиям Пунктов 7.1.1(5) и 7.1.1(6) СН РК EN 1993-1-8. Толщина стенки поперечного сечения раскоса $t = 5\text{мм}$ больше минимального требуемого значения $t = 2,5\text{мм}$ и меньше максимального значения $t = 25\text{мм}$. Толщина стенки поперечного сечения верхнего пояса фермы $t = 4\text{мм}$ больше минимального требуемого значения $t = 2,5\text{мм}$ и меньше максимального значения $t = 25\text{мм}$.

Все элементы выполнены из стали марки S275 с номинальным пределом текучести $f_y = 275\text{Н/мм}^2$, что ниже максимального требуемого значения номинального предела текучести $f_y = 460\text{Н/мм}^2$ (см. Пункт 7.1.1(4) СН РК EN 1993-1-8).

2.2 Определение основных геометрических характеристик узла

Согласно Рисунку 7.1 СН РК EN 1993-1-8 узел, разбираемый в данном примере, классифицируется как Т-образный узел с углом $\theta_1 = 90^\circ$ между раскосом и поясом фермы. Угол $\theta_1 = 90^\circ$ соответствует требованиям Пункта 7.1.2(3) СН РК EN 1993-1-8, так как $\theta_1 = 90^\circ > 30^\circ$.

Необходимо также проверить требования геометрии узла по Таблице 7.8 СН РК EN 1993-1-8 для Т-образного узла сопряжения решетчатой конструкции из замкнутых профилей (класс поперечного сечения - класс 1). Расчеты сведены в таблицу 1.

Таблица 1 - Расчет требований по Таблице 7.8 СН РК EN 1993-1-8

Требования по таблице 7.8 СН РК EN 1993-1-8	Расчет геометрических характеристик К-образного узла сопряжения фермы
$b_i / b_0 > 0,25$	$b_1 / b_0 = 80/120 = 0,667 > 0,25$
$b_i / t_i \leq 35$	$b_1 / t_1 = 80/4 = 20 < 35$
$h_i / t_i \leq 35$	$h_1 / t_1 = 80/4 = 20 < 35$
$h_0 / b_0 \geq 0,5$ $h_0 / b_0 \leq 2,0$	$h_0 / b_0 = 120/120 = 1 > 0,5$ $h_0 / b_0 = 120/120 = 1 < 2,0$
$h_i / b_i \geq 0,5$ $h_i / b_i \leq 2,0$	$h_1 / b_1 = 80/80 = 1 > 0,5$ $h_1 / b_1 = 80/80 = 1 < 2,0$
$b_0 / t_0 \leq 35$ $h_0 / t_0 \leq 35$	$b_0 / t_0 = 120/5 = 24 < 35$ $h_0 / t_0 = 120/5 = 24 < 35$

Согласно Пункту 7.5.1(2) СН РК EN 1993-1-8, для узлов, соответствующих области применения, указанной в Таблице 7.8 СН РК EN 1993-1-8, необходимо учитывать только те

расчетные критерии, которые приведены в соответствующей таблице. Расчетное значение несущей способности узла следует принимать по наименьшему из значений, соответствующих всем рассматриваемым критериям.

3 Определение несущей способности элементов узла

3.1 Несущая способность по осевой силе

Расчет узла сопряжения из квадратных труб по осевой силе:

$$N_{1,Ed} = 20 \text{ кН}$$

Расчет выполняется по формуле, приведенной в Таблице 7.10 СН РК EN 1993-1-8. Так как геометрические характеристики удовлетворяют условиям Таблицы 7.19 СН РК EN 1993-1-8:

$$\beta = b_1 / b_0 = 80 / 120 = 0,667 < 0,85;$$

$$b_0 / t_0 = 120 / 5 = 24 > 10.$$

Таким образом, для Т-образного плоского узла сопряжения из квадратных труб расчетная несущая способность по осевой силе определяется по Формуле из Таблица 7.10 СН РК EN 1993-1-8:

$$N_{1,Ed} = \frac{k_n f_{yo} t_0^2}{(1 - \beta) \cdot \sin \theta_1} \cdot \left(\frac{2\beta}{\sin \theta_1} + 4 \cdot \sqrt{1 - \beta} \right) / \gamma_{M5}$$

где k_n - коэффициент, определяемый по Таблице 7.10 СН РК EN 1993-1-8;

f_{yo} - номинальный предел текучести стали верхнего пояса фермы, равный:

$$f_y = 275 \text{ Н/мм}^2;$$

t_0 - толщина стенки верхнего пояса фермы, равная:

$$t_0 = 5 \text{ мм};$$

β - отношение высот сопряженных элементов узла, равное:

$$\beta = b_1 / b_0 = 80 / 120 = 0,667;$$

θ_1 - угол между сопряженными элементами узла, равный:

$$\theta_1 = 90^\circ;$$

γ_{M5} - частный коэффициент безопасности, определяемый по примечанию Пункта 2.2 СН РК EN 1993-1-8, равный:

$$\gamma_{M5} = 1,0.$$

Коэффициент k_n определяется по Таблице 7.10 СН РК EN 1993-1-8. Так как, все сопряженные узлы подвержены сжатию, то коэффициент k_n - минимальное значение из двух величин: $1,3 - \frac{0,4n}{\beta}$ и 1,0. То есть:

$$k_n = \min \left[1,3 - \frac{0,4n}{\beta}; 1,0 \right],$$

где n - коэффициент использования сечения пояса определяемый по формуле:

$$n = \frac{\frac{\sigma_{0,Ed}}{f_{yo}}}{\gamma_{M5}} = \frac{\left(\frac{N_{0,Ed}}{A_0} \right)}{\gamma_{M5}} = \frac{\left(\frac{185 \cdot 10^3}{22100} \right)}{1} = 0,294$$

Следовательно,

$$\begin{aligned} k_n &= \min \left[1,3 - \frac{0,4n}{\beta}; 1,0 \right] \\ 1,3 - \frac{0,4n}{\beta} &= 1,3 - \frac{0,4 \cdot 0,294}{0,667} = 1,12 \\ k_n &= \min[1,12; 1,0] = 1,0 \end{aligned}$$

Расчетная несущая способность по осевой силе из условия местного изгиба лицевой поверхности в зоне примыкания элемента решётки:

$$N_{1,Ed} = \frac{k_n f_{yo} t_0^2}{(1 - \beta) \cdot \sin \theta_1} \cdot \left(\frac{2\beta}{\sin \theta_1} + 4 \cdot \sqrt{1 - \beta} \right) / \gamma_{M5}$$

$$N_{1,Rd} = \frac{1 \cdot 275 \cdot 5^2}{(1 - 0,667) \cdot 1} \left(\frac{2 \cdot 0,667}{1} + 4 \cdot \sqrt{1 - 0,667} \right) / 1 = 75,2 \text{ кН}$$

Расчётная несущая способность по осевой силе из условия местного изгиба лицевой поверхности в зоне примыкания элемента решётки обеспечена, так как:

$$\frac{N_{1,Ed}}{N_{1,Rd}} = \frac{20}{75,2} = 0,27 < 1,0$$

Условие выполняется.

3.2 Несущая способность на изгиб в плоскости узла

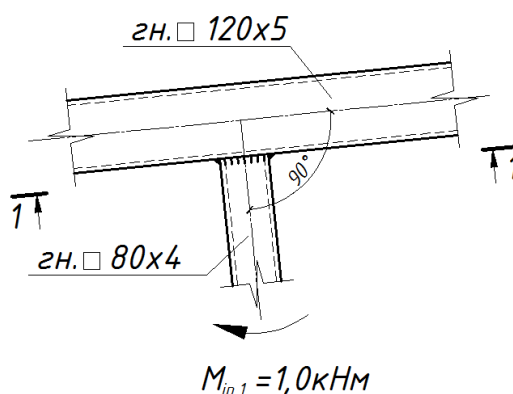


Рисунок 2 - Схема нагружения узла фермы изгибающим моментом в плоскости узла

Расчёт узла сопряжения на местный изгиб лицевой плоскости основного элемента при действии изгибающего момента приложенного к примыкающему стержню в плоскости рамного узла выполняется на основании требований Таблицы 7.14 СН РК EN 1993-1-8 при действующем изгибающем моменте $M_{ip,1,Ed} = 1,0 \text{ кНм}$ (момент действует в плоскости узла).

Расчетная несущая способность на изгиб узла сопряжения в его плоскости на местный изгиб лицевой поверхности пояса определяется по Формуле из Таблицы 7.6 СН РК EN 1993-1-8 с отношением высот сопряженных элементов узла $\beta = 0,667 < 0,85$:

$$M_{ip,1,Rd} = k_n f_{yo} t_0^2 h \cdot \left(\frac{1}{2\eta} + \frac{2}{\sqrt{1 - \beta}} + \frac{\eta}{1 - \beta} \right) / \gamma_{M5},$$

где k_n - коэффициент, определяемый по Таблице 7.10 СН РК EN 1993-1-8, равный в данном примере:

$$k_n = 1,0;$$

f_{yo} - номинальный предел текучести стали верхнего пояса фермы, равный для стали марки S275:

$$f_y = 275 \text{ Н/мм}^2;$$

t_0 - толщина стенки верхнего пояса фермы, равная:

$$t_0 = 5 \text{ мм};$$

h - высота поперечного сечения раскоса, равная:

$$h = 80 \text{ мм};$$

η - отношение высоты стержня решетки к ширине пояса, равное:

$$\eta = b_1 / h_0 = 80 / 120 = 0,667;$$

γ_{M5} - частный коэффициент безопасности, определяемый по примечанию Пункта 2.2 СН РК EN 1993-1-8, равный:

$$\gamma_{M5} = 1,0.$$

Следовательно,

$$M_{ip,1,Rd} = k_n f_{y0} t_0^2 h \cdot \left(\frac{1}{2\eta} + \frac{2}{\sqrt{1-\beta}} + \frac{\eta}{1-\beta} \right) / \gamma_{M5}$$

$$M_{ip,1,Rd} = 1 \cdot 275 \cdot 10^{-6} \cdot 5^2 \cdot 80 \cdot \left(\frac{1}{2 \cdot 0,667} + \frac{2}{\sqrt{1-0,667}} + \frac{0,667}{1-0,667} \right) / 1 = 3,741 \text{ кНм}$$

$$M_{ip,1,Rd} = 3,7 \text{ кНм}$$

Расчётная несущая способность пояса из условия местного изгиба лицевой поверхности в зоне примыкания элемента решётки обеспечена, так как:

$$\frac{M_{ip,1,Ed}}{M_{ip,1,Rd}} = \frac{1,0}{3,7} = 0,27 < 1,0$$

Условие выполняется.

3.3 Несущая способность на изгиб из плоскости узла

Расчёт узла сопряжения на местный изгиб лицевой плоскости основного элемента при действии изгибающего момента приложенного к примыкающему стержню в плоскости рамного узла выполняется на основании требований Таблицы 7.14 СН РК EN 1993-1-8 при действующем изгибающем моменте $M_{op,1,Ed} = 1,0 \text{ кНм}$ (момент действует из плоскости узла).

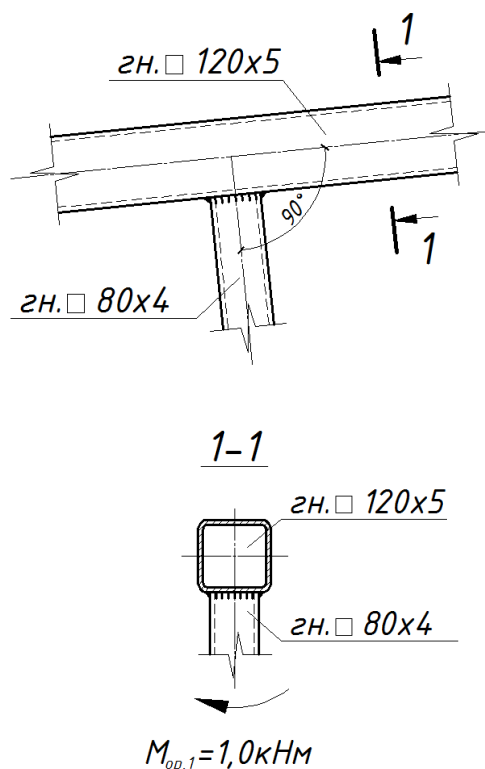


Рисунок 3 - Схема нагружения узла фермы изгибающим моментом из плоскости узла

Расчетная несущая способность на изгиб узла сопряжения из его плоскости на местный изгиб лицевой поверхности пояса определяется по Формуле из Таблицы 7.6 СН РК EN 1993-1-8 с отношением высот сопряженных элементов узла $\beta = 0,667 < 0,85$:

$$M_{op,1,Rd} = k_n f_{yo} t_0^2 \left(\frac{h_1 \cdot (1 + \beta)}{2 \cdot (1 - \beta)} + \sqrt{\frac{2b_0 b_1 \cdot (1 + \beta)}{1 - \beta}} \right) / \gamma_{M5}$$

где k_n - коэффициент, определяемый по Таблице 7.10 СН РК EN 1993-1-8, равный в данном примере:

$$k_n = 1,0;$$

f_{yo} - номинальный предел текучести стали верхнего пояса фермы, равный для стали марки S275:

$$f_y = 275 \text{ Н/мм}^2;$$

t_0 - толщина стенки верхнего пояса фермы, равная:

$$t_0 = 5 \text{ мм};$$

h_1 - высота сечения раскоса, равная:

$$h_1 = 80 \text{ мм};$$

b_0 и b_1 - ширина сечения пояса и раскоса соответственно, равная соответственно:

$$b_0 = 120 \text{ мм};$$

$$b_1 = 80 \text{ мм};$$

γ_{M5} - частный коэффициент безопасности, определяемый по примечанию Пункта 2.2 СН РК EN 1993-1-8, равный:

$$\gamma_{M5} = 1,0.$$

Следовательно,

$$M_{op,1,Rd} = k_n f_{yo} t_0^2 \left(\frac{h_1 \cdot (1 + \beta)}{2 \cdot (1 - \beta)} + \sqrt{\frac{2b_0 b_1 \cdot (1 + \beta)}{1 - \beta}} \right) / \gamma_{M5}$$

$$M_{op,1,Rd} = 1 \cdot 275 \cdot 10^{-6} \cdot 5^2 \cdot \left(\frac{80 \cdot (1 + 0,667)}{2 \cdot (1 - 0,667)} + \sqrt{\frac{2 \cdot 120 \cdot 80 (1 + 0,667)}{1 - 0,667}} \right) / 1$$

$$M_{op,1,Rd} = 2,3 \text{ кНм}.$$

Расчётная несущая способность пояса из условия местного изгиба лицевой поверхности в зоне примыкания элемента решётки обеспечена, так как:

$$\frac{M_{op,Ed}}{M_{op,1,Rd}} = \frac{1,0}{2,3} = 0,43 < 1,0$$

Условие выполняется.

Кроме того, расчетную несущую способность на изгиб Т-образных узлов необходимо определить по Формуле Таблицы 7.6 СН РК EN 1993-1-8:

$$M_{op,1,Rd} = 2f_{yo} t_0 \cdot \left(h_1 t_0 + \sqrt{b_0 h_0 t_0 \cdot (b_0 + h_0)} \right) / \gamma_{M5}$$

где f_{yo} - номинальный предел текучести стали верхнего пояса фермы, равный для стали марки S275:

$$f_y = 275 \text{ Н/мм}^2;$$

t_0 - толщина стенки верхнего пояса фермы, равная:

$$t_0 = 5 \text{ мм};$$

h_0 и h_1 - высоты сечения диагонали и раскоса, равные:

$$h_0 = 120 \text{ мм и } h_1 = 80 \text{ мм};$$

b_0 - ширина сечения пояса, равная:

$$b_0 = 120 \text{ мм};$$

γ_{M5} - частный коэффициент безопасности, определяемый по примечанию Пункта 2.2 СН РК EN 1993-1-8, равный:

$$\gamma_{M5} = 1,0.$$

Следовательно,

$$M_{op,1,Rd} = 2f_{yo}t_0 \cdot \left(h_1t_0 + \sqrt{b_0h_0t_0 \cdot (b_0 + h_0)} \right) / \gamma_{M5}$$

$$M_{op,1,Rd} = 2 \cdot 275 \cdot 10^{-6} \cdot 5 \cdot \frac{(80 \cdot 5 + \sqrt{120 \cdot 120 \cdot 5 \cdot (120 + 120)})}{1}$$

$$M_{op,1,Rd} = 12,53 \text{ кНм}$$

Расчётная несущая способность пояса на искривление в зоне примыкания элемента решётки обеспечена, так как:

$$\frac{M_{op,Ed}}{M_{op,1,Rd}} = \frac{2,1}{12,53} = 0,17$$

Условие выполняется.

3.4 Несущая способность на совместное действие осевой силы и изгиба

Согласно Пункту 7.5.2.1(5) СН РК EN 1993-1-8, узлы сопряжения стержней решетчатой конструкции, подверженных совместному действию осевой силы и изгибающего момента, должны удовлетворять условию Формулы (7.4) СН РК EN 1993-1-8:

$$\frac{N_{i,Ed}}{N_{i,Rd}} + \frac{M_{ip,i,Ed}}{M_{ip,i,Rd}} + \frac{M_{op,i,Ed}}{M_{op,i,Rd}} \leq 1,0 \quad (7.4)$$

где $N_{i,Ed}$ - расчетная сжимающая сила, равная:

$$N_{1,Ed} = 20 \text{ кН};$$

$N_{i,Rd}$ - расчетная несущая способность на действие сжимающей силы, равная:

$$N_{1,Rd} = 75,2 \text{ кН};$$

$M_{ip,i,Ed}$ - расчетный внутренний изгибающий момент в плоскости узла, равный:

$$M_{ip,1,Ed} = 1,0 \text{ кНм};$$

$M_{ip,i,Rd}$ - расчетная несущая способность на действие изгибающего момента в плоскости узла, равная:

$$M_{ip,1,Rd} = 3,7 \text{ кНм};$$

$M_{op,i,Ed}$ - расчетный внутренний изгибающий момент из плоскости узла, равный:

$$M_{op,1,Ed} = 1,0 \text{ кНм};$$

$M_{op,i,Rd}$ - расчетная несущая способность на действие изгибающего момента из плоскости узла, равная:

$$M_{ip,1,Rd} = 2,3 \text{ кНм}.$$

Таким образом, условие Формулы (7.4) СН РК EN 1993-1-8:

$$\frac{N_{1,Ed}}{N_{1,Rd}} + \frac{M_{ip,i,Ed}}{M_{ip,1,Rd}} + \frac{M_{op,i,Ed}}{M_{op,i,Rd}} \leq 1,0$$

$$\frac{20,0}{75,2} + \frac{1,0}{3,7} + \frac{1,0}{2,3} \leq 1,0$$

$$0,27 + 0,27 + 0,43 = 0,97 < 1,0$$

Условие выполняется.

ПРИМЕР 23. Расчет К-образного узла сопряжения стержней решетки из квадратных труб с поясами из квадратных труб

Исходные данные: выполнить расчет несущей способности К-образного узла фермы. К-образный узел - сопряжение нижнего пояса фермы с двумя диагоналями. Нижний пояс представляет собой прокатный профиль квадратного замкнутого сечения - квадратная труба сечением 200×8 мм, диагонали - квадратная труба сечением 150×6 мм.

Угол сопряжения диагоналей с нижним поясом фермы составляет 45° . Эксцентриситет узла сопряжения 20 мм (см. Рисунок 1). Зазор сопряжения диагоналей к нижнему поясу фермы 27,85 мм.

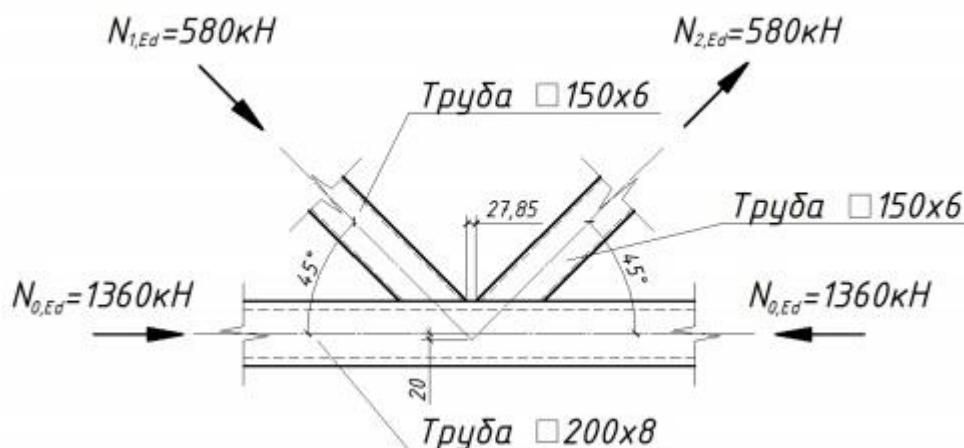
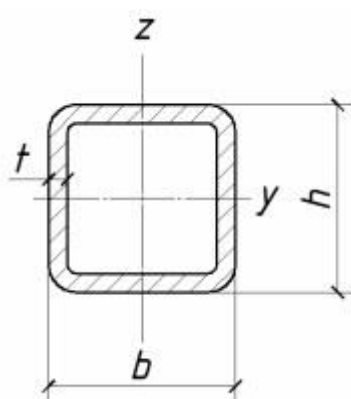


Рисунок 1 - Схема нагружения узла фермы



Квадратная труба 200×8 мм:

- высота $h_0 = 200$ мм;
- ширина $b_0 = 200$ мм;
- толщина стенки $t_0 = 8$ мм;
- площадь поперечного сечения $A_0 = 5924$ мм².

Квадратная труба 150×6 мм:

- высота $h_1 = h_2 = 150$ мм;
- ширина $b_1 = b_2 = 150$ мм;
- толщина стенки $t_1 = t_2 = 6$ мм;
- площадь поперечного сечения $A_1 = A_2 = 3363$ мм².

