

**АССОЦИАЦИЯ
«ОБЪЕДИНЕНИЕ УЧАСТНИКОВ БИЗНЕСА ПО РАЗВИТИЮ
СТАЛЬНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА**

ПОСОБИЕ

РАСЧЕТ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ СТАЛЬНЫХ ГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ

(к СП 260.1325800.2016)

**Москва
2019**

ПОСОБИЕ. РАСЧЕТ ЭЛЕМЕНТОВ ИЗ СТАЛЬНЫХ ГНУТЫХ ПРОФИЛЕЙ.
(к СП 260.1325800.2016) – Москва, 2020. – 173 с., ил.

В пособии рассматриваются примеры расчета элементов конструкций их гнутых профилей в соответствии с требованиями свода правил СП 260.1325800.2016.

В примерах расчета использованы профили, изготовленные из стали толщиной не более 4 мм по ГОСТ Р 58384-2019. В пособии приведены примеры определения геометрических характеристик элементов из профилей при центральном сжатии и изгибе с учетом изменений начальной формы сечения профилей; примеры определения несущей способности элементов при растяжении, сжатии, изгибе и при потере устойчивости элементов с учетом изгибной, крутильной и изгибно-крутильной форм потери устойчивости. Рассмотрены примеры определения несущей способности соединений гнутых профилей в конструкциях с помощью самонарезающих винтов, вытяжных заклепок и болтов.

Пособие рассчитано на инженерно-технических работников проектных и строительных организаций.

© Ассоциация развития стального строительства

Настоящее пособие не может быть полностью или частично воспроизведено, тиражировано и распространено без разрешения Ассоциации «Объединение участников бизнеса по развитию стального строительства»

Содержание

Введение	5
1 Общие данные	7
2 Определение геометрических характеристик сечения гнутых профилей	11
2.1 Определение геометрических характеристик эффективного сечения центрально сжатого профиля с учетом с потери местной устойчивости	14
2.2 Определение геометрических характеристик эффективного сечения центрально-сжатого профиля с учетом потери устойчивости и изменением начальной формы сечения профиля	19
2.3 Определение геометрических характеристик эффективного сечения изгибаемого профиля с учетом потери местной устойчивости и изменением начальной формы сечения профиля	27
2.4 Определение геометрических характеристик составного сечения из двух гнутых профилей С-образного сечения	45
3 Определение несущей способности гнутого профиля при действии осевого растяжении и изгиба	52
4 Определение несущей способности гнутого профиля при центральном сжатии с учетом изгибной, крутильной и изгибно-крутильной форм потери устойчивости	56
5 Определение несущей способности гнутого профиля при действии продольной силы с изгибом с учетом изгибной, крутильной и изгибно-крутильной форм потери устойчивости	62
6 Определение несущей способности изгибаемого элемента из гнутого профиля с учетом крутильной и изгибно-крутильной форм потери устойчивости	73
7 Определение несущей способности изгибаемого элемента с учетом местной устойчивости стенки при сосредоточенной нагрузке	78
8 Расчет соединений ЛСТК	82
8.1 Расчет соединений на вытяжных заклепках и самосверлящих самонарезающих винтах	82

8.2 Расчет соединений на болтах	97
ПРИМЕР РАСЧЕТА КАРНИЗНОГО УЗЛА 1 (СМ. РИС. 45)	103
Библиография	109
Приложения	111
П.1. Определение геометрических характеристик эффективного сечения центрально сжатого несимметричного профиля с учетом потери местной устойчивости	112
П.2. Определение геометрических характеристик эффективного сечения центрально-сжатого несимметричного профиля с учетом потери устойчивости и изменением начальной формы сечения профиля	122
П.3. Определение геометрических характеристик эффективного сечения изгибаемого несимметричного профиля с учетом потери местной устойчивости и изменением начальной формы сечения профиля	131
П.4. Расчет рамы каркаса производственного здания из спаренных гнутых Σ - образных профилей	149
П.5. Расчет балки междуэтажного перекрытия здания детского сада из спаренных гнутых С – образных профилей	166

Введение

СП 260.1325800.2016 «Конструкции стальные тонкостенные из холодногнутых оцинкованных профилей и гофрированных листов. Правила проектирования» утвержден приказом Минстроя России от 3 декабря 2016г. № 881/пр, вступил в действие с 4 июня 2017г. [1].

Свод правил содержит основные положения расчета легких стальных тонкостенных конструкций (ЛСТК) их гнутых профилей, включающее:

- расчет элементов на осевые силы и изгиб;
- расчет элементов с учетом изгибной, крутильной и изгибно-крутильной форм потери устойчивости;
- расчет элементов с учетом местной потери устойчивости при сосредоточенных нагрузках;
- расчет винтовых, заклепочных и болтовых соединений элементов ЛСТК.

