

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Вологодский государственный университет

Кафедра промышленного и гражданского строительства

**Лёгкие стальные тонкостенные конструкции:
проектирование и расчет**

Учебное пособие

Вологда
2019

УДК 624.072.2.014.2 – 415:624.014
ББК 38.54. Я73

Утверждено экспертным советом
по изданию учебной и учебно-методической литературы ВоГУ

Рецензенты:

канд. техн. наук, доцент кафедры Строительства Череповецкого государственного университета **В.Н. Ворожбянов**

канд. техн. наук, заведующий кафедрой "Промышленное, гражданское и транспортное строительство " Павлодарского государственного университета им. С. Торайгырова **К.Т. Саканов**

Казакова, И.С.

Легкие стальные тонкостенные конструкции: проектирование и расчет: Учебное пособие /И.С, Казакова; М-во образ. И науки РФ; Вологод. гос. ут-т. - Вологда: ВоГУ, 2019. - 117 с.

В учебном пособии приводятся основы проектирования и методики расчета легких стальных тонкостенных конструкций зданий. Рассматриваются примеры расчета несущих конструкций мансардного этажа, панели покрытия и балки составного сечения. Пособие предназначено для студентов бакалавров направления подготовки 08.03.01 «Строительство» профиль подготовки «Промышленное и гражданское строительство» и «Городское строительство и хозяйство», а также для инженерно-технических работников проектных организаций.

УДК 624.072.2.014.2 – 415:624.014
ББК 38.54. Я73

© ФГБОУ ВО «Вологодский
государственный университет», 2019
© Казакова, И.С., 2019

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	8
ВВЕДЕНИЕ	9
1.ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ	10
2.РАСЧЕТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ЛСТК	15
2.1.Расчет геометрических характеристик	15
2.1.2.Теория срединной линии	15
2.1.3.Влияние радиусов закругления	16
2.2.Местная потеря устойчивости	17
2.3.Дисторсионная форма потери устойчивости (потеря устойчивости формы сечения)	18
2.4.Крутильная и крутильно-изгибная формы потери устойчивости	19
2.5.Свертывание полок	20
2.6.Смятие, коробление и местная потеря устойчивости полки	20
3.МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЛСТК	21
3.1.Учет коэффициентов надежности по нагрузкам и сопротивлению материала	21
3.2.Учет назначения и условий работы конструкций	21
3.3.Учет начальных несовершенств элементов несущей рамы	22
3.4.Определение характеристик материала	24
3.5.Проверка геометрических параметров	25
3.6.Определение расчетной толщины элемента	26
3.7.Влияние зон сгиба на геометрические характеристики сечения	26
3.8.Определение редуцированных геометрических характеристик	27
3.9.Расчет на прочность центрально растянутых и сжатых элементов .	32
3.10.Расчет на прочность элементов при изгибе	33
3.11.Расчет на прочность при совместном действии изгиба и продольной силы	34
3.12.Расчет на прочность при совместном действии продольной, поперечной силы и изгибающих моментов	35
3.13.Расчет на устойчивость центрально сжатых стержней	35
3.14.Расчет на устойчивость изгибаемых элементов	36

3.15.Расчет на устойчивость при внецентренном сжатии элементов сплошного сечения	37
3.16.Проверка по эксплуатационной пригодности	38
4.1.Исходные данные для расчета	38
4.2. Оценка геометрических параметров профиля	41
4.2.1.Учет начальных несовершенств элементов несущей рамы	42
4.2.2.Определение расчетной толщины материала	42
4.2.3.Проверка геометрических параметров	42
4.2.4.Влияние зон сгиба на геометрические характеристики сечения....	43
4.3.Определение геометрических характеристик.....	43
4.3.1.Геометрические характеристики сечения брутто (без учета закруглений)	43
4.3.2.Сведенные геометрические характеристики сечения брутто без учета закруглений.....	50
4.3.3.Геометрические характеристики сечения брутто с учетом закруглений.....	50
4.3.4.Сведенные геометрические характеристики сечения брутто с учетом закруглений.....	51
4.4.1.Геометрические характеристики эффективного сечения без учета закруглений.....	52
4.4.2.Сведенные геометрические характеристики эффективного сечения без учета закруглений	56
4.4.3.Геометрические характеристики эффективного сечения с учетом закруглений.....	56
4.4.4.Сводные геометрические характеристики эффективного сечения с учетом закруглений.....	56
4.5.Геометрические характеристики эффективного сечения при изгибе относительно оси наибольшей жесткости	57
4.5.1.Геометрические характеристики эффективного сечения без учета закруглений.....	57
4.5.2.Сводные геометрические характеристики эффективного сечения с учетом закруглений.....	59
4.5.3.Геометрические характеристики всего эффективного поперечного сечения без учета закруглений.....	62
4.5.4.Сводные геометрические характеристики эффективного сечения без учета закруглений	63

4.5.5.Геометрические характеристики эффективного поперечного сечения с учетом закруглений.....	64
4.5.6.Сводные геометрические характеристики эффективного сечения с учетом закруглений.....	64
4.6.Расчет на прочность при совместном действии изгиба и продольной силы.....	64
4.6.1.Расчетные усилия	64
4.6.2.Характеристики сечения брутто.....	65
4.6.3. Характеристики эффективного сечения.....	65
4.6.4.Несущая способность сечения.....	65
4.6.4.1.Осевое сжатие	65
4.6.4.2.Изгиб.....	66
4.6.4.3.Совместное действие усилий	66
4.7.Расчет на устойчивость при внецентренном сжатии элементов сплошного сечения	67
4.7.1.Несущая способность по потере устойчивости элемента	67
4.7.2.Крутильная форма потери устойчивости	68
4.7.3.Изгибно-крутильная форма потери устойчивости.....	69
4.7.4.Совместное действие усилия сжатия и изгибающего момента.....	73
4.8.Проверка по эксплуатационной пригодности	73
5.1.Исходные данные для расчета	74
5.2.Оценка геометрических параметров профиля	76
5.2.1.Определение расчетной толщины профиля.....	76
5.2.2.Размеры профиля по срединным линиям (рис.5.5)	76
5.2.3.Влияние зон сгиба на геометрические характеристики сечения....	76
5.3.Определение геометрических характеристик сечения.....	77
5.3.1.Геометрические характеристики сечения брутто (без учета закруглений)	77
5.3.2.Сводные геометрические характеристики сечения брутто без учета закруглений.....	81
5.3.3.Геометрические характеристики сечения брутто с учетом закруглений.....	82
5.3.4.Сводные геометрические характеристики сечения с учетом закруглений.....	82
5.4.Геометрические характеристики эффективного сечения при изгибе относительно оси наибольшей жесткости	83

5.4.1.Геометрические характеристики эффективного сечения без учета закруглений.....	84
5.4.2.Геометрические характеристики всего эффективного поперечного сечения без учета закруглений.....	87
5.4.3.Сводные геометрические характеристики эффективного сечения без учета закруглений.....	88
5.4.4.Геометрические характеристики эффективного поперечного сечения с учетом закруглений.....	89
5.4.5.Сводные геометрические характеристики эффективного сечения с учетом закруглений.....	89
5.5.Расчет на прочность элементов при изгибе.....	89
5.5.1.Сбор нагрузки на балку.....	89
5.5.2.Определение расчетных усилий в поперечных ребрах.....	91
5.5.3.Расчет поперечных ребер панели.....	92
6.ПРИМЕР 3.....	94
6.1.Исходные данные для расчета.....	94
6.1.Определение геометрических характеристик эффективного сечения.....	95
6.2.Оценка геометрических параметров профиля.....	95
6.2.1.Определение расчетной толщины материала.....	95
6.2.2.Проверка геометрических параметров сечения профилей.....	95
6.2.3.Влияние зон сгиба на геометрические характеристики сечения....	97
6.3.Определение геометрических характеристик.....	98
6.3.1.Геометрические характеристики сечения брутто (без учета закруглений).....	98
6.3.2.Сводные геометрические характеристики сечения брутто без учета закруглений.....	105
6.3.3.Геометрические характеристики сечения брутто с учетом закруглений.....	106
6.3.4.Геометрические характеристики эффективного сечения без учета закруглений.....	108
6.3.5.Сводные геометрические характеристики эффективного составного сечения без учета закруглений.....	112
6.3.6.Геометрические характеристики эффективного поперечного сечения с учетом закруглений.....	113
6.3.7.Сводные геометрические характеристики эффективного сечения с учетом закруглений.....	113

6.4.Расчет на прочность балки при изгибе	113
6.4.1.Сбор нагрузки на балку	113
6.4.2.Расчетные усилия в балке	115
6.4.3.Проверка сечения составной балки	115
6.4.4.Проверка принятого сечения по первой группе предельных состояний	115
6.4.5.Несущая способность поперечного сечения от действия поперечной силы.....	115
6.4.6.Проверка по второй группе предельных состояний.....	116
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК.....	117
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	118
ПРИЛОЖЕНИЕ 2	120

ПРЕДИСЛОВИЕ

Учебное пособие по легким стальным тонкостенным конструкциям разработано с учетом новой нормативной литературы по проектированию и расчету легких стальных тонкостенных конструкций (далее ЛСТК) и новых разработок в этой области. Оно предназначено для изучения дисциплины «Легкие металлические конструкции» студентами бакалаврами направления подготовки 08.03.01 «Строительство» профиль подготовки «Промышленное и гражданское строительство» и «Городское строительство и хозяйство» Пособие может использоваться для практических занятий, в курсовом и дипломном проектировании. Оно написано в соответствии с рабочими программами курсов.

Пособие состоит из 5 глав.

Первая глава посвящена общим сведениям о легких стальных тонкостенных конструкциях, их достоинствах и недостатках .

Во второй главе рассматриваются особенности конструирования и расчета тонкостенных профилей по сравнению с прокатными.

В третьей главе приводится методика расчета тонкостенных профилей для несущих конструкций покрытий.

В четвертой, пятой и шестой главах представлены примеры расчетов тонкостенных профилей в рамах мансардного этажа, большеразмерных плит покрытий и составных балок перекрытий из тонкостенных профилей.

В приложении к пособию представлены справочные материалы для проектирования и расчета тонкостенных профилей .

Основные буквенные обозначения приняты общими для всех глав и пояснены в тексте.

В пособии использован материал из свода правил СП 260.1325800.2016, учебников, учебных пособий, нормативной, справочной отечественной и зарубежной литературы. Дополнительную информацию по отдельным вопросам, рассмотренным недостаточно полно, можно найти в литературе, список которой приведен в конце пособия.

В пособие включен материал научно-исследовательской работы магистрантки Белкиной Е.И.

ВВЕДЕНИЕ

В пособии рассматриваются прогрессивные металлические конструкции из тонкостенных стальных оцинкованных профилей, которые используются при проектировании промышленных и гражданских зданий. В связи с выходом новой нормативной литературы тонкостенные профили находят применение при проектировании не только малоэтажных зданий с малыми пролетами, но и зданий большей этажности с пролетами 6м и более. Однако в настоящее время недостаточно литературы, в которой были бы в логической последовательности изложены вопросы расчета тонкостенных конструкций покрытий и перекрытий.

В пособии рассматриваются примеры расчетов несущих тонкостенных конструкций покрытий и перекрытий зданий с учетом особенностей их работы. Материал проанализирован и систематизирован, приведен в логической последовательности. Расчеты изложены в доступной форме, раскрывающей напряженное состояние всех несущих элементов и помогающей студенту за-проектировать и рассчитать основные типы конструкций. Имеются необходимые схемы, рисунки, таблицы.

Предварительно перед работой с пособием необходимо изучить основной курс металлоконструкций, основные понятия и терминологию. Изложенный в пособии материал основан на действующих строительных нормах и правилах.

1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

Лёгкие стальные тонкостенные конструкции (ЛСТК) – это конструкции, которые изготавливаются из холодногнутых оцинкованных профилей и гофрированных листов толщиной 0,5÷ 4 мм.

Они применяются как самостоятельные несущие конструкции малоэтажных гражданских зданий, производственных цехов, складских и хозяйственных построек, так и в ограждающих конструкциях стен в комбинации с традиционными технологиями строительства зданий из дерева, металла, кирпича, железобетона (рис.1.1,а,б,в,г). Эти конструкции часто используются при реконструкции кровельных систем и надстройке зданий (возведение мансардных этажей (рис.1.1,д)). Легкие стальные тонкостенные конструкции применяются в большинстве районов нашей страны.

Основные особенности легких стальных тонкостенных конструкций:

- использование для строительных профилей стального листа толщиной 0,5...3 мм;
- тонкостенность поперечного сечения увеличивает жесткость профиля;
- применение для изготовления строительных профилей рулонного холоднокатаного стального листа с цинковым покрытием толщиной 0,02 мм;
- использование стали с пределом текучести 250...350 МПа и более;
- деформирование профиля путем гибки в холодном состоянии в прокатных станах;
- неравномерное повышение предела текучести стали по сечению профиля;
- тонкостенные профили характеризуются различными формами потери устойчивости (местная потеря устойчивости, дисторсионная форма потери устойчивости (искажение сечения), общая потеря устойчивости – изгибная, крутильная и изгибно-крутильная);
- использование тонкостенных профилей (термопрофилей) с продольными прорезями с отгибами, расположенными на стенках в шахматном порядке, для повышения теплотехнических характеристик ограждающих конструкций зданий;
- основные виды соединений элементов ЛСТК: болтовые, на самонарезающих и самосверлящих винтах и вытяжных заклепках;
- все строительные элементы из ЛСТК изготавливаются на специализированных предприятиях, а на строительных площадках только собираются в единую конструкцию.

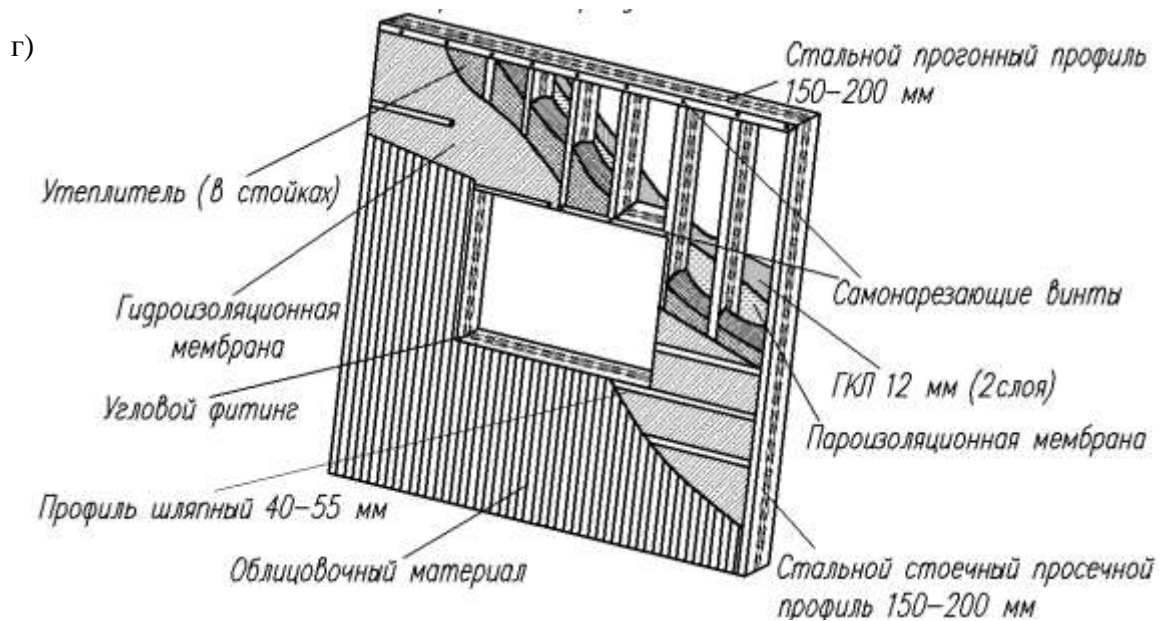
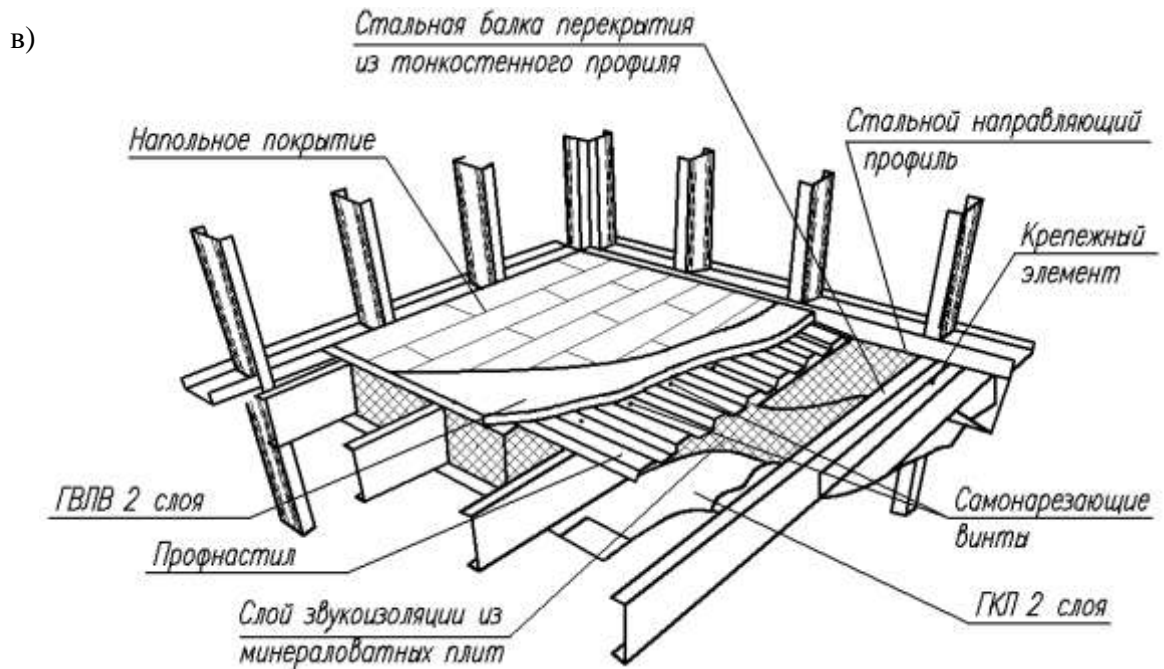


Рисунок 1.1 – Области применения ЛСТК:

- а) возведение малоэтажных зданий; б) в конструкции стен; в) в конструкции перекрытий
г) в конструкции стеновых панелей

д)

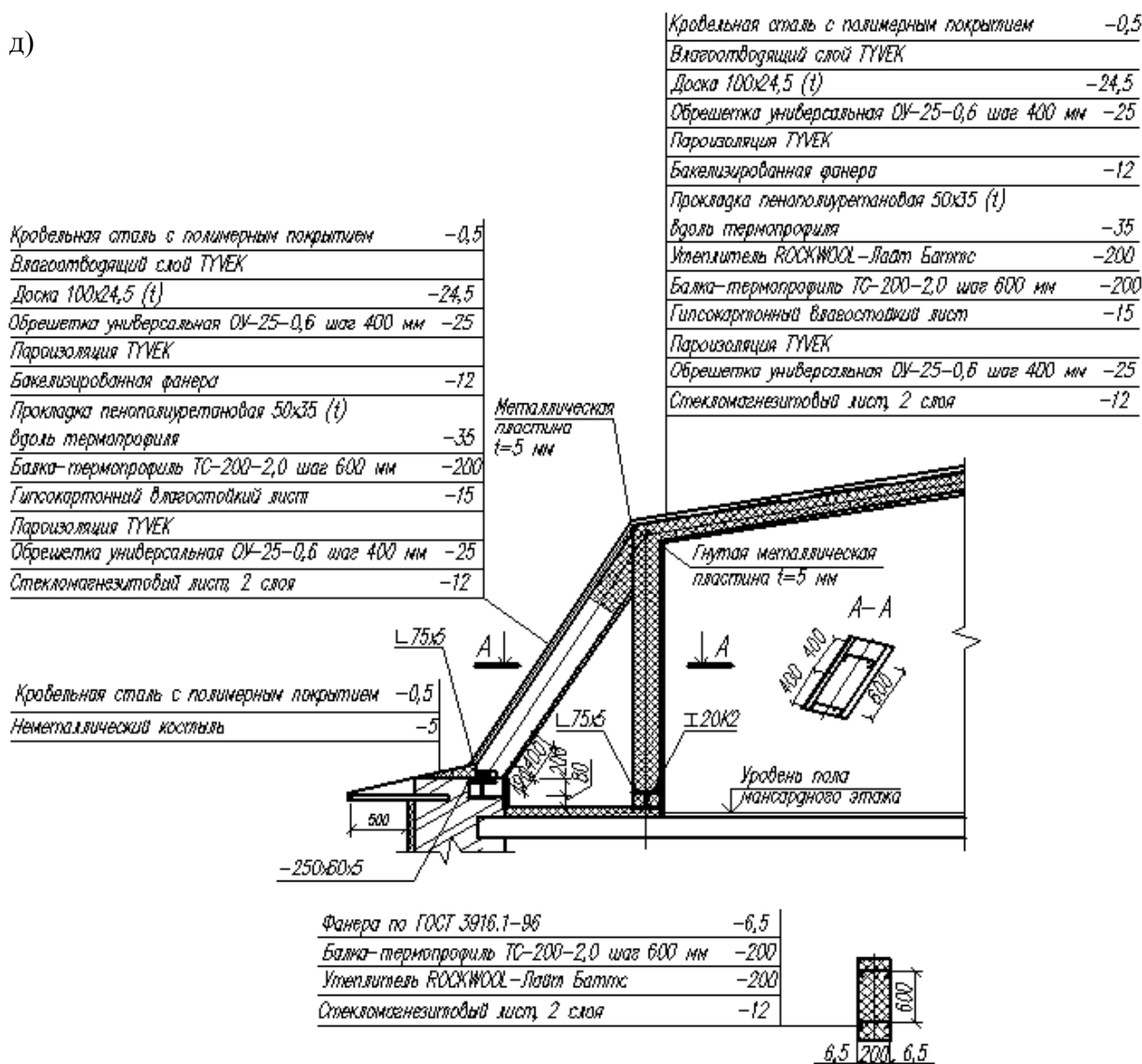


Рисунок 1.1 – Области применения ЛСТК:

д) при реконструкции зданий (при надстройках мансардного этажа)

Основные типы поперечного сечения профилей ЛСТК (рис.1.2):

- П-образный профиль (швеллер);
- С-образный профиль;
- Z-образный профиль;
- шляпный профиль.

По назначению ЛСТК-профили делятся на:

- направляющие;
- стоечные;
- перемычки;
- прогоны.

Высота профилей – 100...350 мм.

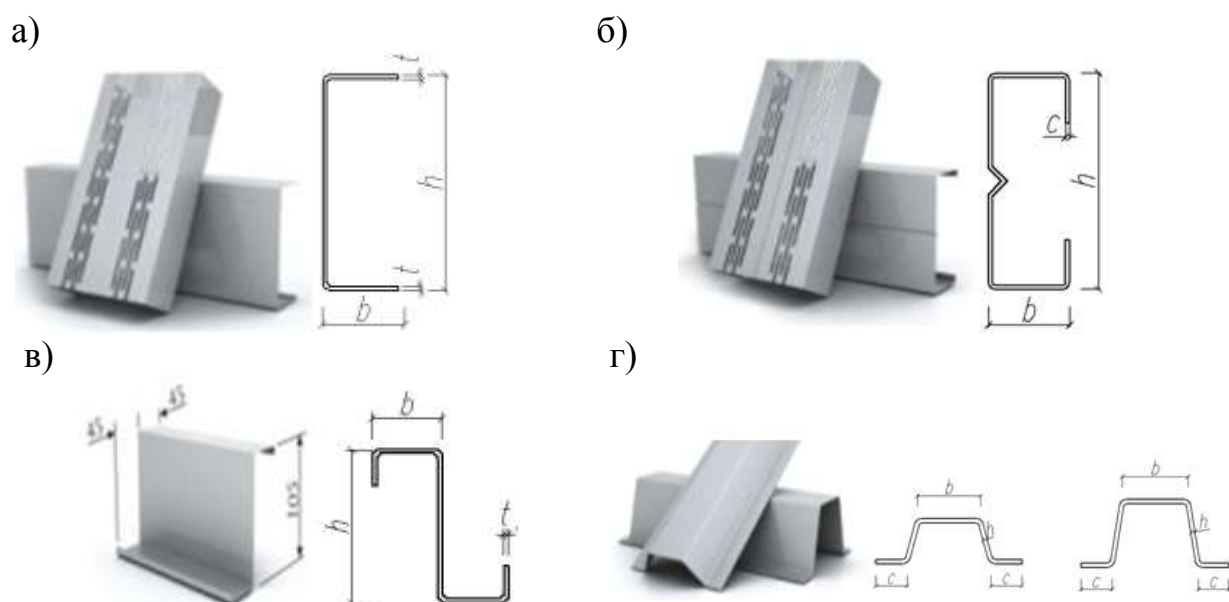


Рисунок 1.2 – Типы поперечных сечений стальных тонкостенных профилей:
 а) П-образный профиль (швеллер) и термопрофиль; б) С-образный профиль и термопрофиль; в) Z-образный профиль; г) шляпный профиль (для обрешетки).

Основные достоинства и недостатки ЛСТК

К главным достоинствам технологии ЛСТК можно отнести:

- Быстрота возведения. Основные элементы каркаса из ЛСТК имеют точные геометрические размеры и отрезаются по размеру на заводе по проекту. На строительной площадке профили устанавливаются в проектное положение и закрепляются самонарезающими винтами.

Три человека возводят коробку коттеджа площадью 250 кв. м, включая монтаж крыши - за три недели.

- Легкость и простота монтажа. Поскольку сами ЛСТК-профили имеют малый вес, их легко разгружать и переносить в место складирования. Каждый профиль имеет специальную маркировку, что обеспечивает безошибочность сборки каркаса строения.

Вес каркаса и готовых зданий из ЛСТК-профиля в разы меньше, чем аналогичные здания из камня и дерева. Благодаря этому снижаются затраты на фундамент, расширяются возможности проведения строительства на сложных грунтовых условиях, значительно упрощается реконструкция старых зданий, появляется возможность осуществлять строительство в стесненных условиях, поскольку не требуется использование тяжелой строительной техники.

Удельный вес термопрофиля 0,98-2,90 кг/пог.м.

Вес 1 кв. м конструкций из термопрофиля 30-35 кг.

- Всесезонное строительство: возможность строительства по технологии ЛСТК круглогодично. В большинстве случаев при строительстве отсутствует «мокрые процессы».

- Долговечность. Каркас из ЛСТК выполняется из оцинкованной стали. По прогнозам изготовителей профиля, срок службы зданий, построенных по технологии ЛСТК, составляет не менее 50 лет.

- Экологичность. Конструкции каркаса выполнены из высококачественной оцинкованной стали. В качестве утеплителей используются негорючие минеральные утеплители. Эти стройматериалы относятся к экологически чистым, поддаются полной вторичной обработке, не наносят вреда экологии.

- Высокие характеристики теплосбережения, что достигается за счет перфорации в стенках профиля. Наличие прорезей, имеющих специальную форму, и удлинение пути теплового потока приводят к снижению потерь тепла.

Кроме того, толщина стального листа, из которого изготовлен профиль, сказывается на его теплопроводности: при уменьшении толщины листа повышаются теплозащитные характеристики профиля.

Недостатки технологии ЛСТК:

- Панельно-каркасные здания из-за особенностей своей конструкции герметичны, поэтому требуют разработки системы вентиляции (устройство вентилируемого фасада и кровли, устройство в стенах клапанов инфильтрации воздуха и т.д.).

- Металлический каркас здания без утепления и звукоизолирующих прокладок отличается гулкостью и хорошей слышимостью. Этот недостаток конструкции здания из ЛСТК решается укладкой тепло- звукоизоляционного материала между тонкостенными профилями в конструкции стены и конструкции перекрытия с последующей обшивкой гипсокартоном изнутри.

- Наличие «мостиков холода» и коррозии. В металлических каркасах главное внимание необходимо уделить антикоррозийной обработке металла по контуру утепления, чтобы исключить возникновение коррозии и «мостиков холода».

- Человеческий фактор. Требуется высокий уровень квалификации рабочих, поскольку любая ошибка при сборке каркаса впоследствии может существенно повлиять на качественные характеристики дома.

- Высокий уровень пожароопасности. Стальные профили под воздействием высоких температур деформируются, теряют жёсткость и прогибаются от вышележащей нагрузки, что требует конструктивной защиты их от воздействия огня специальными огнезащитными покрытиями.

2. РАСЧЕТНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ И КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ЛСТК

Применение холодноформованных тонкостенных стальных профилей требует учета ряда их особенностей при расчете, с которыми обычно не сталкиваются при использовании обычных горячекатаных профилей. К ним относятся:

- неоднородное распределение свойств материала по сечению в связи с холодной обработкой;
- расчет геометрических характеристик (толщина стального листа, теория срединной линии, радиусы закруглений);
- местная устойчивость;
- дисторсионная форма потери устойчивости;
- крутильная и изгибно-крутильная формы потери устойчивости;
- сдвиговое запаздывание (затухание);
- скручивание полки;
- смятие, коробление и выпучивание стенки.

2.1. Расчет геометрических характеристик

2.1.1. Толщина стального листа:

Оцинкованная холоднокатанная рулонная сталь для ЛСТК профилей обычно поставляется металлургическими предприятиями сразу с цинковым покрытием. При указании номинальной толщины стали цинковое покрытие обычно включается в ее толщину. Согласно п 7.1.5 [1] в качестве расчетной следует использовать скорректированную толщину стали.

Для строительной продукции стандартная величина цинкового покрытия принимается 275 г/м^2 . Она соответствует толщине покрытия в $0,02 \text{ мм}$ на каждой поверхности профиля. Поэтому при проектировании номинальная толщина стали должна быть уменьшена на $0,04 \text{ мм}$.

2.1.2. Теория срединной линии

На практике обычно при определении геометрических характеристик сечения тонкостенных стальных профилей размеры принимаются по срединным линиям отдельных элементов. В расчете изначально не учитываются радиусы закругления, и рассматривается идеализированное сечение, состоящее из набора тонких прямоугольных элементов. Согласно п.7.2.5 [1] размеры теоретической ширины b_p и высоты h_w плоских участков поперечных сечений профилей с учетом углов сгиба следует принимать от средних точек соседних угловых элементов. При этом длина элемента получается меньше номинального значения в зависимости от количества углов либо на $t/2$, либо t . Размеры по срединным линиям для С-образного профиля с отгибами показаны на рисунке 2.1.

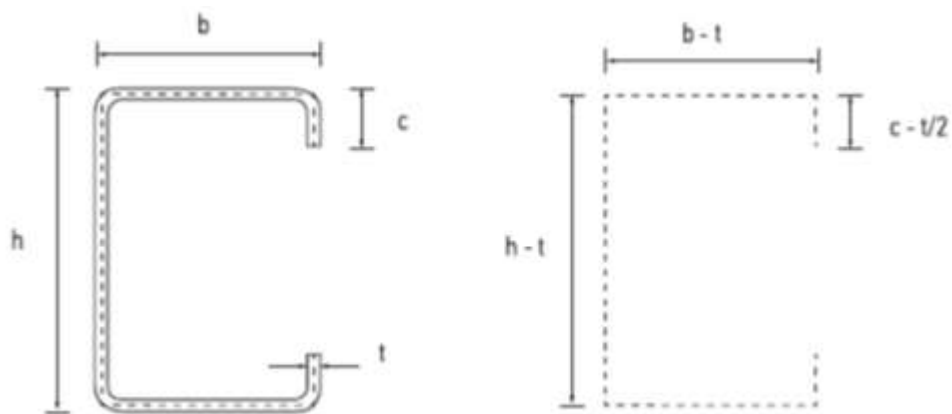


Рисунок 2.1 - Определение средней линии для С-образного профиля с отгибами полок

2.1.3. Влияние радиусов закругления

При внутреннем радиусе $r \leq 5t$ и $r \leq 0,10b_p$ влияние радиусов углов сгиба на несущую способность профиля может не учитываться и расчет геометрических характеристик сечения профилей может производиться приближенным способом. Поперечное сечение в этом случае считают состоящим из плоских элементов соединенных под углом. При определении жесткости поперечного сечения влияние углов сгиба следует учитывать.

Влияние зон сгиба на геометрические характеристики сечения достигается уменьшением геометрических характеристик для сечения с сопряжениями под углом по приближенным формулам в п. 7.2.6[1].

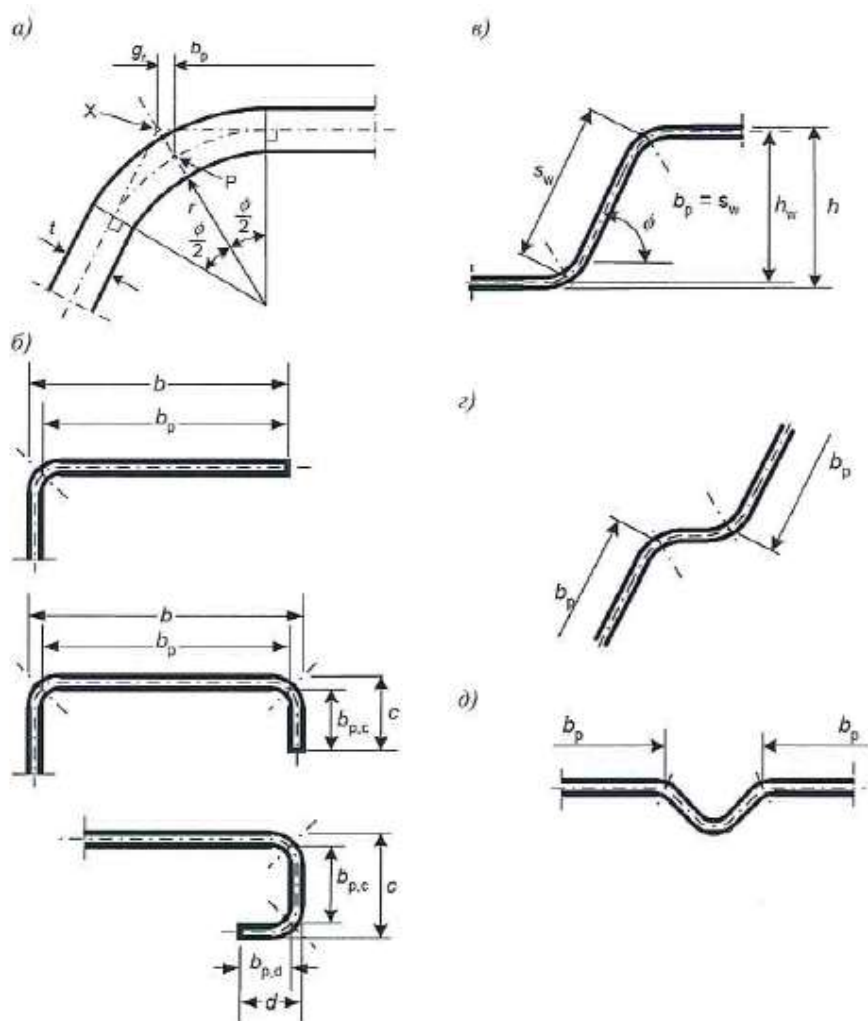


Рисунок 2.2 - Влияние радиусов закругления:

- а) средняя точка угла или сгиба; б) теоретическая ширина b_p для плоских частей полок;
 в) теоретическая ширина b_p плоской части стенки ($b_p =$ наклонная высота s_w); г) теоретическая ширина b_p плоских частей, смежных с элементом жесткости на стенке;
 д) теоретическая ширина b_p плоских участков, смежных с элементом жесткости на полке; X – точка пересечения срединных линий плоских участков; P – точка пересечения биссектрисы угла φ со срединной линией поперечного сечения; g_r – уменьшенный радиус изгиба пластинки, вычисляемый по формуле:

$$g_r = r_m \left(\operatorname{tg} \left(\frac{\varphi}{2} \right) - \sin \left(\frac{\varphi}{2} \right) \right),$$

где $r_m = r + \frac{t}{2}$ – радиус изгиба пластинки, определяемый по формуле 2.2, а.