Рисунок 2 - Геометрические характеристики

2 Определение характеристик узла

2.1 Определение класса сечения

2.1.1 Нижний пояс фермы

а) полка нижнего пояса фермы

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

$$\varepsilon = \sqrt{235/f_y} = \sqrt{235/355} = 0,81$$

Ширина полки:

$$c = b_0 - 3t_0 = 200 - 3 \cdot 8 = 176 \text{ мм}$$

Отношение высоты стенки к толщине стенки:

$$\frac{c}{t} = \frac{c}{t_0} = \frac{176}{8} = 22$$

По Таблице 5.2 СН РК EN 1993-1-1 предельно допустимое значение для сечений класса 1:

$$\frac{c}{t} \leq 72\varepsilon$$

$$72\varepsilon = 72 \cdot 0,81 = 58,32$$

$$22 < 58,32 \rightarrow \text{полка квадратной трубы - сечение 1 класса}$$

б) стенка нижнего пояса фермы

Высота стенки:

$$h = h_0 - 3t_0 = 200 - 3 \cdot 8 = 176 \text{ мм}$$

Отношение высоты стенки к толщине стенки:

$$\frac{c}{t} = \frac{h}{t_0} = \frac{176}{8} = 22$$

По Таблице 5.2 СН РК EN 1993-1-1 предельно допустимое значение для сечений класса 1:

$$\frac{c}{t} \leq 72\varepsilon$$

$$72\varepsilon = 72 \cdot 0,81 = 58,32$$

$$22 < 58,32 \rightarrow \text{стенка квадратной трубы - сечение 1 класса}$$

Следовательно, поперечное сечение квадратной трубы 200×8мм классифицируется как сечение 1 класса.

2.1.2 Диагональ фермы

а) полка диагонали

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

$$\varepsilon = \sqrt{235/f_y} = \sqrt{235/355} = 0,81$$

Ширина полки:

$$c = b_1 - 3t_1 = 150 - 3 \cdot 6 = 132 \text{ мм}$$

Отношение высоты стенки к толщине стенки:

$$\frac{c}{t} = \frac{c}{t_1} = \frac{132}{6} = 22$$

По Таблице 5.2 СН РК EN 1993-1-1 предельно допустимое значение для сечений класса 1:

$$\frac{c}{t} \leq 72\varepsilon$$

$$72\varepsilon = 72 \cdot 0,81 = 58,32$$

$$22 < 58,32 \rightarrow \text{полка квадратной трубы - сечение 1 класса}$$

б) стенка диагонали

Высота стенки:

$$h = h_1 - 3t_1 = 150 - 3 \cdot 8 = 132 \text{ мм}$$

Отношение высоты стенки к толщине стенки:

$$\frac{c}{t} = \frac{h}{t_1} = \frac{132}{6} = 22$$

По Таблице 5.2 СН РК EN 1993-1-1 предельно допустимое значение для сечений класса 1:

$$\frac{c}{t} \leq 72\varepsilon$$

$$72\varepsilon = 72 \cdot 0,81 = 58,32$$

$$22 < 58,32 \rightarrow \text{стенка квадратной трубы - сечение 1 класса}$$

Следовательно, поперечное сечение квадратной трубы 150×6мм классифицируется как сечение 1 класса.

Поперечное сечение квадратной трубы 200×8мм и поперечное сечение квадратной трубы 168×5мм относятся к 1 классу, что удовлетворяет требованиям Пункта 7.1.2(2) СН РК EN 1993-1-8.

2.2 Определение основных физико-механических характеристик узла

В данном примере рассматривается узел сопряжения решетчатой конструкции из замкнутых профилей. Требования и расчет узлов сопряжения элементов прямоугольного замкнутого профиля описаны в Пункте 7 СН РК EN 1993-1-8.

Узел состоит из двух профилей: квадратных труб сечением 200×8мм (верхний пояс фермы, см. Рисунок 1) и сечением 150×6мм (диагонали фермы, см. Рисунок 1). Нижний пояс испытывает действие сжимающей силы $N_{0,Ed} = 1360\text{кН}$, правая диагональ - сжимающей силы $N_{1,Ed} = 580\text{кН}$, а правая диагональ - растягивающей силы $N_{2,Ed} = 580\text{кН}$.

Номинальные толщины стенок использованных в примере квадратных труб удовлетворяют требованиям Пунктов 7.1.1(5) и 7.1.1(6) СН РК EN 1993-1-8.

Толщина стенки поперечного сечения диагоналей $t = 6\text{мм}$ больше минимального требуемого значения $t = 2,5\text{мм}$ и меньше максимального значения $t = 25\text{мм}$.

Толщина стенки поперечного сечения нижнего пояса фермы $t = 8\text{мм}$ больше минимального требуемого значения $t = 2,5\text{мм}$ и меньше максимального значения $t = 25\text{мм}$.

Все элементы выполнены из стали марки S355 с номинальным пределом текучести $f_y = 355\text{Н/мм}^2$, что ниже максимального требуемого значения номинального предела текучести $f_y = 460\text{Н/мм}^2$ (см. Пункт 7.1.1(4) СН РК EN 1993-1-8).

2.3 Определение основных геометрических характеристик узла

Согласно Рисунку 7.1 СН РК EN 1993-1-8 узел, разбираемый в данном примере, классифицируется как К-образный узел с углами $\theta_1 = 45^\circ$ (между левой диагональю и поясом фермы) и $\theta_2 = 45^\circ$ (между правой диагональю и поясом фермы). Значения углов соответствует требованиям Пункта 7.1.2(3) СН РК EN 1993-1-8, так как $\theta_1 = \theta_2 = 45^\circ > 30^\circ$.

Условия геометрии узла сопряжения требуют проверки выражения:

$$-0,55h_0 \leq e \leq 0,25h_0$$

$$-0,55h_0 = -0,55 \cdot 200 = -110\text{мм} \text{ и } 0,25h_0 = 0,25 \cdot 200 = 50\text{мм}$$

$$-110\text{мм} < 27,85\text{мм} < 50\text{мм}$$

Необходимо также проверить требования геометрии узла по Таблице 7.8 СН РК EN 1993-1-8 для К-образного узла сопряжения решетчатой конструкции из замкнутых профилей (класс поперечного сечения - класс 1) с зазором между диагоналями. Расчеты сведены в таблицу 1.

Таблица 1 - Расчет требований по Таблице 7.8 СН РК EN 1993-1-8

Требования по Таблице 7.8 СН РК EN 1993-1-8	Расчет геометрических характеристик К-образного узла сопряжения фермы
$b_i / b_0 \geq 0,35$	$b_1 / b_0 = 150/200 = 0,75 > 0,35$ $b_2 / b_0 = 150/200 = 0,75 > 0,35$
$b_i / b_0 > 0,1 + 0,01 b_0 / t_0$	$0,1 + 0,01 b_0 / t_0 = 0,1 + 0,01 \cdot 200/8 = 0,35$ $b_1 / b_0 = 150/200 = 0,75 > 0,35$ $b_2 / b_0 = 150/200 = 0,75 > 0,35$
$b_i / t_i \leq 35$	$b_1 / t_1 = 150/6 = 25 < 35$ $b_2 / t_2 = 150/6 = 25 < 35$
$h_i / t_i \leq 35$	$h_1 / t_1 = 150/6 = 25 < 35$ $h_2 / t_2 = 150/6 = 25 < 35$
$h_0 / b_0 \geq 0,5$ $h_0 / b_0 \leq 2,0$	$h_0 / b_0 = 200/200 = 1 > 0,5$ $h_0 / b_0 = 200/200 = 1 < 2,0$
$h_i / b_i \geq 0,5$ $h_i / b_i \leq 2,0$	$h_1 / b_1 = h_2 / b_2 = 150/150 = 1 > 0,5$ $h_1 / b_1 = h_2 / b_2 = 150/150 = 1 < 2,0$
$b_0 / t_0 \leq 35$ $h_0 / t_0 \leq 35$	$b_0 / t_0 = 200/8 = 25 < 35$ $h_0 / t_0 = 200/8 = 25 < 35$
$g/b_0 \geq 0,5 \cdot (1 - \beta)$	$g/b_0 = 25/200 = 0,125$ $0,5 \cdot (1 - \beta) = 0,5 \cdot (1 - 0,75) = 0,125$ $0,125 = 0,125$
$g/b_0 \leq 1,5 \cdot (1 - \beta)$	$g/b_0 = 25/200 = 0,125$ $1,5 \cdot (1 - \beta) = 1,5 \cdot (1 - 0,75) = 0,50$ $0,375 < 0,5$
$g \geq t_1 + t_2$	$g = 20\text{мм} > t_1 + t_2 = 6 + 6 = 12\text{мм}$

Согласно Пункту 7.5.1(2) СН РК EN 1993-1-8, для узлов, соответствующих области применения, указанной в Таблице 7.8 СН РК EN 1993-1-8, необходимо учитывать только те расчетные критерии, которые приведены в соответствующей таблице. Расчетное значение несущей способности узла следует принимать по наименьшему из значений, соответствующих всем рассматриваемым критериям.

Кроме того, необходимо проверить дополнительные условия по Таблице 7.9 СН РК EN 1993-1-8. Расчеты сведены в Таблицу 2.

Таблица 2 - Расчет дополнительных условий по Таблице 7.9 СН РК EN 1993-1-8

Требования по Таблице 7.9 СН РК EN 1993-1-8	Расчет геометрических характеристик К-образного узла сопряжения фермы
$0,6 \leq \frac{b_1 + b_2}{2b_1} \leq 1,3$	$\frac{b_1 + b_2}{2b_1} = \frac{150 + 150}{2 \cdot 150} = 1 > 0,6$ $\frac{b_1 + b_2}{2b_1} = \frac{150 + 150}{2 \cdot 150} = 1 < 1,3$
$\frac{b_0}{t_0} \geq 15$	$\frac{b_0}{t_0} = \frac{150}{6} = 25 > 15$

3 Определение несущей способности по осевой силе

3.1 Несущая способность по местному изгибу лицевой поверхности пояса

Расчет несущей способности сварных узлов сопряжения элементов из замкнутых элементов выполняется с учетом видов отказов К-образных узлов. Согласно Пункту 7.2.2 и Рисунку 7.3 СН РК EN 1993-1-8 для К-образного узла из квадратного замкнутого профиля возможны следующие виды отказа:

- местный изгиб (продавливание) лицевой поверхности пояса (вид отказа - а);
- сдвиг (срез) сечения пояса (вид отказа - в);
- вырывание лицевой поверхности из замкнутого профиля (вид отказа - г);
- потеря несущей способности стержня решетки (вид отказа - д).

Расчетное значение осевой силы принимается (максимальное значение в диагоналях фермы, см. Рисунок 1):

$$N_{1,Ed} = 580 \text{ кН.}$$

Расчет выполняется по формуле, приведенной в Таблице 7.12 СН РК EN 1993-1-8. Так как геометрические характеристики узла сопряжения удовлетворяют условиям Таблиц 7.8 и 7.19 СН РК EN 1993-1-8.

Таким образом, для К-образного плоского узла сопряжения из квадратных труб расчетная несущая способность по осевой силе определяется по формуле (см. Таблицу 7.10 СН РК EN 1993-1-8):

$$N_{1,Rd} = \frac{8,9 \gamma^{0,5} k_n f_{y0} t_0^2}{\sin \theta_1} \cdot \left(\frac{b_1 + b_2}{2b_0} \right) / \gamma_{M5}$$

где γ - коэффициент, определяемый по формуле:

$$\gamma = b_0 / 2t_0 = 200 / (2 \cdot 8) = 12,5;$$

k_n - коэффициент, определяемый по Таблице 7.10 СН РК EN 1993-1-8;

f_{y0} - номинальный предел текучести стали верхнего пояса фермы, равный:

$$f_y = 355 \text{ Н/мм}^2;$$

t_0 - толщина стенки нижнего пояса фермы, равная:

$$t_0 = 8 \text{ мм};$$

θ_1 - угол между сопряженными элементами узла, равный:

$$\theta_1 = 45^\circ;$$

b_1 , b_2 и b_0 - высоты поперечных сечений сжатой и растянутой диагональ и нижнего пояса соответственно;

γ_{M5} - частный коэффициент безопасности, определяемый по примечанию Пункта 2.2 СН РК EN 1993-1-8, равный:

$$\gamma_{M5} = 1,0.$$

Коэффициент k_n определяется по Таблице 7.10 СН РК EN 1993-1-8. Так как, все сопряженные узлы подвержены сжатию, то коэффициент k_n - минимальное значение из двух величин: $1,3 - \frac{0,4n}{\beta}$ и 1,0. То есть:

$$k_n = \min \left[1,3 - \frac{0,4n}{\beta}; 1,0 \right],$$

где n - коэффициент использования сечения пояса определяемый по формуле:

$$n = \frac{\frac{\sigma_{0,Ed}}{f_{y0}}}{\gamma_{M5}} = \frac{\frac{\left(\frac{N_{0,Ed}}{A_0} \right)}{f_{y0}}}{\gamma_{M5}} = \frac{\left(\frac{1360 \cdot 10^3}{5924} \right)}{355} = 0,65$$

Следовательно,

$$k_n = \min \left[1,3 - \frac{0,4n}{\beta}; 1,0 \right]$$

$$1,3 - \frac{0,4n}{\beta} = 1,3 - \frac{0,4 \cdot 0,65}{0,75} = 0,955$$

$$k_n = \min[0,955; 1,0] = 0,955$$

Расчетная несущая способность по осевой силе из условия местного изгиба лицевой поверхности в зоне примыкания элемента решётки:

$$N_{1,Rd} = \frac{8,9 \gamma^{0,5} k_n f_{y0} t_0^2}{\sin \theta_i} \cdot \left(\frac{b_1 + b_2}{2b_0} \right) / \gamma_{M5}$$

$$N_{1,Rd} = \frac{8,9 \cdot 12,5^{0,5} \cdot 0,955 \cdot 355 \cdot 8^2}{\sin 45} \cdot \left(\frac{150 + 150}{2 \cdot 200} \right) / 1,0 = 724157 \text{ Н} = 724,16 \text{ кН}$$

Расчётная несущая способность по осевой силе из условия местного изгиба лицевой поверхности в зоне примыкания элемента решётки обеспечена, так как:

$$\frac{N_{1,Ed}}{N_{1,Rd}} = \frac{580}{724,16} = 0,80 < 1,0$$

Условие выполняется.

3.2 Несущая способность на сдвиг сечения пояса

Расчет несущей способности на сдвиг сечения пояса не описан в Таблице 7.10 СН РК EN 1993-1-8 (квадратные трубы). Поэтому рекомендуется использовать Таблицу 7.12 СН РК EN 1993-1-8 (прямоугольные трубы).

Расчёт узла сопряжения на сдвиг сечения диагонали выполняется на основании требований Таблицы 7.12 СН РК EN 1993-1-8 по формуле:

$$N_{i,Rd} = \frac{f_{y0} A_v}{\sqrt{3} \sin \theta_1} / \gamma_{M5}$$

где f_{y0} - номинальный предел текучести стали нижнего пояса фермы, равный:

$$f_y = 355 \text{ Н/мм}^2;$$

θ_1 - угол между сопряженными элементами узла, равный:

$$\theta_1 = 45^\circ;$$

γ_{M5} - частный коэффициент безопасности, определяемый по примечанию Пункта 2.2 СН РК EN 1993-1-8, равный:

$$\gamma_{M5} = 1,0.$$

A_v - площадь сдвига нижнего пояса фермы.

Площадь сдвига нижнего пояса фермы A_v определяется по Формуле из Таблицы 7.12 СН РК EN 1993-1-8:

$$A_v = (2h_0 + \alpha b_0) \cdot t_0$$

где h_0 , b_0 и t_0 - геометрические характеристики поперечного сечения нижнего пояса фермы;
 α - коэффициент, зависящий от значений толщины стенки $t_0 = 5 \text{ мм}$ и зазора между диагоналями $g = 27,85 \text{ мм}$ и определяемый по формуле:

$$\alpha = \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{4g^2}{3t_0^2}}} = \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{4 \cdot 27,85^2}{3 \cdot 8^2}}} = 0,241$$

Значит, площадь сдвига равна:

$$A_v = (2h_0 + \alpha b_0) \cdot t_0 = (2 \cdot 200 + 0,241 \cdot 200) \cdot 8 = 3586,25 \text{ мм}^2$$

Таким образом, несущая способность на сдвиг сечения пояса равна:

$$N_{i,Rd} = \frac{f_{y0} A_v}{\sqrt{3} \sin \theta_1} / \gamma_{M5} = \frac{355 \cdot 10^{-3} \cdot 3586,25}{\sqrt{3} \cdot \sin 45} / 1,0 = 1039,5 \text{ кН}$$

Расчётная несущая способность на сдвиг обеспечена, так как:

$$\frac{N_{1,Ed}}{N_{1,Rd}} = \frac{580}{1039,5} < 0,56$$

Расчёт узла сопряжения на сдвиг сечения пояса выполняется на основании требований Таблицы 7.12 СН РК EN 1993-1-8 по формуле:

$$N_{0,Rd} = \left[(A_0 - A_v) \cdot f_{y0} + A_v f_{y0} \cdot \sqrt{1 - (V_{Ed}/V_{pl,Rd})^2} \right] / \gamma_{M5}$$

где A_0 - площадь поперечного сечения пояса, равная:

$$A_0 = 2270 \text{ мм}^2;$$

A_v - площадь сдвига пояса, равная:

$$A_v = 3586,25 \text{ мм}^2;$$

f_{y0} - номинальный предел текучести стали нижнего пояса фермы, равный:

$$f_y = 355 \text{ Н/мм}^2;$$

V_{Ed} - значение действующей поперечной силы, определяемой по формуле:

$$V_{Ed} = N_{1,Ed} \cdot \sin \theta_1 = 420 \cdot \sin 45 = 297 \text{ кН};$$

$V_{pl,Rd}$ - значение несущей способности поперечного сечения на сдвиг, определяемый по формуле (класс сечения 1):

$$V_{pl,Rd} = \frac{A_v \cdot (f_{y0}/\sqrt{3})}{\gamma_{M0}} = \frac{3586,25 \cdot (355 \cdot 10^{-3}/\sqrt{3})}{1} = 735 \text{ кН}$$

Таким образом, несущая способность на сдвиг сечения пояса равна:

$$N_{0,Rd} = \left[(A_0 - A_v) \cdot f_{y0} + A_v f_{y0} \cdot \sqrt{1 - (V_{Ed}/V_{pl,Rd})^2} \right] / \gamma_{M5} =$$

$$N_{0,Rd} = \left[(5924 - 3586,25) \cdot 355 + 3586,25 \cdot 355 \cdot \sqrt{1 - (297/735)^2} \right] / 1,0 = 1994,5 \text{ кН}$$

Расчётная несущая способность на сдвиг обеспечена, так как:

$$\frac{N_{0,Ed}}{N_{0,Rd}} = \frac{1360}{1994,5} < 0,68$$

Условие выполняется.

3.3 Несущая способность на вырывание лицевой поверхности из замкнутого профиля

Дополнительное условие:

$$\beta \leq (1 - 1/\gamma)$$

где γ - коэффициент, определяемый по формуле:

$$\gamma = b_0/2t_0 = 200/(2 \cdot 8) = 12,5;$$

β - коэффициент, определяемый по формуле:

$$\beta = b_i/b_0 = b_1/b_0 = b_2/b_0 = 150/200 = 0,75$$

Таким образом,

$$0,75 \leq 0,92$$

Условие выполняется.

Расчетная несущая способность на вырывание лицевой поверхности из замкнутого профиля определяется по формуле:

$$N_{i,Rd} = \frac{f_{y0} t_0}{\sqrt{3} \sin \theta_1} \cdot \left(\frac{2h_1}{\sin \theta_1} + b_1 + b_{e,p} \right) / \gamma_{M5}$$

где f_{y0} - номинальный предел текучести стали нижнего пояса фермы, равный:

$$f_y = 355 \text{ Н/мм}^2;$$

t_0 - толщина стенки верхнего пояса фермы, равная:

$$t_0 = 8 \text{ мм};$$

θ_2 - угол между сопряженными элементами узла, равный:

$$\theta_2 = 45^\circ;$$

h_1 и b_1 - геометрические характеристики поперечного сечения диагонали фермы;

γ_{M5} - частный коэффициент безопасности, определяемый по примечанию Пункта 2.2 СН РК EN 1993-1-8, равный:

$$\gamma_{M5} = 1,0;$$

$b_{e,p}$ - параметр, равный $b_{e,p} = \frac{10}{b_0/t_0} \cdot b_1$, но должен быть не более $b_{e,p} \leq b_1$, то есть:

$$b_{e,p} = \min \left[\frac{10}{b_0/t_0} \cdot b_1; b_1 \right] = \min \left[\frac{10 \cdot 8}{200} \cdot 150; 150 \right] = \min[60; 80] = 60 \text{ мм}$$

Значит,

$$N_{2,Rd} = \frac{f_{y0} t_0}{\sqrt{3} \sin \theta_1} \cdot \frac{\left(\frac{2h_1}{\sin \theta_1} + b_1 + b_{e,p} \right)}{\gamma_{M5}} = \frac{355 \cdot 10^{-3} \cdot 8}{\sqrt{3} \cdot \sin 45^\circ} \cdot \left(\frac{2 \cdot 150}{\sin 45^\circ} + 150 + 60 \right)$$

$$N_{1,Rd} = 1471 \text{ кН}$$

Расчётная несущая способность на вырывание лицевой поверхности обеспечена, так как:

$$\frac{N_{2,Ed}}{N_{2,Rd}} = \frac{580}{1471} = 0,39 < 1,0$$

Условие выполняется.