Расчет ЛСТК из гнутых профилей имеет ряд особенностей, отличающих его от расчета конструкций из стального проката толщиной более 4,0 мм и связанных в основном с тонкостенностью профилей в составе ЛСТК. Эти особенности расчета нашли свое отражение в СП 260.1325800.2016 и в зарубежных стандартах (Еврокод 3 [2], [3], [4], Стандарт Североамериканских стран [5]).

Применение методики расчета легких стальных тонкостенных конструкций их гнутых профилей, изложенных в этих нормативных документах, в практике отечественного проектирования ЛСТК связано с определенными трудностями, вызванными не столько сложностью и объемом вычислений, сколько с дефицитом подготовленных специалистов.

Разработка данного пособия ставила целью показать на примерах расчета возможности практического применения основных положений СП 260.1325800.2016 при проектировании ЛСТК, что позволит повысить квалификацию специалистов и качество проектов.

Замечания и предложения по дополнениям и изменениям настоящего пособия просим направлять по адресу: 119034, Россия, г. Москва, ул.Остоженка 19, стр.1, АРСС, +7 (495) 744-02-63, e-mail: info@steel-development.ru

1 Общие данные

В Пособие включены примеры расчета элементов, выполненных из гнутых профилей, изготовленные из стали толщиной не более 4 мм по ГОСТ Р 58384-2019 [6] и ГОСТ Р 58385-2019 [7].

Форму поперечного сечения, размеры, справочные величины, предельные отклонения размеров гнутых профилей, а также кривизну, скручивание, волнистость полок, стенок и отгибов приводятся в стандарте на сортамент профилей.

Предельные отклонения по толщине профилей должны соответствовать предельным отклонениям по толщине заготовки шириной от 1200 до 1800 мм, точности прокатки А и Б по пункту 4.3 ГОСТ Р 52246—2016 [8]. Предельные отклонения по толщине не распространяются на отклонения в зонах пластических деформаций (углы, рифы и сгибы).

Основные положения, условные обозначения и расчетные формулы в Пособии приняты по СП 260.1325800.2016.

Применение тонких гнутых профилей связано с рядом проблем расчетного характера, с которыми обычно не сталкиваются при использовании обычных горячекатаных профилей. К таким проблемам относятся:

- неоднородное распределение свойств материала в связи с холодной обработкой;
- закругленные углы и расчет геометрических характеристик;
- потеря местной устойчивости;
- потеря устойчивости, сопровождающаяся изменением начальной формы сечения профиля в пределах упругой работы;
- крутильная и изгибно-крутильная формы потери устойчивости;
- скручивание полки;
- смятие, коробление и выпучивание стенки.

Эти эффекты и правила их учета рассмотрены ниже в настоящем пособии.

Для обеспечения надежности несущих конструкций при их расчете в соответствии с СП 260.1325800.2016 [1] следует использовать нормативное и расчетное

сопротивления стали определенные исходя из предела текучести σ_m принимаемым по государственным стандартам и техническим условиям на сталь.

В соответствии с п. 5.3.3 СП 260.1325800.2016 допускается использовать в расчетах изменчивость механических свойств стали по сечению гнутых профилей, полученные на основании экспериментальных данных. По сечению гнутого профиля следует выделять три зоны упрочнения: местагиба; плоские участки, прилегающие к местамгиба и средние зоны плоских участков.

Нормативные и расчетные сопротивления, а также коэффициенты для этих зон необходимо определять и обосновывать статистической обработкой с использованием распределений минимальных значений механических свойств.

Область применения пособия ограничена максимальными значениями отношения ширины к толщине, которые приведены в таблице 1. Применение профилей с элементами сечений, превышающими эти пропорции, должно быть обосновано экспериментально.

Гнутые профили имеют закругленные углы, что делает вычисление геометрических характеристик менее очевидным, чем при острых углах.