2.2. Местная потеря устойчивости

Эффективность тонкостенных профилей, используемых в строительстве, определяется экономией материала. В тонкостенных стальных профилях допускается потеря местной устойчивости сжатых элементов, входящих в состав поперечного сечения конструктивного элемента.

По [2] элементы конструкций подразделяются на три класса в зависимости от напряженно-деформированного состояния (НДС) расчетного сечения. Элементы стальных тонкостенных конструкций согласно п. 5.2.3 [1] относятся

к 4-му классу напряженно-деформированного состояния. Для них потеря местной устойчивости наступает до достижения предела текучести в зонах поперечного сечения.

При определении эффективного сечения при местной потере устойчивости тонкостенный профиль представляют как совокупность длинных пластин, которые жестко соединяются в местах изгиба. Гибкость пластин принимается достаточно большой, и местная потеря устойчивости их проходит в упругой стадии. Следовательно, в окончательных расчетах площадь профиля может быть уменьшена на значение, соответствующее площади участков пластинчатых элементов, потерявших контур при местной потере устойчивости.

На рисунке 2.3 показано использование метода эффективной ширины и приближенно проанализировано поведение гибких пластинчатых элементов при местной потере устойчивости.



Рисунок 2.3 - Концепция эффективной ширины применительно к пластине

Потеря местной устойчивости тонкостенных профилей учитывается в расчете путем редуцирования геометрических характеристик поперечного сечения: площади поперечного сечения (A_{ef} , b_{ef} , t_{ef}), момента сопротивления (W_{ef}) и момента инерции (I_{ef}). Методика определения редуцированных характеристик приведена в п. 7.3 [1].

2.3. Дисторсионная форма потери устойчивости (потеря устойчивости формы сечения)

Выше рассматривалась местная устойчивость сечения профиля в предположении неподвижного закрепления углов профиля. Этот случай приведен на рисунке 2.4,а. На рисунке 2.4,б показана ситуация с незакрепленными правыми углами полки, позволяющая вращение. Такой случай известен как потеря устойчивости формы сечения. При этом нарушается гипотеза недеформированности контура поперечного сечения.

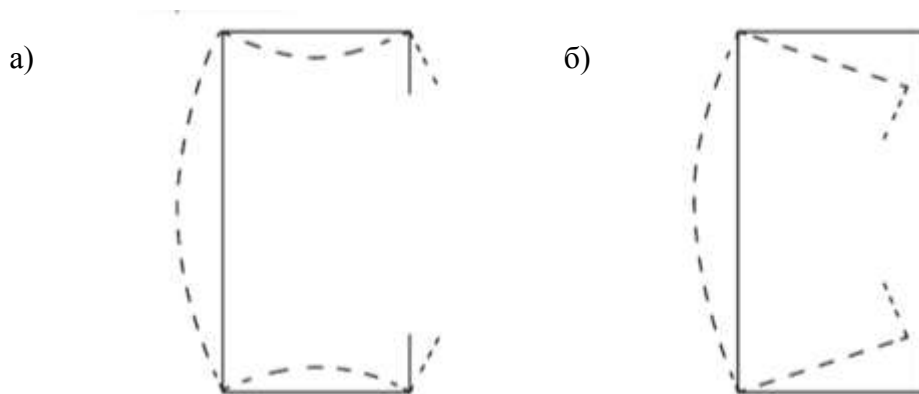


Рисунок 2.4 - Местная потеря устойчивости и потеря устойчивости формы сечения

Склонность к потере устойчивости формы сечения определяется способностью элементов жесткости предотвратить смещение соседних углов полки. Это, в свою очередь, зависит от геометрии и соотношения жесткостей элементов сечения.

При определении несущей способности и жесткости тонкостенных стальных профилей по п. 7.3.1.5[1] следует учитывать влияние потери устойчивости формы сечения. Оно определяется линейным или нелинейным расчетом на устойчивость, численными методами или испытаниями коротких стоек. Упрощенный способ линейного расчета приведен в п. 7.3.2 и 7.3.3[1].

2.4. Крутильная и крутильно-изгибная формы потери устойчивости

Изгибная форма является преобладающей формой потери устойчивости для сжатых элементов стандартных строительных конструкций зданий, в которых используются обычные горячекатаные профили. В тонкостенных конструкциях изгибная потеря устойчивости доминирует во многих расчетных ситуациях, но и сопротивление потере устойчивости по крутильной и крутильно-изгибной форме также требует проверки.

Крутильная форма – это чистое скручивание профиля, которое происходит только в центрально нагруженных стойках с центрально-симметричными сечениями, имеющими малую жесткость на кручение (см. рисунок 2.5, а). Крутильно-изгибная потеря устойчивости является более общим случаем и встречается в центрально сжатых стойках с одной осью симметрии сечения и несовпадающими центрами тяжести полного и расчетного сечения (см. рисунок 2.5, б).

Для открытых кососимметричных поперечных сечений тонкостенных профилей (например, Z-образных с одинаковыми полками) в соответствии с п. 7.7.8.2 [1] кроме проверки устойчивости продольного изгиба делается проверка стержня на крутильную форму потери устойчивости. Открытые сечения с одной осью симметрии следует проверять на изгибно-крутильную форму потери устойчивости; открытые сечения с несимметричной формой поперечного сечения проверяются из условия потери устойчивости по крутильной

форме или изгибно-крутильной форме потери устойчивости, которая может быть меньше, чем несущая способность элемента из условия потери плоской формы устойчивости.

Расчетная несущая способность N по потере устойчивости по крутильной или изгибно-крутильной форме определяется в соответствии с п. 7.7.8.1 и 7.7.8.4[1]. На рисунке 2.5 показаны сечения тонкостенных профилей, предрасположенные к изгибно-крутильной форме потери устойчивости.

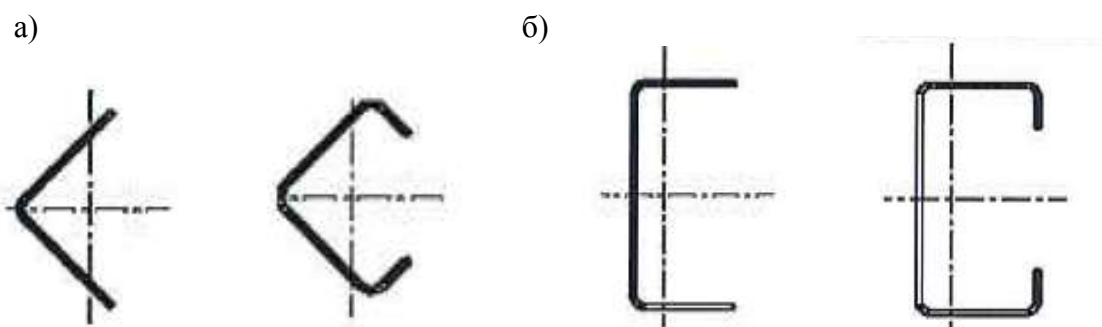


Рисунок 2.5 - Поперечные сечения, предрасположенные к изгибно-крутильной форме потери устойчивости

2.5. Свертывание полок

По 7.3.1.2[1] влияние кривизны более широкой сжатой полки профиля относительно проектной оси полки на несущую способность профиля при изгибе учитывается, если ее кривизна будет более 5% высоты сечения профиля. Учитывается снижение несущей способности, например, путем уменьшения свеса широких полок и путем учета возможного изгиба стенок. При кривизне менее 5% высоты сечения профиля ее влияние на несущую способность профиля при изгибе допускается не учитывать.

Пример искривления сжатой и растянутой полки профиля с элементами жесткости и без них, прямолинейных до приложения нагрузки, приведен на рисунке 2.6.

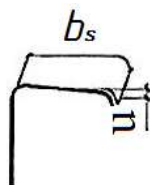


Рисунок 2.6 – Пример кривизны полки профиля, прямолинейного до приложения нагрузки

Кривизну сжатой полки вычисляют по формулам, приведенным в п. 7.3.1.4[1].

2.6. Смятие, коробление и местная потеря устойчивости полки

Поперечно нагруженные стенки большой гибкости, типичные для холодноформованных сечений, подвержены ряду возможных видов отказа, включая смятие, коробление и местную потерю устойчивости.

3. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ЛСТК

3.1. Учет коэффициентов надежности по нагрузкам и сопротивлению материала

По п.5.3 [1] при расчете конструкций и соединений из стальных тонкостенных профилей учитываются коэффициенты надежности по нагрузкам γ_f и материалу γ_m .

Для обеспечения надежности несущих конструкций используются нормативные и расчетные значения нагрузок и сопротивления. Коэффициенты надежности по нагрузкам γ_f и материалу γ_m представляют собой отношения:

$$\gamma_f = \frac{P}{P_n}, \gamma_m = R_n/R, \quad (3.1)$$

где P_n и R_n – нормативная нагрузка и нормативное сопротивление, определяемые по ГОСТ 27751, ГОСТ 14918, ГОСТ 15623, СП 20.13330.2011, СП 16.13330.2017;

P , R – расчетная нагрузка и расчетное сопротивление, представляющие собой максимальную нагрузку и минимальное сопротивление (в статическо-вероятностном смысле) за срок службы сооружения.

3.2. Учет назначения и условий работы конструкций

Для учета особенностей работы конструктивного элемента (динамические нагрузки, усталость, искажение формы сечения под нагрузкой, влияние низких температур, возможность потери устойчивости) согласно 5.4[1] применяют коэффициент условий работы γ_c , на который умножается нормативное сопротивление стали. Значение данного коэффициента определяют по ГОСТ 27751, СП 16.13330.2017 [2] и в соответствии с таблицей 3.1.

Для учета ответственности сооружаемого объекта из стальных тонкостенных профилей используют коэффициент надежности по ответственности γ_n , минимальные значения которого для зданий и сооружений повышенного, нормального и пониженного уровней ответственности приведены в ГОСТ 27751.

Уровень ответственности зданий и сооружений, а также значения коэффициента надежности по ответственности устанавливаются генеральным проектировщиком по согласованию с заказчиком в задании на проектирование, но не ниже значений, приведенных в ГОСТ 27751-2014[4] (таблица 3.2).

Таблица 3.1

Коэффициенты условий работы (выборка из табл. 5.1 [1])

Элемент конструкции	Коэффициент условий работы γ_c
1. Балки, прогоны из одиночных гнутых профилей С-, Z- и Σ -образных сечений	0,95
2. Колонны и стойки из спаренных С- и Σ -образных сечений	0,95
3. Сжатые и внецентренно сжатые колонны и стойки из спаренных швеллеров	0,80
4. Растянутые элементы (затяжки, тяги, оттяжки и подвески) при расчете на прочность по неослабленному сечению	0,90
5. Сжатые элементы ферм из спаренных профилей из С- и Σ -образных сечений	0,90
6. Прогоны несимметричного сечения	0,90
7. Сжатые тавровые элементы решетчатых конструкций из спаренных уголков с неокаймленными полками при расчете на устойчивость	0,75
8. Сжатые элементы из одиночных уголков с неокаймленными полками	0,7
9. Крепление связей, распорок, жестких настилов, планок, раскрепляющих сжатые пояса стержней и внецентренно сжатые стержни из плоскости действия момента	0,85
10. Устойчивость неподкрепленной стенки балок и прогонов от воздействия опорной реакции или местной нагрузки, приложенных к поясам	0,85
Примечание: Коэффициенты $\gamma_c < 1$ в расчетах не следует учитывать совместно.	

Таблица 3.2

Минимальные значения коэффициента надежности по ответственности (табл.2 [4])

Класс сооружений	Уровень ответственности	Минимальные значения коэффициентов надежности по ответственности γ_n
КС-3	Повышенный	1,1
КС-2	Нормальный	1,0
КС-1	Пониженный	0,8

3.3. Учет начальных несовершенств элементов несущей рамы

В формулах вычисления несущей способности элементов по устойчивости учитываются местные изгибные отклонения элементов. Относительные начальные местные изгибные несовершенства элементов при плоской форме

потери устойчивости e_0/L приведены в таблице 3.3. Кривые потери устойчивости для различных сечений определяют по таблице 3.4.

Таблица 3.3

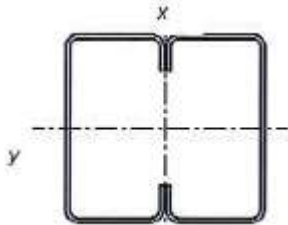
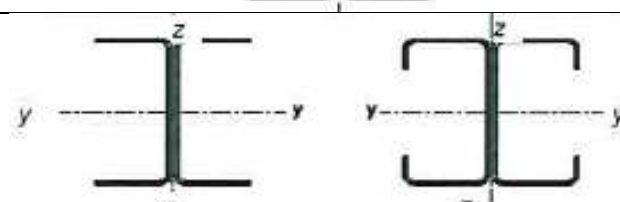


Расчетные относительные значения начального местного изгибного несовершенства e_0/L (табл.5.2 [1])


Соотношение при упругом расчете	Принятые предельные значения местных изгибов по СП 16.13330.2017 (таблица Д.1) в зависимости от кривой потери устойчивости		
	a	b	c
e_0/L	1/300	1/250	1/200
Коэффициент α_{LT}	0,21	0,34	0.49

α_{LT} – коэффициент, учитывающий начальные несовершенства

Таблица 3.4

Кривые потери устойчивости для различных типов поперечных сечений (табл.7.5 [1])

Тип поперечного сечения	Потеря устойчивости относительно оси	Кривая потери устойчивости
	Любая	b
	y-y z-z	A b
	Любая	b
		

	или другое поперечное сечение	Любая	с
---	-------------------------------	-------	---

3.4. Определение характеристик материала

Для изготовления стальных холодногнуемых оцинкованных профилей используется холоднокатаный листовой прокат из углеродистой стали, оцинкованной в агрегатах непрерывного цинкования по ГОСТ Р 52246 толщиной от 1 до 4 мм, повышенной точности проката по толщине и ширине, нормальной плоскостности с обрезной кромкой и цинковым покрытием класса 275, или по ГОСТ 14918 толщиной до 2,5 мм включительно, группы ХП, ПК повышенной точности проката по толщине и ширине, нормальной плоскостности с обрезной кромкой и цинковым покрытием класса 1.

Расчетные сопротивления гнутых профилей определяются по формулам, приведенным в таблице 3.5.

Значение $\gamma_m=1,025$ – для проката с пределом текучести до 350 Н/мм² и $\gamma_m=1,05$ – для проката с пределом текучести 350 Н/мм² и выше.

Таблица 3.5

Формулы для определения расчетных сопротивлений гнутых профилей (табл.6.1 [1])

Напряженное состояние	Расчетное сопротивление проката
Растяжение, сжатие, изгиб	$R_y = R_{yn} / \gamma_m$
Сдвиг	$R_s = 0,58R_{yn} / \gamma_m$
Смятие при плотном касании	$R_{lp} = 0,5R_{un} / \gamma_m$

Нормативные и расчетные сопротивления при растяжении, сжатии и изгибе холоднокатаного листового проката приведены в таблице 3.6.

Таблица 3.6

Нормативные и расчетные сопротивления при растяжении, сжатии и изгибе холоднокатаного листового проката (табл.6.2 [1])


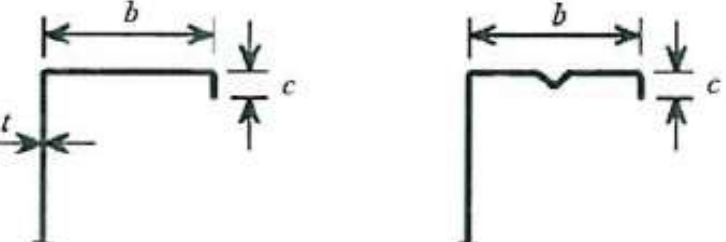
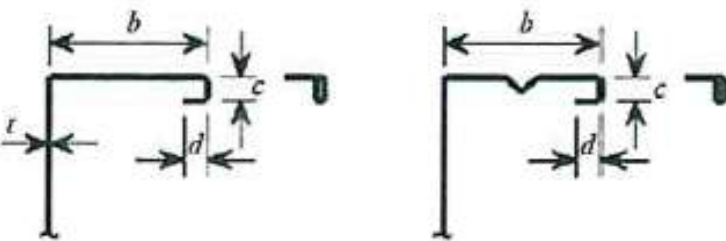
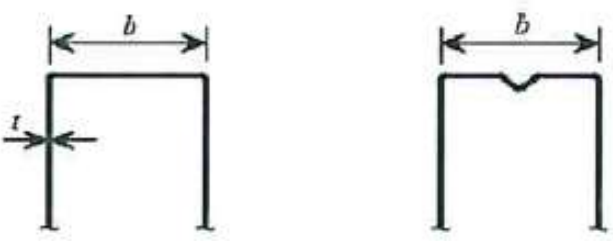
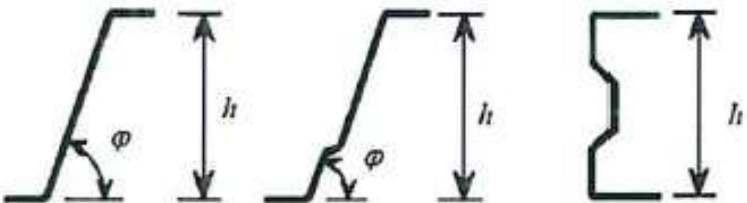
Марка стали	Нормативный документ	Нормативное сопротивление, Н/мм ²		Расчетное сопротивление, Н/мм ²		
		R_{yn}	R_{un}	R_y	R_s	R_{lp}
220	ГОСТ Р 52246	220	300	215	125	105
250		250	330	245	140	120
280		280	360	270	155	135
320		320	390	310	180	155
350		350	420	330	190	165
ХП, ХК	ГОСТ 14918	230	300	225	130	110

3.5. Проверка геометрических параметров

Требования [1] по расчету не распространяются на поперечные сечения, отношения ширины и высоты которых к их толщине выходят за пределы, указанные в таблице 3.7.

Таблица 3.7

Максимальные значения отношений ширины и высоты элементов сечения к толщине (табл.7.1 [1])

Элементы поперечного сечения	Максимальное значение
	$b/t \leq 60$
	$\frac{b}{t} \leq 100$ $\frac{c}{t} \leq 40$
	$b/t \leq 100$ $c/t \leq 50$ $d/t \leq 40$
	$b/t \leq 300$
	$h/t \leq 300 \cdot \sin\varphi$ $45^\circ \leq \varphi \leq 90$

Для обеспечения необходимой жесткости и исключения преждевременной потери устойчивости самого элемента, его размеры должны быть в следующих пределах:

$$0,2 \leq c/b \leq 0,5; \quad (3.2)$$

$$0,1 \leq d/b \leq 0,25, \quad (3.3)$$

где размеры b , c , d – в соответствии с таблицей 3.7. Если $c/b < 0,2$ или $d/b < 0,1$, то отгиб не учитывается ($c=0$ или $d=0$).

3.6. Определение расчетной толщины элемента

Согласно п. 7.1.5[1] в качестве расчетной следует использовать скорректированную толщину стали t_{cor} :

$$t_{cor} = t - t_{m.p.}, \quad (3.4)$$

где $t_{m.p.}$ – толщина металлического покрытия,
 t – толщина профиля, включающая покрытие.

Рекомендуемые значения толщины листа для изготовления профилей и профилированных листов: $0,5 \text{ мм} \leq t_{cor} \leq 4 \text{ мм}$.

Может быть использован материал большей или меньшей толщины при условии, что несущая способность элемента определена по расчету, основанному на испытаниях.

3.7. Влияние зон сгиба на геометрические характеристики сечения

При определении геометрических характеристик сечения профилей следует отдавать предпочтение приближенному расчету, без учета радиусов закругления в углах профилей. Влияние радиусов углов сгиба на несущую способность сечения может не учитываться, если внутренний радиус $r \leq 5t$ и $r \geq 0,1 b_p$. В этом случае поперечное сечение считается состоящим из плоских элементов, соединенных под углом.

Влияние зон сгиба на геометрические характеристики сечения может быть учтено уменьшением их значений, рассчитанных для подобного сечения с сопряжениями под углом, используя следующие приближенные формулы:

$$A_g \approx A_{g,sh} (1 - \delta); \quad (3.5)$$

$$I_g \approx I_{g,sh} (1 - 2\delta); \quad (3.6)$$

$$I_w \approx I_{w,sh} (1 - 4\delta); \quad (3.7)$$

$$\delta = 0,43 \cdot \frac{\sum_{j=1}^n r_j \frac{\varphi_j}{90^\circ}}{\sum_{j=1}^m b_{p,i}}, \quad (3.8)$$

где A_g – полная площадь поперечного сечения;

$A_{g,sh}$ – значение A_g для сечения с острыми углами;

$b_{p,i}$ – теоретическая ширина плоского i -го элемента в сечении с острыми углами;

I_g – момент инерции полного поперечного сечения;

$I_{g,sh}$ – значение I_g для сечения с острыми углами;

I_w – секториальный момент инерции поперечного сечения;

$I_{w,sh}$ – значение I_w для сечения с острыми углами;

φ_j – угол между двумя плоскими элементами;

m – количество плоских элементов;

n – количество криволинейных элементов;

r_j – внутренний радиус криволинейного j -го элемента.

Уменьшенные значения, определяемые по формулам (3.5)-(3.8), могут также использоваться для расчета эффективных характеристик поперечного сечения A_{ef} , $I_{y,ef}$, $I_{z,ef}$ и $I_{w,ef}$, с учетом того, что теоретическая ширина плоских элементов измеряется от точек пересечения их срединных линий.

Если внутренний радиус $r > 0,04tE/R_{yn}$, то несущая способность поперечного сечения профиля определяется испытаниями.

3.8. Определение редуцированных геометрических характеристик

При определении несущей способности и жесткости тонкостенных профилей учитывается влияние потери местной устойчивости и устойчивости сжатой части поперечного сечения.

Редуцированную площадь поперечного сечения тонкостенного холодногогнутого профиля после потери местной устойчивости определяют по формуле:

$$A_{red} = \rho \cdot A, \quad (3.9)$$

При постоянной толщине редуцируемого элемента редукция ведется за счет изменения ширины пластинки $b_{ef} = \rho \cdot b$, допускается также осуществлять редукцию изменением толщины $t_{ef} = \rho \cdot t$.

Для гладких сжатых пластин, имеющих закрепления на продольных кромках (например, стенка двутаврового или полка и стенка С-образного сечений), коэффициент редукции определяется:

$$\rho = 1, \text{ при } \bar{\lambda}_p \leq 0,673; \quad (3.10)$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,553(3+\psi)}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1,0; \text{ при } \bar{\lambda}_p > 0,673, \quad (3.11)$$

где $(3 + \psi) \geq 0$.

Для гладких пластин с закреплением по одной кромке, например, полка двутаврового, уголкового или швеллерного сечения (свес полки):

$$\rho = 1, \text{ при } \bar{\lambda}_p \leq 0,748; \quad (3.12)$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,188}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1,0; \text{ при } \bar{\lambda}_p > 0,748, \quad (3.13)$$

Для гладких сжатых пластин, имеющих закрепления по двум продольным кромкам (например, стенки и полки С-образного сечения) или закрепленных по одной стороне (например, полки швеллеров или уголков), коэффициент редукиции определяют в зависимости от критического напряжения потери устойчивости пластинки σ_{cr} :

$$\sigma_{cr} = k_\sigma \frac{\pi^2 E t^2}{12(1-\nu^2)b^2}, \quad (3.14)$$

где k_σ – коэффициент, зависящий от граничных условий и характера напряжений в пластинке (приведен в таблицах 3.8, 3.9);

b – ширина пластинки;

t – толщина пластинки;

ν – коэффициент Пуассона (0,3).

Для стальной пластинки формула для $\bar{\lambda}_p$ приводится к виду:

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{R_y}{\sigma_{cr}}} = \frac{b}{28,4t\varepsilon\sqrt{k_\sigma}}, \quad (3.15)$$

где $\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{R_y}}$.

Для определения геометрических характеристик редуцированного сечения ($A_{red}, I_{red}, W_{red}$) необходимо знать эффективную ширину b_{ef} и коэффициент k_σ , которые рассчитываются по формулам в таблицах 3.8, 3.9.

Для повышения жесткости и несущей способности пластин, составляющих поперечное сечение профилей, используются промежуточные или крайние элементы жесткости.

Согласно п. 7.3.2 [1] расчет крайних отгибов полок С- и Z-образных и аналогичных им сечений, состоящих из стенки и верхней и нижней полок, начинается с определения эффективной ширины сжатых полок с элементами жесткости в виде отгибов или двойных отгибов, параметры отгибов определяют по п. 7.3.1[1].

Коэффициент снижения несущей способности χ_d вследствие потери устойчивости формы сечения (плоская форма потери устойчивости краевого элемента жесткости) зависит от значения $\sigma_{cr,s}$. Критическое напряжение потери устойчивости краевого отгиба в упругой стадии $\sigma_{cr,s}$ определяется по формуле:

$$\sigma_{cr,s} = \frac{2\sqrt{K_1 EI_s}}{A_s}, \quad (3.16)$$

где K_1 – жесткость связи, накладываемая отгибом на единицу длины полки;

I_s – момент инерции эффективного сечения отгиба, определенный по эффективной площади A_s относительно центральной оси а-а эффективного поперечного сечения (см. рисунок 3.1).

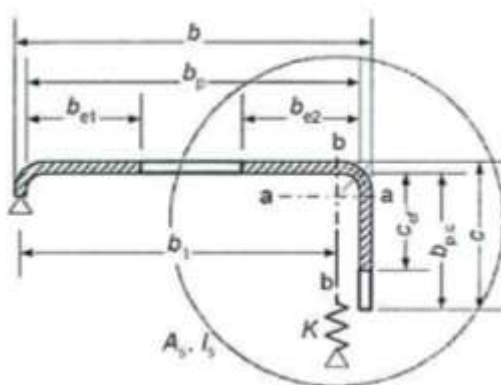


Рисунок 3.1 – Одинарный краевой отгиб

Для краевых элементов жесткости выражение жесткости связи K_1 для сжатой полки вычисляют по формуле:

$$K_1 = \frac{E \cdot t^3}{4(1-\nu^2)} \cdot \frac{1}{b_1^2 \cdot h_w + b_1^3 + 0,5 h_w k_f b_1 b_2}, \quad (3.17)$$

где b_1 – расстояние от пересечения стенки и полки до центра тяжести эффективной площади краевого отгиба на сжатой полке (см. рисунок 3.2).

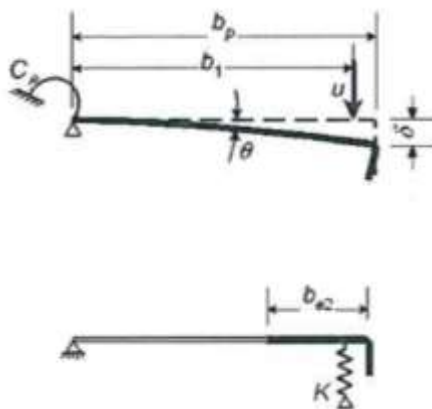


Рисунок 3.2 – Схема к определению жесткости связей

b_2 – расстояние от пересечения стенки и полки до центра тяжести эффективной площади краевого отгиба на сжатой полке;

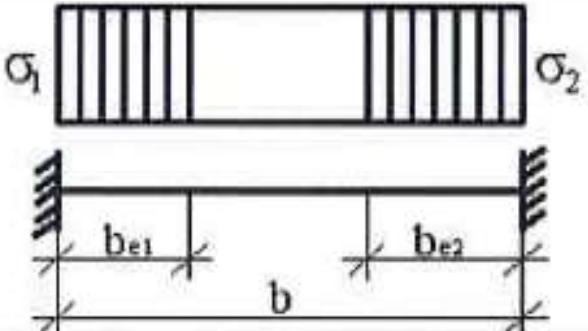
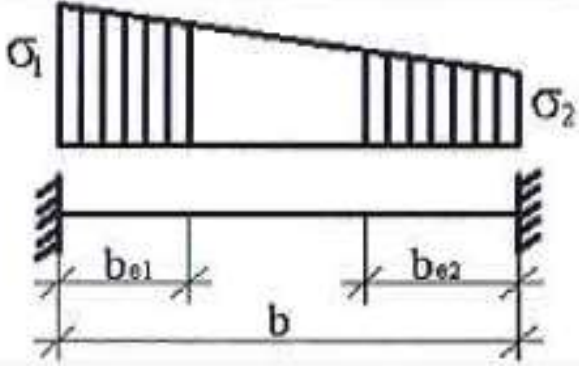
h_w – высота стенки;

$k_f = 0$ – если нижняя полка растянута;

$k_f = 1$ – для сжатого симметричного сечения.

Таблица 3.8

Пластины с двумя закрепленными кромками (табл.7.2 [1])

Распределение напряжений (сжатие положительно)	Эффективная ширина b_{ef}
	$\psi = 1$ $b_{ef} = \rho \cdot b$ $b_{e1} = 0,5b_{ef}$ $b_{e2} = 0,5b_{ef}$
	$1 > \psi > 0$ $b_{ef} = \rho \cdot b$ $b_{e1} = \frac{2}{5 - \psi} b_{ef}$ $b_{e2} = b_{ef} - b_{e1}$

				$\psi < 0$ $b_{ef} = \rho \cdot b_c = \rho b / (1 - \psi)$ $b_{e1} = 0,4b_{ef}$ $b_{e2} = 0,6b_{ef}$		
$\psi = \frac{\sigma_2^*}{\sigma_1}$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1	$-1 > \psi > -3$
Коэффициент k_σ	4,0	$8,2/(1,05+\psi)$	7,81	$7,81-6,29\psi+9,78\psi^2$	23,9	$5,98(1-\psi)^2$
$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1}$ – отношение меньшего напряжения к большему согласно эпюрам напряжений, показанным на рисунках в настоящей таблице 3.8.						

Таблица 3.9

Пластины с одной закрепленной кромкой (табл.7.3 [1])

Распределение напряжений (сжатие положительно)			Эффективная ширина b_{ef}	
			$1 > \psi > 0$ $b_{ef} = \rho \cdot c$	
			$\psi < 0$ $b_{ef} = \rho \cdot b_c = \rho c / (1 - \psi)$	
$\psi = \frac{\sigma_2^*}{\sigma_1}$	1	0	-1	$1 \geq \psi \geq 3$
Коэффициент k_σ	0,43	0,57	0,85	$0,57-0,21\psi+0,07\psi^2$

		$1 > \psi > 0$ $b_{ef} = \rho \cdot c$			
		$\psi < 0$ $b_{ef} = \rho \cdot b_c = \rho c / (1 - \psi)$			
$\psi = \frac{\sigma_{2*}}{\sigma_1}$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1
Коэффициент k_σ	0,43	$0,578/(\psi+0,34)$	1,70	$1,75-5\psi+17,1\psi^2$	23,8

Коэффициент снижения несущей способности ребра χ_d вследствие плоской формы потери устойчивости элемента жесткости следует определять с учетом относительной гибкости $\bar{\lambda}_d$ следующим образом:

$$\chi_d = 1,0, \quad \text{если } \bar{\lambda}_d \leq 0,65; \quad (3.18)$$

$$\chi_d = 1,47 - 0,723\bar{\lambda}_d, \quad \text{если } 0,65 \leq \bar{\lambda}_d \leq 1,38 \quad (3.19)$$

$$\chi_d = \frac{0,66}{\bar{\lambda}_d}, \quad \text{если } \bar{\lambda}_d \geq 1,38, \quad (3.20)$$

где $\bar{\lambda}_d = \sqrt{\frac{R_y}{\sigma_{cr,s}}}$.

3.9. Расчет на прочность центрально растянутых и сжатых элементов

Расчетную несущую способность сечения тонкостенного профиля по прочности при осевом растяжении N определяют по формуле:

$$\frac{N}{A_{gn} R_y \gamma_c} \leq 1. \quad (3.21)$$

Если для элемента эффективная площадь нетто $A_{ef,n}$ меньше полной площади поперечного сечения нетто A_{gn} , то прочность стержня при центральном сжатии определяют по формуле:

$$\frac{N}{A_{ef,n} R_y \gamma_c} \leq 1. \quad (3.22)$$

При несовпадении центра тяжести эффективного поперечного сечения с центром тяжести полного сечения следует учитывать момент от смещения $e_{N(x,y)}$ центральных осей $x-x$ и $y-y$ относительно оси действия силы.

При смещении центральных осей дополнительные моменты ΔM_x и ΔM_y вычисляют по формулам:

$$\Delta M_x = N \cdot e_{Nx} \quad (3.23)$$

$$\Delta M_y = N \cdot e_{Ny} \quad (3.24)$$

В некоторых случаях эксцентриситет можно не учитывать:

- если эксцентриситет составляет менее 0,015 размера сечения в направлении эксцентриситета;
- если учет эксцентриситета приводит к лучшему результату при определении напряжений.

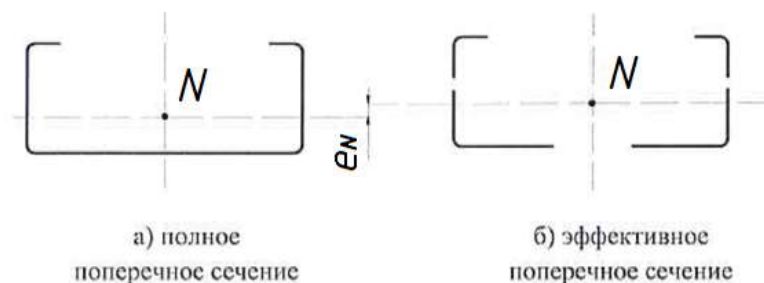


Рисунок 3.3 - Эффективное поперечное сечение при сжатии

3.10. Расчет на прочность элементов при изгибе

Расчетную несущую способность сечения тонкостенного профиля по изгибающему моменту относительно одной из главных осей M_x вычисляют в зависимости от условий:

- при моменте сопротивления эффективного сечения $W_{x,ef}$ меньше момента сопротивления полного упругого сечения W_x по формуле:

$$\frac{M_x}{W_{x,ef} R_y \gamma_c} \leq 1 \quad (3.25)$$

- при моменте сопротивления эффективного сечения $W_{x,ef}$ равном моменту сопротивления полного упругого сечения $W_{x,min}$ из выражения:

$$\frac{M_x}{W_{x,min} R_y \gamma_c} \leq 1. \quad (3.26)$$

При изгибе в двух главных плоскостях:

$$\frac{M_x}{W_{x,ef} R_y \gamma_c} + \frac{M_y}{W_{y,ef} R_y \gamma_c} \leq 1. \quad (3.27)$$

Формулы (3.25) и (3.26) применяются при соблюдении следующих требований:

а) изгибающий момент действует только в плоскости одной из главных осей сечения профиля ;

б) конструктивный элемент не склонен к кручению или крутильной, изгибно-крутильной формам потери устойчивости, или плоской формы потери устойчивости изгиба, или потери устойчивости формы сечения;

в) угол φ между стенкой и полкой в сечении профиля более 60° .