3.4 Потеря несущей способности стержня решетки

$$N_{1,Rd} = f_{y1} t_1 \cdot (2h_1 - 4t_1 + 2b_{eff}) / \gamma_{M5}$$

где f_{y1} - номинальный предел текучести стали сжатой диагонали, равный:

$$f_y = 275 \text{ Н/мм}^2;$$

t_1 и h_1 - геометрические характеристики поперечного сечения сжатой диагонали фермы;

b_{eff} - эффективная ширина стержня, равная:

$$b_{eff} = \frac{10}{b_0/t_0} \cdot \frac{f_{y0} t_0}{f_{y1} t_1} \cdot b_1$$

но должен быть не более:

$$b_{eff} \leq b_1$$

То есть,

$$b_{eff} = \min \left[\frac{10}{b_0/t_0} \cdot \frac{f_{y0} t_0}{f_{y1} t_1} \cdot b_1; b_1 \right]$$

$$b_{eff} = \min \left[\frac{10}{200/8} \cdot \frac{355 \cdot 10^{-3} \cdot 8}{355 \cdot 10^{-3} \cdot 6} \cdot 150; 150 \right] = \min[80; 150] = 80 \text{ мм}$$

Значит,

$$N_{1,Rd} = f_{y1} t_1 \cdot (2h_1 - 4t_1 + 2b_{eff}) / \gamma_{M5}$$

$$N_{1,Rd} = 355 \cdot 10^{-3} \cdot 6 (2 \cdot 150 - 4 \cdot 6 + 2 \cdot 80) = 928,7 \text{ кН}$$

Расчётная несущая способность обеспечена, так как:

$$\frac{N_{1,Ed}}{N_{1,Rd}} = \frac{580}{928,7} = 0,63 < 1,0$$

Условие выполняется.

7.6 Сварные узлы сопряжения стержней решетки из круглых или прямоугольных труб с поясом из двутавров

7.6.1 Расчетные значения несущей способности сварных узлов могут быть определены по формулам Таблиц 7.21 или 7.22 при условии, что геометрические параметры узлов соответствуют области применения, указанной в Таблице 7.20.

Таблица 7.20 - Область применения сварных узлов сопряжения стержней решетки из круглых или прямоугольных труб с поясами из двутавров

Тип узла	Параметры узлов [$i = 1$ или $2, j =$ перекрываемый стержень решетки]					
	d_w / t_w			d_w / t_w		d_w / t_w
X	Сечение класса 1 и $d_w \leq 400$ мм	X Т или Y К с	Сечение класса 1 и $d_w \leq 400$ мм	X	Сечение класса 1 и $d_w \leq 400$ мм	X
Т или Y	Сечение класса 2 $d_w \leq 400$ и мм	зазором N с	Сечение класса 2 $d_w \leq 400$ и мм	Т или Y	Сечение класса 2 $d_w \leq 400$ и мм	Т или Y
К с зазором N с зазором		зазором K с	нахлестом N с	К с зазором N с зазором	нахлестом N с	К с зазором N с зазором
К с нахлестом N с нахлестом		нахлестом N с		К с нахлестом N с нахлестом		К с нахлестом N с нахлестом

7.6.2 Для узлов, соответствующих области применения, указанной в Таблице 7.20, необходимо учитывать только те расчетные критерии, которые приведены в соответствующей таблице. Расчетное значение несущей способности узла следует принимать по наименьшему из значений, соответствующих всем возможным критериям.

7.6.3 Для узлов, не соответствующих области применения, указанной в Таблице 7.20, следует учитывать все критерии, приведенные в Пункте 7.2.2 настоящего пособия. Кроме того, следует учитывать дополнительные моменты, обусловленные вращательной жесткостью узлов.

7.6.4 В узлах сопряжения стержней решетки, подверженных действию только осевых сил, расчетное значение внутренней осевой силы $N_{i,Ed}$ не должно превышать расчетной несущей способности сварного узла $N_{i,Rd}$, определяемой по Таблице 7.21.

7.6.5 Узлы сопряжения стержней решетки, подверженных совместному действию осевой силы и изгибающего момента, должны удовлетворять условию

$$\frac{N_{i,Ed}}{N_{i,Rd}} + \frac{M_{ip,i,Ed}}{M_{ip,i,Rd}} \leq 1,0, \quad (7.5)$$

где $M_{ip,i,Rd}$ - расчетная несущая способность на действие изгибающего момента в плоскости узла;

$M_{ip,i,Ed}$ - расчетный внутренний изгибающий момент в плоскости узла.

7.6.6 За расчетное значение внутреннего момента $M_{i,Ed}$ может быть принято значение момента в точке пересечения оси стержня решетки с лицевой поверхностью пояса.

7.6.7 Расчетные значения несущей способности по изгибающему моменту в плоскости узла $M_{i,Rd}$ следует определять по Таблице 7.22.

7.6.8 Если пояс подкреплен в узле ребрами жесткости (см. Рисунок 7.7), то расчетная несущая способность стержней решетки в узлах типов Т, Х, Y, а также К и N с зазором (Таблица 7.22) определяется по формуле:

$$N_{i,Rd} = 2f_{yi}t_i \cdot (b_{eff} + b_{eff,s}) / \gamma_{M5}, \quad (7.6)$$

где

$$b_{eff} = t_w + 2r + 7t_f / f_{y0}, \text{ но } b_{eff} \leq b_i + h_i - 2t_i;$$

$$b_{eff,s} = t_s + 2a + 7t_f / f_{yi}, \text{ но } b_{eff} + b_{eff,s} \leq b_i + h_i - 2t_i$$

здесь

a — толщина сварного шва, прикрепляющего ребро жесткости к поясу. При односторонних угловых сварных швах вместо $2a$ следует принимать a ;

s — обозначает принадлежность к ребру жесткости.

7.6.9 Толщина ребер жесткости должна быть не менее толщины стенки двутавра.

Таблица 7.21 - Расчетная несущая способность сварных узлов сопряжения стержней решетки из прямоугольных или круглых труб с поясами из двутавров

Тип узла	Расчетная несущая способность, вид отказа [$i = 1$ или $2, j =$ перекрываемый стержень решетки]
Т, Y и Х	Текучесть стенки пояса
	$N_{1,Rd} = \frac{f_{y0} t_w b_w}{\sin \theta_1} / \gamma_{M5}$
	<p>Потеря несущей способности стержня решетки</p> $N_{1,Rd} = 2f_{y1} t_1 p_{eff} / \gamma_{M5}$

Таблица 7.21 - Расчетная несущая способность сварных узлов сопряжения стержней решетки из прямоугольных или круглых труб с поясами из двутавров
(продолжение)

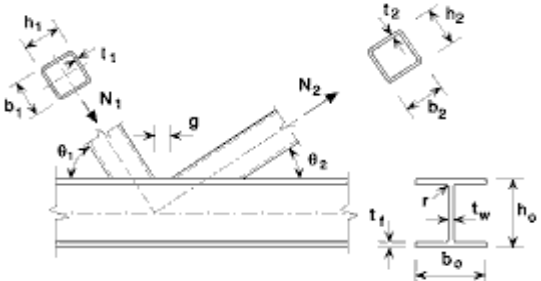
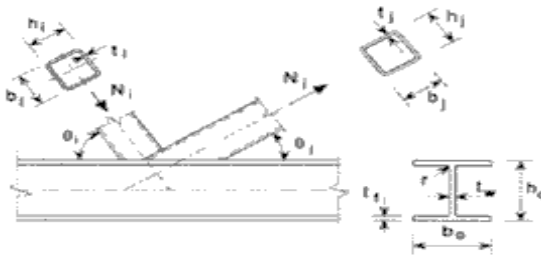
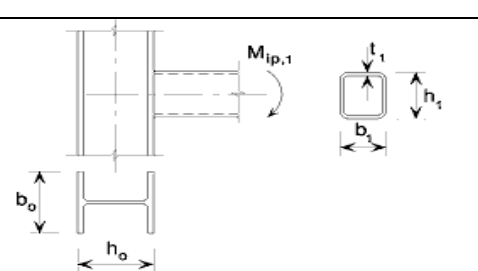
Тип узла	Расчетная несущая способность, вид отказа [$i = 1$ или $2, j =$ перекрываемый стержень решетки]	
К и N с зазором [$i = 1$ или 2]	Потеря устойчивости стенки пояса	Потеря несущей способности стержня решетки не рассматривается, если:
	$N_{i,Rd} = \frac{f_{y0} t_w b_w}{\sin \theta_i} / \gamma_{M5}$	$g / t_i \leq 20 - 28\beta,$ $\beta \leq 1 - 0,03\gamma,$
	Потеря несущей способности стержня решетки	где $\gamma = b_0 / 2t_i$ и для стержней из круглых труб $0,75 \leq d_1 / d_2 \leq 1,33$ или для стержней из прямоугольных труб $0,75 \leq b_1 / b_2 \leq 1,33$
	$N_{i,Rd} = 2f_{yi} t_i p_{eff} / \gamma_{M5}$	
	Сдвиг пояса	
	$N_{i,Rd} = \frac{f_{y0} A_v}{\sqrt{3} \sin \theta_i} / \gamma_{M5}$ $N_{0,Rd} = \left[(A_0 - A_v) \cdot f_{y0} + A_v f_{y0} \cdot \sqrt{1 - (V_{Ed} / V_{p1,Rd})^2} \right] / \gamma_{M5}$	
К и N с нахлестом* [$i = 1$ или 2]	Потеря несущей способности стержня решетки 25 % $\leq \lambda_{ov} \leq 50$ %	
Стержни решетки i и j могут быть сжаты или растянуты 	$N_{i,Rd} = f_{yi} t_i \cdot (p_{eff} + b_{e,ov} + (h_i - 2t_i) \cdot \lambda_{ov} / 50) / \gamma_{M5}$	
	Потеря несущей способности стержня решетки 50 % $\leq \lambda_{ov} \leq 80$ %	
	$N_{i,Rd} = f_{yi} t_i \cdot (p_{eff} + b_{e,ov} + h_i - 2t_i) / \gamma_{M5}$	
	Потеря несущей способности стержня решетки $\lambda_{ov} \geq 80$ % $N_{i,Rd} = f_{yi} t_i \cdot (b_i + b_{e,ov} + 2h_i - 4t_i) / \gamma_{M5}$	

Таблица 7.21 - Расчетная несущая способность сварных узлов сопряжения стержней решетки из прямоугольных или круглых труб с поясами из двутавров
(продолжение)

Тип узла	Расчетная несущая способность, вид отказа [$i = 1$ или $2, j =$ перекрываемый стержень решетки]	
$A_v = A_0 - (2 - \alpha) \cdot b_0 t_f + (t_w + 2r) \cdot t_f$ Для стержней из прямоугольных труб $\alpha = \sqrt{\frac{1}{1 + 4g^2 / 3t_f^2}}$ Для стержней из круглых труб $\alpha = 0$	$p_{eff} = f_w + 2r + 7t_f f_{y0} / f_{y1}$, но $p_{eff} \leq b_i + h_i - 2t_i$ для Т-, Y- и X-образных узлов, а также К- и Н-образных узлов с зазором и $p_{eff} \leq b_i + h_i - 2t_i$ для К- и Н-образных узлов с нахлестом	$b_w = \frac{h_i}{\sin \theta_i} + 5 \cdot (t_f + r)$, но $b_w \leq 2t_i + 10 \cdot (t_f + r)$
	$b_{e,ov} = \frac{10}{b_j / t_j} \cdot \frac{f_{y1} t_j}{f_{y1} t_i} \cdot b_i$, но $b_{e,ov} \leq b_i$	
Для стержней решетки из круглых труб значение несущей способности умножается на $\pi/4$; b_1 и h_1 заменяют на d_1 , а b_2 и h_2 заменяют на d_2 .		
* Следует проверять только перекрывающий стержень решетки i . Эффективность перекрываемого стержня решетки j (т.е. расчетная несущая способность узла, деленная на расчетную несущую способность стержня решетки в пластической стадии) следует принимать равной эффективности перекрывающего стержня решетки.		

Таблица 7.22 - Расчетная несущая способность на изгиб сварных узлов сопряжения стержней решетки из прямоугольных труб с поясами из двутавров

Тип узла	Расчетная несущая способность, вид отказа [i = 1 или 2, j = перекрываемый стержень решетки]	
Т и Y	Текучесть стенки пояса	
	$M_{ip,1,Rd} = 0,5f_{y0}t_wb_wh_1 / \gamma_{M5}$	
	Потеря несущей способности стержня решетки	
	$M_{ip,1,Rd} = f_{y1}t_1b_{eff} \cdot (h_1 - t_1) / \gamma_{M5}$	
Параметры b_{eff} и b_w		
$b_{eff} = t_w + 2r + 7t_f f_{y0} / f_{y1}$, но $p_{eff} \leq b_1 + h_1 - 2t_1$	$b_w = \frac{h_1}{\sin \theta_1} + 5 \cdot (t_f + r)$, но $b_w \leq 2t_1 + 10 \cdot (t_f + r)$	

Эффективный периметр стержня решетки
решетки без ребер жесткости

Эффективный периметр стержня
решетки с ребрами жесткости

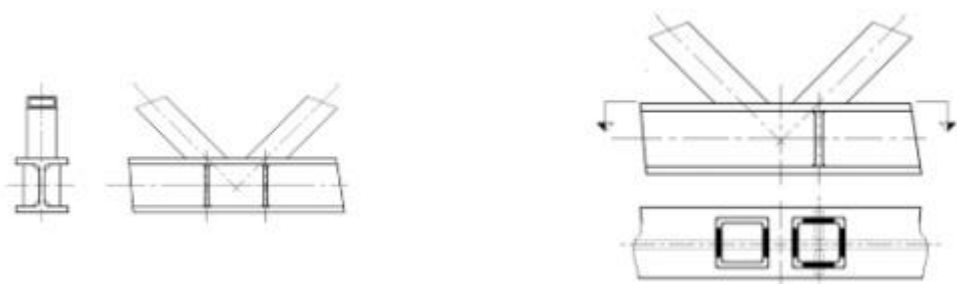


Рисунок 7.7 — Ребра жесткости в поясах из двутавров

ПРИМЕР 24. Расчет Т-образного узла сопряжения стержней решетки из круглых труб с поясами из двутавров

Исходные данные: выполнить расчет несущей способности Т-образного узла фермы. Т-образный узел - сопряжение нижнего пояса фермы со стойкой. Нижний пояс представляет собой прокатный профиль двутаврового сечения - двутавр ИРЕ 240, стойка - круглая труба сечением 140×5мм.

2 Определение характеристик узла

2.1 Определение класса сечения

2.1.1 Нижний пояс фермы (двутавр ИРЕ 240)

а) стенка сечения

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

$$\varepsilon = \sqrt{235/f_y} = \sqrt{235/355} = 0,81$$

Отношение высоты стенки к толщине стенки:

$$\frac{c}{t} = \frac{d_w}{t_w} = \frac{h_0 - 2t_f - 2r}{t_w} = \frac{240 - 2 \cdot 9,8 - 2 \cdot 15}{6,2} = \frac{190,4}{6,2} = 30,70$$

По Таблице 5.2 СН РК EN 1993-1-1 предельно допустимое значение для сечений класса 1:

$$\frac{c}{t} \leq 72\varepsilon$$

$$72\varepsilon = 72 \cdot 0,81 = 58,32$$

$$30,70 < 58,32 \rightarrow \text{стенка двутавра – стенка класса 1}$$

б) полка сечения

Отношение длины полки к толщине полки:

$$\frac{c}{t} = \frac{(b_0 - t_w - 2r)/2}{t_f} = \frac{(120 - 6,2 - 2 \cdot 15)/2}{9,8} = 4,27$$

По Таблице 5.2 СН РК EN 1993-1-1 предельно допустимое значение для сечений класса 1:

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

$$9\varepsilon = 9 \cdot 0,81 = 7,29$$

$$4,27 < 7,29 \rightarrow \text{стенка двутавра – стенка класса 1}$$

Сечение двутавра классифицируется как поперечное сечения класса 1.

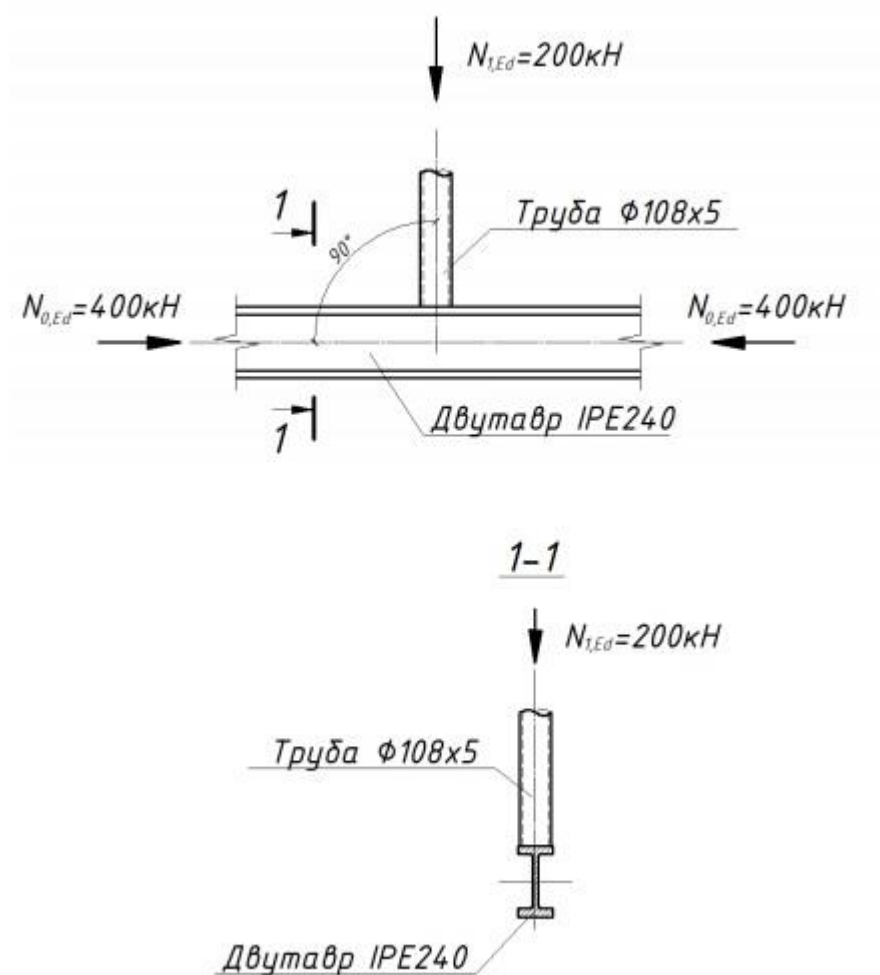
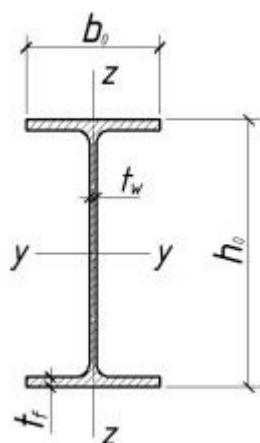


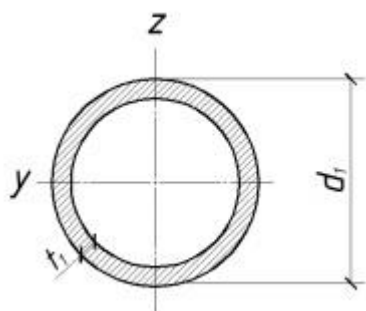
Рисунок 1 - Схема нагружения узла фермы продольными сжимающими силами



Двутавр IPE 240:

- высота $h_0 = 240\text{мм}$;
- ширина $b_0 = 120\text{мм}$;
- толщина стенки $t_w = 6,2\text{мм}$;
- толщина полки $t_f = 9,8\text{мм}$;
- радиус закругления $r = 15\text{мм}$;
- площадь поперечного сечения $A = 3912\text{мм}^2$.

Рисунок 2 - Геометрические характеристики нижнего пояса фермы

**Круглая труба 140×5мм:**

- высота $d_1 = 140\text{мм}$;
- толщина стенки $t_1 = 5\text{мм}$;
- площадь поперечного сечения $A_1 = 2121\text{мм}^2$.

Рисунок 3 - Геометрические характеристики стойки

2.1.2 Стойка фермы (круглая труба сечением 140×5мм)

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

$$\varepsilon = \sqrt{235/f_y} = \sqrt{235/355} = 0,81$$

Отношение диаметра трубы к толщине стенки:

$$d/t = d_0/t_0 = 140/5 = 28$$

По Таблице 5.2 СН РК EN 1993-1-1 предельно допустимое значение для сечений класса 1:

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

$$50\varepsilon^2 = 50 \cdot 0,81^2 = 32,8$$

$$28 < 32,80 \rightarrow \text{сечение класса 1}$$

Сечение трубы классифицируется как поперечное сечения класса 1.

Поперечное сечение двутавра ИРЕ 240 и круглой трубы сечением 140×5мм относятся к 1 классу сечения, что удовлетворяет требованиям Пункта 7.1.2(2) СН РК EN 1993-1-8.

2.2 Определение основных физико-механических характеристик узла

В данном примере рассматривается узел сопряжения решетчатой конструкции из двутавра (нижний пояс) и круглой трубы (стойка). Требования и расчет узлов сопряжения стержней из круглых труб с поясами из двутавров описаны в Пункте 7.6 СН РК EN 1993-1-8.

Т-образный узел состоит из двух профилей: двутавр ИРЕ 240 (нижний пояс фермы, см. Рисунок 1) и круглой трубы сечением 140×5мм (стойка фермы, см. Рисунок 1). Нижний пояс испытывает действие сжимающей силы $N_{0,Ed} = 400\text{кН}$, а раскос - сжимающей силы $N_{1,Ed} = 200\text{кН}$.

Номинальная толщина стенки использованных в примере круглой трубы (стойка фермы) удовлетворяют требованиям Пунктов 7.1.1(5) и 7.1.1(6) СН РК EN 1993-1-8.

Толщина стенки поперечного сечения стойки $t = 5\text{мм}$ больше минимального требуемого значения $t = 2,5\text{мм}$ и меньше максимального значения $t = 25\text{мм}$.