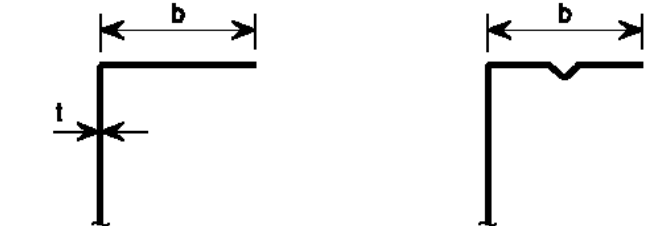
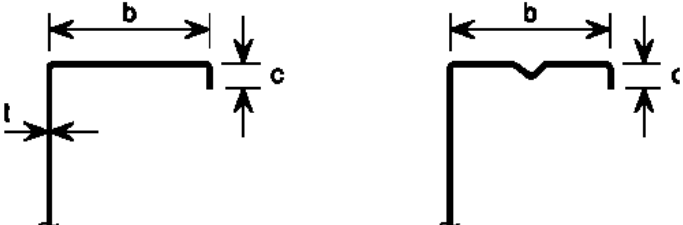
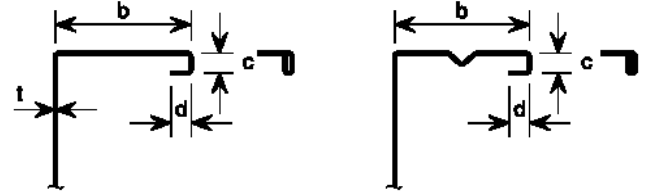
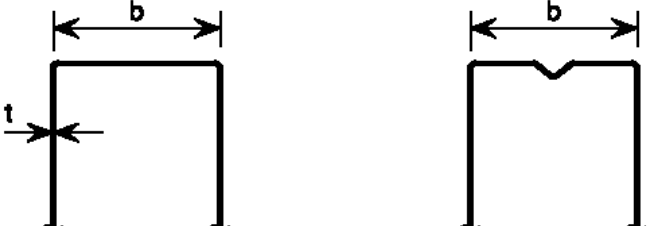
В соответствии с СП 260.1325800.2016 при определении расчетных характеристик сечения гнутых профилей в рассматриваемых в Пособии примерах применены идеализированные сечения, состоящие из плоских участков с острыми углами вместо сечений с закругленными угламигиба профилей.

Согласно СП 260.1325800.2016 для таких профилей условную ширину плоской грани b_p (используемую в качестве основы для вычисления свойств расчетного сечения) следует измерять до средних точек образующих угол элементов сечения, как показано на Рис. 1.

Для малых внутренних радиусов эффект от закругленных углов меньше, и им можно пренебречь. Согласно СП 260.1325800.2016 допускается расчет характеристик сечения для идеализированного сечения с концентрацией материала на средних линиях фактических элементов сечения, как показано на Рис. 2, при условии,

что $r < 5t$ и $r < 0,10b_p$, где r - внутренний радиус угла, t - толщина материала и b_p - ширина плоского элемента сечения.

Таблица 1 — Максимальные значения отношения ширины к толщине

Часть поперечного сечения	Максимальное значение
	$b/t \leq 50$
	$b/t \leq 60$ $c/t \leq 50$
	$b/t \leq 90$ $c/t \leq 60$ $d/t \leq 50$
	$b/t \leq 500$