Эффективный момент сопротивления W_{ef} определяется для эффективного поперечного сечения, которое испытывает изгиб только в плоскости той главной оси, относительно которой происходит изгиб стержня.

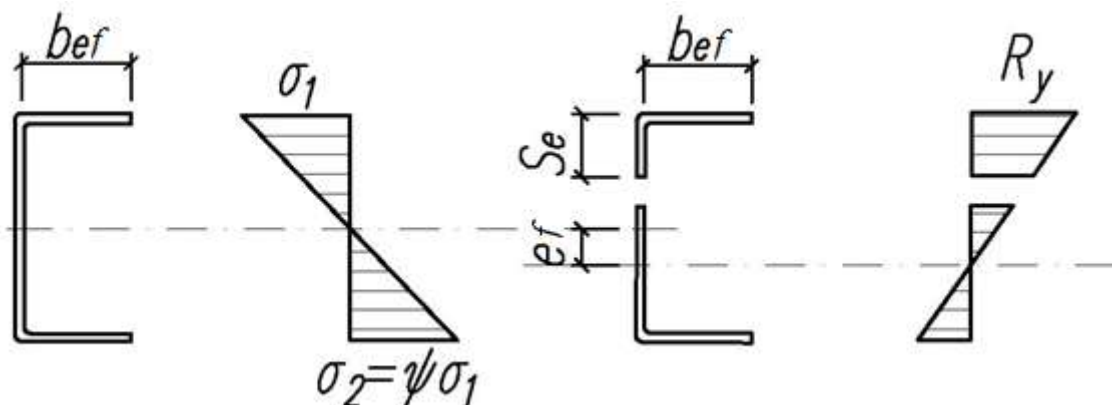


Рисунок 3.4 – Эффективное поперечное сечения для определения предельного изгибающего момента

3.11. Расчет на прочность при совместном действии изгиба и продольной силы

При одновременном действии изгибающих моментов и продольной сжимающей силы и отсутствии поперечной силы, должно выполняться следующее условие:

$$\frac{N}{A_{ef} R_y} + \frac{M_x + N \cdot e_{Nx}}{W_{x,ef} R_y} + \frac{M_y + N \cdot e_{Ny}}{W_{y,ef} R_y} \leq 1, \quad (3.28)$$

где A_{ef} – эффективная площадь поперечного сечения при действии равномерного сжатия;

$W_{ef,x(y)}$ – минимальный момент сопротивления эффективного поперечного сечения относительно соответствующей оси;

$e_{Nx(y)}$ – смещение центральных осей x-x и y-y относительно положения оси действия силы.

3.12. Расчет на прочность при совместном действии продольной, поперечной силы и изгибающих моментов

Для поперечных сечений при одновременном действии осевой силы N , изгибающего момента M и поперечной силы Q влияние последней не учитывается, если выполняется условие $Q \leq 0,5Q_w$. При величине поперечной силы более половины предельного значения несущей способности при совместном действии момента и поперечной силы расчетное значение несущей способности поперечного сечения профиля определяется по уменьшенному значению расчетного сопротивления:

$$(1 - \rho_Q) R_y, \quad (3.29)$$

где $\rho_Q = \left(\frac{2Q}{Q_w} - 1\right)^2$.

$$Q_w = \frac{\gamma_c h_w t R_s}{\sin \alpha}, \quad (3.30)$$

где R_s – расчетное напряжение при сдвиге, учитывающее потерю устойчивости стенки, определяется по формулам в табл.3.10;

α – угол наклона стенки относительно полок.

Таблица 3.10

Расчетные напряжения R_s при сдвиге (табл.7.4 [1])

Условная гибкость стенки	Стенка без элемента жесткости на опоре	Стенка с элементом жесткости на опоре*
$\bar{\lambda}_\omega \leq 0,83$	$0,58R_y$	$0,58R_y$
$0,83 < \bar{\lambda}_\omega < 1,40$	$0,48R_y / \bar{\lambda}_\omega$	$0,48R_y / \bar{\lambda}_\omega$
$\bar{\lambda}_\omega \geq 1,40$	$0,67R_y / \bar{\lambda}_\omega^2$	$0,48R_y / \bar{\lambda}_\omega$

*Элементы жесткости на опоре, также как ребра жесткости, установленные для предотвращения искривлений стенки и рассчитанные на восприятие опорной реакции.

3.13. Расчет на устойчивость центрально сжатых стержней

Проверка устойчивости центрально сжатых стержней сплошного сечения производится по формуле:

$$\frac{N}{\varphi A_{ef} R_y \gamma_c} \leq 1, \quad (3.31)$$

где φ - коэффициент устойчивости при центральном сжатии, принимаемый по приведенной гибкости $\bar{\lambda}$ по табл. Д1 [2].

Значение критической силы $N_{cr,T}$ при изгибно-крутильной форме потери устойчивости в упругой стадии свободно опертого стержня определяют по формуле:

$$N_{cr,T} = \frac{1}{i_0^2} \left(GI_t + \frac{\pi^2 EI_w}{l_T^2} \right), \quad (3.32)$$

$$i_0^2 = i_x^2 + i_y^2 + x_0^2 + y_0^2, \quad (3.33)$$

где G – модуль сдвига;

I_t – момент инерции при свободном кручении полного сечения;

I_w – секториальный момент инерции полного сечения;

i_y – радиус инерции полного сечения относительно оси у-у;

i_x – радиус инерции полного сечения относительно оси х-х;

l_T – расчетная длина элемента, теряющего устойчивость по крутильной форме;

x_0, y_0 – координаты центра сдвига относительно центра тяжести полного поперечного сечения.

3.14. Расчет на устойчивость изгибаемых элементов

Несущую способность по устойчивости плоской формы изгиба для элементов, не имеющих раскрепления из плоскости действия изгибающего момента, вычисляют по формуле:

$$\frac{M_b}{\chi_{LT} W_{ef} R_y} \leq 1, \quad (3.34)$$

где χ_{LT} – понижающий коэффициент при проверке устойчивости плоской формы изгиба.

Для изгибаемых элементов постоянного поперечного сечения значение $\chi_{LT} \leq 1,0$ при условной гибкости $\bar{\lambda}_{LT}$ определяют по формуле:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}}, \quad (3.35)$$

$$\text{где } \Phi_{LT} = [1 + \alpha_{LT}(\bar{\lambda}_{LT} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT}^2], \quad (3.36)$$

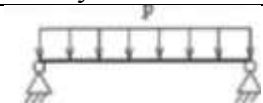
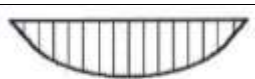
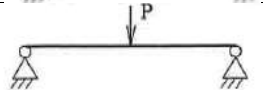
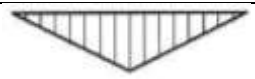
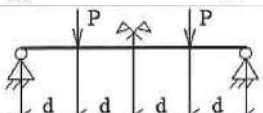
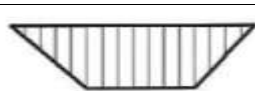
α_{LT} – коэффициент, учитывающий начальные несовершенства;

$$\overline{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_x R_y}{M_{cr}}}, \quad (3.37)$$

где M_{cr} – критический момент потери устойчивости плоской формы изгиба в упругой стадии, вычисление M_{cr} приведено в таблице 3.11.

Таблица 3.11

Коэффициенты C_1 , C_2 и C_3 для балок с изгибающей нагрузкой (табл.7. [1])

Нагрузки и граничные условия	Эпюры моментов	k_y	C_1	C_2	C_3
		1,0 0,5	1,127 0,970	0,454 0,360	0,525 0,438
		1,0 0,5	1,348 1,050	0,630 0,480	0,411 0,338
		1,0 0,5	1,040 0,950	0,420 0,310	0,562 0,539

3.15. Расчет на устойчивость при внецентренном сжатии элементов сплошного сечения

Для сжато-изгибаемых (внецентренно сжатых) элементов должны выполняться следующие условия:

$$\frac{N_p}{\varphi_x A_{ef} R_y} + k_{xx} \frac{M_{x,p} + \Delta M_{x,p}}{\chi_{LT} W_{x,ef} R_y} + k_{xy} \frac{M_{y,p} + \Delta M_{y,p}}{\chi_{LT} W_{y,ef} R_y} \leq 1, \quad (3.38)$$

$$\frac{N_p}{\varphi_y A_{ef} R_y} + k_{yx} \frac{M_{x,p} + \Delta M_{x,p}}{\chi_{LT} W_{x,ef} R_y} + k_{yy} \frac{M_{y,p} + \Delta M_{y,p}}{\chi_{LT} W_{y,ef} R_y} \leq 1, \quad (3.39)$$

где N_p , $M_{x,p}$, $M_{y,p}$ – расчетные значения сжимающей силы и максимальных моментов относительно осей x-x и y-y соответственно;

$\Delta M_{x,p}$, $\Delta M_{y,p}$ – моменты от смещения центра тяжести относительно осей x-x и y-y;

φ_x , φ_y – понижающие коэффициенты при плоской форме потери устойчивости;

χ_{LT} – понижающий коэффициент при проверке устойчивости плоской формы изгиба;

k_{xx} , k_{xy} , k_{yx} , k_{yy} – коэффициенты взаимодействия (по таблице 3.12).

Допускается использовать упрощенную формулу для проверки устойчивости сжато-изгибаемых элементов использовать:

$$\left(\frac{N_p}{\varphi_x A_{ef} R_y}\right)^{0,8} + \left(\frac{M_x}{\chi_{LT} W_{x,ef} R_y}\right)^{0,8} \leq 1,0. \quad (3.40)$$

Таблица 3.12

Коэффициенты взаимодействия k_{ij} (табл. 7.1 [1])

Коэффициенты взаимодействия	Упругие свойства поперечного сечения, класс 4	Вспомогательные обозначения
k_{yy}	$C_{m,x} C_{m,LT} \cdot \frac{\mu_x}{1 - \frac{N}{N_{cr,x}}}$	$\mu_x = \frac{1 - \frac{N}{N_{cr,x}}}{1 - \varphi_x \frac{N}{N_{cr,x}}}$
k_{yz}	$C_{m,y} \cdot \frac{\mu_y}{1 - \frac{N}{N_{cr,y}}}$	
k_{zy}	$C_{m,x} C_{m,LT} \cdot \frac{\mu_y}{1 - \frac{N}{N_{cr,x}}}$	$\mu_y = \frac{1 - \frac{N}{N_{cr,y}}}{1 - \varphi_x \frac{N}{N_{cr,y}}}$
k_{zz}	$C_{m,y} \cdot \frac{\mu_y}{1 - \frac{N}{N_{cr,y}}}$	

3.16. Проверка по эксплуатационной пригодности

Проверку конструкции по второму предельному состоянию от воздействия нормативных нагрузок с учетом редукиции сечения следует выполнять по формуле:

$$f \leq f_u, \quad (3.41)$$

где f – прогиб или перемещение элемента конструкции;

f_u – предельный прогиб или перемещение элемента конструкции по Приложению Д [3].

4. ПРИМЕР 1

Произвести проверку поперечного сечения элементов несущей рамы мансардного этажа из тонкостенных оцинкованных профилей.

4.1. Исходные данные для расчета

Район строительства – г. Вологда. Вологда относится к IV снеговому району ($S_g=2,0$ кПа) и I ветровому району ($w_0=0,23$ кПа). Пролет несущей рамы мансардного этажа здания 12,6м. Шаг несущих рам – 0,6 м. Расчетная схема и конструктивное решение изображены на рисунках 4.1 и 4.2.

Сортамент ЛСТК-профилей представлен в приложении 1.

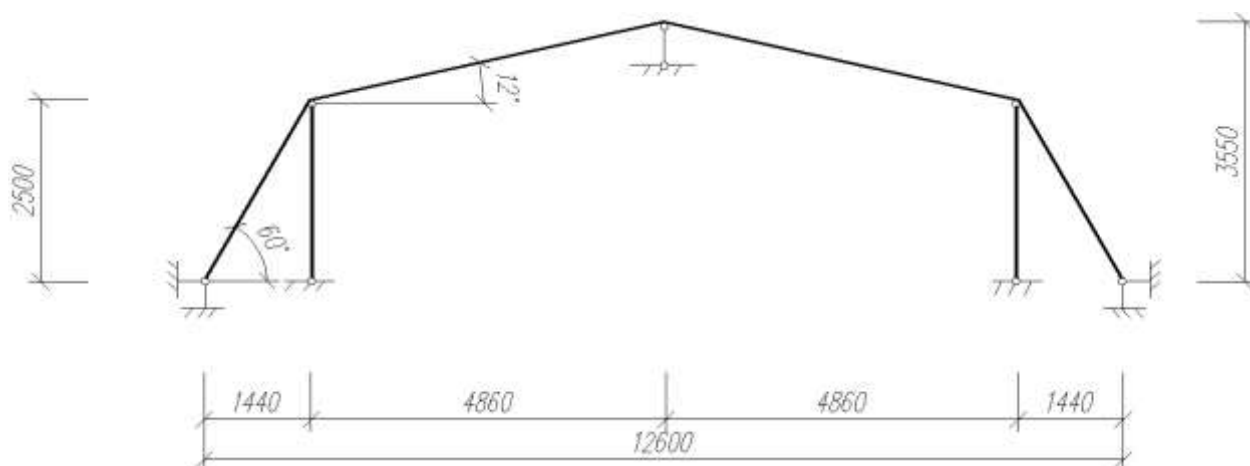


Рисунок 4.1 – Геометрическая схема рамы

В соответствии с СП 20.13330.2016[3] был произведен сбор нагрузок.

Нагрузками, действующими на поперечную раму мансардного этажа, являются:

- постоянная – от веса ограждающих и несущих конструкций;
- временная – снег, ветер.

По СП 20.13330.2016 [3] приняты коэффициенты надежности по нагрузкам γ_f , которые были использованы при сборе нагрузок на раму.

Статический расчет поперечной рамы на действующие нагрузки выполнен по программе «SCAD». Поперечная рама задается в декартовой системе координат по узлам рамы. Расчетная схема рамы имеет 7 узлов, в раме – 6 элементов (рис.4.3), 4 опорных закрепления и 1 тип жесткости. Расчет поперечной рамы произведен на следующие виды загрузений:

- постоянная + снеговая (1 вариант) + ветровая;
- постоянная + снеговая (2 вариант) + ветровая;
- постоянная + снеговая (3 вариант) + ветровая.

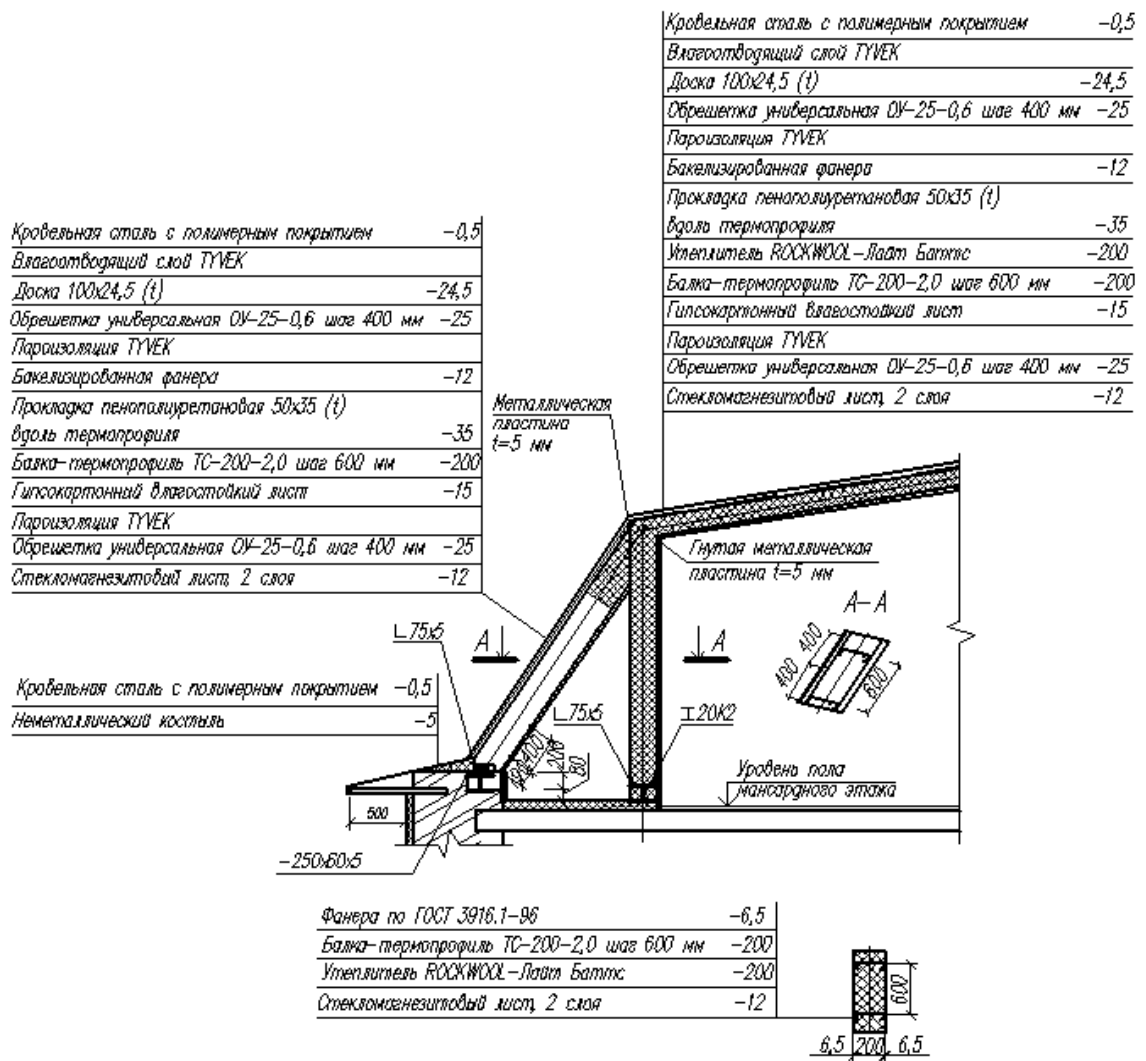


Рисунок 4.2 – Конструкции мансарды из ЛСТК

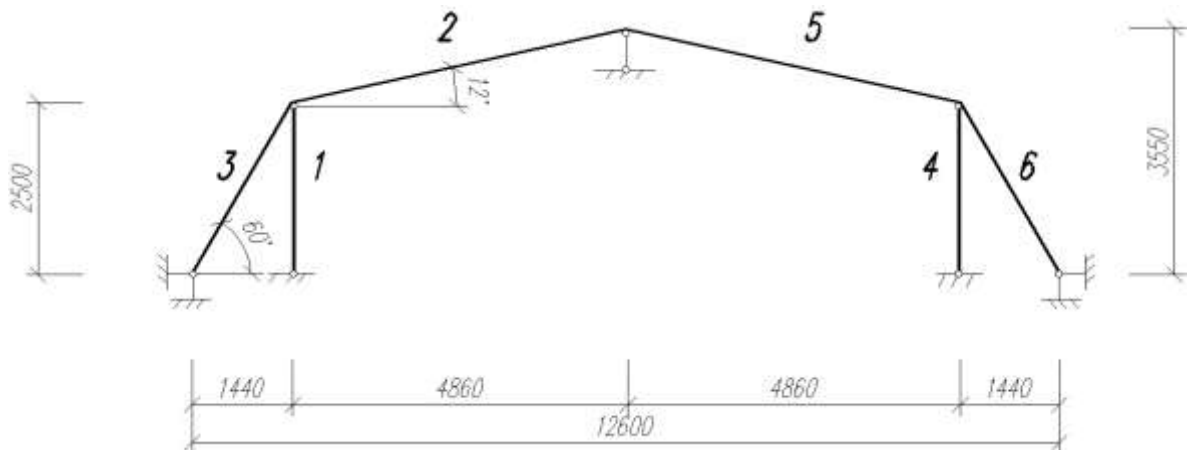


Рисунок 4.3– Номера элементов рамы

Полученные усилия в элементах представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1

Расчетные усилия

№ элемента	Расчетные усилия		
	N (кН)	M (кНм)	Q (кН)
1,4	-4,54	-2,441	-1,446
2,5	-0,79	-3,43	-3,77
3,6	-0,17	-1,25	-0,71

Далее представлен пример проверки поперечного сечения ригеля покрытия (элемент 3,6) из С - образного профиля ПС-200-1,5 из стали марки 280.

Расчетные усилия, действующие в элементах 3,6:

$N = -0,17$ кН; $M = -1,25$ кН·м; $Q = -0,71$ кН.

По таблице 3.1 принимаем коэффициент условий работы $\gamma_c = 0,95$ как для балки из одиночного гнутого профиля С-образного сечения.

По таблице 3.2 принимаем коэффициент надежности по ответственности $\gamma_n = 1,0$, как для класса сооружения КС-2 нормального уровня ответственности.

По таблице 3.6 для конструктивных элементов рамы принимаем сталь марки С280 с пределом текучести $R_y = 270$ Мпа.

4.2. Оценка геометрических параметров профиля

Размеры профиля ПС - 200-1,5 по табл.П1.2 Приложения 1 (рис.4.4):

- высота сечения - $h = 200$ мм;
- ширина полки - $b_1 = b_2 = 50$ мм;
- высота отгиба полки - $c = 15$ мм;
- радиус закругления - $r = 3$ мм;
- номинальная толщина $t_{nom} = 1,5$ мм;
- толщина металлического (цинкового) покрытия $t_{m,p} = 0,02$ мм.

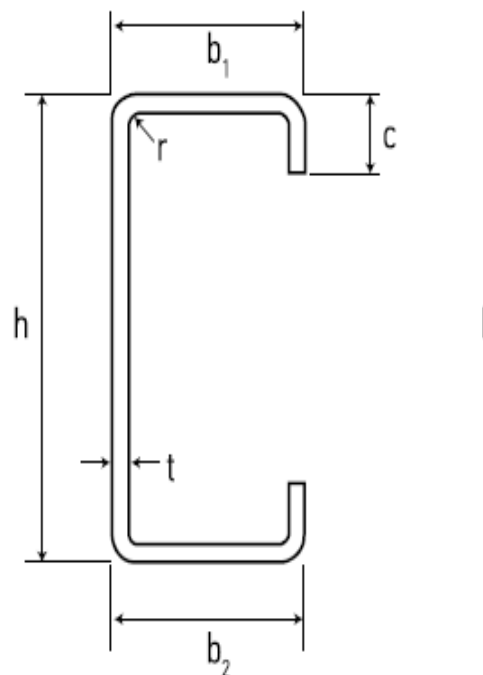


Рисунок 4.4 – Поперечное сечение термопрофиля

4.2.1. Учет начальных несовершенств элементов несущей рамы

По таблице 3.4 для профиля С - образного сечения кривая потери устойчивости – b. Соответственно, по таблице 3.3 $\frac{e_0}{L} = 1/250$, коэффициент $\alpha_{LT} = 0,34$.

4.2.2. Определение расчетной толщины материала

Номинальная толщина профиля $t_{nom} = 1,5$ мм;

Толщина металлического (цинкового) покрытия $t_{m,p} = 0,02$ мм;

Расчетная толщина профиля $t = t_{nom} - 2 \cdot t_{m,p} = 1,5 - 2 \cdot 0,02 = 1,46$ мм.

4.2.3. Проверка геометрических параметров

Размеры профиля по срединным линиям (рис.4.5):

- высота стенки: $h_p = h - t_{nom} = 200 - 1,5 = 198,5$ мм;

- ширина полки: $b_{p1} = b_{p2} = b_1 - t_{nom} = 50 - 1,5 = 48,5$ мм;

- высота отгиба полки: $c_p = c - t_{nom}/2 = 15 - 1,5/2 = 14,25$ мм;

- радиус закругления: $r_m = r + t/2 = 3 + 1,46/2 = 3,73$ мм;

- угол: $g_r = r_m \cdot (\tan\varphi/2 - \sin\varphi/2) = 3,73 \cdot (\text{tg } 45^\circ - \sin 45^\circ) = 1,09$ мм.

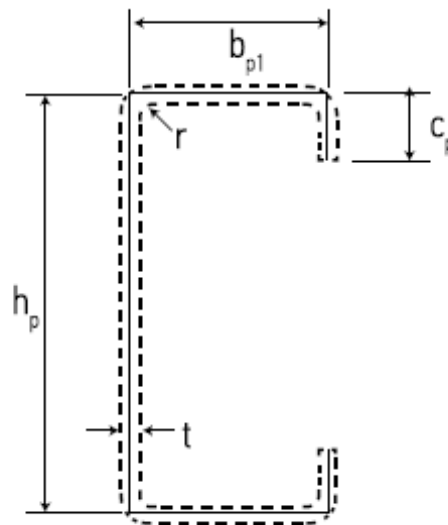


Рисунок 4.5 – Размеры профиля по срединным линиям

Размеры плоских участков (рис.4.5):

- стенка: $b_{p,h} = h_p - 2 \cdot g_r = 198,5 - 2 \cdot 1,09 = 196,32$ мм;

- полка: $b_{p,b} = b_p - 2 \cdot g_r = 48,5 - 2 \cdot 1,09 = 46,32$ мм;

- отгиб полки: $b_{p,c} = c_p - g_r = 14,25 - 1,09 = 13,16$ мм.

Проверка соотношений геометрических параметров поперечного сечения и сравнение их с максимальными по табл. 3.7:

$b/t = 50/1,46 = 34,25 < 100$ - Условие выполняется;

$c/t = 15/1,46 = 10,27 < 40$ - Условие выполняется.

Проверка размеров элемента жесткости:

$c/b_1 = 15/50 = 0,3$; $0,2 < 0,3 < 0,5$ - Условие выполняется.

4.2.4. Влияние зон сгиба на геометрические характеристики поперечного сечения профиля

Проверка возможности пренебрежения закруглениями углов:

$r = 3 \leq 5t = 5 \cdot 1,46 = 7,3$ – условие выполняется;

$r = 3 \geq 0,1 b_p = 0,1 \cdot 48,5 = 4,85$ – условие не выполняется.

Невыполнение указанного выше условия требует учета влияния закругленных углов при расчете геометрических характеристик поперечного сечения профиля. Влияние закругленных углов учитывается уменьшением геометрических характеристик, рассчитанных для аналогичного поперечного сечения без учета закруглений по формулам, приведенным в пункте 3.7.

$$\delta = 0,43 \cdot \frac{\sum_{j=1}^n r_j \cdot \frac{\varphi_j}{90}}{\sum_{j=1}^m b_{p,i}}$$

$$\delta = 0,43 \frac{3 \cdot 3,73 \cdot \frac{90}{90}}{196,32 + 2 \cdot 46,32 + 2 \cdot 13,16} = 0,015.$$

4.3. Определение геометрических характеристик

4.3.1. Геометрические характеристики поперечного сечения брутто (без учета закруглений)

Сечение профиля разделяется на плоские участки, каждый из которых задается координатами его начала и конца на основе геометрии сечения в срединных линиях, как указано на рисунке 4.6. Точки начала и конца каждого элемента называются узлами. Для удобства расчеты производятся в табличной форме (4.2-4.11).

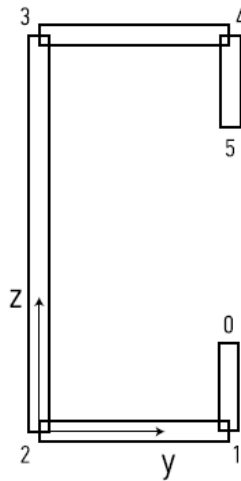


Рисунок 4.6 – К определению геометрические характеристик сечения брутто (без учета закруглений)

Таблица 4.2

Координаты узлов сечения

Узел J	Координата y_j , мм	Координата z_j , мм
0	48,5	14,25
1	48,5	0
2	0	0
3	0	198,5
4	48,5	198,5
5	48,5	184,25

Таблица 4.3

Координаты плоских участков сечения

Часть i	Начальный узел			Конечный узел			Толщина t_i , мм	Длина, мм	Площадь dA_i , мм ²
	№	y коорд. y_{i-1} , мм	z коорд. z_{i-1} , мм	№	y коорд. y_i , мм	z коорд. z_i , мм			
1	0	48,5	14,25	1	48,5	0	1,46	14,25	20,81
2	1	48,5	0	2	0	0	1,46	48,5	70,81
3	2	0	0	3	0	198,5	1,46	198,5	289,81
4	3	0	198,5	4	48,5	198,5	1,46	48,5	70,81
5	4	48,5	198,5	5	48,5	184,25	1,46	14,25	20,81
Итого									473,05

Площадь сечения брутто определяется как сумма площадей отдельных плоских участков поперечного сечения профиля, приведенных в последнем столбце табл.4.3.

$$A_{gr} = \sum dA_i = 473,05 \text{ мм}^2.$$

Центр тяжести:

Координата z центра тяжести (z_{gc}) указывает на положение оси y сечения брутто. Если ось y является осью симметрии сечения профиля, то она же бу-

дет считаться центральной осью. Следовательно, z_1 и z_{b2} равны. Определение координаты z_{gc} показано для формальности и полноты расчета.

Координата у центра тяжести укажет на положение главной оси z сечения брутто. Обозначения приняты в соответствии с рисунком 4.7.

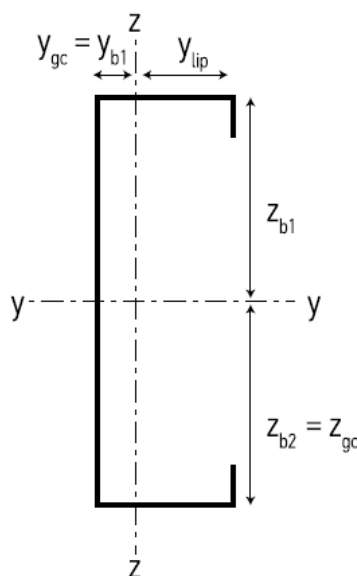


Рисунок 4.7 – Центр тяжести сечения

Определим координату z центра тяжести:

Таблица 4.4

К определению координаты z центра тяжести поперечного сечения профиля

Часть i	$(z_i + z_{i-1}) \cdot dA_i / 2, \text{ мм}^3$
1	148,27
2	0
3	28763,64
4	14055,79
5	3982,51
Итого	46950,21

Статический момент сечения для оси у равен сумме указанных в табл.4.4 значений: $S_{y0} = 46950 \text{ мм}^3$.

Координата z центра тяжести **вычисляется** следующим образом:

$$Z_{gc} = S_{y0} / A_{gr} = 46950 / 473,05 = 99,25 \text{ мм};$$

$$Z_{gc} = z_{b1} = z_{b2} = 99,25 \text{ мм}.$$

Определим координату у центра тяжести:

Таблица 4.5

К определению координаты у центра тяжести поперечного сечения профиля

Часть i	$(y_i + y_{i-1}) \cdot dA_i / 2, \text{ мм}^3$
---------	--

1	1008,8
2	1717,14
3	0
4	1717,14
5	1008,8
Итого	5451,88

Статический момент сечения для оси z равен сумме указанных значений в табл.4.5: $S_{z0} = 5451,88 \text{ мм}^3$.

Координата у центра тяжести **вычисляется** следующим образом:

$$y_{gc} = S_{z0} / A_{gr} = 5451,88 / 473,05 = 11,52 \text{ мм};$$

$$y_{gc} = y_{b1} = 11,52 \text{ мм};$$

$$y_{lip} = b_{p1} - y_{b1} = 48,5 - 11,52 = 36,98 \text{ мм}.$$

Моменты инерции сечения:

Таблица 4.6

К определению момента инерции поперечного сечения профиля относительно оси наибольшей жесткости

Часть i	$(z_i^2 + z_{i-1}^2 + z_i \cdot z_{i-1}) \cdot dA_i / 3, \text{ мм}^4$
1	1408,58
2	0
3	3806388,69
4	2790073,32
5	762505,71
Итого	7360376,3

Момент инерции сечения относительно начальной оси у (по нижней полке сечения) равен сумме указанных значений в последнем столбце табл.4.6: $I_{y0} = 7360376,3 \text{ мм}^4$.

Момент инерции сечения относительно центральной оси у находится следующим образом:

$$I_y = I_{y0} - A_{gr} \cdot z_{gc}^2$$

$$I_y = 7360376,3 - 473,05 \cdot 99,25^2 = 2700567,7 \text{ мм}^4.$$

Таблица 4.7

К определению момента инерции поперечного сечения профиля относительно оси наименьшей жесткости

Часть i	$(y_i^2 + y_{i-1}^2 + y_i \cdot y_{i-1}) \cdot dA_i / 3, \text{ мм}^4$
1	48950,32
2	55520,94
3	0
4	55520,94
5	48950,32
Итого	208942,52

Момент инерции сечения относительно начальной оси z (по стенке балки) равен сумме указанных значений в последнем столбце табл.4.7: $I_{z0} = 208942,52 \text{ мм}^4$.

Момент инерции сечения относительно центральной оси z вычисляется следующим образом:

$$I_z = I_{z0} - A_{gr} \cdot y_{gc}^2$$
$$I_z = 208942,52 - 473,05 \cdot 11,52^2 = 146163,87 \text{ мм}^4.$$

Радиусы инерции:

- радиус инерции относительно оси наибольшей жесткости:

$$i_y = (I_y / A_{gr})^{0,5}$$
$$i_y = (2700567,7 / 473,05)^{0,5} = 75,56 \text{ мм}$$

- радиус инерции относительно оси наименьшей жесткости:

$$i_z = (I_z / A_{gr})^{0,5}$$
$$i_z = (146163,87 / 473,05)^{0,5} = 17,58 \text{ мм}.$$

Моменты сопротивления в упругой стадии:

- момент сопротивления в упругой стадии относительно оси наибольшей жесткости: $W_y = I_y / \max\{z_{b1}, z_{b2}\} = 2700567,7 / 99,25 = 27209,75 \text{ мм}^3$;

- момент сопротивления в упругой стадии относительно оси наименьшей жесткости: $W_z = I_z / \max\{y_{gc}, u_{lip}\} = 146163,87 / 36,98 = 3952,51 \text{ мм}^3$

Центр изгиба:

Положение центра изгиба рассчитывается относительно центра тяжести. Поскольку сечение симметричное относительно оси y, то центр изгиба будет находиться на главной оси. Все обозначения приняты в соответствии с рисунком 4.8.