Все элементы выполнены из стали марки S355 с номинальным пределом текучести $f_y = 355\text{Н/мм}^2$, что ниже максимального требуемого значения номинального предела текучести $f_y = 460\text{Н/мм}^2$ (см. Пункт 7.1.1(4) СН РК EN 1993-1-8).

2.3 Определение основных геометрических характеристик узла

Согласно Рисунку 7.1 СН РК EN 1993-1-8 узел, разбираемый в данном примере, классифицируется как Т-образный узел с углом $\theta_1 = 90^\circ$ между стойкой и поясом фермы. Угол $\theta_1 = 90^\circ$ соответствует требованиям Пункта 7.1.2(3) СН РК EN 1993-1-8, так как:

$$\theta_1 = 90^\circ > 30^\circ.$$

Необходимо также проверить требования геометрии узла по Таблице 7.20 СН РК EN 1993-1-8 для Т-образного узла сопряжения решетчатой конструкции со стержнями из круглых труб и с поясами из двутавров. Расчеты сведены в Таблицу 1.

Таблица 1 - Расчет требований по Таблице 7.20 СН РК EN 1993-1-8

Требования по таблице 7.20 СН РК EN 1993-1-8	Расчет геометрических характеристик Т-образного узла сопряжения фермы
d_w / t_w - класс сечения 1	Класс сечения стенки двутавра - 1 класс
$d_w \leq 400\text{мм}$	$d_w = h_0 - 2t_f - 2r = 240 - 2 \cdot 9,8 - 2 \cdot 15 = 190,4\text{мм}$ $d_w = 190,4\text{мм} < 400\text{мм}$
d_i / t_i - класс сечения 1 или 2	Класс сечения стержня стойки - 1 класс
$d_i / t_i \leq 50$	$d_1 / t_1 = 140/5 = 28 < 50$
b_0 / t_w - класс сечения 1 или 2	Класс сечения полки двутавра - 1 класс

Согласно Пункту 7.6(2) СН РК EN 1993-1-8, для узлов, соответствующих области применения, указанной в Таблице 7.20 СН РК EN 1993-1-8, необходимо учитывать только те расчетные критерии, которые приведены в соответствующей таблице. Расчетное значение несущей способности узла следует принимать по наименьшему из значений, соответствующих всем рассматриваемым критериям.

3 Определение несущей способности элементов узла

3.1 Текучесть стенки пояса

Расчёт узла сопряжения по осевой сжимающей силе в стойке фермы:

$$N_{1,Ed} = 200\text{кН}$$

Для Т-образного плоского узла сопряжения стойки из круглой трубы и пояса из двутавра расчетная несущая способность по осевой силе определяется по Формуле из Таблицы 7.21 СН РК EN 1993-1-8:

$$N_{1,Ed} = \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{f_{y0} t_w b_w}{\sin \theta_1} / \gamma_{M5} \right)$$

где f_{y0} - номинальный предел текучести стали верхнего пояса фермы, равный:

$$f_{y0} = 355\text{Н/мм}^2;$$

t_w - толщина стенки двутавра:

$$t_w = 6,2\text{мм};$$

b_w - ширина пояса двутавра:

$$b = 120\text{мм};$$

θ_1 - угол между сопряженными элементами узла, равный:

$$\theta_1 = 90^\circ;$$

γ_{M5} - частный коэффициент безопасности, определяемый по примечанию Пункта 2.2 СН РК EN 1993-1-8, равный:

$$\gamma_{M5} = 1,0.$$

Расчетная несущая способность равна:

$$N_{1,Ed} = \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{f_{y0} t_w b_w}{\sin \theta_1} / \gamma_{M5} \right) =$$

$$= \frac{\pi}{4} \cdot \left(\frac{355 \cdot 10^{-3} \cdot 9,8 \cdot 120}{\sin 90} \right) / 1,0 = 327,9 \text{ кН}$$

$$N_{1,Ed} = 327,9 \text{ кН}$$

Расчётная несущая способность обеспечена, так как:

$$\frac{N_{1,Ed}}{N_{1,Rd}} = \frac{200}{327,9} = 0,61 < 1,0$$

Условие выполняется.

3.2 Потеря несущей способности стержня решетки

Для Т-образного плоского узла сопряжения стойки из круглой трубы и пояса из двутавра потеря несущей способности стержня решетки определяется по Формуле из Таблицы 7.21 СН РК EN 1993-1-8:

$$N_{1,Ed} = \frac{\pi}{4} \cdot (2f_{y1} t_1 p_{eff} / \gamma_{M5})$$

где f_{y1} - номинальный предел текучести стали стойки фермы, равный:

$$f_{y1} = 355 \text{ Н/мм}^2;$$

t_1 - толщина стенки стержня стойки:

$$t_1 = 5 \text{ мм};$$

γ_{M5} - частный коэффициент безопасности, определяемый по примечанию Пункта 2.2 СН РК EN 1993-1-8, равный:

$$\gamma_{M5} = 1,0;$$

p_{eff} - параметр, определяемый по Таблице 7.21 СН РК EN 1993-1-8:

$$p_{eff} = \min \left[t_w + 2r + \frac{7t_f f_{y0}}{f_{y1}}; b_1 + h_1 - 2t_1 \right]$$

$$t_w + 2r + \frac{7t_f f_{y0}}{f_{y1}} = 6,2 + 2 \cdot 15 + \frac{7 \cdot 9,8 \cdot 355}{355} = 104,8 \text{ мм}$$

$$b_1 + h_1 - 2t_1 = d_1 + d_1 - 2t_1 = 140 + 140 - 2 \cdot 5 = 270 \text{ мм}$$

$$p_{eff} = \min[104,8; 270] = 104,8 \text{ мм}$$

Расчетная несущая способность равна:

$$N_{1,Ed} = \frac{\pi}{4} \cdot (2f_{y1} t_1 p_{eff} / \gamma_{M5}) = \frac{\pi}{4} \cdot (2 \cdot 355 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot 104,8) / 1,0 = 292,2 \text{ кН}$$

Расчётная несущая способность обеспечена, так как:

$$\frac{N_{1,Ed}}{N_{1,Rd}} = \frac{200}{292,2} = 0,68 < 1,0$$

Условие выполняется.

7.7 Сварные узлы сопряжения стержней решетки из круглых или прямоугольных труб с поясами из швеллера

7.7.1 Расчетные значения несущей способности сварных узлов сопряжения стержней решетки из замкнутых профилей с поясами из швеллера могут быть определены по Таблице 7.24 при условии, что геометрические параметры узлов соответствуют области применения, указанной в Таблице 7.23.

7.7.2 Следует учитывать дополнительно моменты, обусловленные изгибной жесткостью узлов.

7.7.3 В узлах с зазором расчетную несущую способность по осевой силе поперечного сечения пояса $N_{0,Rd}$ следует определять с учетом передачи поясом поперечной силы на стержни решетки, но без учета возникающих при этом дополнительных моментов. Проверку следует осуществлять в соответствии с СН РК EN 1993-1-1:

а) Расчетное значение растягивающей силы N_{Ed} в каждом поперечном сечении центрально-растянутых элементов должно удовлетворять условию:

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

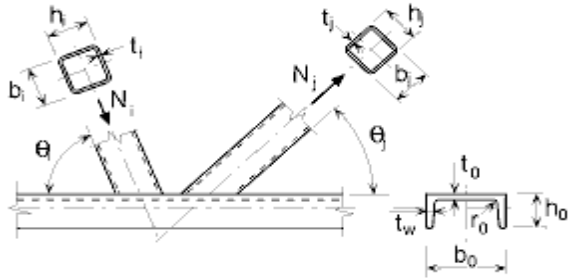
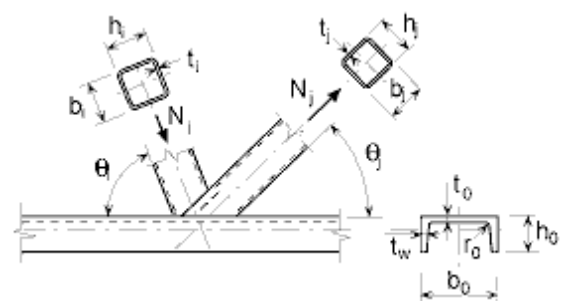
б) Расчетное значение сжимающей силы N_{Ed} в каждом поперечном сечении центрально-сжатых элементов следует определять по формуле:

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

Таблица 7.23 - Область применения сварных узлов сопряжения стержней решетки из круглых или прямоугольных труб с поясами из швеллера

Тип узла	Параметры узлов [$i = 1$ или $2, j =$ перекрываемый элемент решетки]				
	b_i / b_0	b_i / t_i и h_i / t_i или d_i / t_i		h_i / b_i	b_0 / t_0
		Сжатие	Растяжение		
К с зазором N с зазором	$\geq 0,4$ и $b_0 \leq 400$ мм	Сечение класса 1 и $\frac{h_i}{t_i} \leq 35$	$\frac{h_i}{t_i} \leq 35$ $\frac{b_i}{t_i} \leq 35$	$\geq 0,5$, но $\leq 2,0$	Сечение класса 2
К с нахлестом N с нахлестом	$\geq 0,25$ и $b_0 \leq 400$ мм	$\frac{b_i}{t_i} \leq 35$ $\frac{d_i}{t_i} \leq 50$	$\frac{d_i}{t_i} \leq 50$		
$\beta^* = b_i / b_0^*$; $b_0^* = b_0 - 2 \cdot (t_w + r_0)$. ¹⁾ Это условие применяется только при $\beta \leq 0,85$.					

Таблица 7.24 - Расчетная несущая способность сварных узлов сопряжения стержней решетки из прямоугольных или круглых труб с поясами из швеллера

Тип узла	Расчетная несущая способность, вид отказа [$i = 1$ или $2, j =$ перекрываемый стержень решетки]
К и N с зазором	Потеря несущей способности стержня решетки
	$N_{i,Rd} = f_{yi} t_i \cdot (b_i + b_{eff} + 2h_i - 4t_i) / \gamma_{M5}$
	Сдвиг (срез) сечения пояса
	$N_{i,Rd} = \frac{f_{y0} A_v}{\sqrt{3} \sin \theta_i} / \gamma_{M5}$ $N_{0,Rd} = \left[(A_0 - A_v) \cdot f_{y0} + A_v f_{y0} \cdot \sqrt{1 - (V_{Ed} / V_{pl,Rd})^2} \right] / \gamma_{M5}$
К и N с нахлестом*	Потеря несущей способности стержня решетки $25 \% \leq \lambda_{ov} \leq 50 \%$
	$N_{i,Rd} = f_{yi} t_i \cdot (b_{eff} + b_{e,ov} + (2h_i - 4t_i) \cdot \lambda_{ov} / 50) / \gamma_{M5}$
	Потеря несущей способности стержня решетки $50 \% \leq \lambda_{ov} \leq 80 \%$
	$N_{i,Rd} = f_{yi} t_i \cdot (b_{eff} + b_{e,ov} + 2h_i - 4t_i) / \gamma_{M5}$
	Потеря несущей способности стержня решетки $\lambda_{ov} \geq 80 \%$
	$N_{i,Rd} = f_{yi} t_i \cdot (b_i + b_{e,ov} + 2h_i - 4t_i) / \gamma_{M5}$
<p>$A_v = A_0 - (1 - \alpha) \cdot b_0^* t_0$</p> <p>$b_0^* = b_0 - 2 \cdot (t_w + r_0)$</p> <p>Для стержней решетки из прямоугольных труб</p> $\alpha = \sqrt{\frac{1}{1 + 4g^2 / 3t_i^2}}$ <p>Для стержней решетки из круглых труб $\alpha = 0$</p> $V_{pl,Rd} = \frac{f_{y0} A_v}{\sqrt{3}} / \gamma_{M5}$ $V_{Ed} = (N_{i,Ed} \sin \theta_i)_{\max}$	$b_{eff} = \frac{10}{b_0^* / t_0} \cdot \frac{f_{y0} t_0}{f_{yi} t_i} \cdot b_i, \text{ но } b_{eff} \leq b_i$ $b_{e,ov} = \frac{10}{b_j / t_j} \cdot \frac{f_{yj} t_j}{f_{yi} t_i} \cdot b_i, \text{ но } b_{e,ov} \leq b_i$
Для стержней решетки из круглых труб значение несущей способности умножается на $\pi / 4$; b_1 и h_1 заменяют на d_1 , а b_2 и h_2 заменяют на d_2 .	
* Следует проверять только перекрывающий стержень решетки i . Эффективность перекрываемого стержня решетки j (т. е. расчетная несущая способность узла, деленная на расчетную несущую способность стержня решетки в пластической стадии) следует принимать равной эффективности перекрывающего стержня решетки.	

ПРИМЕР 25. Расчет К-образного узла сопряжения стержней решетки из круглых труб с поясами из швеллера

Исходные данные: выполнить расчет несущей способности К-образного сварного узла фермы. К-образный узел - сопряжение нижнего пояса фермы с диагоналями. Нижний пояс представляет собой прокатный профиль - швеллер U300, диагонали - квадратные трубы сечением $140 \times 140 \times 5$ мм.

Угол сопряжения диагоналей с поясом фермы составляет 45° . Зазор между стержнями диагоналей - 50 мм. Эксцентриситет узла 75 мм.

Все элементы фермы выполнены из стали марки S355 с номинальным пределом текучести $f_y = 355 \text{ Н/мм}^2$.

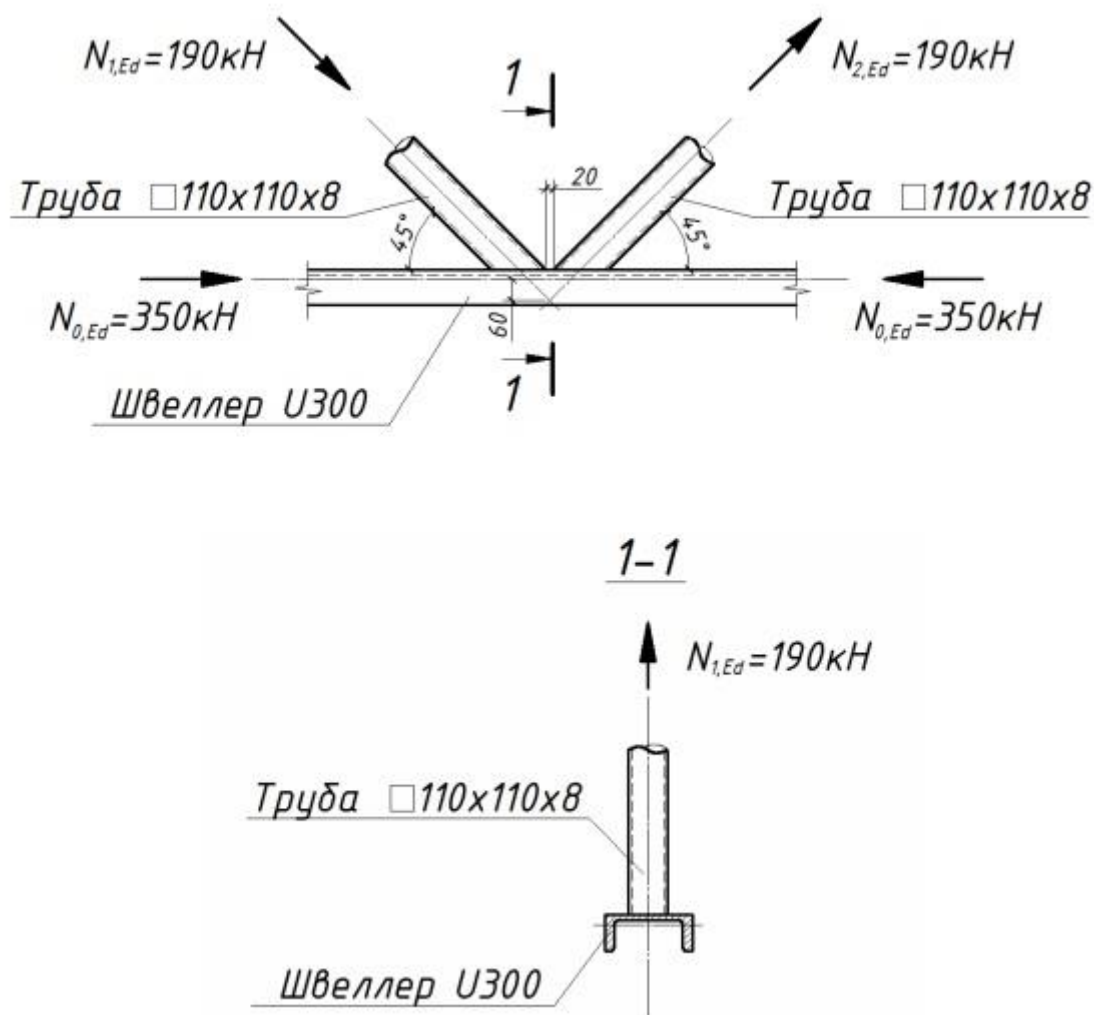
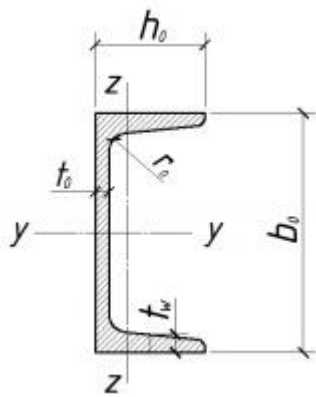


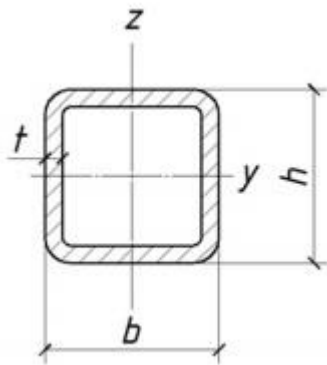
Рисунок 1 - Схема нагружения узла фермы



Швеллер U300:

- высота $h_0 = 100\text{мм}$;
- ширина $b_0 = 300\text{мм}$;
- толщина стенки $t_0 = 10\text{мм}$;
- толщина полки $t_w = 16\text{мм}$;
- радиус закругления $r_0 = 16\text{мм}$;
- площадь поперечного сечения $A_0 = 5830\text{мм}^2$.

Рисунок 2 - Геометрические характеристики нижнего пояса фермы



Квадратная труба 140×140×5мм:

- высота $h_1 = 140\text{мм}$;
- ширина $b_1 = 140\text{мм}$;
- толщина стенки $t_1 = 5\text{мм}$;
- площадь поперечного сечения $A_1 = 2670\text{мм}^2$.

Рисунок 3 - Геометрические характеристики стойки

2 Определение характеристик узла

2.1 Определение класса сечения

2.1.1 Нижний пояс фермы (швеллер)

Согласно требованиям СН РК EN 1993-1-8, в расчетах сварных узлов сопряжения в решетчатых конструкциях из стали необходимо, чтобы все элементы имели класс поперечного сечения - 1 или 2 класс (при условии чистого изгиба).

Значит, в начале расчета несущей способности узла необходимо определить класс поперечного сечения всех сжатых элементов.

а) стенка сечения

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

$$\varepsilon = \sqrt{235/f_y} = \sqrt{235/355} = 0,81$$

Отношение высоты стенки к толщине стенки:

$$\frac{c}{t} = \frac{d_w}{t_w} = \frac{b_0 - 2t_w - 2r_0}{t_0} = \frac{300 - 2 \cdot 16 - 2 \cdot 16}{10} = \frac{236}{10} = 23,6$$

По Таблице 5.2 СН РК EN 1993-1-1 предельно допустимое значение для сечений класса 1:

$$\frac{c}{t} \leq 72\varepsilon$$

$$72\varepsilon = 72 \cdot 0,81 = 58,32$$

$$23,6 < 58,32 \rightarrow \text{стенка швеллера} - \text{сечение класса 1.}$$

б) полка сечения

Отношение длины полки к толщине полки:

$$\frac{c}{t} = \frac{h_0 - t_0 - r_0}{t_w} = \frac{100 - 10 - 16}{16} = 4,625$$

По Таблице 5.2 СН РК EN 1993-1-1 предельно допустимое значение для сечений класса 1:

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

$$9\varepsilon = 9 \cdot 0,81 = 7,29$$

$$4,625 < 7,29 \rightarrow \text{полка швеллера – сечение класса 1.}$$

Сечение швеллера будет классифицироваться как поперечное сечения класса 1.

Поперечное сечение швеллера U300 относятся к 1 классу сечения, что удовлетворяет требованиям Пункта 7.1.2(2) СН РК EN 1993-1-8.

2.1.2 Диагональ фермы (квадратная труба сечением 140×140×5мм)

а) полка диагонали

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

$$\varepsilon = \sqrt{235/f_y} = \sqrt{235/355} = 0,81$$

Ширина полки:

$$c = b_1 - 3t_1 = 140 - 3 \cdot 5 = 125\text{мм}$$

Отношение высоты стенки к толщине стенки:

$$\frac{c}{t} = \frac{c}{t_1} = \frac{125}{5} = 25$$

По Таблице 5.2 СН РК EN 1993-1-1 предельно допустимое значение для сечений класса 1:

$$\frac{c}{t} \leq 72\varepsilon$$

$$72\varepsilon = 72 \cdot 0,81 = 58,32$$

$$25 < 58,32 \rightarrow \text{полка квадратной трубы - сечение 1 класса}$$

б) стенка диагонали

Высота стенки:

$$h = h_1 - 3t_1 = 140 - 3 \cdot 5 = 125\text{мм}$$

Отношение высоты стенки к толщине стенки:

$$\frac{c}{t} = \frac{h}{t_1} = \frac{125}{5} = 25$$

По Таблице 5.2 СН РК EN 1993-1-1 предельно допустимое значение для сечений класса 1:

$$\frac{c}{t} \leq 72\varepsilon$$

$$72\varepsilon = 72 \cdot 0,81 = 58,32$$

$$25 < 58,32 \rightarrow \text{стенка квадратной трубы - сечение 1 класса}$$

Следовательно, поперечное сечение квадратной трубы 140×140×5мм классифицируется как сечение 1 класса.