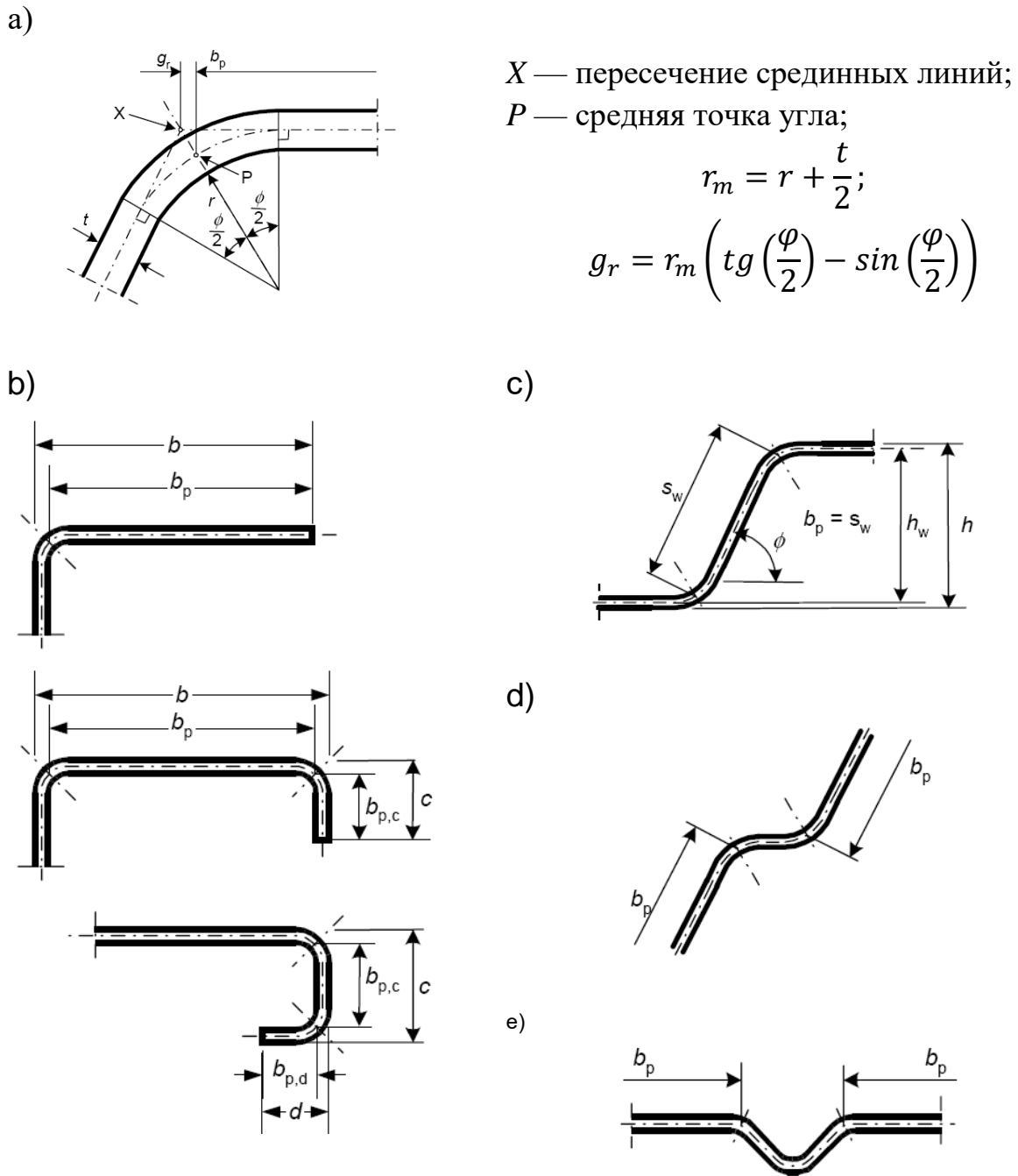


Рис. 1. Условная ширина b_p плоских участков поперечного сечения, примыкающих к углу:

- a — средняя точка угла или сгиба;
- b — условная ширина b_p для плоских элементов b , c и d ;
- c — условная ширина плоского участка b_p стенки ($b_p =$ длина наклонного участка s_w);
- d — условная ширина b_p плоских частей, смежных с элементом жесткости на стенке;
- e — условная ширина b_p плоских участков, смежных с элементом жесткости на полке

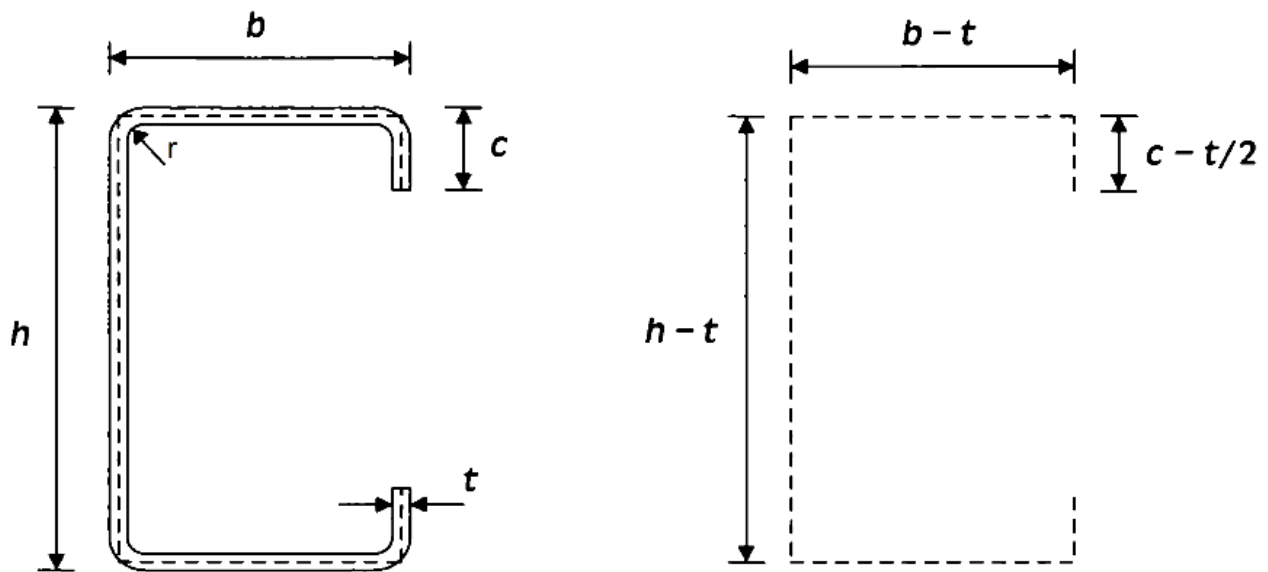


Рис. 2. Характеристики идеализированного сечения

2 Определение геометрических характеристик сечения гнутых профилей

Блок-схемы, показанные на рисунках 2.1 и 2.2, схематично представляют расчет характеристик эффективного сечения для гнутых стальных профилей центрально сжатого и изгибаемого профилей.