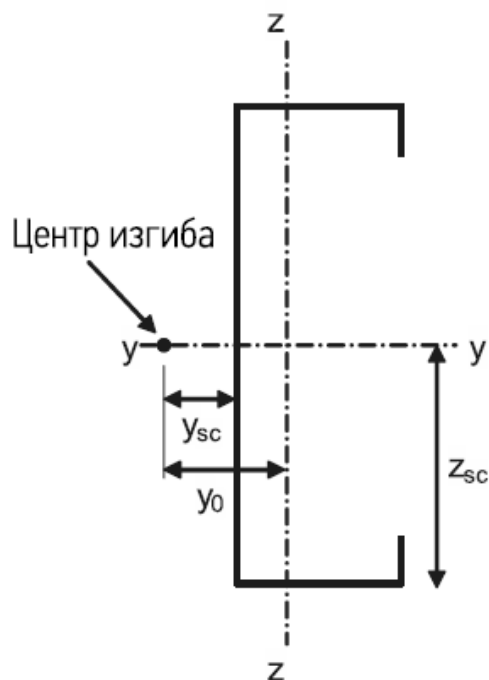


Рисунок 4.8 – Центр изгиба сечения

Таблица 4.8

К определению центра изгиба поперечного сечения профиля

Часть i	$(2 \cdot y_{i-1} \cdot z_{i-1} + 2 \cdot y_i \cdot z_i + y_{i-1} \cdot z_i + y_i \cdot z_{i-1}) \cdot dA_i / 6, \text{ мм}^4$
1	7191,16
2	0
3	0
4	340852,79
5	193236,02
Итого	541252,97

Центробежный момент инерции сечения относительно начального центра координат равен **сумме указанных значений в последнем столбце табл.4.8:**

$$I_{yz0} = 541252,97 \text{ мм}^4.$$

Центробежный момент инерции сечения относительно центра тяжести вычисляется следующим образом:

$$I_{yz} = I_{yz0} - (S_{y0} \cdot S_{z0} / A_{gr})$$

$$I_{yz} = 541252,97 - (46950 \cdot 5451,88 / 473,05) = 156,3 \text{ мм}^4,$$

Полученная погрешность относительно начального значения центробежного момента инерции составляет <1%. Относительно главных осей центробежный момент инерции сечения должен равняться нулю.

Таблица 4.9

Секториальные координаты

Часть i	ω_{0i} $y_{i-1} \cdot z_i + y_i \cdot z_{i-1}$	ω_i $\omega_{i-1} + \omega_{0i}$
0	-	0
1	-691,13	-691,13
2	0	-691,13
3	0	-691,13
4	-9627,25	-10318,38
5	-691,13	-11009,51

Таблица 4.10

К определению секториального момента инерции сечения профиля

i	$I_{y\omega 0}$	$I_{z\omega 0}$	$I_{\omega\omega 0}$	$(\omega_{i-1} + \omega_i) \cdot dA_i / 2$
1	$3,48 \cdot 10^5$	$-3,42 \cdot 10^4$	$9,94 \cdot 10^6$	$-0,72 \cdot 10^4$
2	$3,95 \cdot 10^5$	0	$0,33 \cdot 10^8$	$-2,45 \cdot 10^4$
3	0	$-1,99 \cdot 10^7$	$1,38 \cdot 10^8$	$-2 \cdot 10^5$
4	$1,22 \cdot 10^7$	$-7,74 \cdot 10^7$	$2,69 \cdot 10^9$	$-3,65 \cdot 10^5$
5	$1,08 \cdot 10^7$	$-3,7 \cdot 10^7$	$2,37 \cdot 10^9$	$-0,114 \cdot 10^5$
Итого	$23,7 \cdot 10^6$	$-12,9 \cdot 10^7$	$5,24 \cdot 10^9$	$-0,61 \cdot 10^6$

$$I_{\omega} = \Sigma(\omega_{i-1} + \omega_i) \cdot dA_i / 2 = 610000 \text{ мм}^3;$$

$$I_{y\omega} = -23700000 - 5451,88 \cdot (-610000) / 473,05 = -16669777,4 \text{ мм}^4;$$

$$I_{z\omega} = -129000000 - 45521,62 \cdot (-610000) / 473,05 = -70299676,14 \text{ мм}^4;$$

$$I_{\omega\omega} = 5,24 \cdot 10^9 - (-610000)^2 / 473,05 = 6,03 \cdot 10^9 \text{ мм}^4.$$

Координата у центра изгиба определяется следующим образом:

$$y_{sc} = (I_{z\omega} \cdot I_z - I_{y\omega} \cdot I_{yz}) / (I_y \cdot I_z - I_{yz}^2)$$

$$y_{sc} = \frac{(-70299676,14) \cdot 146163,87 - (-16669777,4) \cdot 156,3}{(2700567,7 \cdot 146163,87 - 156,3^2)} = -26,02 \text{ мм}.$$

Расстояние от центра тяжести до центра изгиба сечения находится следующим образом:

$$y_0 = -y_{sc} + y_{gc} = 26,02 + 11,52 = 37,54 \text{ мм}.$$

Координата z центра сдвига соответствует оси симметрии: $z_{sc} = 99,25 \text{ мм}$.

Секториальный момент инерции сечения вычисляется следующим образом:

$$I_{\omega} = I_{\omega\omega} + z_{sc} \cdot I_{y\omega} - y_{sc} \cdot I_{z\omega}$$

$$I_{\omega} = 6,03 \cdot 10^9 + 99,25 \cdot (-16669777,4) - 26,02 \cdot (-70299676,14) = 6,2 \cdot 10^9 \text{ мм}^6.$$

Таблица 4.11

К определению момента инерции сечения профиля при свободном кручении

Часть i	$dA_i \cdot t_i^2 / 3, \text{ мм}^4$
1	14,8
2	50,3
3	205,9
4	50,31
5	14,78
Итого	336,1

Момент инерции сечения профиля при свободном кручении равен сумме указанных значений в последнем столбце табл.4.11: $I_t = \sum dA_i \cdot (t_i)^2 / 3 = 336,1 \text{ мм}^4$.

4.3.2. Сводные геометрические характеристики поперечного сечения брутто без учета закруглений

- площадь сечения: $A_{gr} = 473,05 \text{ мм}^2$;
- расстояние от центра тяжести до полки: $z_{gc} = 99,25 \text{ мм}$;
- расстояние от центра тяжести до стенки: $y_{gc} = 11,52 \text{ мм}$;
- расстояние от центра тяжести до отгибов: $y_{lip} = 36,98 \text{ мм}$;
- момент инерции сечения относительно оси наибольшей жесткости: $I_y = 2700567,7 \text{ мм}^4$;
- момент инерции сечения относительно оси наименьшей жесткости: $I_z = 146163,87 \text{ мм}^4$;
- радиус инерции относительно оси наибольшей жесткости: $i_y = 75,56 \text{ мм}$;
- радиус инерции относительно оси наименьшей жесткости: $i_z = 17,58 \text{ мм}$;
- момент сопротивления в упругой стадии относительно оси наибольшей жесткости: $W_y = 27209,75 \text{ мм}^3$;
- момент сопротивления в упругой стадии относительно оси наименьшей жесткости: $W_z = 3952,51 \text{ мм}^3$;
- расстояние от центра изгиба до полки: $z_{sc} = 99,25 \text{ мм}$;
- расстояние от центра изгиба до стенки: $y_{sc} = -26,02 \text{ мм}$;
- расстояние от центра изгиба до центра тяжести: $y_0 = 37,54 \text{ мм}$;
- секториальный момент инерции сечения: $I_\omega = 6,2 \cdot 10^9 \text{ мм}^6$;
- момент инерции при свободном кручении: $I_t = 336,1 \text{ мм}^4$.

4.3.3. Геометрические характеристики поперечного сечения брутто с учетом закруглений

Влияние закругленных углов на геометрические характеристики сечения профиля учитывается в расчете путем уменьшения этих характеристик, рассчитанных для аналогичного сечения без учета закруглений, с использованием следующих выражений:

$$A_g = A_{g,sharp}(1-\delta);$$

$$I_g = I_{g,sharp}(1-2 \cdot \delta);$$

$$I_w = I_{w,\text{sharp}}(1-4\cdot\delta);$$

Такие характеристики, как положение главных осей и центра изгиба, для сечения с закругленными углами берутся равными тем, что были рассчитаны для сечения без учета закруглений.

Расчет характеристик сечения, уменьшенных с учетом закругленных углов, производится следующим образом:

$$A_g = 473,05 \cdot (1-0,015) = 465,95 \text{ мм}^2;$$

$$I_y = 2700567,7 \cdot (1-2\cdot0,015) = 2619550,67 \text{ мм}^4;$$

$$I_z = 146163,87 \cdot (1-2\cdot0,015) = 141778,95 \text{ мм}^4;$$

$$i_y = (2619550,67/465,95)^{0,5} = 74,98 \text{ мм};$$

$$i_z = (141778,95 /465,95)^{0,5} = 17,44 \text{ мм};$$

$$W_y = 2619550,67 /99,25 = 26393,46 \text{ мм}^3;$$

$$W_z = 141778,95 /36,98 = 3833,94 \text{ мм}^3;$$

$$I_w = 6,2 \cdot 10^9 \cdot (1-4\cdot0,015) = 5,83 \cdot 10^9 \text{ мм}^6.$$

4.3.4. Сводные геометрические характеристики поперечного сечения брутто с учетом закруглений

- площадь сечения: $A_{gr} = 465,95 \text{ мм}^2$;
- расстояние от центра тяжести до полки: $z_{gc} = 99,25 \text{ мм}$;
- расстояние от центра тяжести до стенки: $y_{gc} = 11,52 \text{ мм}$;
- расстояние от центра тяжести до отгибов: $y_{lip} = 36,98 \text{ мм}$;
- момент инерции сечения относительно оси наибольшей жесткости: $I_y = 2619550,67 \text{ мм}^4$;
- момент инерции сечения относительно оси наименьшей жесткости: $I_z = 141778,95 \text{ мм}^4$;
- радиус инерции относительно оси наибольшей жесткости: $i_y = 74,98 \text{ мм}$;
- радиус инерции относительно оси наименьшей жесткости: $i_z = 17,44 \text{ мм}$;
- момент сопротивления в упругой стадии относительно оси наибольшей жесткости: $W_y = 26393,46 \text{ мм}^3$;
- момент сопротивления в упругой стадии относительно оси наименьшей жесткости: $W_z = 3833,94 \text{ мм}^3$;
- расстояние от центра изгиба до полки: $z_{sc} = 99,25 \text{ мм}$;
- расстояние от центра изгиба до стенки: $y_{sc} = -26,02 \text{ мм}$;
- расстояние от центра изгиба до центра тяжести: $y_0 = 37,54 \text{ мм}$;
- секториальный момент инерции сечения: $I_w = 5,83 \cdot 10^9 \text{ мм}^6$;
- момент инерции при свободном кручении: $I_t = 336,1 \text{ мм}^4$.

4.4. Геометрические характеристики эффективного поперечного сечения профиля при сжатии

Размеры поперечного сечения и характеристики материала:

- высота сечения: $h = 150$ мм;
- ширина полки: $b_1 = b_2 = 50$ мм;
- высота отгиба полки: $c = 15$ мм;
- радиус закругления: $r = 3$ мм;
- номинальная толщина: $t_{\text{ном}} = 1,5$ мм;
- толщина стали: $t = 1,46$ мм;
- расчетный предел текучести: $R_y = 270$ Н/мм²;
- модуль упругости: $E = 203\,000$ Н/мм²;
- коэффициент Пуассона: $\nu = 0,3$;
- коэффициент надежности: $\gamma_m = 1,025$;
- высота стенки: $h_p = h - t_{\text{ном}} = 200 - 1,5 = 198,5$ мм;
- ширина полки: $b_{p1} = b_{p2} = b_1 - t_{\text{ном}} = 50 - 1,5 = 48,5$ мм;
- высота отгиба полки: $c_p = c - t_{\text{ном}}/2 = 15 - 1,5/2 = 14,25$ мм.

4.4.1. Геометрические характеристики эффективного поперечного сечения профиля без учета закруглений

Определение эффективного сечения полок и отгибов:

Эффективная ширина полок:

Для соотношения напряжений $\psi = 1$ (равномерное сжатие), $k\sigma=4$

$$\varepsilon = \sqrt{235/R_y}$$
$$\lambda_{p,b}^- = \frac{b_{pl}/t}{28,4 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k\sigma}}$$
$$\lambda_{p,b}^- = \frac{48,5/1,46}{28,4 \cdot \sqrt{235/270} \cdot \sqrt{4}} = \frac{33,22}{52,99} = 0,63$$
$$\rho = \frac{\overline{\lambda_{p,b}} - 0,055(3+\psi)}{\overline{\lambda_{p,b}}^2} = < 1;$$
$$\rho = \frac{0,63 - 0,055 \cdot (3+1)}{0,63^2} = 1 < 1;$$
$$b_{\text{eff}} = \rho \cdot b_{pl} = 1 \cdot 48,5 = 48,5$$

$$b_{e1}=b_{e2}= 0,5 \cdot b_{eff} = 0,5 \cdot 48,5 = 24,25$$

Эффективная ширина краевого элемента жесткости (отгиба). Коэффициент потери устойчивости определяется:

$$\text{если } b_{p,c}/b_{p1} < 0,35 \rightarrow k_{\sigma}=0,5;$$

$$b_{p,c}/b_{p1} = 12,57/48,5 = 0,27 < 0,35 \rightarrow k_{\sigma}=0,5.$$

$$\begin{aligned} & \frac{c_p/t}{\lambda_{p,c}^- \frac{1}{28,4 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_{\sigma}}}} \\ & \frac{14,25/1,46}{\lambda_{p,c}^- \frac{1}{28,4 \cdot \sqrt{235/270} \cdot \sqrt{0,5}}} = 0,53 \\ & \rho = \frac{\lambda_{p,c}^- - 0,188}{\lambda_{p,c}^-^2} \\ & \rho = \frac{0,53 - 0,188}{0,53^2} = 1,2 \end{aligned}$$

Эффективная ширина **вычисляется**:

$$c_{eff} = \rho \cdot c_p = 1,2 \cdot 14,25 = 17,1 \text{ мм.}$$

Эффективная площадь краевого элемента жесткости составляет:

$$A_s = t \cdot (b_{e2} + c_{eff}) = 1,46 \cdot (24,25 + 17,1) = 60,37 \text{ мм}^2.$$

Критическое напряжение при потере устойчивости для краевого элемента жесткости определяется по формуле:

$$\sigma_{cr,s} = \frac{2 \cdot \sqrt{K \cdot E \cdot I_s}}{A_s}$$

где K – это жесткость пружины на единицу длины;

I_s – это эффективный момент инерции сечения элемента жесткости.

$$b_1 = b_{p1} - \frac{b_{e2} \cdot t \cdot \frac{b_{e2}}{2}}{(b_{e2} + c_{eff}) \cdot t}$$

$$b_1 = 48,5 - \frac{24,25 \cdot 1,46 \cdot \frac{24,25}{2}}{(24,25 + 17,1) \cdot 1,46} = 41,4 \text{ мм}$$

$b_2 = b_1 = 50$ мм (равные полки);

$k_f = A_{s2}/A_{s1} = 60,37/60,37 = 1$ (осевое сжатие).

$$K = \frac{E \cdot t^3}{4 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \frac{1}{b_1^2 \cdot h_p + b_1^3 + 0,5 \cdot b_1 \cdot b_2 \cdot h_p \cdot k_f}$$

$$K = \frac{203000 \cdot 1,46^3}{4 \cdot (1 - 0,3^2)} \cdot \frac{1}{41,4^2 \cdot 198,5 + 41,4^3 + 0,5 \cdot 41,4 \cdot 41,4 \cdot 198,5 \cdot 1} = 0,3$$

$$I_s = \frac{b_{e2} \cdot t^3}{12} + \frac{c_{eff}^3 \cdot t}{12} + b_{e2} \cdot t \cdot \left(\frac{c_{eff}^2}{2 \cdot (b_{e2} + c_{eff})} \right)^2 + c_{eff} \cdot t \cdot \left(\frac{c_{eff}}{2} \left(\frac{c_{eff}}{2(b_{e2} + c_{eff})} \right) \right)^2$$

$$I_s = \frac{24,25 \cdot 1,46^3}{12} + \frac{17,1^3 \cdot 1,46}{12} + 24,25 \cdot 1,46 \cdot \left(\frac{17,1^3}{2 \cdot (24,25 + 17,1)} \right)^2 + 17,1 \cdot 1,46 \cdot \left(\frac{17,1}{2} \left(\frac{17,1^2}{2(24,25 + 17,1)} \right) \right)^2 = 1685 \text{ мм}^4$$

Поскольку у сечения профиля равные полки, жесткость пружины K и момент инерции сечения I_s применимы к обоим крайним элементам жесткости. При асимметричного сечении возникает необходимость повторить процесс расчета, рассмотренный выше, для верхнего и нижнего крайних элементов жесткости.

$$\sigma_{cr,s} = \frac{2 \cdot \sqrt{K \cdot E \cdot I_s}}{A_s}$$

$$\sigma_{cr,s} = \frac{2 \cdot \sqrt{0,3 \cdot 203000 \cdot 1685}}{60,37} = 2607,5 \text{ Н/мм}^2$$

$$\lambda_d^- = \sqrt{R_y / \sigma_{cr,s}} = 0,32$$

Если $0,65 < \lambda_d^- < 1,38$, то $\chi_d = 1,47 - 0,723 \cdot \lambda_d^-$

$\chi_d = 0,66 \lambda_d^-$, если $\lambda_d^- \geq 1,38$

$\chi_d = 1$, если $\lambda_d^- \leq 0,65$

$t_{red} = t \cdot \chi_d = 1,46 \cdot 1 = 1,46$.

Характеристики эффективного сечения стенки:

При равномерном сжатии соотношение напряжений $\psi = 1$ и коэффициент потери устойчивости $k_\sigma = 4$ (для внутреннего сжатого элемента).

$$\lambda_{p,h}^- \frac{h_p/t}{28,4 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_\sigma}}$$

$$\lambda_{p,h}^- \frac{198,5/1,46}{28,4 \cdot \sqrt{235/270 \cdot \sqrt{4}}} = 2,57$$

$$\rho = \frac{\lambda_{p,h}^- - 0,055 \cdot (3 + \psi)}{\lambda_{p,h}^{-2}}$$

$$\rho = \frac{2,57 - 0,055 \cdot (3 + 1)}{2,57^2} = 0,35$$

$$h_{\text{eff}} = \rho \cdot h_p = 0,35 \cdot 198,5 = 70 \text{ мм};$$

$$h_{e1} = h_{e2} = 0,5 \cdot h_{\text{eff}} = 0,5 \cdot 70 = 35 \text{ мм}.$$

Геометрические характеристики всего эффективного поперечного сечения:

Теоретическое эффективное сечение представлено на рисунке 4.9. Характеристики всего эффективного сечения рассчитаны с использованием этой теоретической геометрии.

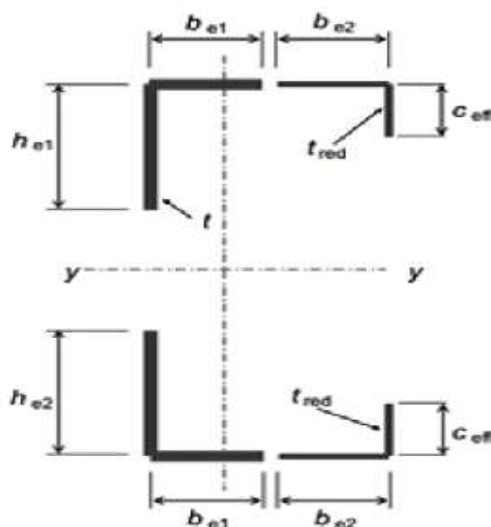


Рисунок 4.9 - Теоретическое эффективное сечение при сжатии

$$A_{\text{eff}} = t \cdot (2 \cdot b_{e1} + h_{e1} + h_{e2} + 2 \cdot (b_{e2} + c_{\text{eff}}) \cdot \chi_d)$$

$$A_{\text{eff}} = 1,46 \cdot (2 \cdot 24,25 + 35 + 35 + 2 \cdot (24,25 + 17,1) \cdot 1) = 293,8 \text{ мм}^2.$$

4.4.2. Сводные геометрические характеристики эффективного поперечного сечения профиля без учета закруглений

- эффективная площадь: $A_{\text{eff}} = 293,8 \text{ мм}^2$;
- расстояние от центра тяжести эффективного сечения до полки:
 $z_{\text{gc}} = 99,25 \text{ мм}$;
- расстояние от центра тяжести эффективного сечения до стенки:
 $y_{\text{gc}} = 11,52 \text{ мм}$;
- расстояние от центра тяжести эффективного сечения до отгибов:
 $y_{\text{lip}} = 36,98 \text{ мм}$;
- момент инерции эффективного сечения относительно оси наибольшей жесткости: $I_y = 2700567,7 \text{ мм}^4$;
- момент инерции эффективного сечения относительно оси наименьшей жесткости: $I_z = 146163,87 \text{ мм}^4$.

4.4.3. Геометрические характеристики эффективного поперечного сечения профиля с учетом закруглений

Для рассматриваемого в примере сечения тонкостенного профиля учитывается влияние закругленных углов. Такие геометрические характеристики, как положение главных осей, значения геометрических характеристик для сечения с закругленными углами принимаются равными тем, что были получены для сечения без учета закруглений.

Расчет характеристик сечения, уменьшенных с учетом закругленных углов, производится следующим образом:

$$A_{\text{eff}} = 293,8 \cdot (1 - 0,015) = 289,39 \text{ мм}^2;$$
$$I_y = 2700567,7 \cdot (1 - 2 \cdot 0,015) = 2619550,67 \text{ мм}^4;$$
$$I_z = 146163,87 \cdot (1 - 2 \cdot 0,015) = 141778,95 \text{ мм}^4.$$

4.4.4. Сводные геометрические характеристики эффективного поперечного сечения профиля с учетом закруглений

- эффективная площадь: $A_{\text{eff}} = 289,39 \text{ мм}^2$;
- расстояние от центра тяжести эффективного сечения до полки:
 $z_{\text{gc}} = 99,25 \text{ мм}$;
- расстояние от центра тяжести эффективного сечения до стенки:
 $y_{\text{gc}} = 11,52 \text{ мм}$;
- расстояние от центра тяжести эффективного сечения до отгибов:
 $y_{\text{lip}} = 36,98 \text{ мм}$;
- момент инерции эффективного сечения относительно оси наибольшей жесткости: $I_y = 2619550,67 \text{ мм}^4$;
- момент инерции эффективного сечения относительно оси наименьшей жесткости: $I_z = 141778,95 \text{ мм}^4$.

i	№	у корд. y _{i-1} , мм	z. корд. z _{i-1} , мм	№	у корд. y _i , мм	z. корд. z _i , мм	t, мм	мм	dA _i , мм ²
1	0	48,5	14,25	1	48,5	0	1,46	14,25	20,81
2	1	48,5	0	2	0	0	1,46	48,5	70,81
3	2	0	0	3	0	134,25	1,46	134,25	196
4	3	0	134,25	4	0	163,5	0	29,25	0
5	4	0	163,5	5	0	198,5	1,46	35	51,1
6	5	0	198,5	6	48,5	198,5	1,46	48,5	70,81
7	6	48,5	198,5	7	48,5	181,4	1,46	17,1	25
Итого:									434,53

Площадь: $A_{gr} = \Sigma dA_i = 434,53 \text{ мм}^2$.

Определим координату z центра тяжести:

Таблица 4.14

**К определению координаты z центра тяжести
поперечного сечения профиля**

Часть i	$(z_i + z_{i-1}) \cdot dA_i / 2, \text{ мм}^3$
1	148,27
2	0
3	13156,5
4	0
5	9249,1
6	14055,79
7	4748,75
Итого	41358,41

$S_{y0} = 41358,41 \text{ мм}^3$.

$Z_{gc} = S_{y0} / A_{gr} = 41358,41 / 434,53 = 95,2 \text{ мм};$

$Z_{gc} = z_{b1} = z_{b2} = 95,2 \text{ мм}.$

Определим координату y центра тяжести:

Таблица 4.15

**К определению координаты y центра тяжести
поперечного сечения профиля**

Часть i	$(y_i + y_{i-1}) \cdot dA_i / 2, \text{ мм}^3$
1	1009,29
2	1717,14
3	0
4	0
5	0
6	1717,14
7	1212,5
Итого	5656,07

$S_{z0} = 5656,07 \text{ мм}^3$.

$y_{gc} = S_{z0} / A_{gr} = 5656,07 / 434,53 = 13,02 \text{ мм}$

$y_{gc} = y_{b1} = 13,02 \text{ мм}$

$$y_{ip} = b_{p1} - y_{b1} = 48,5 - 13,02 = 35,48 \text{ мм.}$$

Моменты инерции сечения:

Таблица 4.16

К определению момента инерции поперечного сечения профиля относительно оси наибольшей жесткости

Часть i	$(z_i^2 + z_{i-1}^2 + z_i \cdot z_{i-1}) \cdot dA_i/3, \text{ мм}^4$
1	1408,58
2	0
3	1177506,8
4	0
5	1679303,56
6	2790073,32
7	902634,25
Итого	6550926,51

$$I_{y0} = 6550926,51 \text{ мм}^4.$$

$$I_y = I_{y0} - A_{gr} \cdot z_{gc}^2 = 6550926,51 - 434,53 \cdot 95,2^2 = 2612763,74 \text{ мм}^4$$

Таблица 4.17

К определению момента инерции поперечного сечения профиля относительно оси наименьшей жесткости

Часть i	$(y_i^2 + y_{i-1}^2 + y_i \cdot y_{i-1}) \cdot dA_i/3, \text{ мм}^4$
1	48950,32
2	55520,94
3	0
4	0
5	0
6	55520,94
7	58806,25
Итого	218797,75

$$I_{z0} = 218797,75 \text{ мм}^4.$$

$$I_z = I_{z0} - A_{gr} \cdot y_{gc}^2 = 218797,75 - 434,53 \cdot 13,02^2 = 145136,05 \text{ мм}^4.$$

$$A_{eff} = A_{eff,sharp} (1 - \delta) = 434,53 \cdot (1 - 0,015) = 428,01 \text{ мм}^2;$$

$$I_y = I_{y,sharp} (1 - 2 \cdot \delta) = 2612763,74 \cdot (1 - 2 \cdot 0,015) = 2534380,83 \text{ мм}^4;$$

$$I_z = I_{z,sharp} (1 - 2 \cdot \delta) = 145136,05 \cdot (1 - 2 \cdot 0,015) = 140781,97 \text{ мм}^4.$$

4.5.2. Сводные геометрические характеристики эффективного сечения с учетом закруглений

- эффективная площадь: $A_{eff} = 428,01 \text{ мм}^2$;

- расстояние от центра тяжести эффективного сечения до полки:

$$z_{gc} = 88,76 \text{ мм};$$

- расстояние от центра тяжести эффективного сечения до стенки:

$$y_{gc} = 13,02 \text{ мм};$$

- расстояние от центра тяжести эффективного сечения до отгибов:

$$y_{lip} = 35,48 \text{ мм};$$

- момент инерции эффективного сечения относительно оси наибольшей жесткости: $I_y = 6314272,47 \text{ мм}^4$;

- момент инерции эффективного сечения относительно оси наименьшей жесткости: $I_z = 6314272,47 \text{ мм}^4$.

Определение эффективного сечения сжатой полки и ее отгиба:

Для соотношения напряжений $\psi = 1$ (равномерное сжатие), $k_\sigma = 4$

$$\varepsilon = \sqrt{235/f_{yb}}.$$

$$\overline{\lambda}_{p,b} = \frac{b_{p1}/t}{28,4 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_\sigma}} = \frac{48,5/1,46}{28,4 \cdot \sqrt{235/270} \cdot \sqrt{4}} = 0,63;$$

$$\rho = \frac{\overline{\lambda}_{p,b} - 0,055(3+\psi)}{\overline{\lambda}_{p,b}^2} = \frac{0,63 - 0,055 \cdot (3+1)}{0,63^2} = 1 < 1;$$

$$b_{eff} = \rho \cdot b_{p1} = 1 \cdot 48,5 = 48,5 \text{ мм};$$

$$b_{e1} = b_{e2} = 0,5 \cdot b_{eff} = 0,5 \cdot 48,5 = 24,25 \text{ мм}.$$

Эффективная ширина краевого элемента жесткости (отгиба). Коэффициент потери устойчивости определяется следующим образом:

если $b_{p,c}/b_{p1} < 0,35 \rightarrow k_\sigma = 0,5$;

если $0,35 < b_{p,c}/b_{p1} < 0,6 \rightarrow k_\sigma = 0,5 + 0,83 \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{b_{p,c}}{b_{p1}} - 0,35\right)^2}$.

$$b_{p,c}/b_{p1} = 12,57/48,5 = 0,27 \rightarrow k_\sigma = 0,5.$$

$$\overline{\lambda}_{p,c} = \frac{c_p/t}{28,4 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_\sigma}} = \frac{14,25/1,46}{28,4 \cdot \sqrt{235/270} \cdot \sqrt{0,5}} = 0,53;$$

$$\rho = \frac{\overline{\lambda}_{p,c} - 0,188}{\overline{\lambda}_{p,c}^2} = \frac{0,53 - 0,188}{0,53^2} = 1,2.$$

Эффективная ширина определяется следующим образом:

$$c_{eff} = \rho \cdot c_p = 1,2 \cdot 14,25 = 17,1 \text{ мм}.$$

Эффективная площадь краевого элемента жесткости составляет:

$$A_s = t \cdot (b_{e2} + c_{eff}) = 1,46 \cdot (24,25 + 17,1) = 60,37 \text{ мм}^2.$$

Критическое напряжение при потере устойчивости для краевого элемента жесткости определяется по формуле:

$$\sigma_{cr,s} = \frac{2 \sqrt{K \cdot E \cdot I_s}}{A_s},$$

где K – это жесткость пружины на единицу длины;

I_s – это эффективный момент инерции сечения элемента жесткости.

$$b_1 = b_{p1} - \frac{b_{e2} \cdot t \cdot \frac{b_{e2}}{2}}{(b_{e2} + c_{eff}) \cdot t} = 48,5 - \frac{24,25 \cdot 1,46 \cdot \frac{24,25}{2}}{(24,25 + 17,1) \cdot 1,46} = 41,4 \text{ мм};$$

$$b_2 = b_1 = 50 \text{ мм (равные полки);}$$

$$k_f = A_{s2}/A_{s1} = 60,37/60,37 = 1 \text{ (осевое сжатие).}$$

$$K = \frac{203000 \cdot 1,46^3}{4 \cdot (1 - 0,3^2)} \cdot \frac{1}{41,4^2 \cdot 198,5 + 41,4^3 + 0,5 \cdot 41,4 \cdot 41,4 \cdot 198,5 \cdot 1} = 0,3;$$

$$I_s = \frac{24,25 \cdot 1,46^3}{12} + \frac{17,1^3 \cdot 1,46}{12} + 24,25 \cdot 1,46 \cdot \left(\frac{17,1^2}{2 \cdot (24,25 + 17,1)}\right)^2 + 17,1 \cdot 1,46 \times$$

$$\left(\frac{17,1}{2} - \left(\frac{17,1^2}{2 \cdot (24,25 + 17,1)}\right)\right)^2 = 1685 \text{ мм}^4.$$

Поскольку сечение имеет равные полки, жесткость пружины K и момент инерции сечения I_s применимы к обоим крайвым элементам жесткости. Если бы сечение было ассиметричным, возникла бы необходимость повторить процесс, продемонстрированный выше, для верхнего и нижнего крайвых элементов жесткости.

$$\sigma_{cr,s} = \frac{2\sqrt{0,3 \cdot 203000 \cdot 1685}}{60,37} = 2607,5 \text{ Н/мм}^2$$

$$\bar{\lambda}_d = \sqrt{f_y / \sigma_{cr,s}} = \sqrt{270 / 2607,5} = 0,32$$

Если $0,65 < \lambda \bar{d} < 1,38$, то $\chi_d = 1,47 - 0,723 \cdot \lambda \bar{d}$

$$\chi_d = 0,66 \lambda \bar{d}, \text{ если } \lambda \bar{d} \geq 1,38$$

$$\chi_d = 1, \text{ если } \lambda \bar{d} \leq 0,65$$

поскольку $\bar{\lambda}_d = 0,32 < 0,65$

$$\chi_d = 1$$

Определение эффективного сечения стенки:

Размер сжатой зоны с учетом эффективного сечения полки:

$$h_c = \frac{c_p \cdot \left(h_p - \frac{c_p}{2}\right) + b_{p2} \cdot h_p + \frac{h_p^2}{2} + c_{eff}^2 \cdot \chi_d / 2}{c_p + b_{p2} + h_p + b_{e1} + (b_{e2} + c_{eff}) \cdot \chi_d}$$

$$h_c = \frac{14,25 \cdot \left(198,5 - \frac{14,25}{2}\right) + 48,5 \cdot 198,5 + \frac{198,5^2}{2} + 17,1^2 \cdot 1 / 2}{14,25 + 48,5 + 198,5 + 24,25 + (24,25 + 17,1) \cdot 1} = 98,5 \text{ мм};$$

Соотношение напряжений определяется следующим образом:

$$\Psi = \frac{h_c - h_p}{h_c}$$

$$\Psi = \frac{98,5 - 198,5}{98,5} = -1,02$$

Коэффициент потери устойчивости для участков определяется следующим образом:

$$k_\sigma = 7,81 - 6,29 \cdot \Psi + 9,78 \cdot \Psi^2$$

$$k_\sigma = 7,81 - 6,29 \cdot (-1,02) + 9,78 \cdot (-1,02)^2 = 4,1;$$

$$\bar{\lambda}_{p,h} = \frac{h_p/t}{28,4 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_\sigma}} = \frac{198,5/1,46}{28,4 \cdot \sqrt{235/270} \cdot \sqrt{4,1}} = 2,5;$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_{p,h} - 0,055 \cdot (3 + \Psi)}{\bar{\lambda}_{p,h}^2} = \frac{2,5 - 0,055 \cdot (3 - 1,02)}{2,5^2} = 0,38.$$

$$h_{\text{eff}} = \rho \cdot h_c = 0,38 \cdot 98,5 = 37,68 \text{ мм};$$

$$h_{e1} = 0,4 \cdot h_{\text{eff}} = 0,4 \cdot 37,68 = 15,07 \text{ мм};$$

$$h_{e2} = 0,6 \cdot h_{\text{eff}} = 0,6 \cdot 37,68 = 22,6 \text{ мм}.$$

Эффективная ширина стенки разделяется на два участка следующим образом:

$$h_1 = h_{e1} = 15,07 \text{ мм};$$

$$h_2 = h_p - (h_c - h_{e2}) = 198,5 - (98,5 - 22,6) = 122,6 \text{ мм}.$$

4.5.3. Геометрические характеристики всего эффективного поперечного сечения профиля без учета закруглений

$$A_{\text{eff}} = t \cdot (c_p + b_{p2} + h_1 + h_2 + b_{e1} + (b_{e2} + c_{\text{eff}}) \cdot \chi_d) =$$

$$1,46 \cdot (14,25 + 48,5 + 15,07 + 122,6 + 24,25 + (24,25 + 17,1) \cdot 1) = 352,98 \text{ мм}^2.$$

Положение нейтральной оси относительно сжатой полки определяется следующим образом:

$$z_c = \frac{t \cdot (c_p \cdot (h_p - \frac{c_p}{2}) + b_{p2} \cdot h_p + h_2 \cdot (h_p - \frac{h_2}{2}) + \frac{h_1^2}{2} + c_{\text{eff}}^2 \cdot \frac{\chi_d}{2})}{A_{\text{eff}}}$$

$$z_c =$$

$$= \frac{1,46 \cdot (14,25 \cdot (198,5 - \frac{14,25}{2}) + 48,5 \cdot 198,5 + 122,6 \cdot (198,5 - \frac{122,6}{2}) + \frac{15,07^2}{2} + 17,1^2 \cdot \frac{1}{2})}{352,98}$$

$$= 121,7 \text{ мм}$$

Положение нейтральной оси относительно сжатой полки определяется следующим образом: $Z_t = h_p - z_c = 198,5 - 121,7 = 76,8$ мм.

$$I_{eff,y} = \frac{h_1^3 \cdot t}{12} + \frac{h_2^3 \cdot t}{12} + \frac{b_{p2} \cdot t^3}{12} + \frac{c_p^3 \cdot t}{12} + \frac{b_{e1} \cdot t^3}{12} + \frac{b_{e2} \cdot (\chi_d \cdot t)^3}{12} + \frac{c_{eff}^3 \cdot (\chi_d \cdot t)}{12} + c_p \cdot t \cdot (z_t - \frac{c_p}{2})^2 + b_{p2} \cdot t \cdot z_t^2 + h_2 \cdot t \cdot (z_t - \frac{h_2}{2})^2 + h_1 \cdot t \cdot (z_c - \frac{h_1}{2})^2 + b_{e1} \cdot t \cdot z_c^2 + b_{e2} \cdot (\chi_d \cdot t) \cdot z_c^2 + c_{eff} \cdot (\chi_d \cdot t) \cdot (z_c - \frac{c_{eff}}{2})^2$$

$$I_{eff,y} = \frac{15,07^2 \cdot 1,46}{12} + \frac{122,6^3 \cdot 1,46}{12} + \frac{48,5 \cdot 1,46^3}{12} + \frac{14,25^3 \cdot 1,46}{12} + \frac{24,25 \cdot 1,46^3}{12} + \frac{24,25 \cdot (1 \cdot 1,46)^3}{12} + \frac{17,1^3 \cdot (1 \cdot 1,46)}{12} + 14,25 \cdot 1,46 \cdot \left(76,8 - \frac{14,25}{2}\right)^2 + 48,5 \cdot 1,46 \cdot 76,8^2 + 122,6 \cdot 1,46 \cdot \left(76,8 - \frac{122,6}{2}\right)^2 + 15,07 \cdot 1,46 \cdot \left(121,7 - \frac{15,07}{2}\right)^2 + 24,25 \cdot 1,46 \cdot 121,7^2 + 24,25 \cdot (1 \cdot 1,46) \cdot 121,7^2 + 17,1 \cdot (1 \cdot 1,46) \cdot \left(121,7 - \frac{17,1}{2}\right)^2 = 2442041,06 \text{ мм}^2$$

$$W_{eff,yc} = \frac{I_{eff,y}}{z_c} = \frac{2442041,06}{121,7} = 20066,07 \text{ мм}^3$$

$$W_{eff,yt} = \frac{I_{eff,y}}{z_t} = \frac{2442041,06}{76,8} = 31797,41 \text{ мм}^3.$$

4.5.4. Сводные геометрические характеристики эффективного поперечного сечения профиля без учета закруглений

- эффективная площадь: $A_{eff} = 352,98 \text{ мм}^2$;
- расстояние от центра тяжести эффективного сечения до сжатой полки: $Z_c = 121,7 \text{ мм}$;
- расстояние от центра тяжести эффективного сечения до растянутой полки: $Z_t = 76,8 \text{ мм}$;
- момент инерции сечения относительно оси наибольшей жесткости: $I_{eff,y} = 2442041,06 \text{ мм}^4$;

- момент сопротивления сечения относительно оси наибольшей жесткости для сжатой полки: $W_{eff,yc}=20066,07\text{мм}^3$;
- момент сопротивления сечения относительно оси наибольшей жесткости для растянутой полки: $W_{eff,yt}=31797,41\text{мм}^3$.