Поперечные сечения элементов сквозной конструкции относятся к 1 классу, что удовлетворяет требованиям Пункта 7.1.2(2) СН РК EN 1993-1-8.

2.2 Определение основных физико-механических характеристик узла

В данном примере рассматривается узел сопряжения решетчатой конструкции из швеллера (нижний пояс фермы) и круглой трубы (диагонали фермы). Требования и расчет узлов сопряжения

стержней решетки из замкнутого профиля с поясами из швеллеров описаны в Пункте 7.7 СН РК EN 1993-1-8.

К-образный узел состоит из двух профилей: швеллер U300 (нижний пояс фермы, см. Рисунок 1) и квадратной трубы сечением 140×140×5мм (стойка фермы, см. Рисунок 1). Нижний пояс испытывает действие сжимающей силы $N_{0,Ed} = 350\text{кН}$, правая диагональ - сжимающей силы $N_{1,Ed} = 190\text{кН}$, а правая диагональ - растягивающей силы $N_{2,Ed} = 190\text{кН}$.

Номинальные толщины стенок использованных в примере квадратных труб удовлетворяют требованиям Пунктов 7.1.1(5) и 7.1.1(6) СН РК EN 1993-1-8.

Толщина стенки поперечного сечения диагоналей $t = 5\text{мм}$ больше минимального требуемого значения $t = 2,5\text{мм}$ и меньше максимального значения $t = 25\text{мм}$.

Все элементы выполнены из стали марки S355 с номинальным пределом текучести $f_y = 355\text{Н/мм}^2$, что ниже максимального требуемого значения номинального предела текучести $f_y = 460\text{Н/мм}^2$ (см. Пункт 7.1.1(4) СН РК EN 1993-1-8).

2.3 Определение основных геометрических характеристик узла

Согласно Рисунку 7.1 СН РК EN 1993-1-8 узел, разбираемый в данном примере, классифицируется как К-образный узел с углом $\theta_1 = \theta_2 = 45^\circ$ между диагоналями и поясом фермы. Угол $\theta_1 = \theta_2 = 45^\circ$ соответствует требованиям Пункта 7.1.2(3) СН РК EN 1993-1-8, так как:

$$\theta_1 = \theta_2 = 45^\circ > 30^\circ.$$

Необходимо также проверить требования геометрии узла по Таблице 7.23 СН РК EN 1993-1-8 для К-образного узла сопряжения решетчатой конструкции со стержнями из круглых труб и с поясами из швеллеров. Расчеты сведены в таблицу 1.

Таблица 1 - Расчет требований по Таблице 7.23 СН РК EN 1993-1-8

Требования по таблице 7.23 СН РК EN 1993-1-8	Расчет геометрических характеристик Т-образного узла сопряжения фермы
$\frac{b_i}{b_0} \geq 0,4$	$\frac{b_1}{b_0} = \frac{140}{300} = 0,466 > 0,4$
$b_0 \leq 400\text{мм}$	$b_0 = 300\text{мм} < 400\text{мм}$
Класс сечения 1 или 2	Класс сечения стержня стойки - 1 класс
$\frac{h_i}{t_i} \leq 35$	$\frac{h_1}{t_1} = \frac{140}{5} = 28 < 35$
$\frac{b_i}{t_i} \leq 35$	$\frac{b_1}{t_1} = \frac{140}{5} = 28 < 35$
$h_i/b_i \geq 0,5$ $h_i/b_i \leq 2,0$	$h_1/b_1 = 140/140 = 1 > 0,5$ $h_1/b_1 = 140/140 = 1 < 2,0$
$\beta \leq 0,85$	$\beta = b_1/b_0 = 140/300 = 0,47 < 0,8$
$0,5 \cdot (1 - \beta^*) \leq g/b_0^*$	$b_0^* = b_0 - 2 \cdot (t_w + r_0) = 300 - 2 \cdot (16 + 16) = 236\text{мм}$ $\beta^* = b_1/b_0^* = 140/236 = 0,59$ $g/b_0^* = 50/236 = 0,211$ $0,5 \cdot (1 - \beta^*) = 0,5 \cdot (1 - 0,59) = 0,205$ $0,205 < 0,211$
$1,5 \cdot (1 - \beta^*) \geq g/b_0^*$	$1,5 \cdot (1 - \beta^*) = 1,5 \cdot (1 - 0,59) = 0,615$ $g/b_0^* = 50/236 = 0,211$ $0,615 > 0,211$
$g \geq t_1 + t_2$	$g = 50\text{мм} > t_1 + t_2 = 5 + 5 = 10\text{мм}$

Согласно Пункту 7.7(1) СН РК EN 1993-1-8, расчетные значения несущей способности сварных узлов сопряжения стержней решетки из замкнутых профилей с поясами из швеллеров могут быть определены по Таблице 7.24 СН РК EN 1993-1-8 при условии, что геометрические параметры узлов соответствуют области применения, указанной в таблице 7.23 СН РК EN 1993-1-8.

3 Определение несущей способности элементов узла

3.1 Потеря несущей способности стержня решетки

Расчёт узла сопряжения по осевой силе:

$$N_{1,Ed} = 190 \text{ кН}$$

Для К-образного плоского узла сопряжения стойки из круглой трубы и пояса из двутавра расчетная несущая способность по осевой силе определяется по Формуле из Таблицы 7.24 СН РК EN 1993-1-8:

$$N_{1,Ed} = f_{y1} t_1 \cdot (b_1 + b_{eff} + 2h_1 - 4t_1) / \gamma_{M5}$$

где f_{y1} - номинальный предел текучести стали верхнего пояса фермы, равный:

$$f_{y1} = 355 \text{ Н/мм}^2;$$

t_1 - толщина стенки сечения сжатого стержня:

$$t_w = 5,0 \text{ мм};$$

b_1 - ширина сечения сжатого стержня:

$$b_1 = 140 \text{ мм};$$

h_1 - высота сечения сжатого стержня:

$$h_1 = 140 \text{ мм};$$

γ_{M5} - частный коэффициент безопасности, определяемый по примечанию Пункта 2.2 СН РК EN 1993-1-8, равный:

$$\gamma_{M5} = 1,0;$$

b_{eff} - эффективная ширина пояса ферма, определяемая по Таблице 7.24 СН РК EN 1993-1-8:

$$b_{eff} = \frac{10}{b_0^*/t_0} \cdot \frac{f_{y0} t_0}{f_{y1} t_1} \cdot b_1 = \frac{10}{236/10} \cdot \frac{355 \cdot 10}{355 \cdot 5} \cdot 140 = 118,65 \text{ мм}$$

Расчетная несущая способность равна:

$$\begin{aligned} N_{1,Ed} &= f_{y1} t_1 \cdot (b_1 + b_{eff} + 2h_1 - 4t_1) / \gamma_{M5} = \\ &= 355 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot (140 + 118,65 + 2 \cdot 140 - 4 \cdot 5) / 1,0 = 952,55 \text{ кН} \end{aligned}$$

Расчётная несущая способность обеспечена, так как:

$$\frac{N_{1,Ed}}{N_{1,Rd}} = \frac{190}{952,55} = 0,05 < 1,0$$

Условие выполняется.

3.2 Сдвиг сечения пояса

Для К-образного плоского узла сопряжения диагоналей из квадратных труб и пояса из швеллера несущая способность на сдвиг пояса определяется по Формуле из Таблицы 7.24 СН РК EN 1993-1-8:

$$N_{1,Rd} = \frac{f_{y0} A_v}{\sqrt{3} \sin \theta_1 \gamma_{M5}}$$

где f_{y0} - номинальный предел текучести стали верхнего пояса фермы, равный:

$$f_y = 355 \text{ Н/мм}^2;$$

θ_1 - угол сопряжения диагонали с поясом фермы:

$$\theta_1 = 45^\circ;$$

γ_{M5} - частный коэффициент безопасности, определяемый по примечанию Пункта 2.2 СН РК EN 1993-1-8, равный:

$$\gamma_{M5} = 1,0;$$

A_v - площадь сдвига, определяемая по Таблице 7.24 СН РК EN 1993-1-8:

$$A_v = A_0 - (1 - \alpha) \cdot b_0^* t_0 =$$

$$= A_0 - \left(1 - \left(\sqrt{\frac{1}{1 + 4g^2/3t_f^2}} \right) \right) \cdot b_0 \cdot t_0 =$$

$$= 5830 - \left(1 - \left(\sqrt{\frac{1}{1 + 4 \cdot 50^2/3 \cdot 10^2}} \right) \right) \cdot 236 \cdot 10 = 3872 \text{ мм}^2$$

Расчетная несущая способность равна:

$$N_{1,Ed} = \frac{f_{y0} A_v}{\sqrt{3} \sin \theta_1} / \gamma_{M5} = \frac{355 \cdot 10^{-3} \cdot 3872}{\sqrt{3} \sin 45} / 1,0 = 1122,54 \text{ кН}$$

Расчётная несущая способность обеспечена, так как:

$$\frac{N_{1,Ed}}{N_{1,Rd}} = \frac{190}{1122,54} = 0,17 < 1,0$$

Условие выполняется.

Кроме того,

$$N_{0,Rd} = \frac{\left[(A_0 - A_v) \cdot f_{y0} + A_v f_{y0} \cdot \sqrt{1 - (V_{Ed}/V_{pl,Rd})^2} \right]}{\gamma_{M5}}$$

где f_{y0} - номинальный предел текучести стали верхнего пояса фермы, равный:

$$f_y = 355 \text{ Н/мм}^2;$$

A_0 - площадь поперечного сечения нижнего пояса фермы, равная:

$$A_0 = 5830 \text{ мм}^2;$$

A_v - площадь сдвига, равная:

$$A_v = 3872 \text{ мм}^2;$$

V_{Ed} - значение поперечной силы, определяемое по Таблице 7.24 СН РК EN 1993-1-8:

$$V_{Ed} = (N_{1,Ed} \sin \theta_1)_{\max} = 190 \cdot \sin 45 = 134,35 \text{ кН}$$

$V_{pl,Rd}$ - несущая способность пояса фермы по поперечной силе в пластической стадии работы поперечного сечения, определяемая по Таблице 7.24 СН РК EN 1993-1-8:

$$V_{pl,Rd} = \frac{\frac{f_{y0} A_v}{\sqrt{3}}}{\gamma_{M5}} = \frac{\frac{355 \cdot 10^{-3} \cdot 3872}{\sqrt{3}}}{1,0} = 793,6 \text{ кН}$$

Расчетная несущая способность равна:

$$N_{0,Rd} = \left[(A_0 - A_v) \cdot f_{y0} + A_v f_{y0} \cdot \sqrt{1 - (V_{Ed}/V_{pl,Rd})^2} \right] / \gamma_{M5} =$$

$$= \left[(5830 - 3872) \cdot 355 \cdot 10^{-3} + 3872 \cdot 355 \cdot 10^{-3} \sqrt{1 - (134,35/793,6)^2} \right] / 1,0$$

$$N_{0,Rd} = 2055,8 \text{ кН}$$

Расчётная несущая способность обеспечена, так как:

$$\frac{N_{1,Ed}}{N_{1,Rd}} = \frac{190}{2055,8} = 0,092 < 1,0$$

Условие выполняется.

Приложение А
(информационное)

Справочная информация по расположению рисок под отверстия в прокатных профилях

Таблица А.1 - Профиль IPE

Размеры							Риски для отверстий [мм]						
	h	b	t _w	t _f	r ₁	d	в поясах		в стенке				
	мм	мм	мм	мм	мм	мм	v	диаметр болта	v ₁	v ₂	h ₁	диаметр болта	
№								сред. макс.				сред.	макс.
IPE 80	80	46	3,8	5,2	5,0	59,6	26	- -	40	-	50	12	16
IPE 100	100	55	4,1	5,7	7,0	74,6	30	- -	50	-	70	16	20
IPE 120	120	64	4,4	6,3	7,0	93,4	36	- -	40	40	90	12	12
IPE 140	140	73	4,7	6,9	7,0	112,2	40	- -	45	50	100	12	16
IPE 160	160	82	5,0	7,4	9,0	127,2	44	12 12	50	60	120	12	16
IPE 180	180	91	5,3	8,0	9,0	146,0	50	12 12	55	70	140	16	20
IPE 200	200	100	5,6	8,5	12,0	159,0	56	12 12	65	70	150	16	24
IPE 220	220	110	5,9	9,2	12,0	177,6	60	16 16	65	90	170	20	24
IPE 240	240	120	6,2	9,8	15,0	190,4	68	16 16	70	100	180	20	24
IPE 270	270	135	6,6	10,2	15,0	219,6	72	16 20	80	110	210	24	27
IPE 300	300	150	7,1	10,7	15,0	248,6	80	20 20	80	140	240	24	27
IPE 330	330	160	7,5	11,5	18,0	271,0	86	20 24	85	160	260	24	27
IPE 360	360	170	8,0	12,7	18,0	298,6	90	24 24	85	190	290	24	27
IPE 400	400	180	8,6	13,5	21,0	331,0	96	24 27	85	230	330	24	27
IPE 450	450	190	9,4	14,6	21,0	378,6	106	27 27	90	270	370	27	27
IPE 500	500	200	10,2	16,0	21,0	426,0	110	27 27	90	320	420	27	27
IPE 550	550	210	11,1	17,2	24,0	467,6	120	27 27	95	360	460	27	27
IPE 600	600	220	12,0	19,0	24,0	514,0	130	27 27	100	400	500	27	27

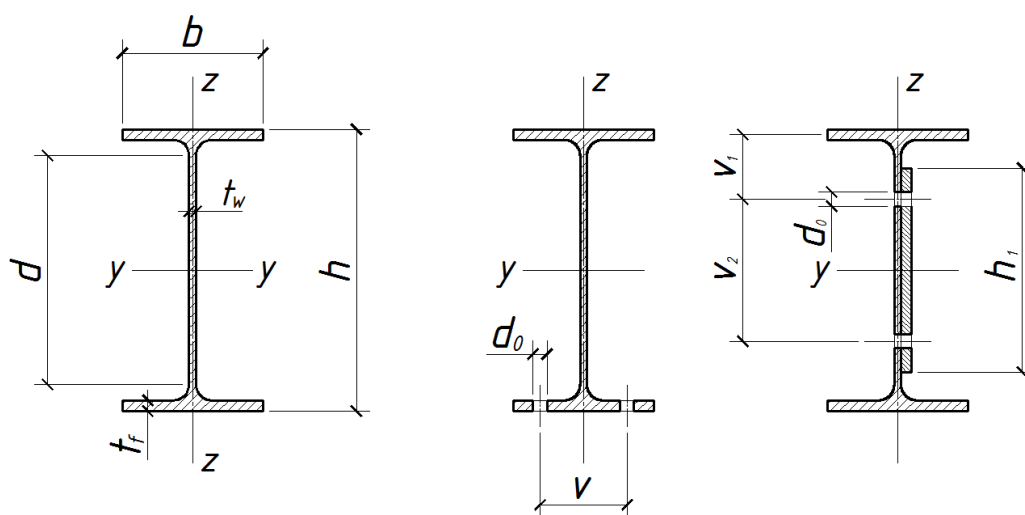


Рисунок А.1 - Профиль IPE

Таблица А.2 - Профиль IPN

	Размеры							Риски для отверстий [мм]							
	h	b	t _w	t _f	r ₁	r ₂	d	в поясах			в стенке				
	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	v	диаметр болта		v ₁	v ₂	h ₁	диаметр болта	
№									сред.	макс.				сред.	макс.
I 80	80	42	3,9	5,9	3,9	2,3	59,0	22	-	-	40	-	50	12	16
I 100	100	50	4,5	6,8	4,5	2,7	75,7	26	-	-	50	-	70	16	20
I 120	120	58	5,1	7,7	5,1	3,1	92,4	32	-	-	40	40	80	12	12
I 140	140	66	5,7	8,6	5,7	3,4	109,1	34	-	-	45	50	100	12	16
I 160	160	74	6,3	9,5	6,3	3,8	125,8	40	12	12	50	60	110	16	16
I 180	180	82	6,9	10,4	6,9	4,1	142,4	44	12	12	55	70	130	16	20
I 200	200	90	7,5	11,3	7,5	4,5	159,1	48	12	16	55	90	150	20	20
I 220	220	98	8,1	12,2	8,1	4,9	175,8	52	16	16	60	100	160	20	20
I 240	240	106	8,7	13,1	8,7	5,2	192,5	56	16	16	60	120	180	20	20
I 260	260	113	9,4	14,1	9,4	5,6	208,9	58	16	16	60	140	200	20	20
I 280	280	119	10,1	15,2	10,0	6,1	225,1	62	16	20	75	130	210	24	24
I 300	300	125	10,8	16,2	11,0	6,5	241,6	64	20	20	75	150	230	24	24
I 320	320	131	11,5	17,3	12,0	6,9	257,9	70	20	20	75	170	250	24	24
I 340	340	137	12,2	18,3	12,0	7,3	274,3	74	20	20	75	190	270	24	24
I 360	360	143	13,0	19,5	13,0	7,8	290,2	76	20	20	75	210	290	24	24
I 380	380	149	13,7	20,5	14,0	8,2	306,7	80	20	20	80	220	300	24	24
I 400	400	155	14,4	21,6	14,0	8,6	322,9	84	24	24	85	230	320	24	27
I 450	450	170	16,2	24,3	16,0	9,7	363,6	92	24	24	90	270	360	24	27
I 500	500	185	18,0	27,0	18,0	10,8	404,3	100	24	27	95	310	400	24	27
I 550	550	200	19,0	30,0	19,0	11,9	445,6	110	27	27	100	350	440	27	27

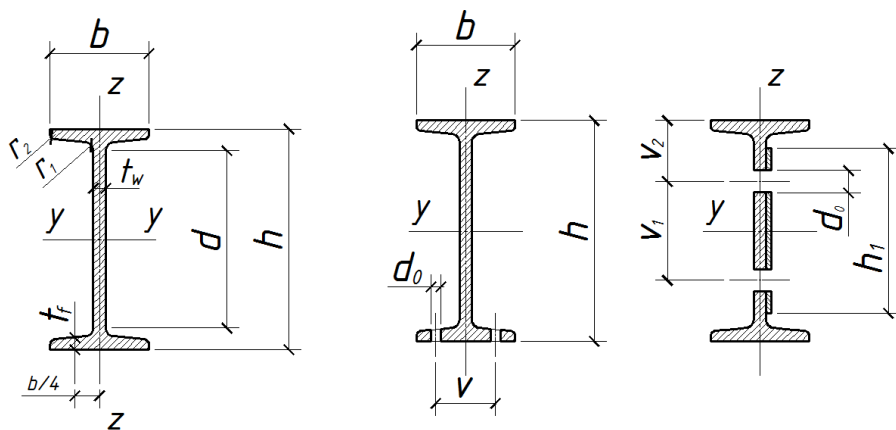


Рисунок А.2 - Профиль IPN

Таблица А.3 - Профиль HEA

№	Размеры						Риски для отверстий [мм]						
	h	b	t _w	t _f	r ₁	d	в поясах			в стенке			
	мм	мм	мм	мм	мм	мм	v	v ₁	диаметр болта	v ₂	v ₃	h ₁	диаметр болта
HEA 100	96	100	5,0	8,0	12,0	56	56	-	12	48	-	50	12
HEA 120	114	120	5,0	8,0	12,0	74	66	-	16	57	-	70	16
HEA 140	133	140	5,5	8,5	12,0	92	76	-	20	46,5	40	90	16
HEA 160	152	160	6,0	9,0	15,0	104	86	-	20	51	50	100	16
HEA 180	171	180	6,0	9,5	15,0	122	100	-	24	50,5	70	120	16
HEA 200	190	200	6,5	10,0	18,0	134	110	-	24	55	80	130	16
HEA 220	210	220	7,0	11,0	18,0	152	120	-	24	65	80	150	20
HEA 240	230	240	7,5	12,0	21,0	164	94	164	24	70	90	160	20
HEA 260	250	260	7,5	12,5	24,0	177	100	180	24	80	90	170	24
HEA 280	270	280	8,0	13,0	24,0	196	110	200	24	85	100	190	24
HEA 300	290	300	8,5	14,0	27,0	208	120	210	27	90	110	200	24
HEA 320	310	300	9,0	15,5	27,0	225	120	210	27	95	120	220	27
HEA 340	330	300	9,5	16,5	27,0	243	120	210	27	95	140	240	27
HEA 360	350	300	10,0	17,5	27,0	261	120	210	27	95	160	260	27
HEA 400	390	300	11,0	19,0	27,0	298	120	210	27	100	190	290	27
HEA 450	440	300	11,5	21,0	27,0	344	120	210	27	100	240	340	27
HEA 500	490	300	12,0	23,0	27,0	390	120	210	27	100	290	390	27
HEA 550	540	300	12,5	24,0	27,0	438	120	210	27	105	330	430	27
HEA 600	590	300	13,0	25,0	27,0	486	120	210	27	105	380	480	27
HEA 650	640	300	13,5	26,0	27,0	534	120	210	27	105	430	530	27
HEA 700	690	300	14,5	27,0	27,0	582	120	210	27	105	480	580	27
HEA 800	790	300	15,0	28,0	30,0	674	130	210	27	110	570	670	27
HEA 900	890	300	16,0	30,0	30,0	770	130	210	27	110	670	770	27
HEA 1000	990	300	16,5	31,0	30,0	868	130	210	27	115	760	860	27