На примерах 1, 2 и 3 показаны подробные расчеты характеристик сечений гнутого профиля С-образного сечения на основе, описанной в разделе 1 идеализации.

Потеря местной устойчивости сжатых элементов (участков) сечения учитывается в соответствии с требованиями СП 260.1325800.2016, где за основу принимается эффективная ширина рабочего участка, а «неработающие» участки сечения не учитываются, и характеристики сечения определяются с учетом оставшихся частей сечения.

В тех случаях, когда в расчетах возможно применение идеализированного сечения, состоящего из прямолинейных элементов с острыми углами (т.е. при $r < 5t$ и $r < 0,10b_p$), условная ширина b_p плоских элементов сечения (используемая для вычисления характеристик эффективного сечения) может быть принята как ширина идеализированных элементов.

На примере 4 показан расчет характеристик составного сечения из двух гнутых профилей С-образного сечения с помощью программы реализованной средствами Microsoft Excel и встроенного в него программного языка Visual Basic.

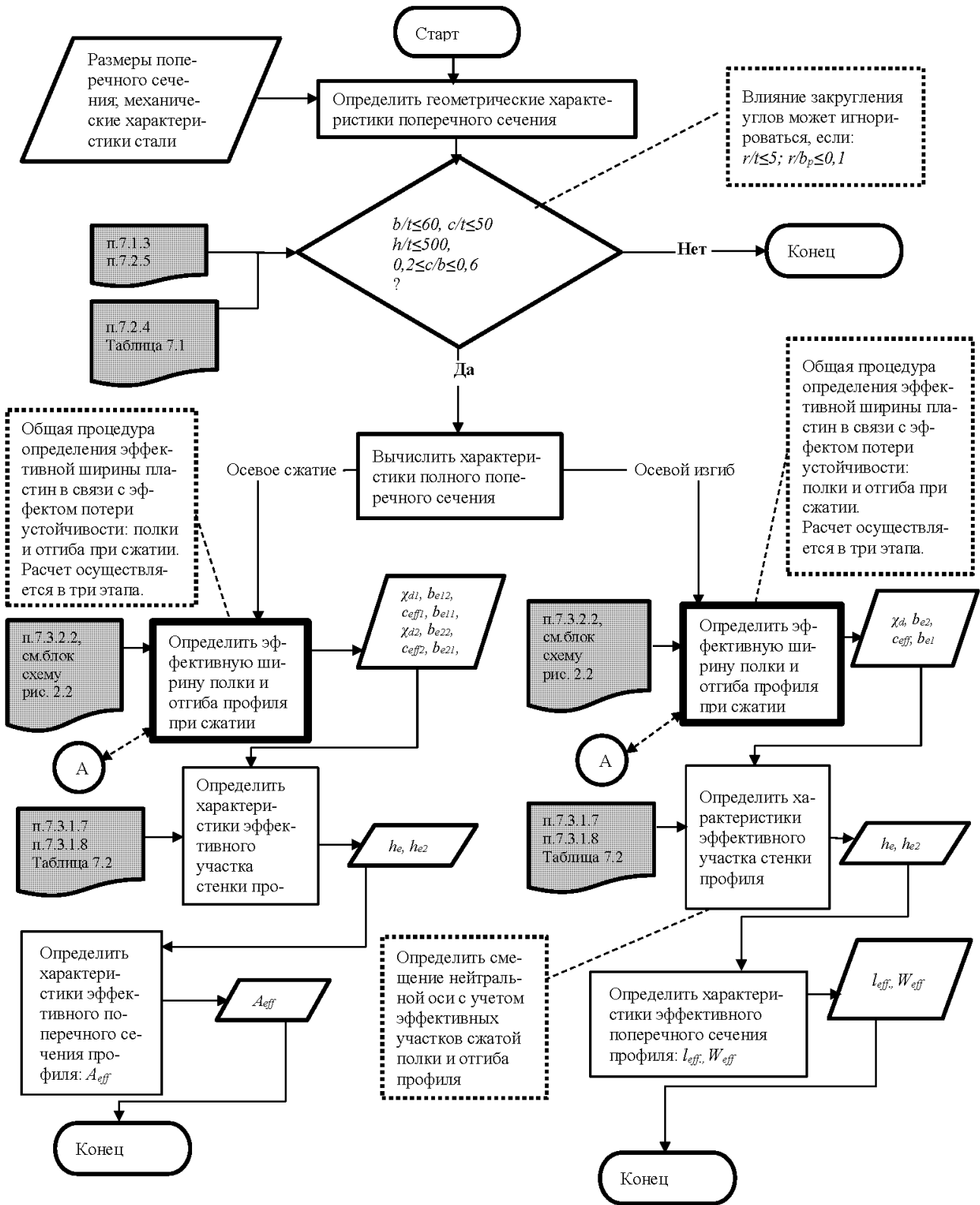


Рис. 2.1. Блок схема расчета характеристик эффективного сечения центрально сжатого и изгибаемого профиля с учетом потери местной устойчивости плоских участков профиля

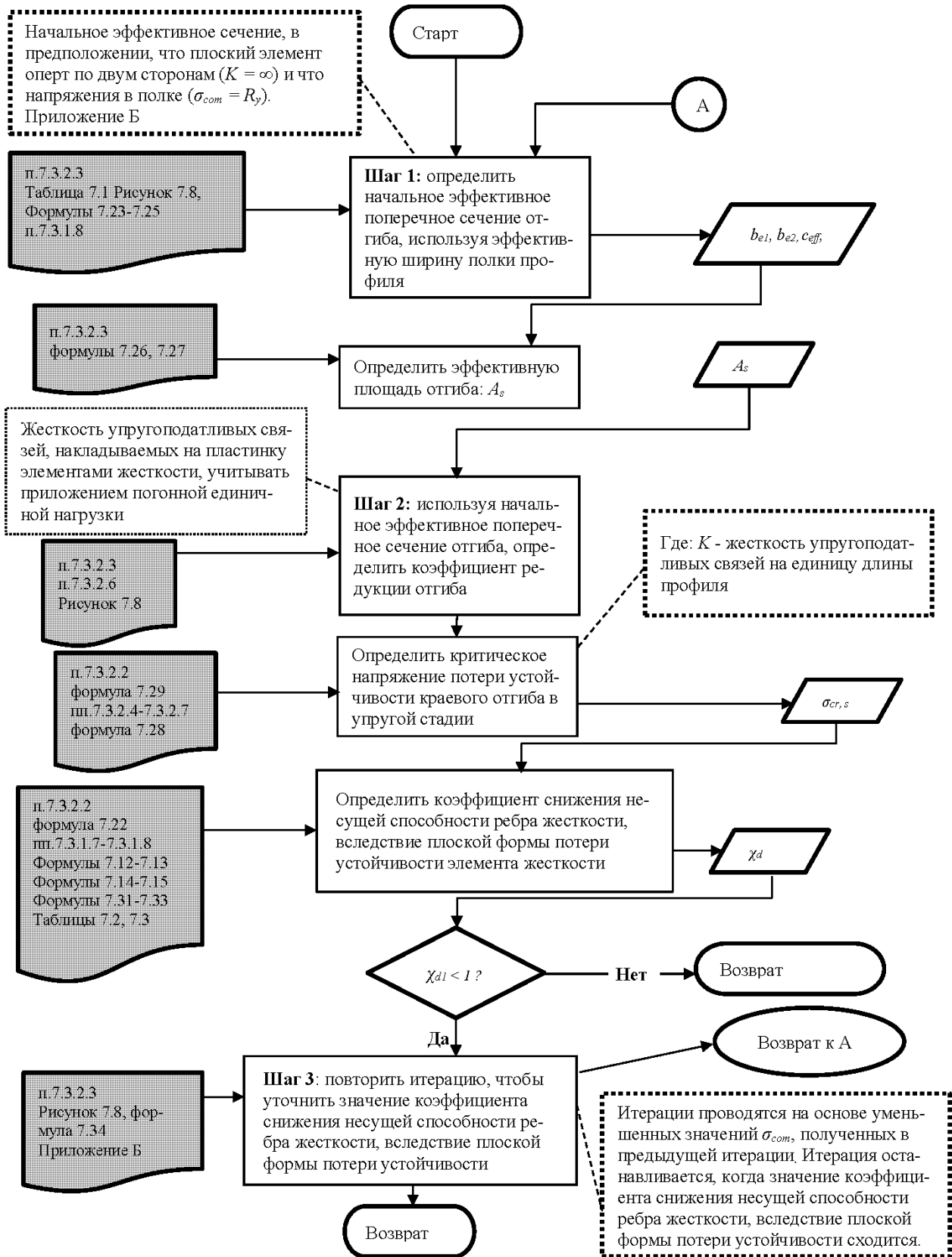


Рис. 2.2. Блок схема итерационного расчета характеристик эффективного сечения центрально сжатого и изгибаемого профиля с учетом изменения начальной формы сечения профиля с концевыми и промежуточными элементами жесткости

2.1 Определение геометрических характеристик эффективного сечения центрально сжатого профиля с учетом с потери местной устойчивости

Вычисление характеристик эффективного сечения центрально сжатого профиля с учетом с потери местной устойчивости плоских участков С-образного сечения показано в Примере 1. Однако для такого сечения необходимо также учитывать потерю устойчивости при изменении начальной формы сечения профиля в пределах упругой работы, которая рассматривается в Примере 2.