4.5.5. Геометрические характеристики эффективного поперечного сечения профиля с учетом закруглений

Для данного сечения необходимо учитывать влияние закругленных углов на геометрические характеристики. Для таких характеристик, как положение главных осей, значения для сечения с закругленными углами берутся равными тем, что были рассчитаны для сечения без учета закруглений.

Влияние закругленных углов учитывается следующим образом:

$$A_{eff} = A_{eff,sharp}(1-\delta) = 352,98 \cdot (1-0,015) = 347,69 \text{ мм}^2;$$

$$I_y = I_{y,sharp}(1-2\cdot\delta) = 2442041,06 \cdot (1-2\cdot0,015) = 2368779,83 \text{ мм}^4;$$

$$W_{eff,yc} = \frac{I_{eff,y}}{z_c} = \frac{2442041,06}{121,7} = 20066,07 \text{ мм}^3;$$

$$W_{eff,yt} = \frac{I_{eff,y}}{z_t} = \frac{2442041,06}{76,8} = 31797,41 \text{ мм}^3.$$

4.5.6. Сводные геометрические характеристики эффективного поперечного сечения профиля с учетом закруглений

- эффективная площадь: $A_{eff}= 347,69 \text{ мм}^2$;
- расстояние от центра тяжести эффективного сечения до сжатой полки: $Z_c = 121,7 \text{ мм}$;
- расстояние от центра тяжести эффективного сечения до растянутой полки: $Z_t= 76,8 \text{ мм}$;
- момент инерции сечения относительно оси наибольшей жесткости: $I_{eff,y} = 2368779,83 \text{ мм}^4$;
- момент сопротивления сечения относительно оси наибольшей жесткости для сжатой полки: $W_{eff,yc} = 20066,07 \text{ мм}^3$;
- момент сопротивления сечения относительно оси наибольшей жесткости для растянутой полки: $W_{eff,yt} = 31797,41 \text{ мм}^3$.

4.6. Расчет на прочность при совместном действии изгиба и продольной силы

- длина ригеля: $L = 2\ 880 \text{ мм}$; шаг: $S = 600 \text{ мм}$.

4.6.1. Расчетные усилия

- расчетное значение продольного усилия: $N_{Ed} = 0,17 \text{ кН}$;
- расчетное значение поперечного усилия: $Q = 0,71 \text{ кН}$;

- максимальный расчетный момент: $M_{y,Ed} = 1,25 \text{ кН}\cdot\text{м}$.

Размеры профиля и свойства материала:

4.6.2. Характеристики поперечного сечения брутто

Принимаются по п.4.3.4. «Сводные геометрические характеристики сечения брутто»:

- площадь сечения: $A_{gr} = 465,95 \text{ мм}^2$;
- радиус инерции относительно оси наибольшей жесткости: $i_y = 74,98 \text{ мм}$;
- радиус инерции относительно оси наименьшей жесткости: $i_z = 17,44 \text{ мм}$;
- расстояние от полки до оси y (при сжатии): $y_{flange} = 99,25 \text{ мм}$;
- расстояние от стенки до оси z (при сжатии): $z_{web} = 11,52 \text{ мм}$;
- расстояние от центра изгиба до оси y : $z_0 = 0,00 \text{ мм}$;
- расстояние от центра изгиба до оси z : $y_0 = 37,54 \text{ мм}$;
- момент инерции при свободном кручении: $I_t = 336,1 \text{ мм}^4$;
- секториальный момент инерции сечения: $I_w = 5,83 \cdot 10^9 \text{ мм}^6$;
- момент инерции сечения относительно оси наибольшей жесткости: $I_y = 2619550,67 \text{ мм}^4$.

4.6.3. Характеристики эффективного поперечного сечения профиля

- эффективная площадь: $A_{eff} = 347,69 \text{ мм}^2$;
- момент сопротивления сечения относительно оси y в упругой стадии при изгибе: $W_{eff,y} = 26393,46 \text{ мм}^3$;
- момент сопротивления сечения относительно оси z в упругой стадии при изгибе: $W_{eff,z} = 3833,94 \text{ мм}^3$;
- расстояние от полки до оси y (при сжатии): $y_{flange} = 99,25 \text{ мм}$;
- расстояние от стенки до оси z (при сжатии): $z_{web} = 11,52 \text{ мм}$;
- момент инерции сечения относительно y (при изгибе): $I_{y,eff} = 2368779,83 \text{ мм}^4$.

Так как $Q = 0,71 \text{ кН} < Q_w = 0,5 \cdot 43115,03 = 21,56 \text{ кН}$, то действие поперечной силы можно не учитывать:

$$Q_w = \frac{\gamma_c \cdot h_w \cdot t \cdot R_s}{\sin \alpha}$$

$$Q_w = \frac{0,95 \cdot 198,5 \cdot 1,46 \cdot 156,6}{1} = 43115,03 \text{ кН}$$

$$R_s = 0,58 \cdot R_y = 0,58 \cdot 270 = 156,6 \text{ кН/мм}$$

4.6.4. Несущая способность сечения

4.6.4.1. Осевое сжатие

Расчетная несущая способность поперечного сечения на сжатие определяется формулой:

$$N_{c,Rd} = A_{eff} \cdot \frac{R_y}{\gamma_m}$$
$$N_{c,Rd} = 347,69 \cdot \frac{270 \cdot 10^{-3}}{1,025} = 91,59 \text{ кН}$$

4.6.4.2. Изгиб

Расчетная несущая способность на изгиб относительно оси y определяется по формуле:

$$M_{cy,Rd} = W_{eff,y} \cdot \frac{R_y}{\gamma_m}$$
$$M_{cy,Rd} = 26393,46 \cdot \frac{270 \cdot 10^{-6}}{1,025} = 6,95 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

Расчетная несущая способность на изгиб относительно оси z определяется следующим образом:

$$M_{cz,Rd} = W_{eff,z} \cdot \frac{R_y}{\gamma_m}$$
$$M_{cz,Rd} = 3833,94 \cdot \frac{270 \cdot 10^{-6}}{1,025} = 1,01 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

4.6.4.3. Совместное действие усилий

Эксцентриситет приложения осевых усилий за счет смещения нейтральной оси эффективного сечения относительно нейтральной оси сечения брутто приводит к появлению дополнительного момента, вызываемого продольными нагрузками, предположительно прикладываемыми по нейтральной оси сечения брутто.

Смещение по оси y при сжатии описывается выражением:

$$e_{Ny} = 99,25 - 99,25 = 0,0 \text{ мм};$$

Смещение по оси z при сжатии определяется формулой:

$$e_{Nz} = 11,52 - 11,52 = 0,0 \text{ мм};$$

Дополнительный момент относительно оси y от смещения осей:

$$\Delta M_{y,Ed} = e_{N,y} \cdot N_{ed} = 0 \cdot 0,17 = 0$$

Дополнительный момент относительно оси z от смещения осей:

$$\Delta M_{z,Ed} = e_{N,z} \cdot N_{ed} = 0 \cdot 0,17 = 0 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} + \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{M_{cy,Rd}} + \frac{M_{z,Ed} + \Delta M_{z,Ed}}{M_{cz,Rd}} \leq 1$$

$$\frac{0,17}{91,59} + \frac{1,25 + 0}{6,95} + \frac{0 + 0}{1,01} = 0,182 \leq 1$$

условие выполняется

4.7. Расчет на устойчивость при внецентренном сжатии элементов сплошного сечения

4.7.1. Несущая способность по потере устойчивости элемента

Потеря устойчивости в форме продольного изгиба относительно оси наибольшей жесткости (оси y). Расчетная длина относительно оси y принимается равной длине элемента: $L_{cr,y} = 2880$ мм.

$$\lambda_l = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{R_y}} = \pi \cdot \sqrt{\frac{203000}{270}} = 86,09$$

Условная гибкость:

$$\lambda^- = \frac{L_{cr} \cdot \sqrt{A_{eff}/A_{gr}}}{i \cdot \lambda_l}$$

$$\lambda^- = \frac{2880 \cdot \sqrt{347,69/465,95}}{74,98 \cdot 86,09} = 0,385$$

Для кривой потери устойчивости b коэффициент несовершенства α составляет 0,34:

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

$$\Phi = 0,5 \cdot (1 + 0,34 \cdot (0,385 - 0,2) + 0,385^2) = 0,6$$

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}}$$

$$\chi = \frac{1}{0,6 + \sqrt{0,6^2 - 0,385^2}} = 0,94 < 1$$

Несущая способность по потере устойчивости в форме продольного изгиба:

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A_{eff} \cdot R_y}{\gamma_M}$$

$$N_{b,Rd} = \frac{0,94 \cdot 347,69 \cdot 270 \cdot 10^{-3}}{1,025} = 86,09 \text{ кН}$$

Проверка выполнения условия:

$$N_{Ed}/N_{b,Rd} = 0,17/86,09 = 0,002 < 1 - \text{Условие выполняется.}$$

Потеря устойчивости в форме продольного изгиба относительно оси наименьшей жесткости (оси z):

Расчетная длина относительно оси z принимается равной половине длины элемента благодаря наличию раскрепления в уровне середины высоты:

$$L_{cr,z} = 2880/2 = 1440 \text{ мм};$$

$$\lambda_l = 86,09$$

Условная гибкость:

$$\lambda^- = \frac{L_{cr} \cdot \sqrt{A_{eff}/A_{gr}}}{i \cdot \lambda_l}$$

$$\lambda^- = \frac{2880 \cdot \sqrt{347,69/465,95}}{17,44 \cdot 86,09} = 1,67$$

Для кривой потери устойчивости α коэффициент несовершенства α составляет 0,34:

$$\Phi = 0,5 \cdot (1 + 0,34 \cdot (1,67 - 0,2) + 1,67^2) = 2,14$$

$$\chi = \frac{1}{2,14 + \sqrt{2,14^2 - 1,67^2}} = 0,29$$

Несущая способность по потере устойчивости в форме продольного изгиба:

$$N_{b,Rd} = \frac{0,29 \cdot 347,69 \cdot 270 \cdot 10^{-3}}{1,025} = 26,56 \text{ кН}$$

Проверка выполнения условия:

$$N_{Ed}/N_{b,Rd} = 0,17/26,56 = 0,006 < 1 - \text{Условие выполняется.}$$

4.7.2. Крутильная форма потери устойчивости

Расчетные длины для крутильной формы потери устойчивости составляют:

$$L_{T,y} = 2880 \text{ мм};$$

$$L_{T,z} = 1440 \text{ мм.}$$

Расчет полярного радиуса инерции выполняется следующим образом:

$$i_0^2 = i_y^2 + i_z^2 + y_0^2 + z_0^2$$

$$i_0^2 = 74,98^2 + 17,44^2 + 37,54^2 + 0^2 = 7335,41 \text{ мм}^2$$

Критическое усилие потери устойчивости по крутильной форме шарнирно опертого элемента определяется по формуле:

$$N_{cr,T} = \frac{1}{i_0^2} \left(G \cdot I_t + \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_w}{L_T^2} \right)$$

$$N_{cr,T} = \frac{1}{7335,41} \left(74000 \cdot 336,1 + \frac{3,14^2 \cdot 203000 \cdot 5,83 \cdot 10^9}{1440^2} \right) = 770,53 \text{ кН}$$

Условная гибкость:

$$\bar{\lambda}_T = \sqrt{\frac{A_{eff} \cdot R_y}{N_{cr}}}$$

$$\lambda_T = \sqrt{\frac{347,69 \cdot 270 \cdot 10^{-3}}{770,53}} = 0,35$$

Для кривой потери устойчивости в коэффициент несовершенства α равен 0,34:

$$\Phi_T = 0,5 \cdot (1 + 0,35 \cdot (0,35 - 0,2)) + 0,35^2 = 0,59$$

$$\chi_T = \frac{1}{0,59 + \sqrt{0,59^2 - 0,35^2}} = 0,94 < 1$$

Несущая способность по потере устойчивости в форме продольного изгиба:

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A_{eff} \cdot R_y}{\gamma_M}$$

$$N_{b,Rd} = \frac{0,94 \cdot 347,69 \cdot 270 \cdot 10^{-3}}{1,025} = 86,09 \text{ кН}$$

Проверка выполнения условия:

$$N_{Ed}/N_{b,Rd} = 0,17/86,09 = 0,002 < 1 - \text{Условие выполняется.}$$

4.7.3. Изгибно-крутильная форма потери устойчивости

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{L_{cr,y}^2}$$

$$N_{cr,y} = \frac{3,14^2 \cdot 203000 \cdot 2619550,67}{2880^2} = 632,12 \text{ кН}$$

$$\beta = 1 - \left(\frac{y_0}{i_0}\right)^2$$

$$\beta = 1 - \left(\frac{37,54}{85,65}\right)^2 = 0,81$$

Критическое усилие потери устойчивости по изгибно-крутильной форме определяется по формуле:

$$N_{cr,TF} = \frac{N_{cr,y}}{2\beta} \cdot \left(1 + \frac{N_{cr,T}}{N_{cr,y}} - \sqrt{\left(1 - \frac{N_{cr,T}}{N_{cr,y}}\right)^2 + 4 \cdot \left(\frac{y_0}{i_0}\right)^2 \cdot \frac{N_{cr,T}}{N_{cr,y}}}\right)$$

$$N_{cr,TF} = \frac{632,12}{2 \cdot 0,81} \cdot \left(1 + \frac{770,53}{632,12} - \sqrt{\left(1 - \frac{770,53}{632,12}\right)^2 + 4 \cdot \left(\frac{37,54}{85,65}\right)^2 \cdot \frac{770,53}{632,12}}\right)$$

$$= 314,04 \text{ кН}$$

Условная гибкость:

$$\lambda_{TF}^- = \bar{\lambda}_{TF} = \sqrt{\frac{A_{eff} \cdot R_y}{N_{cr}}} = \sqrt{\frac{347,69 \cdot 270 \cdot 10^{-3}}{314,04}} = 0,547$$

Для кривой потери устойчивости ν коэффициент несовершенства α равен 0,34:

$$\Phi_{TF} = 0,5 \cdot (1 + 0,34 \cdot (0,547 - 0,2)) + 0,547^2 = 0,71$$

$$\chi_E = \frac{1}{0,71 + \sqrt{0,71^2 - 0,547^2}} = 0,86 < 1$$

Несущая способность по потере устойчивости в форме продольного изгиба:

$$N_{b,Rd} = \frac{0,86 \cdot 347,69 \cdot 0,27}{1,025} = 78,76 \text{ кН}$$

Проверка выполнения условия:

$$N_{Ed}/N_{b,Rd} = 0,17/78,76 = 0,0022 < 1 - \text{Условие выполняется.}$$

Потеря устойчивости плоской формы изгиба:

Максимальная длина элемента между точками поперечного закрепления составляет половину длины элемента: $L = 1440$ мм.

Коэффициенты, зависящие от нагрузки и условий опирания:

$$C_1 = 1,127; C_2 = 0,454.$$

Коэффициент расчетной длины для поворота концов в плане: $k = 1,00$;

Коэффициент расчетной длины для скручивания на концах: $k_w = 1,00$.

Расстояние от уровня приложения нагрузки до центра изгиба принимается равным половине высоты сечения элемента:

$$z_R = 200/2 = 100 \text{ мм.}$$

При расчете M_{cr} используется коэффициент g . Его значение может принято с запасом как 1,00 либо быть рассчитано:

$$g = \sqrt{1 - \frac{I_z}{I_y}}$$

Принимаем $g=1$.

Критический момент потери устойчивости плоской формы изгиба в упругой стадии описывается формулой:

$$M_{cr} = C_1 \cdot \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{(k \cdot L)^2 \cdot g} \left(\sqrt{\left(\frac{k}{k_w}\right)^2 \cdot \frac{I_w}{I_z} + \frac{(kL)^2 G \cdot I_t}{\pi^2 \cdot E \cdot I_z} + (C_2 \cdot z_g)^2} - C_2 \cdot z_g \right)$$

$$M_{cr} = 1,127 \cdot \frac{3,14^2 \cdot 203000 \cdot 146163,87}{(1 \cdot 1440)^2 \cdot 1}$$

$$\left(\sqrt{\left(\frac{1}{1}\right)^2 \cdot \frac{6,2 \cdot 10^9}{146163,87} + \frac{(1 \cdot 1440)^2 74000 \cdot 336,1}{3,14^2 \cdot 203000 \cdot 146163,87} + (0,454 \cdot 100)^2} - 100 \cdot 0,454 \right) =$$

$$26380902,2 \text{ кН} \cdot \text{м.}$$

Для потери устойчивости плоской формы изгиба необходимо использовать кривую потери устойчивости ψ . Условная гибкость:

$$\lambda_{LT}^- = \sqrt{\frac{W_{y,eff} \cdot R_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{26393,46 \cdot 270 \cdot 10^{-6}}{26380902,2}} = 0,0005$$

Для кривой потери устойчивости ψ коэффициент несовершенства α равен 0,34:

$$\Phi_{LT} = 0,5 \cdot (1 + 0,34 \cdot (0,0005 - 0,2) + 0,0005^2) = 0,47$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{0,47 + \sqrt{0,47^2 - 0,0005^2}} = 1$$

Несущая способность по потере устойчивости в форме продольного изгиба:

$$M_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot W_{eff,y} \cdot R_y}{\gamma_{M1}}$$

$$M_{b,Rd} = \frac{1 \cdot 26393,46 \cdot 270 \cdot 10^{-6}}{1,025} = 6,95 \text{ кН}$$

Проверка выполнения условия:

$$M_{Ed}/M_{b,Rd} = 1,25/6,95 = 0,18 < 1 - \text{Условие выполняется}$$

4.7.4. Совместное действие усилия сжатия и изгибающего момента

Проверка на совместное действие изгибающего момента и продольной силы может быть выполнена расчетом второго порядка либо по следующей формуле:

$$\left(\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}}\right)^{0,8} + \left(\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}}\right)^{0,8} \leq 1$$
$$\left(\frac{0,17}{86,09}\right)^{0,8} + \left(\frac{1,25}{6,95}\right)^{0,8} = 0,26 \leq 1$$

условие выполняется

где $N_{b,Rd}$ – минимальное из значений несущей способности по потере устойчивости в форме продольного изгиба, крутильной и изгибно-крутильной формах;

M_{Ed} - включает в себя любые дополнительные моменты, возникающие в связи с эксцентриситетами.

4.8. Проверка по эксплуатационной пригодности

Для проверки по эксплуатационной пригодности необходимо всегда учитывать влияние закруглений углов на геометрические характеристики сечения. В рамках этого примера принято, что максимальное напряжение при расчете по эксплуатационной пригодности равно пределу текучести, деленному на 1,5.

$$I_{fic} = I_{gr} - \left(\frac{1}{1,5}\right) \cdot (I_{gr} - I_{eff})$$

$$I_{fic} = 2700567,7 - \left(\frac{1}{1,5}\right) \cdot (2700567,7 - 2368779,83) = 1776909,65 \text{ мм}^4$$

Коэффициент учета закруглений $\delta = 0,015$. С учетом закруглений углов момент инерции сечения при расчете по эксплуатационной пригодности определяется следующим образом:

$$I_{SLS} = I \cdot (1 - 2\delta) = 1776909,65 \cdot (1 - 2 \cdot 0,015) = 1723602,36 \text{ мм}^4.$$

Суммарная ветровая нагрузка:

$$W = L \cdot S \cdot q_k = 2880 \cdot 600 \cdot 0,23 \cdot 10^{-6} = 0,397 \text{ кН}$$

Прогиб от действия ветра равен:

$$f = \frac{5 \cdot W \cdot L^3}{384 \cdot E \cdot I_{SLS}}$$

$$f = \frac{5 \cdot 0,397 \cdot 2880^3 \cdot 10^3}{384 \cdot 203000 \cdot 1723602,36} = 0,35 \text{ мм}$$

Предельный прогиб принимается по СП 20.13330.2016[3] равным 1/300 длины элемента.

$$\delta_{limit} = \frac{2880}{300} = 9,6 > 0,35$$

Несущая способность профиля обеспечена.

5. ПРИМЕР 2

Произвести проверку сечения поперечных ребер из тонкостенных оцинкованных профилей в конструкции плиты покрытия.

5.1. Исходные данные для расчета

Район строительства – г. Москва. Снеговой район – III ($S_g=1,5$ кПа). Размеры кровельной панели покрытия в плане $3 \times 7,2$ м. Конструктивное решение панели приведено на рисунках 5.1 и 5.2. Панель выполнена из тонкостенных оцинкованных профилей и металлического профилированного листа. Тонкостенные оцинкованные профили выполняют роль поперечных ребер, имеют С-образное сечение SA-150-1,5 и расположены с шагом 1200 мм. Материал профилей - сталь марки 280. Сортамент стальных тонкостенных профилей представлен в Приложении 2. Профилированный лист НС35-1000-0,6 по ГОСТ 24045-2016. Кровельные панели опираются на фермы покрытия из ЛСТК, расположенные с шагом 3 м (рис.5.3).



Рисунок 5.1 – Каркас кровельной панели из ЛСТК (1-поперечные ребра каркаса, 2-продольные ребра каркаса)

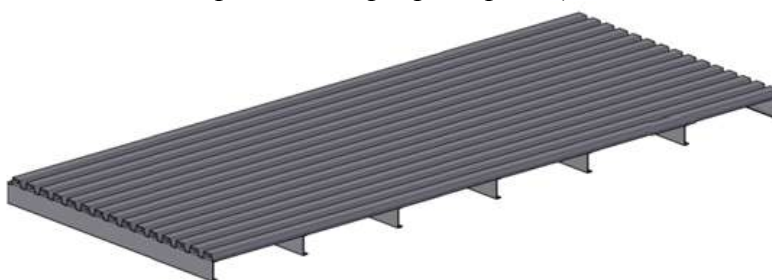


Рисунок 5.2 – Общий вид кровельной панели (продольное ребро каркаса условно не показано)

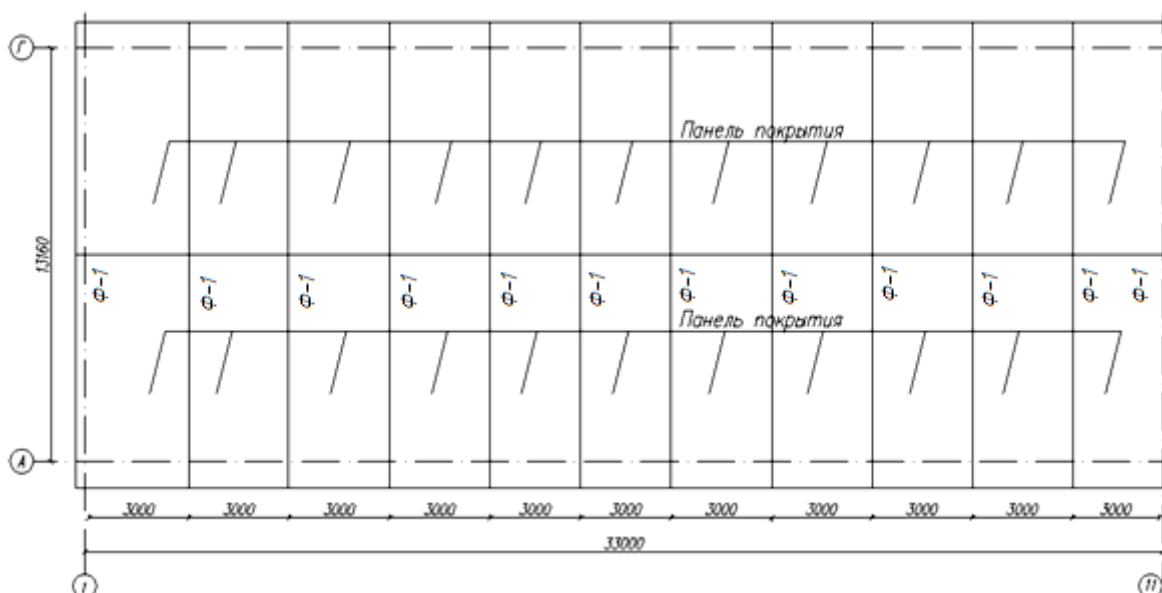


Рисунок 5.3 – Схема раскладки кровельных панелей

Размеры профиля SA150 -1,5 по Приложению 2 (рис.5.4):

- высота сечения - $h = 150$ мм;
- ширина полки - $b_1 = b_2 = 50$ мм;
- высота отгиба полки - $c = 15$ мм;
- радиус закругления - $r = 2$ мм;
- номинальная толщина $t_{\text{ном}} = 1,5$ мм.

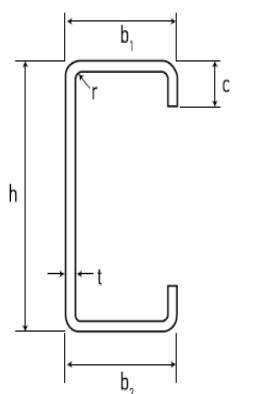


Рисунок 5.4 – Поперечное сечение профиля

Особенностью проектирования из тонкостенных стальных профилей является небольшая толщина профиля, что вызывает потерю местной устойчивости, в связи с чем, необходимо учитывать ее влияние, используя в расчетах редуцированные (эффективные) геометрические характеристики сечения. Эффективные сечения определяются по формулам п.7.3[1].

Вычисляются характеристики:

A_{eff} – эффективная площадь поперечного сечения;

J_{ef} – момент сопротивления эффективного сечения;

i_{ef} – радиус инерции эффективного сечения .

5.2. Оценка геометрических параметров поперечного сечения профиля

5.2.1. Определение расчетной толщины поперечного сечения профиля

Номинальная толщина профиля $t_{nom} = 1,5$ мм;

Толщина металлического (цинкового) покрытия $t_{m,p} = 0,02$ мм;

Расчетная толщина профиля $t = t_{nom} - 2 \cdot t_{m,p} = 1,5 - 2 \cdot 0,02 = 1,46$ мм

5.2.2. Размеры профиля по срединным линиям (рис.5.5)

- высота стенки: $h_p = h - t_{nom} = 150 - 1,5 = 148,5$ мм ;

- ширина полки: $b_{p1} = b_{p2} = b_1 - t_{nom} = 50 - 1,5 = 48,5$ мм

- высота отгиба полки: $c_p = c - t_{nom}/2 = 15 - 1,5/2 = 14,25$ мм;

- радиус закругления: $r_m = r + t/2 = 2 + 1,46/2 = 2,73$ мм;

- угол: $g_r = r_m \cdot (\tan\varphi/2 - \sin\varphi/2) = 2,73 \cdot (\tan 45^\circ - \sin 45^\circ) = 0,8$ мм.

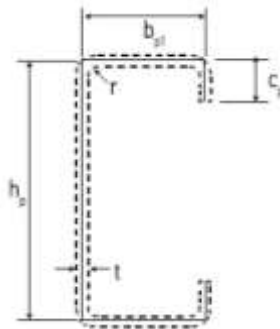


Рисунок 5.5 – Размеры профиля по срединным линиям

Размеры плоских участков:

- стенка: $b_{p,h} = h_p - 2 \cdot g_r = 148,5 - 2 \cdot 0,8 = 146,9$ мм;

- полка: $b_{p,b} = b_p - 2 \cdot g_r = 48,5 - 2 \cdot 0,8 = 46,9$ мм;

- отгиб полки: $b_{p,c} = c_p - g_r = 14,25 - 0,8 = 13,45$ мм.

Проверка соотношений геометрических параметров поперечного сечения и сравнение их с максимальными по табл. 3.7:

$b/t = 50/1,46 = 34,25 < 100$ - Условие выполняется;

$c/t = 15/1,46 = 10,27 < 40$ - Условие выполняется.

Проверка размеров элемента жесткости:

$c/b_1 = 15/50 = 0,3 - 0,2 < 0,3 < 0,5$ - Условие выполняется.

5.2.3. Влияние зон сгиба на геометрические характеристики поперечного сечения профиля

Проверка возможности пренебрежения закруглениями углов

$r = 2 \leq 5t = 5 \cdot 1,46 = 7,3$ – условие выполняется;

$r = 3 \geq 0,1 b_p = 0,1 \cdot 48,5 = 4,85$ – условие НЕ выполняется.

Невыполнение указанного выше условия требует учета влияния закругленных углов при расчете геометрических характеристик поперечного сечения профиля. Влияние закругленных углов учитывается уменьшением геометрических характеристик, рассчитанных для аналогичного поперечного сечения профиля без учета закруглений по формулам, приведенным в пункте 3.7.

$$\delta = 0,43 \cdot \frac{\sum_{j=1}^n r_j \cdot \frac{\varphi_j}{90}}{\sum_{j=1}^m b_{p,i}}$$

$$\delta = 0,43 \frac{4 \cdot 3 \cdot \frac{90}{90}}{146,9 + 2 \cdot 46,9 + 2 \cdot 13,45} = 0,019.$$

5.3. Определение геометрических характеристик поперечного сечения профиля

5.3.1. Геометрические характеристики поперечного сечения брутто (без учета закруглений)

Поперечное сечение профиля разделяется на плоские участки, каждый из которых характеризуется координатами его начала и конца на основе геометрии сечения в срединных линиях, как изображено на рисунке 5.6. Точки начала и конца каждого элемента называются узлами. Для удобства расчеты выполняются в табличной форме (табл.5.1-5.7).

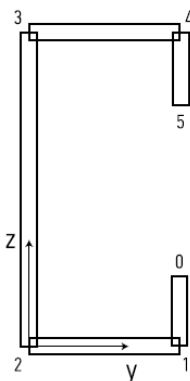


Рисунок 5.6 – Определение геометрические характеристик сечения брутто (без учета закруглений)

Таблица 5.1

Координаты узлов поперечного сечения профиля

Узел J	Координата x_j , мм	Координата y_j , мм
0	48,5	14,25
1	48,5	0
2	0	0
3	0	148,5

4	48,5	148,5
5	48,5	134,25

Таблица 5.2

Координаты плоских участков поперечного сечения профиля

Часть i	Начальный узел			Конечный узел			Толщина t _i , мм	Длина, мм	Площадь dA _i , мм ²
	№	х коорд. x _{i-1} , мм	у коорд. y _{i-1} , мм	№	х коорд. x _i , мм	у коорд. y _i , мм			
1	0	48,5	14,25	0	48,5	0	1,46	14,25	20,81
2	1	48,5	0	1	0	0	1,46	48,5	70,81
3	2	0	0	2	0	148,5	1,46	148,5	216,81
4	3	0	148,5	3	48,5	148,5	1,46	48,5	70,81
5	4	48,5	148,5	4	48,5	134,25	1,46	14,25	20,81
Итого:									400,05

Площадь: $A_{gr} = \Sigma dA_i = 400,05 \text{ мм}^2$.

Координата у центра тяжести (y_{gc}) **устанавливает** положение оси x сечения брутто. **Так как** ось x является осью симметрии сечения, то она же и будет центральной осью. Следовательно, y_1 и y_{b2} равны. **Вычисление** координаты y_{gc} показано для формальности и полноты расчета.

Координата x центра тяжести **устанавливает** положение главной оси y сечения брутто. Обозначения **приняты по** рисунку 5.7.

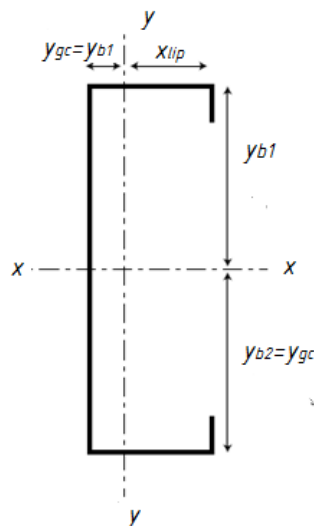


Рисунок 5.7 – Центр тяжести сечения

Вычислим координату у центра тяжести:

Таблица 5.3

К определению координаты у центра тяжести поперечного сечения профиля

Часть i	$(y_i + y_{i-1}) \cdot dA_i / 2, \text{ мм}^3$
1	148,27
2	0

3	16098,14
4	10515,29
5	2942,01
Итого	29703,71

Статический момент сечения для оси у равен сумме указанных выше значений в последнем столбце в табл.5.3: $S_{x0} = 29703,71 \text{ мм}^3$.