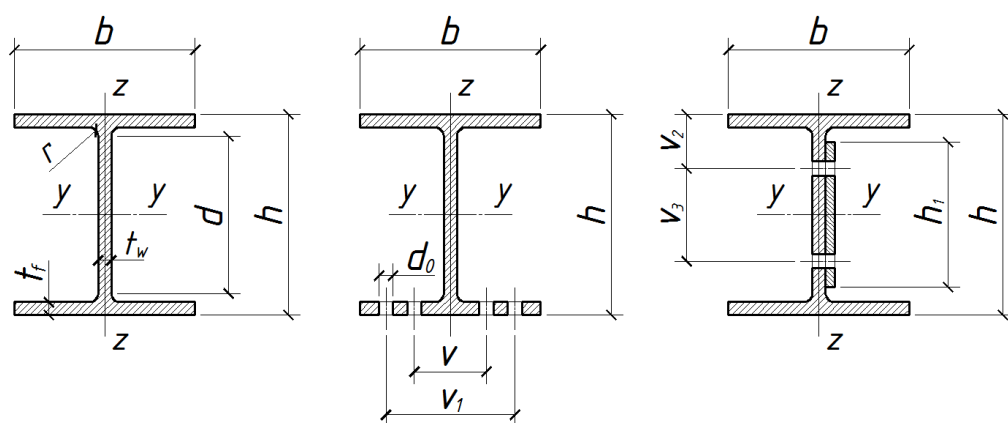


Рисунок А.3 - Профиль HEA

Таблица А.4 - Профиль НЕВ

№	Размеры						Риски для отверстий [мм]						
	h	b	t _w	t _f	r ₁	d	в поясах			в стенке			
	мм	мм	мм	мм	мм	мм	v	v ₁	диаметр болта	v ₂	v ₃	h ₁	диаметр болта
НЕВ 100	100	100	6,0	10,0	12,0	56	56	-	12	50	-	50	12
НЕВ 120	120	120	6,5	11,0	12,0	74	66	-	16	60	-	70	16
НЕВ 140	140	140	7,0	12,0	12,0	92	76	-	20	30	40	90	16
НЕВ 160	160	160	8,0	13,0	15,0	104	86	-	20	55	50	100	16
НЕВ 180	180	180	8,5	14,0	15,0	122	100	-	24	55	70	120	16
НЕВ 200	200	200	9,0	15,0	18,0	134	110	-	24	60	80	130	16
НЕВ 220	220	220	9,5	16,0	18,0	152	120	-	24	70	80	150	20
НЕВ 240	240	240	10,0	17,0	21,0	164	96	166	24	75	90	160	20
НЕВ 260	260	260	10,0	17,5	24,0	177	106	186	24	85	90	170	24
НЕВ 280	280	280	10,5	18,0	24,0	196	110	200	24	90	100	190	24
НЕВ 300	300	300	11,0	19,0	27,0	208	120	210	27	95	110	200	24
НЕВ 320	320	300	11,5	20,5	27,0	225	120	210	27	100	120	220	27
НЕВ 340	340	300	12,0	21,5	27,0	243	120	210	27	100	140	240	27
НЕВ 360	360	300	12,5	22,5	27,0	261	120	210	27	100	160	260	27
НЕВ 400	400	300	13,5	24,0	27,0	298	120	210	27	105	190	290	27
НЕВ 450	450	300	14,0	26,0	27,0	344	120	210	27	105	240	340	27
НЕВ 500	500	300	14,5	28,0	27,0	390	120	210	27	105	290	390	27
НЕВ 550	550	300	15,0	29,0	27,0	438	120	210	27	110	330	430	27
НЕВ 600	600	300	15,5	30,0	27,0	486	120	210	27	110	380	480	27
НЕВ 650	650	300	16,0	31,0	27,0	534	120	210	27	110	430	530	27
НЕВ 700	700	300	17,0	32,0	27,0	582	120	210	27	110	480	580	27
НЕВ 800	800	300	17,5	33,0	30,0	674	130	210	27	115	570	670	27
НЕВ 900	900	300	18,5	35,0	30,0	770	130	210	27	115	670	770	27
НЕВ 1000	1000	300	19,0	36,0	30,0	868	130	210	27	120	760	860	27

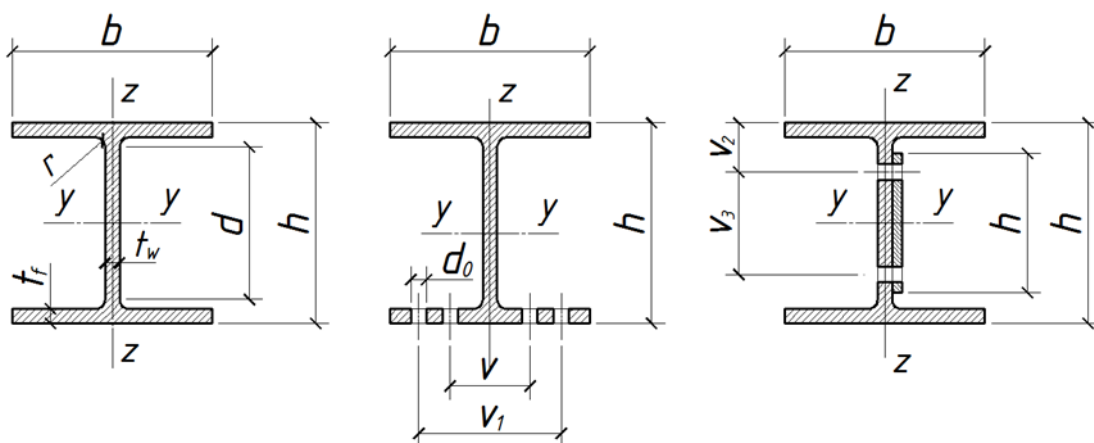


Рисунок А.4 - Профиль НЕВ

Таблица А.5 – Профиль U

№	Размеры									Риски для отверстий [мм]							
	h	b	t _w	t _f	r ₁	r ₂	d	y _s	y _m	в поясах		в стенке					
	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	v	диаметр болта	v ₁	v ₂	h ₁	диаметр болта		
№											сред. макс.					сред.	макс.
U 80	80	45	6,0	8,0	8,0	4,0	46,0	14,5	26,7	25	12 12	40	-	40	12	12	
U 100	100	50	6,0	8,5	8,5	4,0	64,0	15,5	29,3	30	12 12	50	-	60	12	12	
U 120	120	55	7,0	9,0	9,0	4,5	82,0	16,0	30,3	30	16 16	40	40	80	12	12	
U 140	140	60	7,0	10,0	10,0	5,0	98,0	17,5	33,7	35	16 16	45	50	100	12	16	
U 160	160	65	7,5	10,5	11,0	5,5	115,0	18,4	35,6	35	16 20	50	60	110	16	16	
U 180	180	70	8,0	11,0	11,0	5,5	133,0	19,2	37,5	40	20 20	55	70	130	16	20	
U 200	200	75	8,5	11,5	12,0	6,0	151,0	20,1	39,4	40	20 20	55	90	150	20	20	
U 220	220	80	9,0	12,5	13,0	6,5	167,0	21,4	42,0	45	20 20	60	100	160	20	20	
U 240	240	85	9,5	13,0	13,0	6,5	184,0	22,3	43,9	45	24 24	60	120	180	20	20	
U 260	260	90	10,0	14,0	14,0	7,0	200,0	23,6	46,6	50	24 24	60	140	200	20	20	
U 280	280	95	10,0	15,0	15,0	7,5	216,0	25,3	50,2	50	24 24	75	130	210	24	27	
U 300	300	100	10,0	16,0	16,0	8,0	232,0	27,0	54,1	55	24 27	75	150	230	24	27	
U 320	320	100	14,0	17,5	18,0	8,8	246,0	26,0	48,2	58	27 27	90	140	240	27	27	
U 350	350	100	14,0	16,0	16,0	8,0	282,0	24,0	44,5	58	27 27	85	180	280	27	27	
U 380	380	102	13,5	16,0	16,0	8,0	313,0	23,8	45,8	60	27 27	85	200	300	27	27	
U 400	400	110	14,0	18,0	18,0	9,0	324,0	26,5	51,1	60	27 27	90	220	320	27	27	

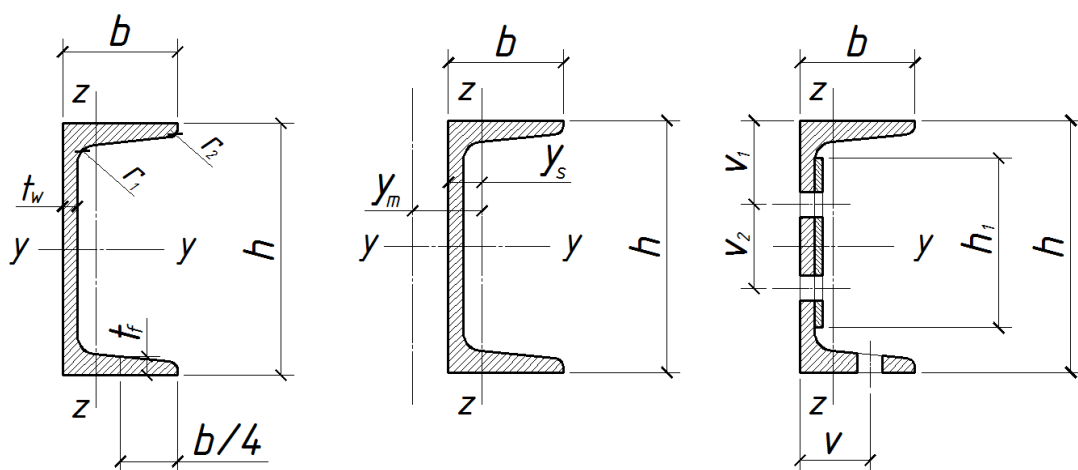


Рисунок А.5 - Профиль U

Таблица А.6 – Равнополочный уголок

№	Размеры									Риски для отверстий [мм]				
	b	t	r ₁	r ₂	e	é	v	v ₁	w	v	v ₁	v ₂	диаметр болта	
	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	сред.	макс.
40x4	40	4	6	3	11,2	28,8	15,8	14,1	28,3	25	-	-	12	12
40x5	40	5	6	3	11,6	28,4	16,4	14,2	28,3	25	-	-	12	12
45x4	45	4	7	3,5	12,3	32,7	17,4	15,8	31,8	30	-	-	12	12
45x5	45	5	7	3,5	12,8	32,2	18,0	15,9	31,8	30	-	-	12	12
50x4	50	4	7	3,5	13,5	36,5	19,2	17,6	35,4	30	-	-	12	12
50x5	50	5	7	3,5	14,0	36,0	19,8	17,6	35,4	30	-	-	16	16
50x6	50	6	7	3,5	14,4	35,6	20,4	17,7	35,4	30	-	-	16	16
55x5	55	5	8	4	15,1	39,9	21,4	19,3	38,9	35	-	-	16	16
55x6	55	6	8	4	15,6	39,4	22,1	19,4	38,9	35	-	-	16	16
60x6	60	6	8	4	16,8	43,2	23,8	21,2	42,2	35	-	-	20	20
60x8	60	8	8	4	17,7	42,3	25,0	21,4	42,4	35	-	-	20	20
65x6	65	6	9	4,5	18,0	47,0	25,4	22,9	46,0	40	-	-	20	20
65x8	65	8	9	4,5	18,8	46,2	26,6	23,1	46,0	40	-	-	20	20
70x6	70	6	10	5	19,1	50,9	27,1	24,6	49,5	40	-	-	20	20
70x7	70	7	10	5	19,6	50,4	27,7	24,7	49,5	45	-	-	20	24
70x8	70	8	10	5	20,0	50,0	28,3	24,8	49,5	45	-	-	20	24
80x6	80	6	10	5	21,6	58,4	30,6	28,2	56,6	45	-	-	20	24
80x8	80	7	10	5	22,5	57,5	31,8	28,3	56,6	50	-	-	20	24
80x10	80	8	10	5	23,3	56,7	33,0	28,6	56,6	50	-	-	20	24
90x6	90	6	10	5	24,1	65,9	34,1	31,7	63,6	50	-	-	20	24
90x8	90	8	10	5	25,0	65,0	35,4	31,9	63,6	55	-	-	24	24
90x10	90	10	10	5	25,8	64,2	36,5	32,1	63,6	55	-	-	24	24
100x6	100	6	12	6	26,4	73,6	37,3	35,2	70,7	55	-	-	24	24
100x8	100	8	12	6	27,3	72,7	38,6	35,3	70,7	55	-	-	24	24
100x10	100	10	12	6	28,2	71,8	39,9	35,4	70,7	-	45	20	24	24
100x12	100	12	12	6	29,0	71,0	41,0	35,7	70,7	-	45	20	24	24
110x8	110	8	12	6	29,8	80,2	42,2	38,8	77,8	-	50	25	24	24
110x10	110	10	12	6	30,7	79,3	43,4	39,0	77,8	-	50	25	24	24
120x8	120	8	13	6,5	32,2	87,8	45,5	42,3	84,9	-	50	25	24	24
120x10	120	10	13	6,5	33,1	86,9	46,8	42,4	84,9	-	55	30	24	24
120x12	120	12	13	6,5	33,9	86,1	48,0	42,7	84,9	-	55	30	24	24
130x12	130	12	14	7	36,4	93,6	51,4	46,1	91,9	-	55	40	24	27
130x14	130	14	14	7	37,2	92,8	52,6	46,4	91,9	-	55	40	24	27
140x10	140	10	15	7,5	37,9	102,1	53,6	49,4	99,0	-	55	40	24	27
140x12	140	12	15	7,5	38,8	101,2	54,8	49,6	99,0	-	60	55	24	27
140x14	140	14	15	7,5	39,6	100,4	56,0	49,8	99,0	-	60	55	24	27
160x10	160	10	17	8,5	42,7	117,3	60,3	56,4	113,0	-	60	55	24	27
160x12	160	12	17	8,5	43,6	116,4	61,6	56,5	113,0	-	60	55	24	27
160x14	160	14	17	8,5	44,4	115,6	62,8	56,7	113,0	-	60	70	24	27
160x16	160	16	17	8,5	45,3	114,7	64,0	56,9	113,0	-	60	70	24	27
180x12	180	12	18	9	48,5	131,5	68,5	63,5	127,0	-	65	85	24	27
180x14	180	14	18	9	49,3	130,7	69,8	63,7	127,0	-	65	85	24	27
200x14	200	14	18	9	54,3	145,7	76,9	70,7	141,0	-	65	85	24	27
200x16	200	16	18	9	55,2	144,8	78,0	71,0	141,0	25	-	-	12	12
200x20	200	20	18	9	56,8	143,2	80,3	71,5	141,0	25	-	-	12	12

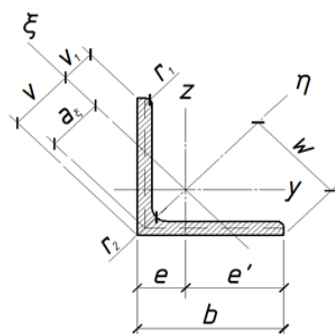


Рисунок А.6 - Угловой профиль равнополочный

Таблица А.7 – Неравнополочный уголок

№	Размеры													
	h	b	t	R	e	é	w	w ₁	v	v ₁	v ₂	tg φ	A	A _m
	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	мм	-	мм ²	мм ² /м
50x30x4	50	30	4	6	7,0	16,7	33,7	23,5	12,1	16,7	7,3	0,348	308	0,15
50x30x5	50	30	5	6	7,4	17,2	33,4	23,6	12,6	16,6	7,6	0,345	379	0,15
60x40x5	60	40	5	6	9,7	19,6	41,0	29,9	16,7	21,1	10,7	0,430	479	0,19
60x40x6	60	40	6	6	10,1	20,0	40,8	30,1	17,1	21,1	11,0	0,427	568	0,19
60x40x7	60	40	7	6	10,5	20,4	40,6	30,3	17,6	21,0	13,3	0,423	655	0,19
65x50x5	65	50	5	6	12,5	19,9	45,3	35,9	20,8	23,9	14,8	0,574	554	0,22
65x50x6	65	50	6	6	12,9	20,4	45,2	36,1	21,3	23,9	15,1	0,572	658	0,22
65x50x7	65	50	7	6	13,3	20,8	45,0	36,2	21,9	24,0	15,3	0,569	760	0,22
65x50x8	65	50	8	6	13,7	21,1	43,9	36,3	22,3	24,0	15,6	0,566	860	0,22
75x50x5	75	50	5	7	11,7	23,9	51,5	37,2	20,2	26,5	13,1	0,433	605	0,24
75x50x6	75	50	6	7	12,1	24,4	51,3	37,4	20,7	26,4	13,4	0,431	719	0,24
75x50x7	75	50	7	7	12,5	24,8	51,1	37,6	21,2	26,4	13,7	0,429	831	0,24
75x50x8	75	50	8	7	12,9	25,2	50,8	37,8	21,7	26,3	14,0	0,426	941	0,24
80x60x6	80	60	6	8	14,8	24,7	55,7	43,3	24,8	29,3	17,3	0,535	811	0,27
80x60x7	80	60	7	8	15,2	25,9	55,5	43,4	25,4	29,3	17,6	0,543	938	0,27
80x60x8	80	60	8	8	15,6	25,5	55,4	43,5	25,9	29,3	17,8	0,541	1060	0,27
90x60x6	90	60	6	8	14,0	28,8	61,7	44,7	24,3	31,8	15,8	0,434	871	0,29
90x60x8	90	60	8	8	14,8	29,6	61,3	45,1	25,3	31,7	16,4	0,431	1140	0,29
100x65x7	100	65	7	10	15,1	32,3	67,7	48,8	26,3	35,0	16,7	0,411	1120	0,32
100x65x8	100	65	8	10	15,5	32,7	68,1	49,1	26,8	34,9	17,0	0,410	1270	0,32
100x65x10	100	65	10	10	16,3	33,6	67,7	49,4	27,8	34,7	17,6	0,406	1650	0,32
100x65x12	100	65	12	10	17,1	34,4	67,2	49,8	28,7	34,6	18,2	0,401	1850	0,32
120x80x8	120	80	8	11	18,7	38,3	82,4	59,6	32,4	42,5	21,0	0,434	1550	0,39
120x80x10	120	80	10	11	19,5	39,2	81,9	60,0	33,4	42,3	21,6	0,431	1910	0,39
120x80x12	120	80	12	11	20,3	40,0	81,5	60,3	34,4	42,2	22,2	0,428	2270	0,39
130x90x10	130	90	10	11	21,9	41,6	89,3	66,5	37,4	46,6	24,8	0,466	2110	0,43
130x90x12	130	90	12	11	22,6	42,4	89,0	66,8	38,4	46,5	25,4	0,464	2510	0,43
130x90x14	130	90	14	11	23,4	43,2	88,6	67,1	39,4	46,4	26,0	0,460	2900	0,43
140x90x8	140	90	8	11	20,3	44,9	95,1	68,0	35,8	48,9	22,9	0,410	1790	0,45
140x90x10	140	90	10	11	21,1	45,8	95,2	68,4	36,8	48,7	23,5	0,406	2210	0,45
140x90x12	140	90	12	11	21,9	46,6	94,8	68,8	37,8	48,5	24,1	0,404	2630	0,45
140x90x14	140	90	14	11	22,7	47,4	94,3	69,1	38,7	48,4	24,7	0,400	3040	0,45
160x100x10	160	100	10	12	22,7	52,3	108,6	76,7	40,1	55,0	25,4	0,387	2520	0,50
160x100x12	160	100	12	12	23,5	53,2	108,1	77,2	41,1	54,8	26,0	0,385	2990	0,50
160x100x14	160	100	14	12	24,3	54,0	107,7	77,5	42,0	54,7	26,6	0,383	3460	0,50
160x100x16	160	100	16	12	25,0	54,8	107,2	77,9	42,9	54,5	27,2	0,380	3920	0,50

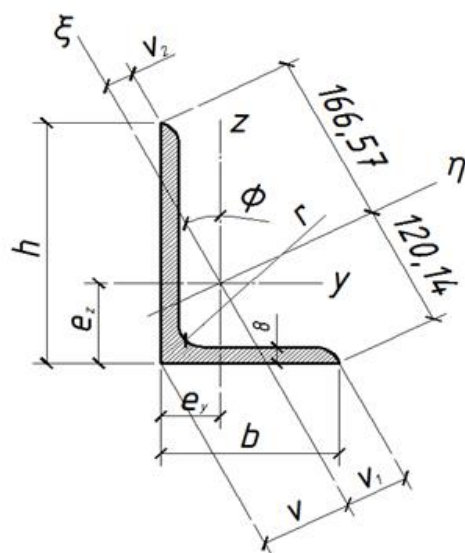


Рисунок А.7 - Угловой профиль неравнополочный

Приложение Б
(информационное)

Вспомогательные таблицы для расчета болтовых соединений

Таблица Б.1

Диаметр болта	d (мм)	12	16	20	24	27	30
Диаметр отверстия	d_o (мм)	13	18	22	26	30	33
Площадь брутто сечения болта	A (мм)	113	201	314	452	573	707
Площадь нетто сечения болта	A_s (мм)	84,3	157	245	353	459	561
Минимальное расстояние (мм)	e_1	1,2 d_o					
	e_2	1,5 d_o					
	p_1	2,2 d_o					
	p_2	3,0 d_o					
Рекомендованное расстояние (мм)	e_1	30	40	50	60	70	75
	e_2	25	30	40	50	55	60
	p_1	40	55	70	80	90	100
	p_2	40	55	70	80	90	100

Таблица Б.2

Диаметр болта	d (мм)	12	16	20	24	27	30
Диаметр отверстия	d_o (мм)	13	18	22	26	30	33
	Материал болта						
Расчетная несущая способность одного болта на срез одной плоскостью (кН)	4.6	18,7	33,3	52,0	74,9	94,8	117,0
	5.6	23,4	41,6	65,0	93,6	118,5	146,2
	8.8	37,4	66,6	104,0	149,8	189,5	234,0
	10.9	46,8	83,2	130,0	187,2	236,9	292,5
Расчетная несущая способность одного болта на срез одной плоскостью (кН)	4.6	14,0	26,0	40,6	58,4	76,0	92,9
	5.6	17,4	32,5	50,7	73,0	95,0	116,1
	8.8	27,9	52,0	81,1	116,9	151,9	185,7
	10.9	34,9	65,0	101,4	146,1	189,9	232,1

Таблица Б.3 - Расчетная несущая способность одного болта на смятие для пластины толщиной 10 мм [кН]