Пример 1. Расчет характеристик сечения с учетом местной устойчивости пластин:

Требуется найти эффективную площадь и горизонтальное смещение нейтральной оси в связи с эффектом потери местной устойчивости для гнутого профиля С-образного сечения 200 х 95 х 2,5, изготовленного из оцинкованной стали с номинальным пределом текучести 350 Н/мм² и модулем Юнга 210000 Н/мм² при осевом сжатии. Толщина цинкового покрытия класса 275 составляет $q = 0,04$ мм при толщине профиля 2,5 мм, и не учитывается в расчете.

Геометрические характеристики сечения

Геометрические размеры сечения представлены на Рис. 3.

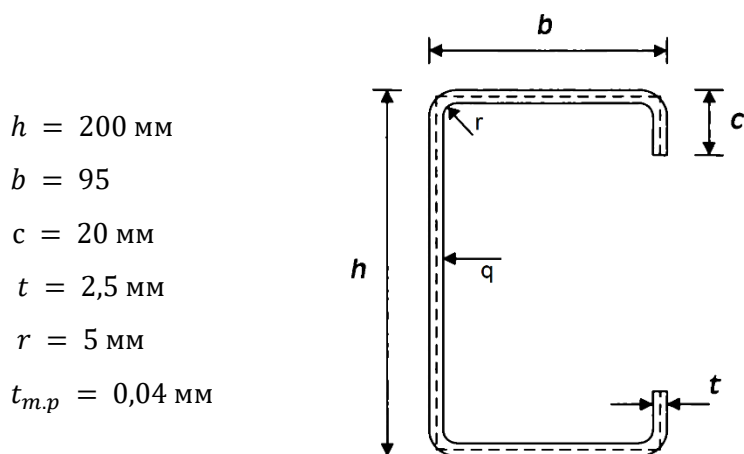


Рис. 3. Геометрические размеры сечения С-образного гнутого профиля 200 х 95 х 2,5 мм

Внутренние радиусы углов меньше $r < 5t$ и $r < 0,10b_p$. Следовательно, можно использовать идеализированную геометрию без существенной погрешности.

Размеры полного сечения

Размеры полного сечения показаны на Рис. 4.

Расчет геометрических характеристик полного сечения

Полная площадь:

$$A_g = (h - t) * (t - t_{m.p}) + 2(b - t) * (t - t_{m.p}) + 2 * \left(c - \frac{t}{2}\right) * (t - t_{m.p}) = 1033 \text{ мм}^2$$

Положение нейтральной оси Z относительно средней линии стенки для полного сечения:

$$Z = \frac{2 * (b - t) * (t - t_{m.p}) * \left(\frac{b - t}{2}\right) + \left(2 * \left(c - \frac{t}{2}\right) * (t - t_{m.p}) * (b - t)\right)}{A_g} = 28,63 \text{ мм}$$

Момент инерции полного сечения:

$$I_g = \frac{(h - t)^3 * (t - t_{m.p})}{12} + 2 * \left(\frac{(b - t) * (t - t_{m.p})^3}{12}\right) + \left((b - t) * (t - t_{m.p}) * \left(\left(\frac{h - t}{2}\right)^2\right)\right) +$$

$$+ 2 * \left(\frac{\left(\left(c - \frac{t}{2}\right)^3\right) * (t - t_{m.p})}{12}\right) + \left(c - \frac{t}{2}\right) * (t - q) * \left(\left(\left(\frac{h - t}{2}\right)^2\right) - \left(c - \frac{t}{2}\right)^2 + \left(c - \frac{t}{2}\right) / 2\right)^2 = 11330 \text{ см}^4$$