Координата у центра тяжести определяется следующим образом:

$$y_{gc} = S_{x0} / A_{gr} = 29703,71 / 400,05 = 74,25 \text{ мм};$$

$$y_{gc} = y_{b1} = y_{b2} = 74,25 \text{ мм}.$$

Вычислим координату у центра тяжести:

Таблица 5.4

К определению координаты x центра тяжести поперечного сечения профиля

Часть i	$(x_i + x_{i-1}) \cdot dA_i / 2, \text{ мм}^3$
1	1009,29
2	1717,14
3	0
4	1717,14
5	1009,29
Итого	5452,85

Статический момент сечения профиля для оси у определяется как сумма приведенных выше значений в последнем столбце табл.5.4: $S_{y0} = 5452,85 \text{ мм}^3$.

Координата x центра тяжести вычисляется:

$$x_{gc} = S_{y0} / A_{gr} = 5452,85 / 400,05 = 13,63 \text{ мм};$$

$$x_{gc} = x_{b1} = 13,63 \text{ мм};$$

$$x_{lip} = b_{p1} - x_{b1} = 48,5 - 13,63 = 34,87 \text{ мм}.$$

Моменты инерции сечения.

Таблица 5.5

К определению моментов инерции поперечного сечения профиля относительно оси наибольшей жесткости

Часть i	$(y_i^2 + y_{i-1}^2 + y_i \cdot y_{i-1}) \cdot dA_i / 3, \text{ мм}^4$
1	1408,58
2	0
3	1 593 716,11
4	1 561 519,82
5	416 297,34
Итого	3 575 941,85

Момент инерции сечения относительно начальной оси x (по нижней полке сечения) определяется как сумма приведенных выше значений в последнем столбце табл.5.5: $I_{x0} = 3\,575\,941,85 \text{ мм}^4$.

Момент инерции сечения относительно центральной оси x вычисляется по формуле:

$$I_x = I_{x0} - A_{gr} \cdot z_{gc}^2$$

$$I_x = 3\,575\,941,85 - 400,05 \cdot 74,25^2 = 1\,370\,441,20 \text{ мм}^4.$$

Таблица 5.6

К определению момента инерции поперечного сечения профиля относительно оси наименьшей жесткости

Часть i	$(x_i^2 + x_{i-1}^2 + x_i \cdot x_{i-1}) \cdot dA_i/3, \text{ мм}^4$
1	48 950,32
2	55 520,94
3	0
4	55 520,94
5	48 950,32
Итого	208 942,52

Момент инерции сечения относительно начальной оси y (по стенке балки) вычисляется как сумма приведенных выше значений в последнем столбце табл.5.6: $I_{y0} = 208\,942,52 \text{ мм}^4$.

Момент инерции сечения относительно центральной оси y находится следующим образом:

$$I_y = I_{y0} - A_{gr} \cdot y_{gc}^2$$

$$I_y = 208\,942,52 - 400,05 \cdot 13,63^2 = 134\,622,47 \text{ мм}^4.$$

Радиусы инерции:

- радиус инерции относительно оси наибольшей жесткости:

$$I_x = (I_x / A_{gr})^{0,5}$$

$$I_x = (1\,370\,441,20/400,05)^{0,5} = 58,53 \text{ мм}^2.$$

- радиус инерции относительно оси наименьшей жесткости:

$$I_y = (I_y / A_{gr})^{0,5}$$

$$I_y = (134\,622,47/400,05)^{0,5} = 18,34 \text{ мм}^2.$$

Моменты сопротивления в упругой стадии:

- момент сопротивления в упругой стадии относительно оси наибольшей жесткости: $W_x = I_x / \max\{y_{b1}, y_{b2}\} = 1\,370\,441,20/74,25 = 18457,12 \text{ мм}^3$;

- момент сопротивления в упругой стадии относительно оси наименьшей жесткости: $W_y = I_y / \max\{x_{gc}, x_{lip}\} = 134\,622,47/34,87 = 3860,70 \text{ мм}^3$

Центр изгиба:

Положение центра изгиба определяется относительно центра тяжести. Поскольку сечение симметрично относительно оси x, то центр изгиба будет расположен на главной оси. Обозначения приняты в соответствии с рисунком 5.8.

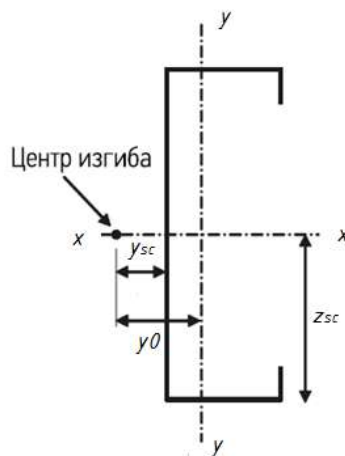


Рисунок 5.8 – Центр изгиба сечения

Таблица 5.7

К определению центра изгиба

Часть i	$(2 \cdot x_{i-1} \cdot y_{i-1} + 2 \cdot x_i \cdot y_i + x_{i-1} \cdot y_i + x_i \cdot y_{i-1}) \cdot dA_i / 6, \text{ мм}^4$
1	7 191,16
2	0
3	0
4	254 995,66
5	142 687,67
Итого	404 874,49

Центробежный момент инерции сечения относительно начального центра координат определяется как сумме указанных выше значений в последнем столбце табл.5.7:

$$I_{xy0} = 404\,874,49 \text{ мм}^4.$$

5.3.2. Сводные геометрические характеристики поперечного сечения брутто без учета закруглений

- площадь сечения: $A_{gr} = 400,05 \text{ мм}^2$;
- расстояние от центра тяжести до полки: $y_{gc} = 74,25 \text{ мм}$;
- расстояние от центра тяжести до стенки: $x_{gc} = 13,63 \text{ мм}$;
- расстояние от центра тяжести до отгибов: $x_{ip} = 34,87 \text{ мм}$;
- момент инерции сечения относительно оси наибольшей жесткости:
 $I_x = 1\,370\,441,20 \text{ мм}^4$;
- момент инерции сечения относительно оси наименьшей жесткости:
 $I_y = 134\,622,47 \text{ мм}^4$;
- радиус инерции относительно оси наибольшей жесткости: $i_x = 58,53 \text{ мм}$;
- радиус инерции относительно оси наименьшей жесткости: $i_y = 18,34 \text{ мм}$;

- момент сопротивления в упругой стадии относительно оси наибольшей жесткости: $W_x = 18\,457,12 \text{ мм}^3$;
- момент сопротивления в упругой стадии относительно оси наименьшей жесткости: $W_y = 3\,860,70 \text{ мм}^3$.

5.3.3. Геометрические характеристики поперечного сечения брутто с учетом закруглений

Влияние закругленных углов сечения профиля на его геометрические характеристики учитывается в расчете путем уменьшения характеристик, вычисленных для аналогичного сечения без учета закруглений, путем использования следующих приближений:

$$A_g = A_{g,\text{sharp}}(1-\delta);$$

$$I_g = I_{g,\text{sharp}}(1-2\cdot\delta);$$

$$I_w = I_{w,\text{sharp}}(1-4\cdot\delta);$$

При определении геометрических характеристик сечения с закругленными углами в формулы подставляются значения соответствующих характеристик для аналогичного сечения без учета закруглений.

Определение геометрических характеристик сечения с учетом закругленных углов, производится следующим образом:

$$A_g = 400,05 \cdot (1-0,019) = 392,45 \text{ мм}^2;$$

$$I_x = 1\,370\,441,20 \cdot (1-2\cdot0,019) = 1\,318\,364,43 \text{ мм}^4;$$

$$I_y = 134\,622,47 \cdot (1-2\cdot0,019) = 129\,506,82 \text{ мм}^4;$$

$$I_x = (1\,318\,364,43 / 392,45)^{0,5} = 57,96 \text{ мм};$$

$$I_y = (129\,506,82 / 392,45)^{0,5} = 18,17 \text{ мм};$$

$$W_x = 1\,318\,364,43 / 74,25 = 17\,755,75 \text{ мм}^3;$$

$$W_y = 129\,506,82 / 34,87 = 3\,713,99 \text{ мм}^3.$$

5.3.4. Сводные геометрические характеристики поперечного сечения профиля с учетом закруглений

- площадь сечения: $A_{gr} = 392,45 \text{ мм}^2$;
- расстояние от центра тяжести до полки: $y_{gc} = 74,25 \text{ мм}$;
- расстояние от центра тяжести до стенки: $x_{gc} = 13,63 \text{ мм}$;
- расстояние от центра тяжести до отгибов: $x_{ip} = 34,87 \text{ мм}$;
- момент инерции сечения относительно оси наибольшей жесткости:
 $I_x = 1\,318\,364,43 \text{ мм}^4$;

- момент инерции сечения относительно оси наименьшей жесткости:
 $I_y = 129\,506,82 \text{ мм}^4$;
 - радиус инерции относительно оси наибольшей жесткости:
 $i_x = 57,96 \text{ мм}$;
 - радиус инерции относительно оси наименьшей жесткости: $i_y = 18,17 \text{ мм}$;
 - момент сопротивления в упругой стадии относительно оси наибольшей жесткости: $W_x = 17\,755,75 \text{ мм}^3$;
 - момент сопротивления в упругой стадии относительно оси наименьшей жесткости: $W_y = 3\,713,99 \text{ мм}^3$;
- На рисунке 20 показаны полное и редуцированное сечения профиля SA 150-50-15-1,5.

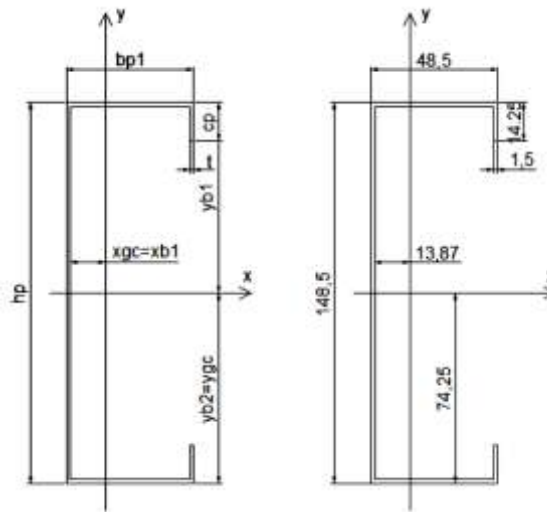


Рисунок 5.9– Сечения брутто профиля

5.4. Геометрические характеристики эффективного поперечного сечения профиля при изгибе относительно оси наибольшей жесткости

Размеры поперечного сечения и характеристики материала:

- высота сечения: $h = 150 \text{ мм}$;
- ширина полки: $b_1 = b_2 = 50 \text{ мм}$;
- высота отгиба полки: $c = 15 \text{ мм}$;
- радиус закругления: $r = 2 \text{ мм}$;
- номинальная толщина: $t_{\text{ном}} = 1,5 \text{ мм}$;
- толщина стали: $t = 1,46 \text{ мм}$;
- расчетный предел текучести: $R_y = 270 \text{ Н/мм}^2$;
- модуль упругости: $E = 206\,000 \text{ Н/мм}^2$;
- коэффициент Пуассона: $\nu = 0,3$
- коэффициент надежности: $\gamma_m = 1,025$;

$$h_p = h - t_{\text{ном}} = 150 - 1,5 = 148,5 \text{ мм};$$

$$b_{p1} = b_{p2} = b_1 - t_{\text{ном}} = 50 - 1,5 = 48,5 \text{ мм};$$

$$c_p = c - t_{\text{ном}}/2 = 15 - 1,5/2 = 14,25 \text{ мм}.$$

Эффективное поперечное сечение тонкостенного профиля с отгибами полок при изгибе изображено на рисунке 5.10. В сечении имеются исключаемые участки стенки, а также уменьшенная толщина t_{cd} элемента жесткости и прилегающего участка полки.

Алгоритм предполагает вначале расчет отдельно полки(стенки) сечения, после рассчитывают все сечение.

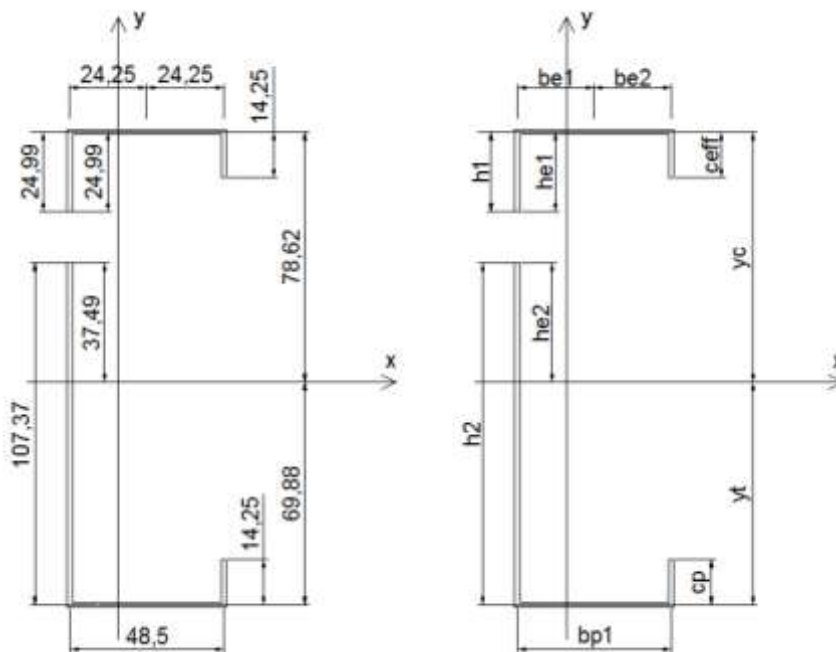


Рисунок 5.10 - Теоретическое эффективное сечение при изгибе

5.4.1. Геометрические характеристики эффективного поперечного сечения профиля без учета закруглений

Определение эффективного сечения полок и отгибов:

Эффективная ширина полок:

Для соотношения напряжений $\psi = 1$ (равномерное сжатие), $k_\sigma=4$

$$\varepsilon = \sqrt{235/R_y}.$$

$$\overline{\lambda}_{p,b} = \frac{b_{p1}/t}{28,4 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_\sigma}}$$

$$\overline{\lambda}_{p,b} = \frac{48,5/1,46}{28,4 \cdot \sqrt{235/270} \cdot \sqrt{4}} = 0,63;$$

$$\rho = \frac{\overline{\lambda}_{p,b} - 0,055(3 + \psi)}{\overline{\lambda}_{p,b}^2} < 1;$$

$$\rho = \frac{0,63 - 0,055 \cdot (3 + 1)}{0,63^2} = 1,03 > 1;$$

Т.к. $\rho = 1,03 > 1$, то $\rho = 1$.

$$b_{\text{eff}} = \rho \cdot b_{p1} = 1 \cdot 48,5 = 48,5 \text{ мм};$$

$$b_{e1} = b_{e2} = 0,5 \cdot b_{\text{eff}} = 0,5 \cdot 48,5 = 24,25 \text{ мм}.$$

Эффективная ширина краевого элемента жесткости (отгиба). Коэффициент потери устойчивости определяется следующим образом:

если $b_{p,c}/b_{p1} < 0,35 \rightarrow k_{\sigma} = 0,5$;

если $0,35 < b_{p,c}/b_{p1} < 0,6 \rightarrow k_{\sigma} = 0,5 + 0,83 \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{b_{p,c}}{b_{p1}} - 0,35\right)^2}$.

$b_{p,c}/b_{p1} = 14,25/48,5 = 0,29 \rightarrow k_{\sigma} = 0,5$.

$$\overline{\lambda}_{p,c} = \frac{c_p/t}{28,4 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_{\sigma}}}$$

$$\overline{\lambda}_{p,c} = \frac{14,25/1,46}{28,4 \cdot \sqrt{235/270} \cdot \sqrt{0,5}} = 0,52;$$

$$\rho = \frac{\overline{\lambda}_{p,c} - 0,188}{\overline{\lambda}_{p,c}^2}$$

$$\rho = \frac{0,52 - 0,188}{0,52^2} = 1,23$$

Т.к. $\rho = 1,23 > 1$, то $\rho = 1$.

Эффективная ширина определяется следующим образом:

$$c_{\text{eff}} = \rho \cdot c_p = 1 \cdot 14,25 = 14,25 \text{ мм}.$$

Эффективная площадь краевого элемента жесткости составляет:

$$A_s = t \cdot (b_{e2} + c_{\text{eff}}) = 1,46 \cdot (24,25 + 14,25) = 56,21 \text{ мм}^2.$$

Критическое напряжение при потере устойчивости для краевого элемента жесткости определяется по формуле:

$$\sigma_{cr,s} = \frac{2\sqrt{K \cdot E \cdot I_s}}{A_s},$$

где K – это жесткость пружины на единицу длины;

I_s – это эффективный момент инерции сечения элемента жесткости.

$$b_1 = b_{p1} - \frac{b_{e2} \cdot t \cdot \frac{b_{e2}}{2}}{(b_{e2} + c_{eff}) \cdot t}$$

$$b_1 = 48,5 - \frac{24,25 \cdot 1,46 \cdot \frac{24,25}{2}}{(24,25 + 14,25) \cdot 1,46} = 40,86 \text{ мм},$$

$$b_2 = b_1 = 40,86 \text{ мм (равные полки);}$$

$$k_f = A_{s2}/A_{s1} = 32,18/32,18 = 1 \text{ (осевое сжатие).}$$

$$K = \frac{E \cdot t^3}{4 \cdot (1 - \nu^2)} \cdot \frac{1}{b_1^2 \cdot h_p + b_1^3 + 0,5 \cdot b_1 \cdot b_2 \cdot h_p \cdot k_f};$$

$$K = \frac{206000 \cdot 1,46^3}{4 \cdot (1 - 0,3^2)} \cdot \frac{1}{40,86^2 \cdot 148,5 + 40,86^3 + 0,5 \cdot 40,86 \cdot 40,86 \cdot 148,5 \cdot 1} = 0,40;$$

$$I_s = \frac{b_{e2} \cdot t^3}{12} + \frac{c_{eff}^3 \cdot t}{12} + b_{e2} \cdot t \cdot \left(\frac{c_{eff}^2}{2 \cdot (b_{e2} + c_{eff})} \right)^2 + c_{eff} \cdot t \cdot \left(\frac{c_{eff}}{2} \left(\frac{c_{eff}^2}{2 \cdot (b_{e2} + c_{eff})} \right) \right)^2$$

$$I_s = \frac{24,25 \cdot 1,46^3}{12} + \frac{14,25^3 \cdot 1,46}{12} + 24,25 \cdot 1,46 \cdot \left(\frac{14,25^2}{2 \cdot (24,25 + 14,25)} \right)^2 + 14,25 \cdot 1,46 \cdot \left(\frac{14,25}{2} - \left(\frac{14,25^2}{2 \cdot (24,25 + 14,25)} \right) \right)^2 = 1023,6 \text{ мм}^4.$$

Для симметричного сечения с равными полками жесткость пружины K и момент инерции сечения I_s применимы к обоим крайвым элементам жесткости. При ассиметричном сечении профиля расчет, рассмотренный выше, выполняется для верхнего и нижнего крайвых элементов жесткости.

$$\sigma_{cr,s} = \frac{2\sqrt{0,4 \cdot 206000 \cdot 1023,6}}{56,21} = 326,77 \text{ Н/мм}^2;$$

$$\bar{\lambda}_d = \sqrt{R_y / \sigma_{cr,s}} = \sqrt{270 / 326,77} = 0,91.$$

поскольку $0,65 < \bar{\lambda}_d = 0,91 < 1,38$

$$\chi_d = 1,47 - 0,723 \cdot \bar{\lambda}_d = 1,47 - 0,723 \cdot 0,91 = 0,81.$$

$$t_{red} = t \cdot \chi_d = 1,46 \cdot 0,81 = 1,18.$$

Определение эффективного сечения стенки:

Размер сжатой зоны с учетом эффективного сечения полки:

$$h_c = \frac{c_p \left(h_p - \frac{c_p}{2} \right) + b_{p2} \cdot h_p + \frac{h_p^2}{2} + c_{eff}^2 \cdot \chi_d / 2}{c_p + b_{p2} + h_p + b_{e1} + (b_{e2} + c_{eff}) \cdot \chi_d};$$

$$h_c = \frac{14,25 \left(148,5 - \frac{14,25}{2} \right) + 48,5 \cdot 148,5 + \frac{148,5^2}{2} + 14,25^2 \cdot 0,81 / 2}{14,25 + 48,5 + 148,5 + 24,25 + (24,25 + 14,25) \cdot 0,81} = 76,21;$$

Соотношение напряжений определяется следующим образом:

$$\psi = \frac{h_c - h_p}{h_c} = \frac{76,21 - 145,8}{76,21} = -0,913;$$

Коэффициент потери устойчивости для участков определяется:

$$k_\sigma = 7,81 - 6,29 \cdot \psi + 9,78 \cdot \psi^2 = 21,71;$$

$$\overline{\lambda}_{p,h} = \frac{h_p / t}{28,4 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_\sigma}} = \frac{148,5 / 1,46}{28,4 \cdot \sqrt{235 / 270} \cdot \sqrt{21,71}} = 0,81;$$

$$\rho = \frac{\overline{\lambda}_{p,h} - 0,055 \cdot (3 + \psi)}{\overline{\lambda}_{p,h}^2} = \frac{0,81 - 0,055 \cdot (3 - 0,913)}{0,81^2} = 0,82;$$

$$h_{eff} = \rho \cdot h_c = 0,82 \cdot 76,21 = 62,49 \text{ мм};$$

$$h_{e1} = 0,4 \cdot h_{eff} = 0,4 \cdot 62,49 = 24,99 \text{ мм.}$$

$$h_{e2} = 0,6 \cdot h_{eff} = 0,6 \cdot 62,49 = 37,49 \text{ мм.}$$

Эффективная ширина стенки разделяется на два участка следующим образом:

$$h_1 = h_{e1} = 24,99 \text{ мм.}$$

$$h_2 = h_p - (h_c - h_{e2}) = 148,5 - (76,21 - 37,49) = 109,78 \text{ мм.}$$

5.4.2. Геометрические характеристики всего эффективного поперечного сечения **профиля** без учета закруглений

$$A_{eff} = t \left(c_p + b_{p2} + h_1 + h_2 + b_{e1} + (b_{e2} + c_{eff}) \chi_d \right);$$

$$A_{eff} = 1,46 (14,25 + 48,5 + 24,99 + 109,78 + 24,25 + (24,25 + 14,25) 0,81)$$

$$= 369,31 \text{ мм}^2;$$

Положение нейтральной оси относительно сжатой полки определяется следующим образом:

$$y_c = \frac{t \left(c_p \left(h_p - c_p / 2 \right) + b_{p2} \cdot h_p + h_2 \cdot \left(h_p - h_2 / 2 \right) + \frac{h_1^2}{2} + c_{eff}^2 \cdot \chi_d / 2 \right)}{A_{eff}};$$

$$y_c = \frac{1,46 \left(14,25 \left(148,5 - \frac{14,25}{2} \right) + 48,5 \cdot 148,5 + 109,78 \cdot \left(148,5 - \frac{109,78}{2} \right) + \frac{24,99^2}{2} + 14,25^2 \cdot \frac{0,81}{2} \right)}{369,31} = 78,62 \text{ мм};$$

Положение нейтральной оси относительно сжатой полки определяется следующим образом:

$$y_t = h_p - y_c = 148,5 - 78,62 = 69,88 \text{ мм.}$$

$$I_{eff,x} = \frac{h_1^3 t}{12} + \frac{h_2^3 t}{12} + \frac{b_{p2} t^3}{12} + \frac{c_p^3 t}{12} + \frac{b_{e1} t^3}{12} + \frac{b_{e2} (\chi_d t)^3}{12} + \frac{c_{eff}^3 (\chi_d t)}{12} + c_p t \cdot \left(y_t - \frac{c_p}{2} \right)^2 + b_{p2} t y_t^2 + h_2 t \cdot \left(y_t - \frac{h_2}{2} \right)^2 + h_1 t \cdot \left(y_t - \frac{h_1}{2} \right)^2 + b_{e1} t y_c^2 + b_{e2} \cdot (\chi_d t) \cdot z_c^2 + c_{eff} \cdot (\chi_d t) \cdot \left(y_c - c_{eff}/2 \right)^2;$$

$$I_{eff,x} = \frac{24,99^3 \cdot 1,46}{12} + \frac{109,78^3 \cdot 1,46}{12} + \frac{48,5 \cdot 1,46^3}{12} + \frac{14,25^3 \cdot 1,46}{12} + \frac{24,25 \cdot 1,46^3}{12} + \frac{24,25 \cdot (0,81 \cdot 1,46)^3}{12} + \frac{14,24^3 (0,81 \cdot 1,46)}{12} + 14,25 \cdot 1,46 \cdot \left(69,88 - \frac{14,25}{2} \right)^2 + 48,5 \cdot 1,46 \cdot 69,88^2 + 109,78 \cdot 1,46 \cdot \left(69,88 - \frac{109,78}{2} \right)^2 + 24,99 \cdot 1,46 \left(69,88 - \frac{24,99}{2} \right)^2 + 24,25 \cdot 1,46 \cdot 78,62^2 + 24,25 \cdot (0,81 \cdot 1,46) \cdot 78,62^2 + 14,25 (0,81 \cdot 1,46) (78,62 - 14,25/2)^2 = 1\,229\,647,04 \text{ мм}^4;$$

$$W_{eff,x.c} = \frac{I_{eff,x}}{y_c} = \frac{1229647,04}{78,62} = 15\,640,4 \text{ мм}^3;$$

$$W_{eff,x.t} = \frac{I_{eff,x}}{y_t} = \frac{1229647,04}{69,88} = 17\,596,6 \text{ мм}^3.$$

5.4.3. Сводные геометрические характеристики эффективного поперечного сечения профиля без учета закруглений

- эффективная площадь: $A_{eff} = 369,31 \text{ мм}^2$;
- расстояние от центра тяжести эффективного сечения до сжатой полки: $y_c = 78,62 \text{ мм}$;
- расстояние от центра тяжести эффективного сечения до растянутой полки: $y_t = 69,88 \text{ мм}$;

- момент инерции эффективного сечения относительно оси наибольшей жесткости: $I_{eff,x} = 1\,229\,647,04 \text{ мм}^4$;
- момент сопротивления сечения относительно оси наибольшей жесткости для сжатой полки: $W_{eff,x.c} = 15\,640,4 \text{ мм}^3$;
- момент сопротивления сечения относительно оси наибольшей жесткости для растянутой полки: $W_{eff,x.t} = 17\,596,6 \text{ мм}^3$.

5.4.4. Геометрические характеристики эффективного поперечного сечения профиля с учетом закруглений

$$A_{eff} = A_{eff,sharp}(1-\delta) = 369,31 \cdot (1-0,019) = 362,29 \text{ мм}^2;$$

$$I_{eff,x} = I_{x,sharp}(1-2 \cdot \delta) = 1\,229\,647,04 \cdot (1-2 \cdot 0,019) = 1\,182\,920,5 \text{ мм}^4;$$

$$W_{eff,x.c} = \frac{I_{eff,x}}{y_c} = \frac{1\,182\,920,5}{78,62} = 15\,046,06 \text{ мм}^3;$$

$$W_{eff,x.t} = \frac{I_{eff,x}}{y_t} = \frac{1\,182\,920,5}{69,88} = 16\,927,88 \text{ мм}^3.$$

5.4.5. Сводные геометрические характеристики эффективного сечения с учетом закруглений

- эффективная площадь: $A_{eff} = 362,29 \text{ мм}^2$;
- расстояние от центра тяжести эффективного сечения до сжатой полки: $y_c = 78,62 \text{ мм}$;
- расстояние от центра тяжести эффективного сечения до растянутой полки: $y_t = 69,88 \text{ мм}$;
- момент инерции сечения относительно оси наибольшей жесткости: $I_{eff,x} = 1\,182\,920,5 \text{ мм}^4$;
- момент сопротивления сечения относительно оси наибольшей жесткости для сжатой полки: $W_{eff,x.c} = 15\,046,06 \text{ мм}^3$;
- момент сопротивления сечения относительно оси наибольшей жесткости для растянутой полки: $W_{eff,x.t} = 16\,927,88 \text{ мм}^3$.

5.5. Расчет на прочность элементов при изгибе

5.5.1. Сбор нагрузки на балку

В соответствии с [3] производим сбор нагрузок.

Нагрузками, действующими на панель, являются (табл.5.8):

- постоянная – от веса покрытия и несущих конструкций;
- временная – снег.

Длина поперечного ребра $L = 3000 \text{ мм}$; шаг $S = 1200 \text{ мм}$.

По статической схеме поперечные ребра панели, рассматриваются как однопролетные балки с шарнирными опорами и равномерно распределенной нагрузкой (рис.5.11).

Сбор нагрузки

Состав нагрузки	Нормативная g^n , кН/м ²	Коэффициент надежности по нагрузке γ_f	Расчетная g , кН/м ²
Постоянная			
1. Профилированный лист НС35-1000-0,6	0,064	1,05	0,0672
Временная			
1. Снеговая * $S_0 = c_e \cdot c_t \cdot \mu \cdot S_g = 1 \cdot 1 \cdot 1,0 \cdot 1,5$ $= 1,5 \text{ кН/м}^2$	1,5	1,4	2,1
Итого:	$g^n = 1,564$		$g_p = 2,1672$
Примечание: * - параметры, входящие в формулу при определении снеговой нагрузки: c_e – коэффициент, учитывающий снос снега с покрытий зданий под действием ветра и других факторов ($c_e = 1$)[3]; c_t – термический коэффициент ($c_t = 1$)[3]; μ – коэффициент перехода, учитывающий профиль покрытия (для мало уклонных кровель $\mu = 1$)[3]. $S_g = 1,5 \text{ кН/м}^2$ – расчетное значение веса снегового покрова на 1м ² горизонтальной поверхности земли для III - го снегового района [3].			

Нормативные и расчетные значения погонных (в Н/м) нагрузок на балку определяют как произведение **равномерно-распределенной нагрузки** по площади (в Н/м²) на ширину грузовой площади по формулам:

$$q^n = (g_n^H + p^n)a + g_{св}$$

$$q = (g_n^H + p)a + g_{св} \cdot \gamma_{fg}$$

где γ_{fg} – коэффициент надежности по нагрузке для собственного веса стальных конструкций, принимается равным 1,05;

γ_{fp} – то же для временной нагрузки, принимается равным 1,4;

p_n - нормативное значение собственного веса прогона;

a - шаг поперечных профилей.

В качестве поперечного профиля принимаем SA 150-1,5 с $m=3,13 \text{ кг/м}$, тогда $q_{n \text{ прог}}^n = 0,0313 \text{ кН/м}$. Шаг поперечных профилей принимается 1200 мм.

$$q_n = (0,064 + 1,5) \cdot 1,2 + 0,0313 = 1,91 \text{ кН/м};$$

$$q = (0,064 \cdot 1,05 + 1,5 \cdot 1,4) \cdot 1,2 + 0,0313 \cdot 1,05 = 3,07 \text{ кН/м}.$$

5.5.2. Определение расчетных усилий в поперечных ребрах

Максимальный изгибающий момент (в середине балки) (рис.5.11):

$$M_{max} = \frac{q \cdot l^2}{8} = \frac{3,07 \cdot 3^2}{8} = 3,45 \text{ кНм};$$

Максимальная поперечная сила (рис.5.12):

$$Q_{max} = \frac{q \cdot l}{2} = \frac{3,07 \cdot 3}{2} = 4,61 \text{ кН}.$$

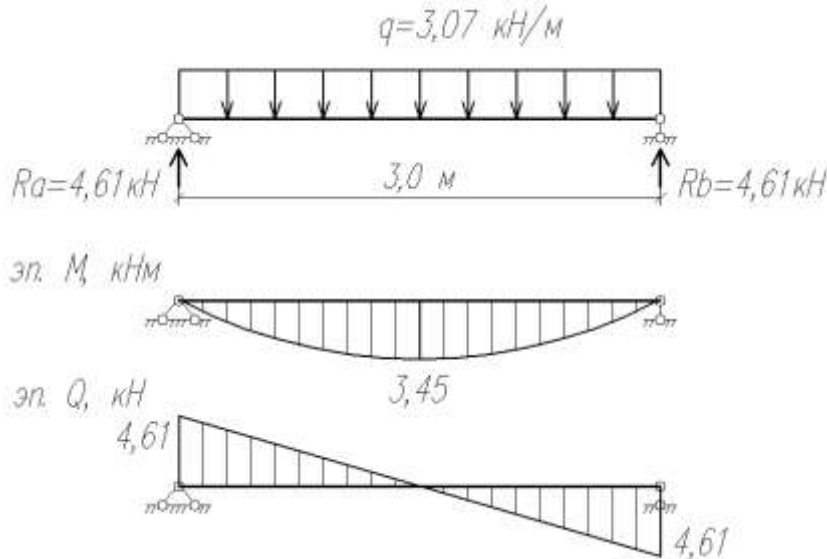


Рисунок 5.11 - Расчетная схема и эпюры усилий M и Q соответственно

5.5.3. Расчет поперечных ребер панели

Проверка принятого сечения ребер панели по первой группе предельных состояний:

$$\frac{M}{W_{eff,x} \cdot R_y \cdot \gamma_c} \leq 1;$$

где γ_c - коэффициент условий работы, принимается равным $\gamma_c = 0,95$;

$$\frac{3,45 \cdot 10^3}{15,05 \cdot 10^{-6} \cdot 270 \cdot 10^6 \cdot 0,95} = 0,89 \leq 1;$$

Условие выполняется.

Несущая способность поперечного сечения ребер панели от действия поперечной силы Q_w вычисляется по формуле:

$$Q_w = \frac{\gamma_c \cdot h_w \cdot t \cdot R_s}{\sin \alpha};$$

где R_s – расчетное сопротивление при сдвиге, учитывающее потерю устойчивости стенки, приведенное в таблице 3.10;

h_w – высота стенки между срединными плоскостями полок;

α – угол наклона стенки относительно полок.

Условная гибкость стенки $\bar{\lambda}_w$ вычисляется:
 - для стенок без продольных элементов жесткости:

$$\bar{\lambda}_w = 0,346 \frac{s_w}{t} \sqrt{\frac{R_y}{E}};$$

где s_w – высота стенки;

$$\bar{\lambda}_w = 0,346 \frac{148,5}{1,46} \sqrt{\frac{270 \cdot 10^6}{2,06 \cdot 10^{11}}} = 1,27;$$

По таблице 3.10 определяем R_s в зависимости от $\bar{\lambda}_w$:

- при $0,83 < \bar{\lambda}_w < 1,40$:

$$R_s = 0,48 R_y / \bar{\lambda}_w;$$

$$R_s = 0,48 \cdot 270 \cdot 10^6 / 1,27 = 102,05 \text{ МПа.}$$

$$Q_{max} = 4,61 \text{ кН} < Q_w = \frac{0,95 \cdot 0,1485 \cdot 0,00146 \cdot 102,05 \cdot 10^6}{1} = 21,02 \text{ кН};$$

Условие выполняется.