Диаметр болта	d (мм)	12	16	20	24	27	30
Диаметр отверстия	d_o (мм)	13	18	22	26	30	33
Минимальное расстояние	e_1	20	27,5	35	40	45	50
	p_1, p_2 (мм)	30	40	50	60	67,5	75
	e_2	20	25	30	35	40	45
	S 235	38,2	48,8	63	76,4	83,8	94,1
	S 275	45,7	58,2	75,2	91,2	100,1	112,3
	S 355	54,1	69	89,2	108,2	118,7	133,2
Рекомендованное расстояние	e_1	30	40	50	60	70	75
	p_1, p_2 (мм)	40	55	70	80	90	100
	e_2	25	30	40	50	55	60
	S 235	57,3	73,6	94,1	114,6	125,7	141
	S 275	68,4	87,9	112,3	136,9	150,1	168,5
	S 355	81,2	104,2	133,2	162,3	178,1	199,9
Максимальное расстояние	e_1	40	55	70	80	90	100
	p_1, p_2 (мм)	50	70	85	100	115	130
	e_2	35	50	60	70	80	90
	S 235	74,5	99,3	124,1	149	167,6	186,2
	S 275	89	118,6	178,3	177,9	200,2	222,4
	S 355	105,5	140,7	175,9	211	237,4	263,8

Таблица Б.4 - Расчетная несущая способность одного болта на растяжение [кН]

Диаметр болта	d (мм)	12	16	20	24	27	30
Диаметр отверстия	d_o (мм)	13	18	22	26	30	33
Материал болта	4.6	20,9	39,0	60,8	87,6	114,0	139,3
	5.6	26,2	48,7	76,0	109,6	142,4	174,1
	8.8	41,9	78,0	121,7	175,3	227,9	278,6
	10.9	52,3	97,4	152,1	219,1	284,9	348,2

Приложение В
(информационное)

**Значения понижающего коэффициента χ для соответствующих кривых потери
устойчивости**

**Таблица В.1 – Значения понижающего коэффициента χ для кривой потери
устойчивости – тип «а₀»**

(α=0,13)											
$\bar{\lambda}$	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	$\bar{\lambda}$
0,00	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,00
0,10	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,10
0,20	1,0000	0,9986	0,9973	0,9959	0,9945	0,9931	0,9917	0,9903	0,9889	0,9874	0,20
0,30	0,9859	0,9845	0,9829	0,9814	0,9799	0,9783	0,9767	0,9751	0,9735	0,9718	0,30
0,40	0,9701	0,9684	0,9667	0,9649	0,9631	0,9612	0,9593	0,9574	0,9554	0,9534	0,40
0,50	0,9513	0,9492	0,9470	0,9448	0,9425	0,9402	0,9378	0,9354	0,9328	0,9302	0,50
0,60	0,9276	0,9248	0,9220	0,9191	0,9161	0,9130	0,9099	0,9066	0,9032	0,8997	0,60
0,70	0,8961	0,8924	0,8886	0,8847	0,8806	0,8764	0,8721	0,8676	0,8630	0,8582	0,70
0,80	0,8533	0,8483	0,8431	0,8377	0,8322	0,8266	0,8208	0,8148	0,8087	0,8025	0,80
0,90	0,7961	0,7895	0,7828	0,7760	0,7691	0,7620	0,7549	0,7476	0,7403	0,7329	0,90
1,00	0,7253	0,7178	0,7101	0,7025	0,6948	0,6870	0,6793	0,6715	0,6637	0,6560	1,00
1,10	0,6482	0,6405	0,6329	0,6252	0,6176	0,6101	0,6026	0,5951	0,5877	0,5804	1,10
1,20	0,5732	0,5660	0,5590	0,5520	0,5450	0,5382	0,5314	0,5248	0,5182	0,5117	1,20
1,30	0,5053	0,4990	0,4927	0,4866	0,4806	0,4746	0,4687	0,4629	0,4572	0,4516	1,30
1,40	0,4461	0,4407	0,4353	0,4300	0,4248	0,4197	0,4147	0,4097	0,4049	0,4001	1,40
1,50	0,3953	0,3907	0,3861	0,3816	0,3772	0,3728	0,3685	0,3643	0,3601	0,3560	1,50
1,60	0,3520	0,3480	0,3441	0,3403	0,3365	0,3328	0,3291	0,3255	0,3219	0,3184	1,60
1,70	0,3150	0,3116	0,3083	0,3050	0,3017	0,2985	0,2954	0,2923	0,2892	0,2862	1,70
1,80	0,2833	0,2804	0,2775	0,2746	0,2719	0,2691	0,2664	0,2637	0,2611	0,2585	1,80
1,90	0,2559	0,2534	0,2509	0,2485	0,2461	0,2437	0,2414	0,2390	0,2368	0,2345	1,90
2,00	0,2323	0,2301	0,2280	0,2258	0,2237	0,2217	0,2196	0,2176	0,2156	0,2136	2,00
2,10	0,2117	0,2098	0,2079	0,2061	0,2042	0,2024	0,2006	0,1989	0,1971	0,1954	2,10
2,20	0,1937	0,1920	0,1904	0,1887	0,1871	0,1855	0,1840	0,1824	0,1809	0,1794	2,20
2,30	0,1779	0,1764	0,1749	0,1735	0,1721	0,1707	0,1693	0,1679	0,1665	0,1652	2,30
2,40	0,1639	0,1626	0,1613	0,1600	0,1587	0,1575	0,1563	0,1550	0,1538	0,1526	2,40
2,50	0,1515	0,1503	0,1491	0,1480	0,1469	0,1458	0,1447	0,1436	0,1425	0,1414	2,50
2,60	0,1404	0,1394	0,1383	0,1373	0,1363	0,1353	0,1343	0,1333	0,1324	0,1314	2,60
2,70	0,1305	0,1296	0,1286	0,1277	0,1268	0,1259	0,1250	0,1242	0,1233	0,1224	2,70
2,80	0,1216	0,1207	0,1199	0,1191	0,1183	0,1175	0,1167	0,1159	0,1151	0,1143	2,80
2,90	0,1136	0,1128	0,1120	0,1113	0,1106	0,1098	0,1091	0,1084	0,1077	0,1070	2,90
3,00	0,1063	0,1056	0,1049	0,1043	0,1036	0,1029	0,1023	0,1016	0,1010	0,1003	3,00
2,10	0,0997	0,0991	0,0985	0,0979	0,0972	0,0966	0,0960	0,0955	0,0949	0,0943	2,10
3,20	0,0937	0,0931	0,0926	0,0920	0,0915	0,0909	0,0904	0,0898	0,0893	0,0888	3,20
3,30	0,0882	0,0877	0,0872	0,0867	0,0862	0,0857	0,0852	0,0847	0,0842	0,0837	3,30
3,40	0,0832	0,0828	0,0823	0,0818	0,0814	0,0809	0,0804	0,0800	0,0795	0,0791	3,40
3,50	0,0786	0,0782	0,0778	0,0773	0,0769	0,0765	0,0761	0,0756	0,0752	0,0748	3,50
3,60	0,0744	0,0740	0,0736	0,0732	0,0728	0,0724	0,0720	0,0717	0,0713	0,0709	3,60

Таблица В.2 – Значения понижающего коэффициента χ для кривой потери устойчивости – тип «а»

(α=0,21)											
λ	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	$\bar{\lambda}$
0,00	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,00
0,10	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,10
0,20	1,0000	0,9978	0,9956	0,9934	0,9912	0,9889	0,9867	0,9844	0,9821	0,9798	0,20
0,30	0,9775	0,9751	0,9728	0,9704	0,9680	0,9655	0,9630	0,9605	0,9580	0,9554	0,30
0,40	0,9528	0,9501	0,9474	0,9447	0,9419	0,9391	0,9363	0,9333	0,9304	0,9273	0,40
0,50	0,9243	0,9211	0,9179	0,9174	0,9114	0,9080	0,9045	0,9010	0,8974	0,8937	0,50
0,60	0,8900	0,8862	0,8823	0,8783	0,8742	0,8700	0,8657	0,8614	0,0857	0,8524	0,60
0,70	0,8477	0,8430	0,8382	0,8332	0,8282	0,8230	0,8178	0,8124	0,8069	0,8014	0,70
0,80	0,7957	0,7899	0,7841	0,7781	0,7721	0,7659	0,7597	0,7534	0,7470	0,7405	0,80
0,90	0,7339	0,7273	0,7206	0,7139	0,7071	0,7003	0,6934	0,6865	0,6796	0,6726	0,90
1,00	0,6656	0,6586	0,6516	0,6446	0,6376	0,6306	0,6236	0,6167	0,6098	0,6029	1,00
1,10	0,5960	0,5892	0,5824	0,5757	0,5690	0,5623	0,5570	0,5492	0,5427	0,5363	1,10
1,20	0,5300	0,5237	0,5175	0,5114	0,5053	0,4993	0,4934	0,4875	0,4817	0,4760	1,20
1,30	0,4703	0,4648	0,4593	0,4538	0,4485	0,4432	0,4380	0,4329	0,4278	0,4228	1,30
1,40	0,4179	0,4130	0,4083	0,4036	0,3989	0,3943	0,3898	0,3854	0,3810	0,3767	1,40
1,50	0,3724	0,3682	0,3641	0,3601	0,3561	0,3521	0,3482	0,3444	0,3406	0,3369	1,50
1,60	0,3332	0,3296	0,3261	0,3226	0,3191	0,3157	0,3124	0,3091	0,3058	0,3026	1,60
1,70	0,2994	0,2963	0,2933	0,2902	0,2872	0,2843	0,2814	0,2786	0,2757	0,2730	1,70
1,80	0,2702	0,2675	0,2649	0,2623	0,2597	0,2571	0,2546	0,2522	0,2497	0,2473	1,80
1,90	0,2449	0,2426	0,2403	0,2380	0,2358	0,2335	0,2314	0,2292	0,2271	0,2250	1,90
2,00	0,2229	0,2209	0,2188	0,2168	0,2149	0,2129	0,2110	0,2091	0,2073	0,2054	2,00
2,10	0,2036	0,2018	0,2001	0,1983	0,1966	0,1949	0,1932	0,1915	0,1899	0,1883	2,10
2,20	0,1867	0,1851	0,1836	0,1820	0,1805	0,1790	0,1775	0,1760	0,1746	0,1732	2,20
2,30	0,1717	0,1704	0,1690	0,1676	0,1663	0,1649	0,1636	0,1623	0,1610	0,1598	2,30
2,40	0,1585	0,1573	0,1560	0,1548	0,1536	0,1524	0,1513	0,1501	0,1490	0,1478	2,40
2,50	0,1467	0,1456	0,1445	0,1434	0,1424	0,1413	0,1403	0,1392	0,1382	0,1372	2,50
2,60	0,1362	0,1352	0,1342	0,1332	0,1323	0,1313	0,1304	0,1295	0,1285	0,1276	2,60
2,70	0,1267	0,1258	0,1250	0,1241	0,1232	0,1224	0,1215	0,1207	0,1198	0,1190	2,70
2,80	0,1182	0,1174	0,1166	0,1158	0,1150	0,1143	0,1135	0,1128	0,1120	0,1113	2,80
2,90	0,1105	0,1098	0,1091	0,1084	0,1077	0,1070	0,1063	0,1056	0,1049	0,1042	2,90
3,00	0,1036	0,1029	0,1022	0,1016	0,1010	0,1003	0,0997	0,9910	0,0985	0,0978	3,00
2,10	0,0972	0,0966	0,0960	0,0954	0,0949	0,0943	0,0937	0,0931	0,0926	0,0920	2,10
3,20	0,0915	0,0909	0,0904	0,0898	0,0893	0,0888	0,0882	0,0877	0,0872	0,0867	3,20
3,30	0,0862	0,0857	0,0852	0,0847	0,0842	0,0837	0,0832	0,0828	0,0823	0,0818	3,30
3,40	0,0814	0,0809	0,0804	0,0800	0,0795	0,0791	0,0786	0,0782	0,0778	0,0773	3,40
3,50	0,0769	0,0765	0,0761	0,0757	0,0752	0,0748	0,0744	0,0740	0,0736	0,0732	3,50
3,60	0,0728	0,0724	0,0721	0,0717	0,0713	0,0709	0,0705	0,0702	0,0698	0,0694	3,60

Таблица В.3 – Значения понижающего коэффициента χ для кривой потери устойчивости – тип «b»

$(\alpha=0,34)$											
λ	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	$\bar{\lambda}$
0,00	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,00
0,10	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,10
0,20	1,0000	0,9965	0,9929	0,9894	0,9858	0,9822	0,9786	0,9750	0,9714	0,9678	0,20
0,30	0,9641	0,9604	0,9567	0,9530	0,9492	0,9455	0,9417	0,9378	0,9339	0,9300	0,30
0,40	0,9261	0,9221	0,9181	0,9140	0,9099	0,9057	0,9015	0,8973	0,8930	0,8886	0,40
0,50	0,8842	0,8798	0,8752	0,8707	0,8661	0,8614	0,8566	0,8518	0,8470	0,8420	0,50
0,60	0,8371	0,8320	0,8269	0,8217	0,8165	0,8112	0,8058	0,8004	0,7949	0,7893	0,60
0,70	0,7837	0,7780	0,7723	0,7665	0,7606	0,7547	0,7488	0,7428	0,7367	0,7306	0,70
0,80	0,7245	0,7183	0,7120	0,7058	0,6995	0,6931	0,6868	0,6804	0,6740	0,6676	0,80
0,90	0,6612	0,6547	0,6483	0,6419	0,6354	0,6290	0,6226	0,6162	0,6098	0,6034	0,90
1,00	0,5970	0,5907	0,5844	0,5781	0,5719	0,5657	0,5595	0,5534	0,5473	0,5412	1,00
1,10	0,5352	0,5293	0,5234	0,5175	0,5117	0,5060	0,5003	0,4947	0,4891	0,4836	1,10
1,20	0,4781	0,4727	0,4674	0,4621	0,4569	0,4517	0,4466	0,4416	0,4366	0,4317	1,20
1,30	0,4269	0,4221	0,4174	0,4127	0,4081	0,4035	0,3991	0,3946	0,3903	0,3860	1,30
1,40	0,3817	0,3775	0,3734	0,3693	0,3653	0,3613	0,3574	0,3535	0,3497	0,3459	1,40
1,50	0,3422	0,3386	0,3350	0,3314	0,3279	0,3245	0,3211	0,3177	0,3144	0,3111	1,50
1,60	0,3079	0,3047	0,3016	0,2985	0,2955	0,2925	0,2895	0,2866	0,2837	0,2809	1,60
1,70	0,2781	0,2753	0,2726	0,2699	0,2672	0,2646	0,2620	0,2595	0,2570	0,2545	1,70
1,80	0,2521	0,2496	0,2473	0,2449	0,2426	0,2403	0,2381	0,2359	0,2337	0,2315	1,80
1,90	0,2294	0,2272	0,2252	0,2231	0,2211	0,2191	0,2171	0,2152	0,2132	0,2113	1,90
2,00	0,2095	0,2076	0,2058	0,2040	0,2022	0,2004	0,1987	0,1970	0,1953	0,1936	2,00
2,10	0,1920	0,1903	0,1887	0,1871	0,1855	0,1840	0,1825	0,1809	0,1794	0,1780	2,10
2,20	0,1765	0,1751	0,1736	0,1722	0,1708	0,1694	0,1681	0,1667	0,1654	0,1641	2,20
2,30	0,1628	0,1615	0,1602	0,1590	0,1577	0,1565	0,1553	0,1541	0,1529	0,1517	2,30
2,40	0,1506	0,1494	0,1483	0,1472	0,1461	0,1450	0,1439	0,1428	0,1418	0,1407	2,40
2,50	0,1397	0,1387	0,1376	0,1366	0,1356	0,1347	0,1337	0,1327	0,1318	0,1308	2,50
2,60	0,1299	0,1290	0,1281	0,1272	0,1263	0,1254	0,1245	0,1237	0,1228	0,1219	2,60
2,70	0,1211	0,1203	0,1195	0,1186	0,1178	0,1170	0,1162	0,1155	0,1147	0,1139	2,70
2,80	0,1132	0,1124	0,1117	0,1109	0,1102	0,1095	0,1088	0,1081	0,1074	0,1067	2,80
2,90	0,1060	0,1053	0,1046	0,1039	0,1033	0,1026	0,1020	0,1013	0,1007	0,1001	2,90
3,00	0,0994	0,0988	0,0982	0,0976	0,0970	0,0964	0,0958	0,0952	0,0946	0,0940	3,00
3,10	0,0935	0,0929	0,0924	0,0918	0,0912	0,0907	0,0902	0,0896	0,0891	0,0886	3,10
3,20	0,0880	0,0875	0,0870	0,0865	0,0860	0,0855	0,0850	0,0845	0,0840	0,0835	3,20
3,30	0,0831	0,0826	0,0821	0,0816	0,0812	0,0807	0,0803	0,0798	0,0794	0,0789	3,30
3,40	0,0785	0,0781	0,0776	0,0772	0,0768	0,0763	0,0759	0,0755	0,0751	0,0747	3,40
3,50	0,0743	0,0739	0,0735	0,0731	0,0727	0,0723	0,0719	0,0715	0,0712	0,0708	3,50
3,60	0,0704	0,0700	0,0697	0,0693	0,0689	0,0686	0,0682	0,0679	0,0675	0,0672	3,60

Таблица В.4 – Значения понижающего коэффициента χ для кривой потери устойчивости –
тип «с»

$(\alpha=0,49)$											
λ	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	$\bar{\lambda}$
0,00	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,00
0,10	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,10
0,20	1,0000	0,9949	0,9898	0,9847	0,9797	0,9746	0,9695	0,9644	0,9593	0,9542	0,20
0,30	0,9491	0,9440	0,9389	0,9338	0,9286	0,9235	0,9183	0,9131	0,9078	0,9026	0,30
0,40	0,8973	0,8920	0,8867	0,8813	0,8760	0,8705	0,8651	0,8596	0,8541	0,8486	0,40
0,50	0,8430	0,8374	0,8317	0,8261	0,8204	0,8146	0,8088	0,8030	0,7972	0,7913	0,50
0,60	0,7854	0,7794	0,7735	0,7675	0,7614	0,7554	0,7493	0,7432	0,7370	0,7309	0,60
0,70	0,7247	0,7185	0,7123	0,7060	0,6998	0,6935	0,6873	0,6810	0,6747	0,6684	0,70
0,80	0,6622	0,6559	0,6496	0,6433	0,6371	0,6308	0,6246	0,6184	0,6122	0,6060	0,80
0,90	0,5998	0,5937	0,5876	0,5815	0,5755	0,5695	0,5635	0,5575	0,5516	0,5458	0,90
1,00	0,5399	0,5342	0,5284	0,5227	0,5171	0,5115	0,5059	0,5004	0,4950	0,4896	1,00
1,10	0,4842	0,4790	0,4737	0,4685	0,4634	0,4583	0,4533	0,4483	0,4434	0,4386	1,10
1,20	0,4338	0,4290	0,4243	0,4197	0,4151	0,4106	0,4061	0,4017	0,3974	0,3931	1,20
1,30	0,3888	0,3846	0,3805	0,3764	0,3724	0,3684	0,3644	0,3606	0,3567	0,3529	1,30
1,40	0,3492	0,3455	0,3419	0,3383	0,3348	0,3313	0,3279	0,3245	0,3211	0,3178	1,40
1,50	0,3145	0,3113	0,3081	0,3050	0,3019	0,2989	0,2959	0,2929	0,2900	0,2871	1,50
1,60	0,2842	0,2814	0,2786	0,2759	0,2732	0,2705	0,2679	0,2653	0,2627	0,2602	1,60
1,70	0,2577	0,2553	0,2528	0,2504	0,2481	0,2457	0,2434	0,2412	0,2389	0,2367	1,70
1,80	0,2345	0,2324	0,2302	0,2281	0,2260	0,2240	0,2220	0,2200	0,2180	0,2161	1,80
1,90	0,2141	0,2122	0,2104	0,2085	0,2067	0,2049	0,2031	0,2013	0,1996	0,1979	1,90
2,00	0,1962	0,1945	0,1929	0,1912	0,1896	0,1880	0,1864	0,1849	0,1833	0,1818	2,00
2,10	0,1803	0,1788	0,1774	0,1759	0,1745	0,1731	0,1717	0,1703	0,1689	0,1676	2,10
2,20	0,1662	0,1649	0,1636	0,1623	0,1611	0,1598	0,1585	0,1573	0,1561	0,1549	2,20
2,30	0,1537	0,1525	0,1514	0,1502	0,1491	0,1480	0,1468	0,1457	0,1446	0,1436	2,30
2,40	0,1425	0,1415	0,1404	0,1394	0,1384	0,1374	0,1364	0,1354	0,1344	0,1334	2,40
2,50	0,1325	0,1315	0,1306	0,1297	0,1287	0,1278	0,1269	0,1260	0,1252	0,1243	2,50
2,60	0,1234	0,1226	0,1217	0,1209	0,1201	0,1193	0,1184	0,1176	0,1168	0,1161	2,60
2,70	0,1153	0,1145	0,1137	0,1130	0,1122	0,1115	0,1108	0,1100	0,1093	0,1086	2,70
2,80	0,1079	0,1072	0,1065	0,1058	0,1051	0,1045	0,1038	0,1031	0,1025	0,1018	2,80
2,90	0,1012	0,1006	0,0999	0,0993	0,0987	0,0981	0,0975	0,0969	0,0963	0,0957	2,90
3,00	0,0951	0,0945	0,0939	0,0934	0,0928	0,0922	0,0917	0,0911	0,0906	0,0901	3,00
2,10	0,0895	0,0890	0,0885	0,0879	0,0874	0,0869	0,0864	0,0859	0,0854	0,0849	2,10
3,20	0,0844	0,0839	0,0835	0,0830	0,0825	0,0820	0,0816	0,0811	0,0806	0,0802	3,20
3,30	0,0797	0,0793	0,0789	0,0784	0,0780	0,0775	0,0771	0,0767	0,0763	0,0759	3,30
3,40	0,0754	0,0750	0,0746	0,0742	0,0738	0,0734	0,0730	0,0726	0,0722	0,0719	3,40
3,50	0,0715	0,0711	0,0707	0,0703	0,0700	0,0696	0,0692	0,0689	0,0685	0,0682	3,50
3,60	0,0678	0,0675	0,0671	0,0668	0,0664	0,0661	0,0657	0,0654	0,0651	0,0647	3,60