Проверка ребер панели по второй группе предельных состояний:

Предельный прогиб принимается по [3] равным 1/150 длины элемента.

$$f/l = \frac{5 \cdot q^n \cdot l^3}{384 \cdot E \cdot I_{eff,x}} \leq [f/l],$$

где $[f/l] = 1/150$;

q^n - нормативная нагрузка;

$$f/l = \frac{5 \cdot 1,91 \cdot 10^3 \cdot 3^3}{384 \cdot 2,06 \cdot 10^{11} \cdot 118,29 \cdot 10^{-8}} = 0,0028 < 1/150 = 0,0067.$$

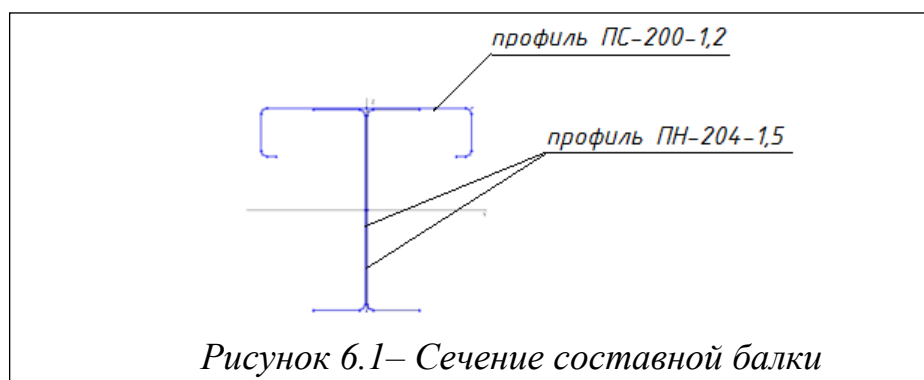
Условие выполняется.

6. ПРИМЕР 3

Произвести проверку сечения составной балки перекрытия из тонкостенных оцинкованных профилей для офисного помещения здания.

6.1. Исходные данные для расчета

Балка перекрытия имеет пролет 6 м, шаг 1 м. Составное сечение выполнено из тонкостенных профилей двух типоразмеров: стенка из двух направляющих профилей ПН-204-1,5, полка из стоечного профиля ПС-200-1,2 (см. рис.6.1,6.2). Материал балки – сталь марки 280. Назначение здания- общественное с офисными помещениями. Сортамент стальных тонкостенных профилей по ТУ 1121-001-13830080-2003 приведен в приложении 3.



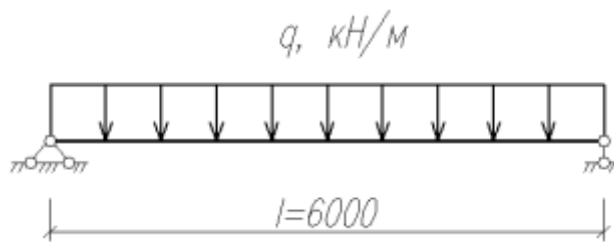


Рисунок 6.3 – Расчетная схема балки перекрытия

6.1. Определение геометрических характеристик эффективного поперечного сечения профиля

Вычисляются следующие характеристики:

A_{ef} – эффективная площадь поперечного сечения;

I_{ef} – момент сопротивления эффективного сечения;

i_{ef} – радиус инерции эффективного сечения.

6.2. Оценка геометрических параметров профиля

6.2.1. Определение расчетной толщины материала

Для профиля ПН:

Номинальная толщина профиля $t_{nom} = 1,5$ мм;

Толщина цинкового покрытия $t_{m.p} = 0,02$ мм;

Расчетная толщина профиля $t = 1,5 - 2 \cdot 0,02 = 1,46$ мм.

Для профиля ПС:

Номинальная толщина профиля $t_{nom} = 1,2$ мм;

Толщина цинкового покрытия $t_{m.p} = 0,02$ мм;

Расчетная толщина профиля $t = 1,2 - 2 \cdot 0,02 = 1,16$ мм.

6.2.2. Проверка геометрических параметров сечения профилей

Размеры профиля ПН по срединным линиям (рис.6.4):

- высота стенки: $h_p = h - t_{nom} = 204 - 1,5 = 202,5$ мм;

- ширина полки: $b_{p1} = b_{p2} = b_1 - \frac{t_{nom}}{2} = 50 - 0,75 = 49,25$ мм;

- радиус закругления: $r_m = r + t/2 = 2 + 1,46/2 = 2,73$ мм;

- уменьшенный радиус изгиба пластинки: $g_r = r_m \cdot (\tan\varphi/2 \sin\varphi/2) = 2,73 \cdot (\tan 45^\circ - \sin 45^\circ) = 0,8$ мм.

Размеры профиля ПС по срединным линиям (рис.6.5):

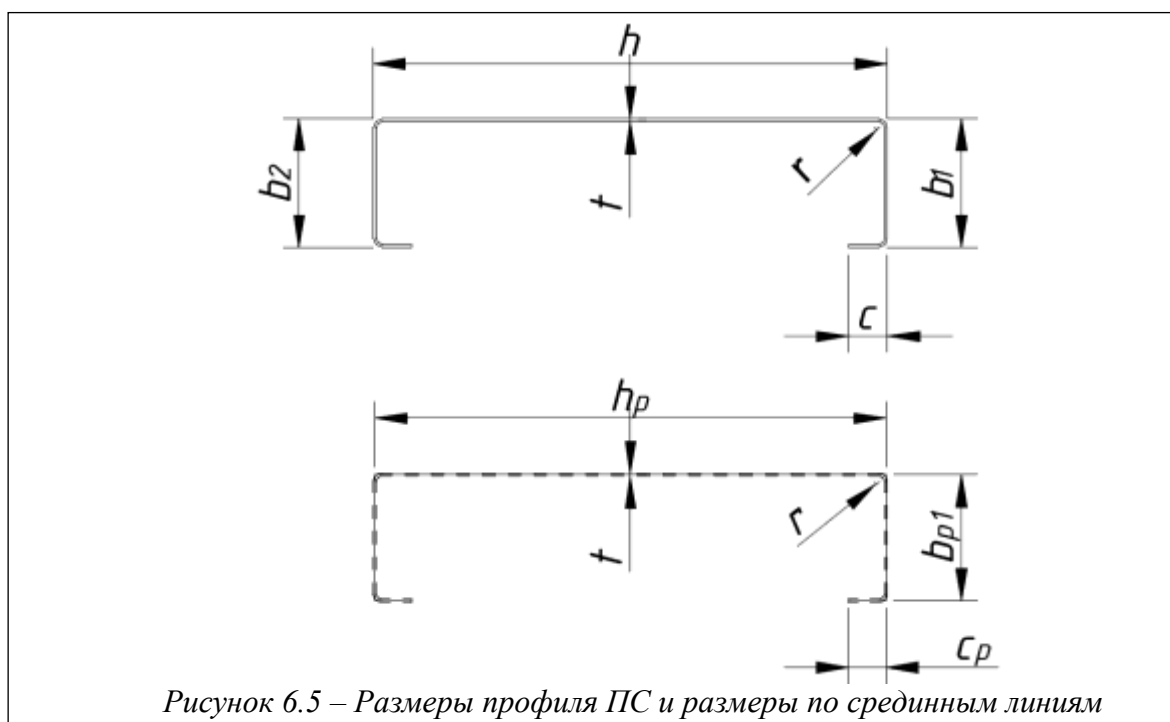
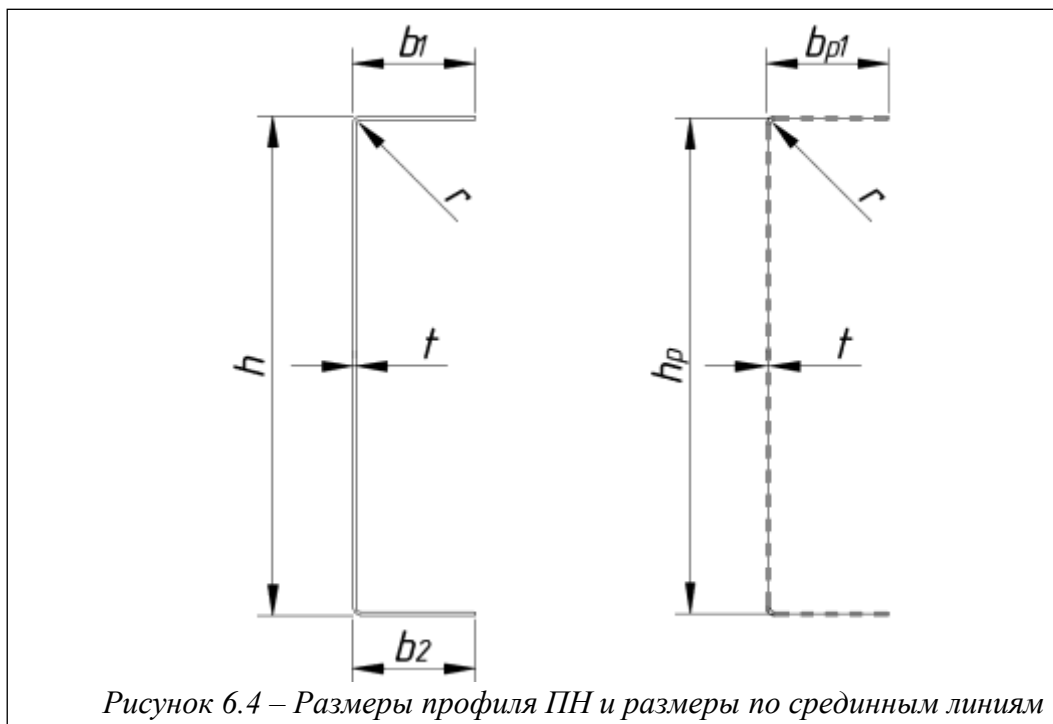
- высота стенки: $h_p = h - t_{nom} = 200 - 1,2 = 198,8$ мм;

- ширина полки: $b_{p1} = b_{p2} = b_1 - t_{nom} = 50 - 1,2 = 48,8$ мм;

- высота отгиба полки: $c_p = c - t_{nom}/2 = 15 - 1,2/2 = 14,4$ мм;

- радиус закругления: $r_m = r + t/2 = 2 + 1,16/2 = 2,58$ мм;

- уменьшенный радиус изгиба пластинки: $g_r = r_m \cdot (\tan\varphi/2 - \sin\varphi/2) = 2,58 \cdot (\tan 45^\circ - \sin 45^\circ) = 0,76$ мм.



Размеры плоских участков профиля ПН:

- стенка: $b_{p,h} = h_p - 2 \cdot g_r = 202,5 - 2 \cdot 0,8 = 200,9$ мм;

- полка: $b_{p,b} = b_p - 2 \cdot g_r = 49,25 - 2 \cdot 0,8 = 47,65$ мм;

Размеры плоских участков профиля ПС:

- стенка: $b_{p,h} = h_p - 2 \cdot g_r = 198,8 - 2 \cdot 0,76 = 197,28$ мм;

- полка: $b_{p,b} = b_p - 2 \cdot g_r = 48,8 - 2 \cdot 0,76 = 47,28$ мм;

- отгиб полки: $b_{p,c} = c_p - g_r = 14,4 - 0,76 = 13,64$ мм.

Проверка соотношений геометрических параметров поперечного сечения и сравнение их с максимальными по табл. 3.7:

Для профиля ПН:

$b/t = 50/1,46 = 34,25 < 100$ - Условие выполняется;

Для профиля ПС:

$b/t = 50/1,16 = 43,1 < 100$ - Условие выполняется;

$c/t = 15/1,16 = 12,93 < 40$ - Условие выполняется.

Проверка размеров элемента жесткости:

$c/b_1 = 15/50 = 0,3 \rightarrow 0,2 < 0,3 < 0,5$ - Условие выполняется.

6.2.3. Влияние зон сгиба на геометрические характеристики сечения

Проверка возможности пренебрежения закруглениями углов.

Профиль ПН:

$r = 2 \leq 5t = 5 \cdot 1,46 = 7,3$ мм – условие выполняется

$r = 2 \leq 0,1b_p = 0,1 \cdot 49,25 = 4,925$ – условие не выполняется.

Профиль ПС:

$r = 2 \leq 5t = 5 \cdot 1,16 = 5,8$ мм – условие выполняется

$r = 2 \leq 0,1b_p = 0,1 \cdot 48,8$ мм = 4,88 – условие не выполняется.

Поскольку условие не выполняется при расчете геометрических характеристик сечения учитывается влияние закругленных углов профиля. Оно учитывается уменьшением геометрических характеристик поперечного сечения профиля, вычисленных для аналогичного поперечного сечения без учета закруглений по формулам, приведенным в пункте 3.7.

$$\delta = 0,43 \cdot \frac{\sum_{i=1}^n r_j \cdot \frac{\varphi_i}{90}}{\sum_{j=1}^m b_{p,i}}$$

Для профиля ПН:

$$\delta = 0,43 \cdot \frac{2 \cdot 2 \cdot \frac{90}{90}}{200,9 + 2 \cdot 47,65} = 0,014$$

Для профиля ПС:

$$\delta = 0,43 \cdot \frac{4 \cdot 2 \cdot \frac{90}{90}}{197,28 + 2 \cdot 47,28 + 2 \cdot 13,64} = 0,025$$

Для составного сечения примем:

$$\delta = \frac{0,014 \cdot 2 + 0,025}{3} = 0,018.$$

6.3. Определение геометрических характеристик

6.3.1. Геометрические характеристики поперечного сечения брутто без учета закруглений

Сечение профиля разбивается на плоские участки, каждый из которых описывается координатами его начала и конца на основе геометрии сечения в срединных линиях, как изображено на рисунке 6.6. Точки начала и конца каждого элемента называются узлами. Для удобства расчеты производятся в таб-

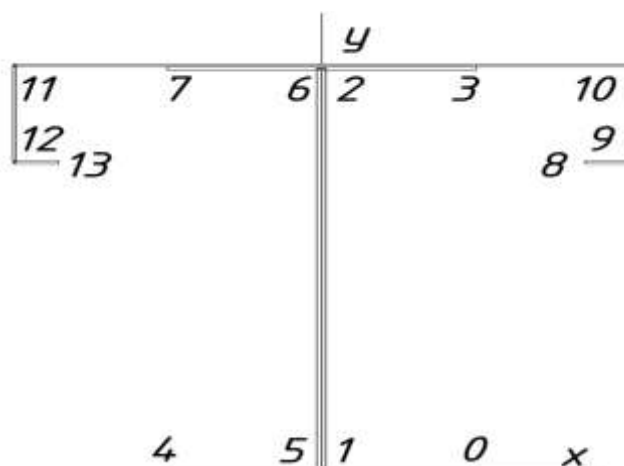


Рисунок 6.6 – Определение геометрических характеристик сечения брутто (без учета закруглений)

личной форме.

Таблица 6.1

Координаты узлов поперечного сечения профиля

Узел J	Координата x_j , мм	Координата y_j , мм
0	50	0
1	0,75	0
2	0,75	202,5
3	50	202,5
4	-50	0
5	-0,75	0
6	-0,75	202,5
7	-50	202,5
8	85	155,05
9	99,4	155,05
10	99,4	203,85
11	-99,4	203,85
12	-99,4	155,05
13	-85	155,05

Таблица 6.2.

Координаты плоских участков переченого сечения профиля

Часть i	Начальный узел			Конечный узел			Толщина t_i , мм	Длина, мм	Пло- щадь dA_i , мм ²
	№	x коорд. x_{i-1} , мм	y коорд. y_{i-1} , мм	№	x коорд. x_i , мм	y коорд. y_i , мм			
1	0	50	0	1	0,75	0	1,46	49,25	71,905
2	1	0,75	0	2	0,75	202,5	1,46	202,5	295,65
3	2	0,75	202,5	3	50	202,5	1,46	49,25	71,905
4	4	-50	0	5	-0,75	0	1,46	49,25	71,905
5	5	-0,75	0	6	-0,75	202,5	1,46	202,5	295,65
6	6	-0,75	202,5	7	-50	202,5	1,46	49,25	71,905
7	8	85	155,05	9	99,4	155,05	1,16	14,4	16,704
8	9	99,4	155,05	10	99,4	203,85	1,16	48,8	56,608
9	10	99,4	203,85	11	-99,4	203,85	1,16	198,8	230,608
10	11	-99,4	203,85	12	-99,4	155,05	1,16	48,8	56,608
11	12	-99,4	155,05	13	-85	155,05	1,16	14,4	16,704
Итого:									1256,15

Площадь: $A_{gr} = \sum dA_i = 1256,152 \text{ мм}^2$.

Центр тяжести:

Координата центра тяжести (x_{gc}) определяет положение оси у сечения брутто. Поскольку ось у является осью симметрии сечения, то она же и будет центральной осью. Следовательно, x_{b1} и x_{b2} равны. Определение координаты x_{gc} показано для формальности и полноты расчета.

Координата у центра тяжести определит положение главной оси х сечения брутто. Обозначения соответствуют рисунку 6.7.



Рисунок 6.7 – Центр тяжести сечения

Определим координату x центра тяжести:

Таблица 6.3.

**К определению координаты x центра тяжести
поперечного сечения профиля**

Часть i	$(x_i + x_{i-1}) \cdot dA_i / 2, \text{ мм}^3$
1	1824,59
2	221,74
3	1824,59
4	-1824,59
5	-221,74
6	-1824,59
7	1540,11
8	5626,84
9	0
10	-5626,84
11	-1540,11
Итого	0

Статический момент поперечного сечения профиля равен сумме указанных выше значений в последнем столбце табл.6.3: $S_{y_0} = 0 \Rightarrow$ положение оси у выбрано правильно (сечение симметрично относительно оси у)

Определим координату x центра тяжести:

Таблица 6.4.

**К определению координаты y центра тяжести
поперечного сечения профиля**

Часть i	$(y_i + y_{i-1}) \cdot dA_i / 2, \text{ мм}^3$
1	0
2	29934,56
3	14560,76
4	0
5	29934,56
6	14560,76
7	2589,96
8	10158,31
9	47009,44
10	10158,31
11	2589,96
Итого	161496,62

Статический момент поперечного сечения профиля равен сумме указанных выше значений в последнем столбце табл.6.4: $S_{x_0} = 161496,62 \text{ мм}^3$.

Координата y центра тяжести определяется следующим образом:

$$y_{gc} = S_{x_0} / A_{gr} = 161496,62 / 1256,152 = 128,56 \text{ мм};$$

$$y_{gc} = y_{b2} = 128,56 \text{ мм};$$

$$y_{lip} = y_{b1} - b_{p1} = (203,85 - 128,56) - 48,8 = 26,49 \text{ мм}.$$

Моменты инерции сечения:

Таблица 6.5.

К определению моментов инерции поперечного сечения профиля относительно оси наибольшей жесткости

Часть i	$(y_i^2 + y_i \cdot y_{i-1} + y_{i-1}^2) \cdot dA_i/3, \text{ мм}^4$
1	0
2	4041165,938
3	2948554,406
4	0
5	4041165,938
6	2948554,406
7	401572,554
8	1834141,986
9	9582874,507
10	1834141,986
11	401572,554
Итого	28033744,28

Момент инерции сечения относительно начальной оси x (по нижней полке сечения) равен сумме указанных выше значений в последнем столбце табл.6.5: $I_{x0} = 28033744,28 \text{ мм}^4$.

Момент инерции сечения относительно центральной оси x определяется следующим образом:

$$I_x = I_{x0} - A_{gr} \cdot z_{gc}^2$$

$$I_x = 28033744,28 - 1256,152 \cdot 128,56^2 = 7272474,032 \text{ мм}^4 .$$

Таблица 6.6

К определению момента инерции поперечного сечения профиля относительно оси наименьшей жесткости

Часть i	$(x_i^2 + x_i \cdot x_{i-1} + x_{i-1}^2) \cdot dA_i/3, \text{ мм}^4$
1	60833,128
2	166,303
3	60833,128
4	60833,128
5	166,303
6	60833,128
7	142286,677
8	559307,419
9	759496,686
10	559307,419
11	142286,677
Итого	2406349,996

Момент инерции сечения относительно начальной оси y (по стенке балки) равен сумме указанных выше значений в последнем столбце табл.6.6:
 $I_{y0} = 2406349,996 \text{ мм}^4$.

Момент инерции сечения относительно центральной оси y вычисляется следующим образом:

$$I_y = I_{y0} - A_{gr} \cdot y_{gc}^2$$

$$I_y = 2406349,996 - 1256,152 \cdot 0 = 2406349,996 \text{ мм}^4.$$

Радиусы инерции:

- радиус инерции относительно оси наибольшей жесткости:

$$i_x = (I_x / A_{gr})^{0,5}$$

$$i_x = (7272474,032 / 1256,152)^{0,5} = 76,09 \text{ мм}$$

- радиус инерции относительно оси наименьшей жесткости:

$$i_y = (I_y / A_{gr})^{0,5}$$

$$i_y = (2406349,996 / 1256,152)^{0,5} = 43,77 \text{ мм}.$$

Моменты сопротивления в упругой стадии:

- момент сопротивления в упругой стадии относительно оси наибольшей жесткости:

$$W_x = I_x / \max\{y_{b1}, y_{b2}\} = 7272474,032 / 128,56 = 56568,72 \text{ мм}^3;$$

- момент сопротивления в упругой стадии относительно оси наименьшей жесткости:

$$W_y = I_y / \max\{x_{gc}, x_{b2}\} = 2406349,996 / (198,8 \cdot 0,5) = 24208,75 \text{ м}^3.$$

Центр изгиба:

Положение центра изгиба рассчитывается относительно центра тяжести определяет. Сечение симметрично относительно оси y . Следовательно, центр изгиба будет лежать на главной оси. Обозначения соответствуют рисунку 6.8.

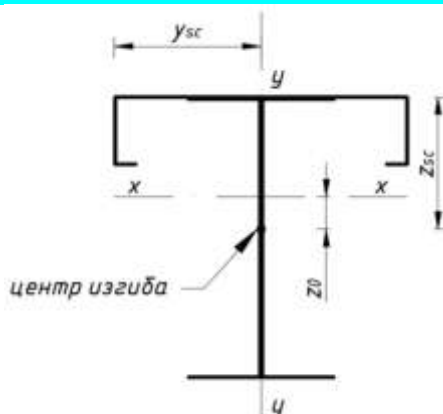


Рисунок 6.8 – Центр изгиба сечения

К определению центра изгиба поперечного сечения профиля

Часть i	$(2 \cdot x_{i-1} \cdot y_{i-1} + 2 \cdot x_i \cdot y_i + x_i \cdot y_{i-1} + y_i \cdot x_{i-1}) \cdot dA_i / 6, \text{ мм}^4$
1	0
2	22450,922
3	369479,348
4	0
5	-22450,922
6	-369479,348
7	238793,869
8	1009735,577
9	0
10	-1009735,577
11	-238793,869
Итого	0

Центробежный момент инерции поперечного сечения профиля относительно начального центра координат равен сумме указанных выше значений в последнем столбце табл. 6.7:

$$I_{xy0} = 0.$$

6.3.2. Сводные геометрические характеристики поперечного сечения брутто без учета закруглений

- площадь сечения: $A_{gr} = 1256,152 \text{ мм}^2$;
- расстояние от центра тяжести до полки: $y_{gc} = 128,56 \text{ мм}$;
- расстояние от центра тяжести до стенки: $x_{gc} = 99,4 \text{ мм}$;
- расстояние от центра тяжести до отгибов: $y_{lip} = 26,49 \text{ мм}$;
- момент инерции сечения относительно оси наибольшей жесткости:
 $I_x = 7272474,032 \text{ мм}^4$;
- момент инерции сечения относительно оси наименьшей жесткости:
 $I_y = 2406349,996 \text{ мм}^4$;
- радиус инерции относительно оси наибольшей жесткости:
 $i_x = 76,09 \text{ мм}$;
- радиус инерции относительно оси наименьшей жесткости:
 $i_y = 43,77 \text{ мм}$;
- момент сопротивления в упругой стадии относительно оси наибольшей жесткости: $W_x = 56568,72 \text{ мм}^3$;
- момент сопротивления в упругой стадии относительно оси наименьшей жесткости: $W_y = 24208,75 \text{ мм}^3$.

6.3.3. Геометрические характеристики поперечного сечения брутто с учетом закруглений

Влияние закругленных углов профиля на геометрические характеристики поперечного сечения учитывается в расчете путем уменьшения геометрических характеристик, вычисленных для аналогичного сечения без учета закруглений, используя следующие выражения:

$$A_g = A_{g,sharp} (1 - \delta);$$

$$I_g = I_{g,sharp} (1 - 2 \cdot \delta);$$

$$I_w = I_{w,sharp} (1 - 4 \cdot \delta);$$

Положение главных осей и центра изгиба при расчете сечения с закругленными углами принимаются равными тем, что были определены для сечения без учета закруглений.

Расчет геометрических характеристик поперечного сечения, уменьшенных с учетом закругленных углов, производится следующим образом:

$$A_g = 1256,152 \cdot (1 - 0,018) = 1233,54 \text{ мм}^2;$$

$$I_x = 7272474,032 \cdot (1 - 2 \cdot 0,018) = 7010665 \text{ мм}^4;$$

$$I_y = 2406349,996 \cdot (1 - 2 \cdot 0,018) = 2319721 \text{ мм}^4;$$

$$i_x = (7010665 / 1233,54)^{0,5} = 75,39 \text{ мм};$$

$$i_y = (2319721 / 1233,54)^{0,5} = 43,37 \text{ мм};$$

$$W_x = 7010665 / 128,56 = 54532,2 \text{ мм}^3;$$

$$W_y = 2319721 / 99,4 = 23337,2 \text{ мм}^3.$$

Сводные геометрические характеристики сечения с учетом закруглений:

- площадь сечения: $A_{gr} = 1233,54 \text{ мм}^2$;
- расстояние от центра тяжести до полки: $y_{gc} = 128,56 \text{ мм}$;
- расстояние от центра тяжести до стенки: $x_{gc} = 99,4 \text{ мм}$;
- расстояние от центра тяжести до отгибов: $y_{lip} = 26,49 \text{ мм}$;
- момент инерции сечения относительно оси наибольшей жесткости:
 $I_x = 7010665 \text{ мм}^4$;
- момент инерции сечения относительно оси наименьшей жесткости:
 $I_y = 2319721 \text{ мм}^4$;
- радиус инерции относительно оси наибольшей жесткости:
 $i_x = 75,39 \text{ мм}$;
- радиус инерции относительно оси наименьшей жесткости:
 $i_y = 43,37 \text{ мм}$;

- момент сопротивления в упругой стадии относительно оси наибольшей жесткости: $W_x = 54532,2 \text{ мм}^3$;

- момент сопротивления в упругой стадии относительно оси наименьшей жесткости: $W_y = 23337,2 \text{ мм}^3$.

На рисунке 6.9 показаны полное и редуцированное сечения составной балки.

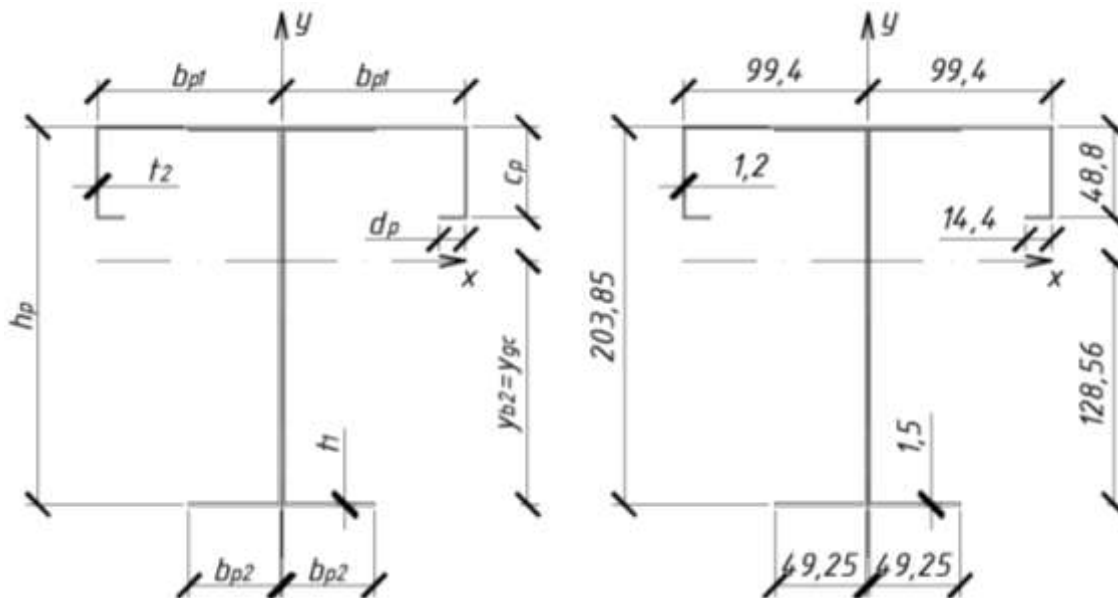


Рисунок 6.9 – Сечения брутто профиля

Геометрические характеристики эффективного сечения при изгибе относительно оси наибольшей жесткости:

Размеры поперечного сечения и характеристики материала:

- высота сечения: $h = 205,2 \text{ мм}$;

- ширина полки: $b_1 = 200 \text{ мм}$; $b_2 = 100 \text{ мм}$;

- высота отгиба полки (профиль ПС):

$c = 50 \text{ мм}$;

$d = 15 \text{ мм}$;

- радиус закругления: $r = 2 \text{ мм}$;

- номинальная толщина:

профиль ПН: $t_{nom} = 1,5 \text{ мм}$;

профиль ПС: $t_{nom}^* = 1,5 \text{ мм}$;

- толщина стали:

профиль ПН: $t = 1,46 \text{ мм}$;

профиль ПС: $t^* = 1,16 \text{ мм}$;

- расчетный предел текучести: $R_y = 270 \text{ Н/мм}^2$;

- модуль упругости: $E = 206\,000 \text{ Н/мм}^2$;

- коэффициент Пуассона: $\nu = 0,3$

- коэффициент надежности: $\gamma_m = 1,025$;

$h_p = h - (t_{nom} + t_{nom}^*)/2 = 205,2 - (1,5 + 1,2)/2 = 203,85 \text{ мм}$;

$b_{p1} = (b_1 - t_{nom}^*)/2 = 198,8/2 = 99,4 \text{ мм}$;

$$b_{p2} = (b_2 - t_{nom})/2 = 49,25 \text{ мм};$$

$$c_p = c - t_{nom} = 50 - 1,2 = 48,8 \text{ мм};$$

$$d_p = d - t_{nom} / 2 = 15 - 1,2/2 = 14,4 \text{ мм}.$$

Эффективное поперечное сечение балки при изгибе показано на рисунке 6.10. На рисунке показаны исключаемые участки полки и стенки, а также уменьшенная толщина t_{cd} элемента жесткости и прилегающего участка полки. Алгоритм предполагает вначале расчет отдельно полки и стенки сечения, после чего может быть произведен расчет для всего сечения.