Таблица В.5 – Таблица В.4 – Значения понижающего коэффициента χ для кривой потери устойчивости – тип «д»

$(\alpha=0,76)$											
λ	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	$\bar{\lambda}$
0,00	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,00
0,10	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	1,0000	0,10
0,20	1,0000	0,9921	0,9843	0,9765	0,9688	0,9611	0,9535	0,9459	0,9384	0,9309	0,20
0,30	0,9235	0,9160	0,9086	0,9013	0,8939	0,8866	0,8793	0,8721	0,8648	0,8576	0,30
0,40	0,8504	0,8432	0,8360	0,8289	0,8218	0,8146	0,8075	0,8005	0,7934	0,7864	0,40
0,50	0,7793	0,7723	0,7653	0,7583	0,7514	0,7444	0,7375	0,7306	0,7237	0,7169	0,50
0,60	0,7100	0,7032	0,6964	0,6897	0,6829	0,6762	0,6695	0,6629	0,6563	0,6497	0,60
0,70	0,6431	0,6366	0,6301	0,6237	0,6173	0,6109	0,6046	0,5983	0,5921	0,5859	0,70
0,80	0,5797	0,5736	0,5675	0,5615	0,5556	0,5496	0,5438	0,5379	0,5322	0,5265	0,80
0,90	0,5208	0,5152	0,5096	0,5041	0,4987	0,4933	0,4879	0,4826	0,4774	0,4722	0,90
1,00	0,4671	0,4620	0,4570	0,4521	0,4472	0,4423	0,4375	0,4328	0,4281	0,4235	1,00
1,10	0,4189	0,4144	0,4099	0,4055	0,4012	0,3969	0,3926	0,3884	0,3843	0,3802	1,10
1,20	0,3762	0,3722	0,3683	0,3644	0,3605	0,3568	0,3530	0,3493	0,3457	0,3421	1,20
1,30	0,3385	0,3350	0,3316	0,3282	0,3248	0,3215	0,3182	0,3150	0,3118	0,3086	1,30
1,40	0,3055	0,3024	0,2994	0,2964	0,2935	0,2906	0,2877	0,2849	0,2821	0,2793	1,40
1,50	0,2766	0,2739	0,2712	0,2686	0,2660	0,2635	0,2609	0,2585	0,2560	0,2536	1,50
1,60	0,2512	0,2488	0,2465	0,2442	0,2419	0,2397	0,2375	0,2353	0,2331	0,2310	1,60
1,70	0,2289	0,2268	0,2248	0,2228	0,2208	0,2188	0,2168	0,2149	0,2130	0,2112	1,70
1,80	0,2093	0,2075	0,2057	0,2039	0,2021	0,2004	0,1987	0,1970	0,1953	0,1936	1,80
1,90	0,1920	0,1904	0,1888	0,1872	0,1856	0,1841	0,1826	0,1810	0,1796	0,1781	1,90
2,00	0,1766	0,1752	0,1738	0,1724	0,1710	0,1696	0,1683	0,1669	0,1656	0,1643	2,00
2,10	0,1630	0,1617	0,1604	0,1592	0,1580	0,1567	0,1555	0,1543	0,1532	0,1520	2,10
2,20	0,1508	0,1497	0,1486	0,1474	0,1463	0,1452	0,1442	0,1431	0,1420	0,1410	2,20
2,30	0,1399	0,1389	0,1379	0,1369	0,1359	0,1349	0,1340	0,1330	0,1320	0,1311	2,30
2,40	0,1302	0,1292	0,1283	0,1274	0,1265	0,1257	0,1248	0,1239	0,1231	0,1222	2,40
2,50	0,1214	0,1205	0,1197	0,1189	0,1181	0,1173	0,1165	0,1157	0,1149	0,1142	2,50
2,60	0,1134	0,1127	0,1119	0,1112	0,1104	0,1097	0,1090	0,1083	0,1076	0,1069	2,60
2,70	0,1062	0,1055	0,1048	0,1042	0,1035	0,1029	0,1022	0,1016	0,1009	0,1003	2,70
2,80	0,0997	0,0990	0,0984	0,0978	0,0972	0,0966	0,0960	0,0954	0,0948	0,0943	2,80
2,90	0,0937	0,0931	0,0926	0,0920	0,0914	0,0909	0,0904	0,0898	0,0893	0,0888	2,90
3,00	0,0882	0,0877	0,0872	0,0867	0,0862	0,0857	0,0852	0,0847	0,0842	0,0837	3,00
2,10	0,0832	0,0828	0,0823	0,0818	0,0814	0,0809	0,0804	0,0800	0,0795	0,0791	2,10
3,20	0,0786	0,0782	0,0778	0,0773	0,0769	0,0765	0,0761	0,0757	0,0752	0,0748	3,20
3,30	0,0744	0,0740	0,0736	0,0732	0,0728	0,0724	0,0721	0,0717	0,0713	0,0709	3,30
3,40	0,0705	0,0702	0,0698	0,0694	0,0691	0,0687	0,0683	0,0680	0,0676	0,0673	3,40
3,50	0,0669	0,0666	0,0663	0,0659	0,0656	0,0652	0,0649	0,0646	0,0643	0,0639	3,50
3,60	0,0636	0,0633	0,0630	0,0627	0,0624	0,0620	0,0617	0,0614	0,0611	0,0608	3,60

Приложение Г
(информационное)

Вспомогательные таблицы по определению классов сечений прокатных профилей

Таблица Г.1 - Профиль двутавровый IPE. Класс сечения

Тип сортамента	Вид нагрузки					
	Изгиб			Сжатие		
	Марка стали			Марка стали		
	S 235	S 355	S 460	S 235	S 355	S 460
IPE 80	1	1	1	1	1	1
IPE 100	1	1	1	1	1	1
IPE 120	1	1	1	1	1	1
IPE 140	1	1	1	1	1	2
IPE 160	1	1	1	1	1	2
IPE 180	1	1	1	1	2	3
IPE 200	1	1	1	1	2	3
IPE 220	1	1	1	1	2	4
IPE 240	1	1	1	1	2	4
IPE 270	1	1	1	2	3	4
IPE 300	1	1	1	2	4	4
IPE 330	1	1	1	2	4	4
IPE 360	1	1	1	2	4	4
IPE 400	1	1	1	3	4	4
IPE 450	1	1	1	3	4	4
IPE 500	1	1	1	3	4	4
IPE 550	1	1	1	4	4	4
IPE 600	1	1	1	4	4	4

Таблица Г.2 - Профиль двутавровый НБА. Класс сечения

Тип сортамента	Вид нагрузки					
	Изгиб			Сжатие		
	Марка стали			Марка стали		
	S 235	S 355	S 460	S 235	S 355	S 460
НБА 100	1	1	1	1	1	1
НБА 120	1	1	2	1	1	2
НБА 140	1	2	3	1	2	3
НБА 160	1	2	3	1	2	3
НБА 180	1	3	3	1	3	3
НБА 200	1	3	3	1	3	3
НБА 220	1	3	3	1	3	3
НБА 240	1	3	3	1	3	3
НБА 260	2	3	3	2	3	3
НБА 280	2	3	4	2	3	4
НБА 300	2	3	3	2	3	3
НБА 320	1	3	3	1	3	3
НБА 340	1	3	3	1	3	3
НБА 360	1	2	3	1	2	3
НБА 400	1	1	3	1	2	3
НБА 450	1	1	1	1	2	3
НБА 500	1	1	1	1	3	4
НБА 550	1	1	1	2	4	4
НБА 600	1	1	1	2	4	4
НБА 650	1	1	1	3	4	4
НБА 700	1	1	1	3	4	4
НБА 800	1	1	1	4	4	4
НБА 900	1	1	1	4	4	4
НБА 1000	1	1	2	4	4	4

Таблица Г.3 - Профиль двутавровый НЕВ. Класс сечения

Тип сортамента	Вид нагрузки					
	Изгиб			Сжатие		
	Марка стали			Марка стали		
	S 235	S 355	S 460	S 235	S 355	S 460
НЕВ 100	1	1	1	1	1	1
НЕВ 120	1	1	1	1	1	1
НЕВ 140	1	1	1	1	1	1
НЕВ 160	1	1	1	1	1	1
НЕВ 180	1	1	1	1	1	1
НЕВ 200	1	1	1	1	1	1
НЕВ 220	1	1	1	1	1	1
НЕВ 240	1	1	1	1	1	1
НЕВ 260	1	1	2	1	1	2
НЕВ 280	1	1	2	1	1	2
НЕВ 300	1	1	3	1	1	3
НЕВ 320	1	1	1	1	1	1
НЕВ 340	1	1	1	1	1	1
НЕВ 360	1	1	1	1	1	1
НЕВ 400	1	1	1	1	1	1
НЕВ 450	1	1	1	1	1	2
НЕВ 500	1	1	1	1	2	2
НЕВ 550	1	1	1	1	2	3
НЕВ 600	1	1	1	1	3	4
НЕВ 650	1	1	1	2	3	4
НЕВ 700	1	1	1	2	4	4
НЕВ 800	1	1	1	3	4	4
НЕВ 900	1	1	1	3	4	4
НЕВ 1000	1	1	1	4	4	4

Таблица Г.4 - Профиль уголкового равнополочный. Класс сечения

Тип сортамента	Вид нагрузки		
	Сжатие		
	Марка стали		
	S 235	S 355	S 460
L 40x4	3	3	3
L 40x5	3	3	3
L 45x4	3	3	4
L 45x5	3	3	3
L 50x4	3	4	4
L 50x5	3	3	3
L 50x6	3	3	3
L 55x5	3	3	4
L 55x6	3	3	3
L 60x6	3	3	3
L 60x8	3	3	3
L 65x6	3	3	4
L 65x8	3	3	3
L 70x6	3	3	4
L 70x7	3	3	3
L 70x8	3	3	3
L 80x6	3	4	4
L 80x8	3	3	4
L 80x10	3	3	3
L 90x6	3	4	4
L 90x8	3	3	4
L 90x10	3	3	3
L 100x6	4	4	4
L 100x8	3	4	4

Таблица Г.4 - Профиль уголкового равнополочный
(продолжение)

Тип сортамента	Вид нагрузки		
	Сжатие		
	Марка стали		
	S 235	S 355	S 460
L 100x10	3	3	3
L 100x12	3	3	3
L 110x8	3	4	4
L 110x10	3	3	4
L 120x8	3	4	4
L 120x10	3	3	4
L 120x12	3	3	3
L 130x12	3	3	4
L 130x14	3	3	3
L 140x10	3	4	4
L 140x12	3	3	4
L 140x14	3	3	3
L 160x10	4	4	4
L 160x12	3	4	4
L 160x14	3	3	4
L 160x16	3	3	3
L 180x12	3	4	4
L 180x14	3	4	4
L 200x14	3	4	4
L 200x16	3	4	4
L 200x20	3	3	3

Таблица Г.5 - Профиль уголкового неравнополочный. Класс сечения

Тип сортамента	Вид нагрузки		
	Сжатие		
	Марка стали		
	S 235	S 355	S 460
L 50x30x4	3	4	4
L 50x30x5	3	3	3
L 60x40x5	3	4	4
L 60x40x6	3	3	4
L 60x40x7	3	3	3
L 65x50x5	3	4	4
L 65x50x6	3	4	4
L 65x50x7	3	3	3
L 65x50x8	3	3	3
L 75x50x5	4	4	4
L 75x50x6	3	4	4
L 75x50x7	3	3	4
L 75x50x8	3	3	3
L 80x60x6	4	4	4
L 80x60x7	3	4	4
L 80x60x8	3	3	4
L 90x60x6	4	4	4
L 90x60x8	3	4	4
L 100x65x7	4	4	4
L 100x65x8	3	4	4
L 100x65x10	3	3	4
L 100x65x12	3	3	3

Таблица Г.5 - Профиль уголкового неравнополочный. Класс сечения
(продолжение)

Тип сортамента	Вид нагрузки		
	Сжатие		
	Марка стали		
	S 235	S 355	S 460
L 120x80x8	4	4	4
L 120x80x10	3	4	4
L 120x80x12	3	3	4
L 130x90x10	3	4	4
L 130x90x12	3	3	4
L 130x90x14	3	3	3
L 140x90x8	4	4	4
L 140x90x10	3	4	4
L 140x90x12	3	4	4
L 140x90x14	3	3	3
L 160x100x10	4	4	4
L 160x100x12	3	4	4
L 160x100x14	3	3	4
L 160x100x16	3	3	3

Таблица Г.6 - Труба квадратная. Класс сечения

Тип сортамента	Вид нагрузки			Тип сортамента	Вид нагрузки		
	Сжатие и изгиб				Сжатие и изгиб		
	Марка стали				Марка стали		
	S 235	S 355	S 460		S 235	S 355	S 460
40x40	1	1	1	180x180x10	1	1	1
50x50	1	1	1	180x180x12,5	1	1	1
60x60	1	1	1	180x180x16	1	1	1
70x70	1	1	1	200x200x6,3	1	2	3
80x80	1	1	1	200x200x8	1	1	1
90x90	1	1	1	200x200x10	1	1	1
100x100	1	1	1	200x200x12,5	1	1	1
110x110	1	1	1	200x200x16	1	1	1
120x120x4,5	1	1	2	220x200x6,3	1	3	4
120x120x5	1	1	1	220x220x8	1	1	2
120x120x5,6	1	1	1	220x220x10	1	1	1
120x120x6,3	1	1	1	220x220x12,5	1	1	1
120x120x8	1	1	1	220x220x16	1	1	1
120x120x10	1	1	1	250x250x8	1	2	3
120x120x12,5	1	1	1	250x250x10	1	1	1
140x140x5	1	1	2	250x250x12,5	1	1	1
140x140x5,6	1	1	1	250x250x16	1	1	1
140x140x6,3	1	1	1	260x260x8	1	2	3
140x140x8	1	1	1	260x260x8,8	1	1	2
140x140x10	1	1	1	260x260x10	1	1	1
140x140x12,5	1	1	1	260x260x11	1	1	1

Таблица Г.6 - Труба квадратная. Класс сечения
(продолжение)

Тип сортамента	Вид нагрузки			Тип сортамента	Вид нагрузки		
	Сжатие и изгиб				Сжатие и изгиб		
	Марка стали				Марка стали		
	S 235	S 355	S 460		S 235	S 355	S 460
150x150x6,3	1	1	1	260x260x12,5	1	1	1
150x150x8	1	1	1	260x260x16	1	1	1
150x150x10	1	1	1	300x300x8	2	4	4
150x150x12,5	1	1	1	300x300x10	1	2	2
150x150x16	1	1	1	300x300x12,5	1	1	1
160x160x6,3	1	1	1	300x300x16	1	1	1
160x160x8	1	1	1	350x350x10	1	3	4
160x160x10	1	1	1	350x350x12,5	1	1	2
160x160x12,5	1	1	1	350x350x16	1	1	1
160x160x14,2	1	1	1	400x400x10	2	4	4
160x160x16	1	1	1	400x400x12,5	1	2	3
180x180x6,3	1	1	2	400x400x16	1	1	1
180x180x8	1	1	1				

Таблица Г.7 - Труба прямоугольная. Класс сечения

Тип сортамента	Вид нагрузки					
	Изгиб			Сжатие		
	Марка стали			Марка стали		
	S 235	S 355	S 460	S 235	S 355	S 460
50x30	1	1	1	1	1	1
60x40	1	1	1	1	1	1
70x40	1	1	1	1	1	1
80x40	1	1	1	1	1	1
90x50x3,2	1	1	1	1	1	2
90x50x4	1	1	1	1	1	1
90x50x5	1	1	1	1	1	1
90x50x8	1	1	1	1	1	1
100x50x3,6	1	1	1	1	1	2
100x50x4	1	1	1	1	1	1
10x50x4,5	1	1	1	1	1	1
100x50x5	1	1	1	1	1	1
100x50x6,3	1	1	1	1	1	1
100x50x8	1	1	1	1	1	1
100x50x10	1	1	1	1	1	1
100x60x3,6	1	1	1	1	1	2
100x60x5	1	1	1	1	1	1
100x60x36,3	1	1	1	1	1	1
100x60x8	1	1	1	1	1	1
100x60x8,8	1	1	1	1	1	1
120x60x4	1	1	1	1	2	2
120x60x5	1	1	1	1	1	1
120x60x8	1	1	1	1	1	1

Таблица Г.7 - Труба прямоугольная. Класс сечения
(продолжение)

Тип сортамента	Вид нагрузки					
	Изгиб			Сжатие		
	Марка стали			Марка стали		
	S 235	S 355	S 460	S 235	S 355	S 460
120x60x10	1	1	1	1	1	1
120x80x5	1	1	1	1	1	1
120x80x6,3	1	1	1	1	1	1
120x80x8	1	1	1	1	1	1
120x80x10	1	1	1	1	1	1
140x70x4	1	1	1	1	3	4
140x70x5	1	1	1	1	1	2
140x70x8	1	1	1	1	1	1
140x70x10	1	1	1	1	1	1
140x80x4	1	1	1	1	3	4
140x80x5	1	1	1	1	1	2
140x80x8	1	1	1	1	1	1
140x80x10	1	1	1	1	1	1
150x100x5	1	1	1	1	2	2
150x100x6,3	1	1	1	1	1	1
150x100x8	1	1	1	1	1	1
150x100x10	1	1	1	1	1	1
150x100x12,5	1	1	1	1	1	1
160x80x5	1	1	1	1	2	3
160x80x6,3	1	1	1	1	1	1
160x80x8	1	1	1	1	1	1
160x80x10	1	1	1	1	1	1
160x80x12,5	1	1	1	1	1	1
160x90x5,6	1	1	1	1	1	2
160x90x8	1	1	1	1	1	1
160x90x10	1	1	1	1	1	1

Таблица Г.8 - Труба прямоугольная. Класс сечения

Тип сортамента	Вид нагрузки					
	Изгиб			Сжатие		
	Марка стали			Марка стали		
	S 235	S 355	S 460	S 235	S 355	S 460
180x100x5	1	1	1	1	3	4
180x100x6,3	1	1	1	1	1	2
180x100x8	1	1	1	1	1	1
180x100x10	1	1	1	1	1	1
180x100x12,5	1	1	1	1	1	1
200x100x6,3	1	1	1	1	2	3
200x100x8	1	1	1	1	1	1
200x100x10	1	1	1	1	1	1
200x100x12,5	1	1	1	1	1	1
200x100x16	1	1	1	1	1	1
200x120x6,3	1	1	1	1	2	3
200x120x8	1	1	1	1	1	1
200x120x10	1	1	1	1	1	1
200x120x14,2	1	1	1	1	1	1
220x120x6,3	1	1	1	1	3	4
220x120x8	1	1	1	1	1	2
220x120x10	1	1	1	1	1	1
220x120x12,5	1	1	1	1	1	1
220x120x16	1	1	1	1	1	1
250x150x6,3	1	1	1	2	4	4
250x150x8	1	1	1	1	2	3
250x150x10	1	1	1	1	1	1
250x150x12,5	1	1	1	1	1	1
250x150x16	1	1	1	1	1	1
260x140x6,3	1	1	1	3	4	4

Таблица Г.8 - Труба прямоугольная. Класс сечения
(продолжение)

Тип сортамента	Вид нагрузки					
	Изгиб			Сжатие		
	Марка стали			Марка стали		
	S 235	S 355	S 460	S 235	S 355	S 460
260x140x8	1	1	1	1	2	3
260x140x10	1	1	1	1	1	1
260x140x12,5	1	1	1	1	1	1
260x180x6,3	1	1	2	3	4	4
260x180x8	1	1	1	1	2	3
260x180x10	1	1	1	1	1	1
260x180x12,5	1	1	1	1	1	1
260x180x16	1	1	1	1	1	1
300x200x6,3	1	2	3	4	4	4
300x200x10	1	1	1	1	2	2
300x200x16	1	1	1	1	1	1
400x200x8	1	1	1	4	4	4
400x200x10	1	1	1	2	4	4
400x200x12,5	1	1	1	1	2	3
400x200x16	1	1	1	1	1	1
450x250x10	1	1	1	3	4	4
450x250x12,5	1	1	1	1	3	4
450x250x16	1	1	1	1	1	2
500x300x8	2	4	4	4	4	4
500x300x10	1	2	2	4	4	4
500x300x12,5	1	1	1	2	4	4
500x300x16	1	1	1	1	2	3

Ресми басылым

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҰЛТТЫҚ ЭКОНОМИКА МИНИСТРЛІГІНІҢ
ҚҰРЫЛЫС, ТҰРҒЫН ҮЙ-КОММУНАЛДЫҚ ШАРУАШЫЛЫҚ ІСТЕРІ ЖӘНЕ
ЖЕР РЕСУРСТАРЫН БАСҚАРУ КОМИТЕТІ

**Қазақстан Республикасының
НОРМАТИВТІК–ТЕХНИКАЛЫҚ ҚҰРАЛЫ**

НТҚ 03-01-8.1-2011

**БОЛАТ КОНСТРУКЦИЯЛАРДЫ ЖОБАЛАУ
1-3 бөлімі. Қосылыстарды есептеу**

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 03-01-8.1-2011

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ СТАЛЬНЫХ
КОНСТРУКЦИЙ. Часть 1-3. Расчет соединений**

Ответственные за выпуск: АО «КазНИИСА»

050046, г. Алматы, ул. Солодовникова, 21
Тел./факс: +7 (727) 392-76-16 – приемная