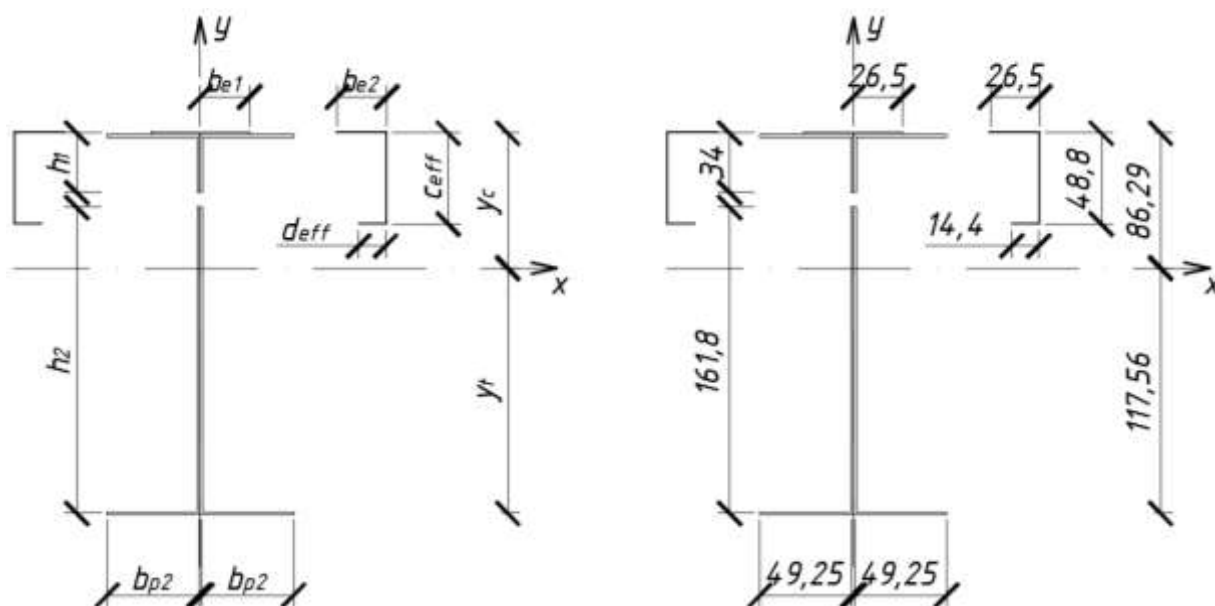


Рисунок 6.10 - Теоретическое эффективное сечение при изгибе

6.3.4. Геометрические характеристики эффективного сечения без учета закруглений

Определение эффективного сечения полок и отгибов:

Эффективная ширина полок:

Для соотношения напряжений $\psi = 1$ (равномерное сжатие), $k_\sigma = 4$

$$\varepsilon = \sqrt{235/R_y}$$

$$\overline{\lambda}_{p,b} = \frac{b_{p1}/t}{28,4 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_\sigma}};$$

$$\overline{\lambda}_{p,b} = \frac{49,25/1,16}{28,4 \cdot \sqrt{235/270} \cdot \sqrt{4}} = 1,62$$

$$\rho = \frac{\overline{\lambda}_{p,b} - 0,055 \cdot (3 + \psi)}{\overline{\lambda}_{p,b}^2} \leq 1$$

$$\rho = \frac{1,62 - 0,055 \cdot (3 + 1)}{1,62^2} = 0,533 < 1$$

$$b_{eff} = \rho \cdot b_{p1} = 0,533 \cdot 99,4 = 53 \text{ мм}$$

$$b_{e1} = b_{e2} = 0,5 \cdot b_{eff} = 0,5 \cdot 53 = 26,5 \text{ мм}$$

Эффективная ширина краевого элемента жесткости (отгиба)

Для двойного краевого отгиба:

пластинка, опертая по 2-м сторонам:

$$c_{ef} = \rho \cdot b_{p,c}$$

$$b_{p,c} = c_p$$

$$k_\sigma = 8,2 / (1,05 + \psi)$$

из подобия треугольников эпюры напряжений:

$$\psi = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = \frac{y_{lip}}{y_{b1}} = \frac{26,49}{203,85 - 128,56} = 0,35$$

$$k_\sigma = \frac{8,2}{1,05 + 0,35} = 5,86$$

$$\overline{\lambda}_{p,c} = \frac{c_p / t}{28,4 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_\sigma}};$$

$$\overline{\lambda}_{p,c} = \frac{48,8 / 1,16}{28,4 \cdot \sqrt{235 / 270} \cdot \sqrt{5,86}} = 0,656$$

$$\overline{\lambda}_{p,d} = 0,656 < 0,673 \Rightarrow \rho = 1$$

Эффективная ширина определяется следующим образом:

$$c_{eff} = \rho \cdot c_p = 1 \cdot 48,8 = 48,8 \text{ мм}$$

$$c_{e1} = c_{e2} = 0,5 \cdot c_{eff} = 0,5 \cdot 48,8 = 24,4 \text{ мм}$$

пластинка, опертая по одной стороне:

$$d_{ef} = \rho \cdot b_{p,d}$$

$$b_{p,d} = d_p$$

$$\psi = 1$$

$$k_\sigma = 0,43$$

$$\overline{\lambda}_{p,d} = \frac{d_p / t}{28,4 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_\sigma}}$$

$$\overline{\lambda_{p,d}} = \frac{14,4/1,16}{28,4 \cdot \sqrt{235/270} \cdot \sqrt{0,43}} = 0,714$$

$$\overline{\lambda_{p,d}} = 0,714 < 0,748 \Rightarrow \rho = 1$$

Эффективная ширина определяется следующим образом:

$$d_{eff} = \rho \cdot d_p = 1 \cdot 14,4 = 14,4 \text{ мм}$$

$$d_{e1} = d_{e2} = 0,5 \cdot d_{eff} = 0,5 \cdot 14,4 = 7,2 \text{ мм}$$

Эффективная площадь краевого элемента жесткости составляет:

$$A_s = t(b_{e2} + c_{eff} + d_{eff}) = 1,16(26,5 + 48,8 + 14,4) = 104,05 \text{ мм}^2$$

Критическое напряжение при потере устойчивости для краевого элемента жесткости определяется по формуле:

$$\sigma_{cr,s} = \frac{2 \cdot \sqrt{K_1 \cdot E \cdot I_s}}{A_s},$$

где K – это жесткость пружины на единицу длины;

I_s – это эффективный момент инерции сечения элемента жесткости.

$$b_1 = b_{p1} - \frac{b_{e2} \cdot t \cdot \frac{b_{e2}}{2}}{A_s}$$

$$b_1 = 99,4 - \frac{26,5 \cdot 1,16 \cdot \frac{26,5}{2}}{104,05} = 95,5 \text{ мм}$$

$$k_f = 0$$

$$h_w = 202,5 \text{ мм}$$

$$K = \frac{E \cdot t^3}{4(1 - \nu^2)} \cdot \frac{1}{b_1^2 \cdot h_w + b_1^3 + 0,5 \cdot h_w \cdot k_f \cdot b_1 \cdot b_2}$$

$$K = \frac{206000 \cdot 1,16^3}{4(1 - 0,3^2)} \cdot \frac{1}{95,5^2 \cdot 202,5 + 95,5^3} = 0,03$$

$$I_s = \frac{b_{e2} \cdot t^3}{12} + \frac{c_{eff}^3 \cdot t}{12} + \frac{d_{eff} \cdot t^3}{12} + b_{e2} \cdot t \cdot \left(\frac{c_{eff}^2}{2 \cdot (b_{e2} + c_{eff} + d_{eff})} \right)^2 +$$

$$+ c_{eff} \cdot t \cdot \left(\frac{c_{eff}}{2} - \left(\frac{c_{eff}^2}{2 \cdot (b_{e2} + c_{eff} + d_{eff})} \right) \right)^2 + d_{eff} \cdot t \cdot \left(\frac{c_{eff}^2}{2 \cdot (b_{e2} + c_{eff} + d_{eff})} \right)^2$$

$$I_s = \frac{26,5 \cdot 1,16^3}{12} + \frac{48,8^3 \cdot 1,16}{12} + \frac{14,4 \cdot 1,16^3}{12} + 26,5 \cdot 1,16 \cdot \left(\frac{48,8^2}{2 \cdot (26,5 + 48,8 + 14,4)} \right)^2 +$$

$$+ 48,8 \cdot 1,16 \cdot \left(\frac{48,8}{2} - \left(\frac{48,8^2}{2 \cdot (26,5 + 48,8 + 14,4)} \right) \right)^2 + 14,4 \cdot 1,16 \cdot \left(\frac{48,8^2}{2 \cdot (26,5 + 48,8 + 14,4)} \right)^2 =$$

$$= 26606,33 \text{ мм}^4$$

$$\sigma_{cr,s} = \frac{2 \cdot \sqrt{0,03 \cdot 206000 \cdot 26606,33}}{104,05} = 246,47 \text{ Н/мм}^2$$

$$\bar{\lambda}_d = \sqrt{R_y / \sigma_{cr,s}} = \sqrt{270 / 246,47} = 1,05$$

поскольку $0,65 < \bar{\lambda}_d = 1,05 < 1,38$

$$\chi_d = 1,47 - 0,723 \bar{\lambda}_d = 1,47 - 0,723 \cdot 1,05 = 0,71$$

$$t_{red} = t \cdot \chi_d = 1,16 \cdot 0,71 = 0,82.$$

Определение эффективного сечения стенки:

Размер сжатой зоны с учетом эффективного сечения полки:

$$h_c = \frac{b_{p2} \cdot h_p + \frac{h_p^2}{2} + c_{eff}^2 \cdot \chi_d / 2 + d_{eff} \cdot \frac{c_{eff}}{2} \cdot \chi_d}{b_{p2} + h_p + b_{e1} + (b_{e2} + c_{eff} + d_{eff}) \cdot \chi_d}$$

$$h_c = \frac{49,25 \cdot 203,85 + \frac{203,85^2}{2} + 48,8^2 \cdot 0,71 / 2 + 14,4 \cdot \frac{48,8}{2} \cdot 0,71}{49,25 + 203,85 + 26,5 + (26,5 + 48,8 + 14,4) \cdot 0,71} = 92,96 \text{ мм}$$

$$\psi = \frac{h_c - h_p}{h_c} = \frac{92,96 - 203,85}{92,96} = -1,19$$

$$k_\sigma = 5,98(1 - \psi)^2 = 28,7$$

$$\bar{\lambda}_{p,h} = \frac{h_p / t}{28,4 \cdot \varepsilon \cdot \sqrt{k_\sigma}} = \frac{203,85 / 1,46}{28,4 \cdot \sqrt{235 / 270} \cdot \sqrt{28,7}} = 0,984$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_{p,h} - 0,055 \cdot (3 + \psi)}{\bar{\lambda}_{p,h}^2} = \frac{0,984 - 0,055 \cdot (3 - 1,19)}{0,984^2} = 0,913$$

$$h_{eff} = \rho \cdot h_c = 0,913 \cdot 92,96 = 84,9 \text{ мм};$$

$$h_{e1} = 0,4 \cdot h_{eff} = 0,4 \cdot 84,9 = 34 \text{ мм};$$

$$h_{e2} = 0,6 \cdot h_{eff} = 0,6 \cdot 84,9 = 50,9 \text{ мм}.$$

Эффективная ширина стенки разделяется на два участка следующим образом:

$$h_1 = h_{e1} = 34 \text{ мм.}$$

$$h_2 = h_p - (h_c - h_{e2}) = 203,85 - 92,96 + 50,9 = 161,8 \text{ мм.}$$

Геометрические характеристики эффективного составного сечения без учета закруглений:

$$A_{eff} = 2t(2b_{p2} + h_1 + h_2) + 2t^* \cdot (b_{e1} + (b_{e2} + c_{eff} + d_{eff}) \cdot \chi_d)$$

$$A_{eff} = 2 \cdot 1,46 \cdot (2 \cdot 49,25 + 34 + 161,8) +$$

$$+ 2 \cdot 1,16 \cdot (26,5 + (26,5 + 48,8 + 14,4) \cdot 0,71) = 1068,59 \text{ мм}^2$$

Положение нейтральной оси относительно сжатой полки определяется следующим образом:

$$y_c = \frac{2t(b_{p2} \cdot h_p + \frac{h_1^2}{2} + h_2 \cdot (h_p - h_2/2)) + 2t^* \cdot \left(\frac{c_{eff}^2}{2} + d_{eff} \cdot c_{eff} \right) \cdot \chi_d}{A_{eff}}$$

$$y_c = \frac{2 \cdot 1,46 \cdot (49,25 \cdot 203,85 + \frac{34^2}{2} + 161,8 \cdot (203,85 - 161,8/2)) + 2 \cdot 1,16 \cdot \left(\frac{48,4^2}{2} + 14,4 \cdot 48,8 \right) \cdot 0,71}{1068,59} =$$

$$= 86,29 \text{ мм}$$

Положение нейтральной оси относительно сжатой полки определяется следующим образом:

$$y_t = h_p - y_c = 203,85 - 86,29 = 117,56 \text{ мм}$$

В программе «Конструктор сечений» программного комплекса SCAD Office определяем:

$$I_{eff,x} = 6284820 \text{ мм}^2$$

$$W_{eff,x,c} = \frac{I_{eff,x}}{y_c} = \frac{6284820}{86,29} = 72833,7 \text{ мм}^3$$

$$W_{eff,x,t} = \frac{I_{eff,x}}{y_t} = \frac{6284820}{117,56} = 53460,5 \text{ мм}^3$$

6.3.5. Сводные геометрические характеристики эффективного составного сечения без учета закруглений

- эффективная площадь: $A_{eff} = 1068,59 \text{ мм}^2$;
- расстояние от центра тяжести эффективного сечения до сжатой полки: $y_c = 86,29 \text{ мм}$;
- расстояние от центра тяжести эффективного сечения до растянутой полки: $y_t = 117,56 \text{ мм}$;

- момент инерции эффективного сечения относительно оси наибольшей жесткости: $I_{eff,x} = 6284820 \text{ мм}^2$;

- момент сопротивления сечения относительно оси наибольшей жесткости для сжатой полки: $W_{eff,x,c} = 72833,7 \text{ мм}^3$

- момент сопротивления сечения относительно оси наибольшей жесткости для растянутой полки: $W_{eff,x,t} = 53460,5 \text{ мм}^3$

6.3.6. Геометрические характеристики эффективного поперечного сечения с учетом закруглений

$$A_{eff} = A_{eff,sharp} (1 - \delta) = 1068,59 \cdot (1 - 0,018) = 1049,36 \text{ мм}^2$$

$$I_{eff,x} = I_{x,sharp} (1 - 2 \cdot \delta) = 6284820 \cdot (1 - 2 \cdot 0,018) = 6058566 \text{ мм}^4$$

$$W_{eff,x,c} = \frac{I_{eff,x}}{y_c} = \frac{6058566}{86,29} = 70211,7 \text{ мм}^3$$

$$W_{eff,x,t} = \frac{I_{eff,x}}{y_t} = \frac{6058566}{117,56} = 51535,9 \text{ мм}^3$$

6.3.7. Сводные геометрические характеристики эффективного сечения профиля с учетом закруглений

- эффективная площадь: $A_{eff} = 1049,36 \text{ мм}^2$;

- расстояние от центра тяжести эффективного сечения до сжатой полки:

$$y_c = 86,29 \text{ мм};$$

- расстояние от центра тяжести эффективного сечения до растянутой полки: $y_t = 117,56 \text{ мм}$;

- момент инерции сечения относительно оси наибольшей жесткости:

$$I_{eff,x} = 6058566 \text{ мм}^4;$$

- момент сопротивления сечения относительно оси наибольшей жесткости для сжатой полки: $W_{eff,x,c} = 70211,7 \text{ мм}^3$;

- момент сопротивления сечения относительно оси наибольшей жесткости для растянутой полки: $W_{eff,x,t} = 51535,9 \text{ мм}^3$.

6.4. Расчет на прочность балки при изгибе

6.4.1. Сбор нагрузки на балку

В соответствии с [3] производим сбор нагрузок. Нагрузками, действующими на балку, являются:

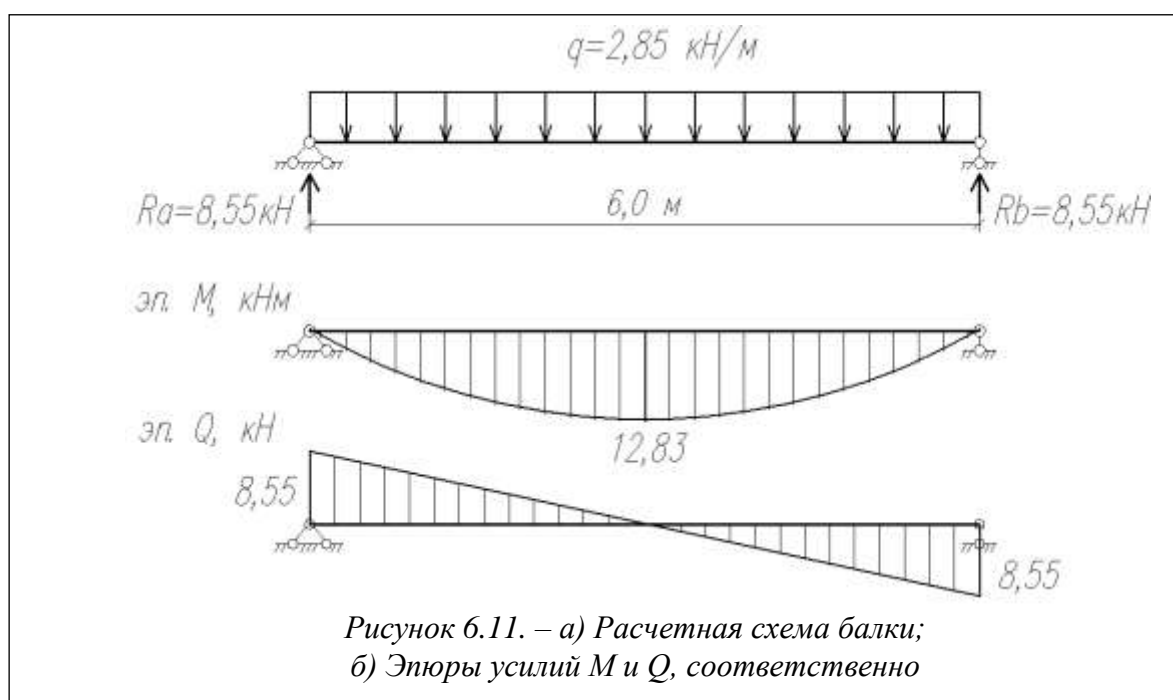
- постоянная – от веса перекрытия и несущих конструкций;

- временная – снег.

Таблица 6.8.

Сбор нагрузок на перекрытие, кН/м²

Наименование нагрузки	Нормативное значение, кН/м ²	γ_f	Расчетное значение, кН/м ²
Постоянная нагрузка			
1. Конструкция пола			
Линолеум	0,05	1,2	0,06
OSB 12мм	0,078	1,2	0,0936
Профлист НС35-1000-0,6	0,064	1,05	0,0672
Rockwool Акустик Баттс -50 мм	0,0225	1,2	0,027
OSB 12мм	0,078	1,2	0,0936
Итого постоянная нагрузка	$g_{с.в.п.} = 0,293$		$g_{с.в.} = 0,341$
Временная нагрузка			
1. Служебные помещения	2	1,2	2,4
Итого временная	2		2,4
Итого постоянная и временная	$g_{п}^n = 2,293$		$g_{п} = 2,741$



Нормативные и расчетные значения погонных (в Н/м) нагрузок на балку определяют как произведение нагрузки, распределенной по площадкам (в Н/м²) на ширину грузовой площади по формулам:

$$q^n = (g_{п}^n + p^n) \cdot a + g_{св}$$

$$q = (g_{п} + p) \cdot a + g_{св} \cdot \gamma_{fg}$$

где γ_{fg} – коэффициент надежности по нагрузке для собственного веса стальных конструкций, принять равным 1,05;

а - шаг балок.

$$g_{пн} = 3,63 \text{ кг/м}$$

$$g_{пс} = 3,11 \text{ кг/м}$$

$$g_{св} = 2g_{пн} + g_{пс} = 2 \cdot 3,63 + 3,11 = 10,37 \frac{\text{кг}}{\text{м}} = 0,104 \frac{\text{кН}}{\text{м}}$$

$$q^n = (0,293 + 2) \cdot 1 + 0,104 = 2,397 \frac{\text{кН}}{\text{м}}$$

$$q = (0,341 + 2,4) \cdot 1 + 0,104 \cdot 1,05 = 2,85 \frac{\text{кН}}{\text{м}}$$

6.4.2. Расчетные усилия в балке

$$M_{max} = 12,83 \text{ кН/м}$$

$$Q_{max} = 8,55 \text{ кН}$$

6.4.3. Проверка сечения составной балки

6.4.4. Проверка принятого сечения по первой группе предельных состояний

$$\frac{M}{W_{eff,x} \cdot R_y \cdot \gamma_c} \leq 1$$

где γ_c – коэффициент условий работы, принимаем равным $\gamma_c = 0,95$

$$\frac{12,83 \cdot 10^3}{53460,5 \cdot 10^{-9} \cdot 270 \cdot 10^6 \cdot 0,95} = 0,94 < 1$$

Условие выполняется.

6.4.5. Несущая способность поперечного сечения от действия поперечной силы

Поперечная сила Q_w вычисляется по формуле:

$$Q_w = \frac{\gamma_c \cdot h_w \cdot t \cdot R_s}{\sin \alpha}$$

где R_s – расчетное сопротивление при сдвиге, учитывающее потерю устойчивости стенки;

h_w – высота стенки между срединными плоскостями полков;

α – угол наклона стенки относительно полков.

Условная гибкость стенки $\overline{\lambda}_w$ вычисляется:
 - для стенок без продольных элементов жесткости

$$\overline{\lambda}_w = 0,346 \cdot \frac{s_w}{t} \cdot \sqrt{\frac{R_y}{E}};$$

где s_w – высота стенки;

$$\overline{\lambda}_w = 0,346 \cdot \frac{203,85}{1,46} \cdot \sqrt{\frac{270}{2,06 \cdot 10^5}} = 1,75;$$

По таблице 7.4[3] определяем R_s в зависимости от $\overline{\lambda}_w$:

- при $\overline{\lambda}_w \geq 1,40$

$$R_s = 0,67 \cdot R_y / \overline{\lambda}_w^2$$

$$R_s = 0,67 \cdot 270 \cdot 10^6 / 1,75^2 = 59,07 \text{ МПа}$$

$$Q_{max} = 8,55 \text{ кН} < Q_w = \frac{0,95 \cdot 203,85 \cdot 1,46 \cdot 59,07}{1} = 16,7 \text{ кН}$$

Условие выполняется.

6.4.6. Проверка по второй группе предельных состояний

Предельный прогиб принимается по СП 20.13330.2017[3] равным 1/200 длины элемента.

$$f/l = \frac{5 \cdot q^n \cdot l^3}{384 \cdot E \cdot I_x} \leq [f/l]$$

q^n – нормативная нагрузка;

$$f/l = \frac{5 \cdot 2,397 \cdot 10^3 \cdot 6^3}{384 \cdot 2,06 \cdot 10^{11} \cdot 6058566 \cdot 10^{-12}} = 0,005 \leq \frac{1}{200} = 0,005$$

Условие выполняется.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. СП 260.1325800.2016. Свод правил. Конструкции стальные тонкостенные из холодногнутох оцинкованных профилей и гофрированных листов : правила проектирования : утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации 03.12.2016 №881/пр. : введен 04.06.2017. – Текст : электронный // Техэксперт : информационно-справочная система / Консорциум «Кодекс» (дата обращения: 07.10.2019). – Режим доступа: для авториз. пользователей.

2. СП 16.13330.2017. Свод правил. Стальные конструкции : актуализированная редакция СНиП II-23-81* : утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации 27.02.2017 №126/пр. : введен 28.08.2017. – Москва : Стандартинформ, 2017. – 148 с.

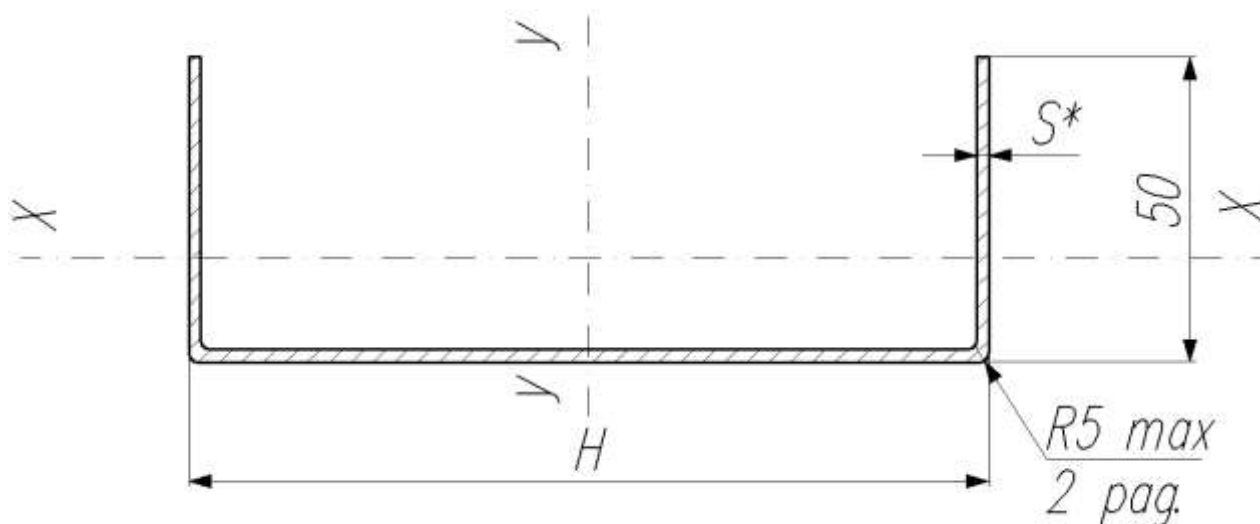
3. СП 20.13330.2016. Свод правил. Нагрузки и воздействия : актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85* : утвержден приказом Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации (Минстрой России) 03.12.2016 №891/пр. : введен 04.06.2017. – Москва : Минстрой России, 2016. – 104 с.

4. ГОСТ 27751-2014. Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения: введен 01.07.2015. – Москва : Стандартинформ, 2015. – 16 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1
СОРТАМЕНТ ЛСТК-ПРОФИЛЕЙ
 (ТУ 1121-001-13830080-2003)

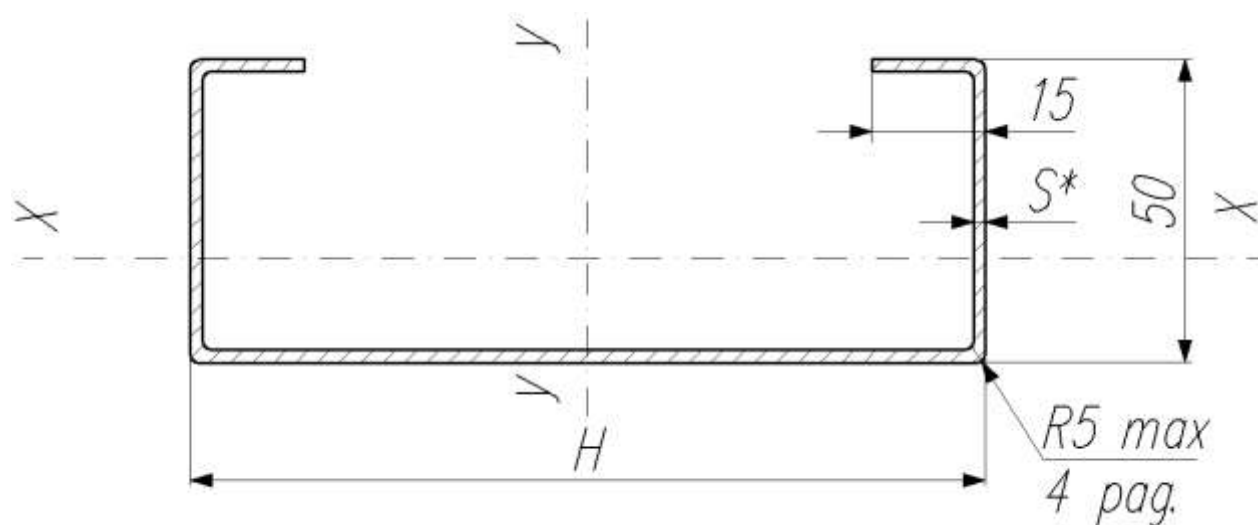
Таблица П1.1

Профили направляющие П-образного сечения (швеллер)



Обозначение	S, мм	H, мм	Моменты инерции		Моменты сопротивления		Масса 1 п.м., кг
			J _x , см ⁴	J _y , см ⁴	W _x , см ³	W _y , см ³	
1	2	3	4	5	6	7	8
ПН-179-1,0	1,0	179	4,97	110,0	1,38	10,04	2,25
ПН-200-1,0		200	4,97	144,4	1,38	12,0	2,42
ПН-204-1,0		204	4,97	151,5	1,38	12,35	2,45
ПН-179-1,2	1,2	179	6,24	138,2	1,68	12,72	2,68
ПН-200-1,2		200	6,24	181,1	1,68	15,11	2,88
ПН-204-1,2		204	6,24	190,0	1,68	15,56	2,92
ПН-179-1,5	1,5	179	8,22	183,9	2,15	17,12	3,33
ПН-200-1,5		200	8,22	240,2	2,15	20,26	3,59
ПН-204-1,5		204	8,22	251,9	2,15	20,84	3,63
ПН-254-1,5		254	8,22	402,2	2,15	29,4	4,21
ПН-179-2,0	2,0	179	11,62	249,4	2,86	25,6	4,38
ПН-200-2,0		200	11,62	310,0	2,86	30,0	4,72
ПН-204-2,0		204	11,62	322,6	2,86	30,93	4,78
ПН-254-2,0		254	11,62	538,5	2,86	42,6	5,56

Профили стоечные С - образного сечения

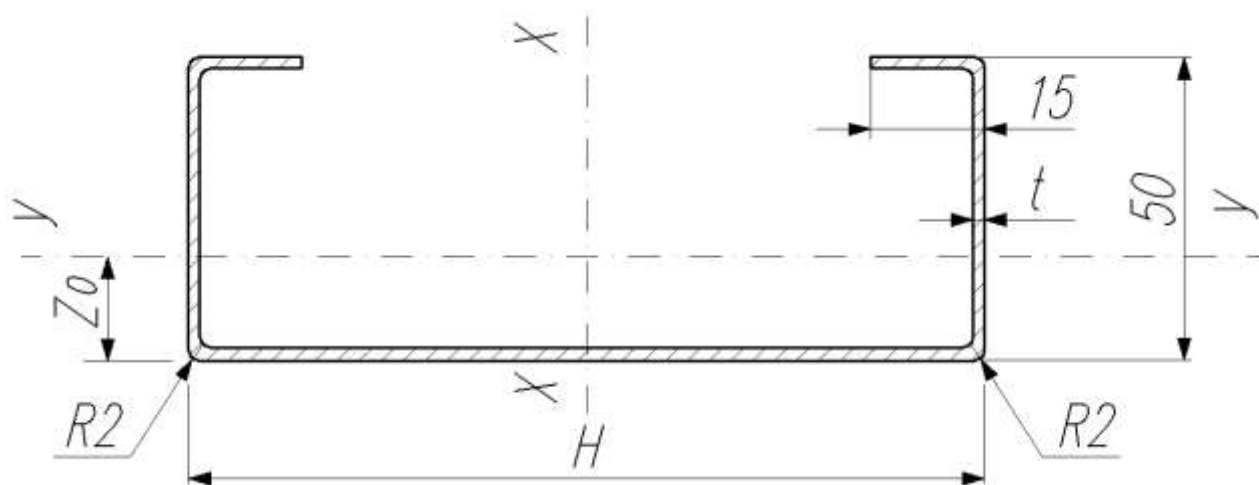


Обозначение	S, мм	H, мм	Моменты инерции		Моменты сопротивления		Масса 1 п.м., кг	Материал
			J _x , см ⁴	J _y , см ⁴	W _x , см ³	W _y , см ³		
ПС-150-0,8	0,8	150	6,0	73,6	2,0	9,03	1,8	Сталь ОЦ 08пс
ПС-175-0,8		175	6,0	105,4	2,0	11,1	1,97	
ПС-200-0,8		200	6,0	145,0	2,0	13,5	2,15	
ПС-150-1,0	1,0	150	7,93	91,4	2,54	12,19	2,2	
ПС-175-1,0		175	7,93	131,1	2,54	15,0	2,41	
ПС-200-1,0		200	7,93	180,4	2,54	18,04	2,61	
ПС-150-1,2	1,2	150	10,15	108,6	3,07	14,48	2,62	
ПС-175-1,2		175	10,15	156,7	3,07	17,91	2,87	
ПС-200-1,2		200	10,15	215,5	3,07	21,55	3,11	
ПС-150-1,5	1,5	150	13,32	135,8	3,9	18,1	3,28	
ПС-175-1,5		175	13,32	195,0	3,9	22,3	3,59	
ПС-200-1,5		200	13,32	268,4	3,9	26,84	3,92	
ПС-250-1,5		250	13,32	453,8	3,9	36,6	4,56	
ПС-150-2,0	2,0	150	19,06	178,0	5,25	23,7	4,29	
ПС-175-2,0		175	19,06	257,0	5,25	29,4	4,7	
ПС-200-2,0		200	19,06	354,0	5,25	35,4	5,1	
ПС-250-2,0		250	19,06	609,7	5,25	48,4	5,88	

ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Таблица П 2.1

Холоднокатанные стоечные профили С - образного сечения (ООО "Полиметалл - СПб")



Условные обозначения к рисунку и таблице:

H – высота профиля, мм;

B = 50 – ширина полки профиля, мм;

L = 15 – ширина отбортовки, мм;

T – толщина профиля, мм;

R2 – внутренний радиус, мм.

Обозначение профиля	H, мм	t, мм	Площадь сечения, мм ²	Масса 1 м, кг/м	Справочные значения							Ширина заготовки, мм
					Jx, см ⁴	Jy, см ⁴	Wx, см ³	Wy, см ³	ix, см	Iy, см	Z0, см	
SA-60-0,7	60	0,7	127	0,997	8,03	4,59	2,67	1,55	2,52	1,9	2,04	179
SA-60-1,0	60	1,0	179	1,41	11,29	6,51	3,76	2,21	2,50	1,9	2,06	179
SA-60-1,2	60	1,2	211	1,66	13,42	7,80	4,47	2,67	2,49	1,9	2,08	176
SA-60-1,5	60	1,5	264	2,07	16,5	9,66	5,50	3,32	2,47	1,89	2,09	176
SA-60-2,0	60	2,0	346	2,72	21,44	12,87	7,14	4,50	2,44	1,89	2,14	173
SA-100-0,7	100	0,7	159	1,31	23,08	4,25	4,12	1,63	3,81	1,64	2,45	227
SA-100-1,0	100	1,0	227	1,84	36,01	6,68	6,61	2,76	3,99	1,72	2,27	227

Окончание табл. П 2.1

Обозначение профиля	H, мм	t, мм	Площадь сечения, мм ²	Масса 1м, кг/м	Справочные значения							Ширина заготовки, мм
					Jx, см ⁴	Jy, см ⁴	Wx, см ³	Wy, см ³	ix, см	Iy, см	Z ₀ , см	
SA-100-1,2	100	1,2	272	2,20	44,42	8,39	8,40	3,63	4,04	1,76	2,17	227
SA-100-1,5	100	1,5	340	2,73	55,17	11,00	11,17	5,09	4,03	1,80	2,04	227
SA-100-2,0	100	2,0	453	3,62	72,23	15,38	14,74	7,84	3,99	1,84	1,86	227
SA-150-0,7	150	0,7	188	1,48	64,79	6,29	8,64	1,73	5,85	1,82	1,37	269
SA-150-1,0	150	1,0	269	2,11	92,00	8,95	12,27	2,48	5,84	1,82	1,39	269
SA-150-1,2	150	1,2	319	2,50	110,00	10,74	14,66	2,99	5,83	1,82	1,40	266
SA-150-1,5	150	1,5	399	3,13	136,55	13,32	17,20	3,72	5,81	1,81	1,42	266
SA-150-2,0	150	2,0	526	4,13	180,83	17,87	24,11	5,04	5,78	1,82	1,46	263
SA-175-0,7	175	0,7	205	1,61	93,05	6,57	10,63	1,75	6,71	1,78	1,26	294
SA-175-1,0	175	1,0	294	2,31	132,23	9,36	15,11	2,51	6,70	1,78	1,27	294
SA-175-1,2	175	1,2	349	2,74	152,24	11,23	18,08	3,02	6,68	1,78	1,29	291
SA-175-1,5	175	1,5	437	3,43	196,60	13,94	22,46	3,76	6,67	1,77	1,30	291
SA-175-2,0	175	2,0	576	4,52	260,78	18,71	29,80	5,12	6,65	1,78	1,34	288
SA-200-0,7	200	0,7	223	1,75	127,76	6,82	12,77	1,78	7,55	1,74	1,16	319
SA-200-1,0	200	1,0	319	2,50	181,68	9,70	18,17	2,54	7,53	1,74	1,18	319
SA-200-1,2	200	1,2	379	3,98	217,52	11,65	21,75	3,06	7,52	1,74	1,19	316
SA-200-1,5	200	1,5	474	3,72	270,43	14,47	27,04	3,80	7,51	1,73	1,20	316
SA-200-2,0	200	2,0	626	4,91	359,16	19,43	35,91	5,18	7,49	1,74	1,24	313
SA-250-0,7	250	0,7	258	2,03	218,73	7,20	17,50	1,81	9,19	1,66	1,01	369
SA-250-1,0	250	1,0	369	2,90	311,34	10,26	24,90	2,58	9,17	1,66	1,02	369
SA-250-1,2	250	1,2	439	3,45	373,00	12,32	29,84	3,11	9,16	1,66	1,04	366

Окончание табл. П 2.1

Обозначение профиля	H, мм	t, мм	Площадь сечения, мм ²	Масса 1м, кг/м	Справочные значения							Ширина заготовки, мм
					Jx, см ⁴	Jy, см ⁴	Wx, см ³	Wy, см ³	ix, см	Iy, см	Z ₀ , см	
SA-250-1,5	250	1,5	549	4,31	464,17	15,30	37,13	3,88	9,15	1,66	1,05	366
SA-250-2,0	250	2,0	726	5,70	617,45	20,57	49,39	5,27	9,13	1,66	1,09	363
SA-300-0,7	300	0,7	293	2,30	342,07	7,50	22,80	1,82	10,78	1,60	0,89	419
SA-300-1,0	300	1,0	419	3,29	487,21	10,68	32,48	2,67	10,77	1,59	0,91	419
SA-300-1,2	300	1,2	499	3,92	583,93	12,83	38,92	3,20	10,75	1,59	0,92	416
SA-300-1,5	300	1,5	624	4,90	727,16	15,94	48,47	3,98	10,75	1,59	0,93	416
SA-300-2,0	300	2,0	826	6,48	968,20	21,44	64,54	5,36	10,73	1,59	0,97	413