Момент сопротивления полного сечения:

$$W = I_g * \left(\frac{h - t}{2}\right)^{-1} = 114800 \text{ мм}^3$$

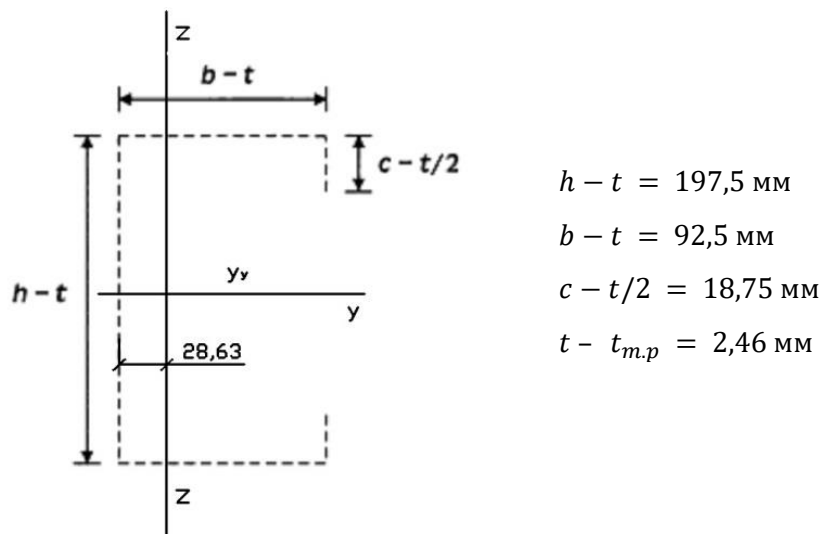


Рис. 4. Геометрические размеры полного сечения С-образного гнутого профиля 200 x 95 x 2,5 мм

Определение эффективной ширины пластин в связи с эффектом потери устойчивости

Стенка профиля:

Коэффициент потери устойчивости, зависящий от граничных условий и характера напряжений в пластине $k_\sigma = 4,0$ для внутреннего элемента при осевом сжатии при $\psi = 1$ (СП 260.1325800.2016, Табл. 7.2)

Поправочный коэффициент, зависящий от R_y

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{R_y}} = 0,819$$

Условная гибкость пластины:

$$\lambda_p = \frac{\left(\frac{h-t}{t-t_{m.p}} \right)}{\sigma_{cr} * \varepsilon * \sqrt{k_\sigma}} = 1,725$$

Редукционный коэффициент и эффективная ширина пластины:

$$\rho = \frac{(\lambda_p - 0.055 * (3 + \psi))}{\lambda_p^2} = 0.506$$

$$b_{ef} = \rho * (h - t) = 99.89 \text{ мм}$$

$$\frac{b_{ef}}{2} = 49,95 \text{ мм}$$

Полки профиля:

Коэффициент потери устойчивости $k_\sigma = 4,0$ для внутреннего элемента при осевом сжатии при $\psi = 1$ (СП 260.1325800.2016, Табл. 7.2)

Поправочный коэффициент, зависящий от R_y ¹:

$$\varepsilon_2 = \sqrt{\frac{235}{R_y}} = 0,819$$

Условная гибкость пластины:

$$\lambda_{p2} = \frac{\left(\frac{h-t}{t-t_{m,p}}\right)}{\sigma_{cr} * \varepsilon_2 * \sqrt{k_\sigma}} = 0,808$$

Редукционный коэффициент:

$$\rho_2 = \frac{(\lambda_{p2} - 0.055 * (3 + \psi))}{\lambda_{p2}^2} = 0,901$$

Эффективная ширина пластины:

$$b_{ef2} = \rho_2 * (b - t) = 83,32 \text{ мм}$$

$$\frac{b_{ef2}}{2} = 41,66 \text{ мм}$$

Отгибы:

Коэффициент потери устойчивости $k_\sigma = 0,43$ для выступающего элемента при осевом сжатии при $\psi = 1$ (СП 260.1325800.2016, Табл. 7.3)

$$\varepsilon_3 = \sqrt{\frac{235}{R_y}} = 0,819$$

$$\lambda_{p3} = \frac{\left(\frac{c-t/2}{t-t_{m,p}}\right)}{\sigma_{cr} * \varepsilon_3 * \sqrt{k_\sigma}} = 0,499$$

$$\lambda_{p3} < 0,748$$

$$\rho_3 = 1$$

¹ индекс 2 и аналогичные в параметрах условные, приняты для приведенных расчетов в среде Mathcad

Эффективная ширина пластины:

$$b_{ef3} = \rho_3 * \left(c - \frac{t}{2} \right) = 18,75 \text{ мм}$$

Полное и расчетное сечения

Полное и эффективное сечения показаны на Рис. 5.

Характеристики эффективного сечения

Эффективная площадь:

$$A_{eff} = [b_{ef}(t - t_{m,p})] + [2b_{ef2}(t - t_{m,p})] + [2b_{ef3}(t - t_{m,p})] = 747,9 \text{ мм}^2$$

Положение нейтральной оси Z относительно средней линии стенки для эффективного сечения:

$$Z_{ef} = \frac{\left[[b_{ef}(t - t_{m,p}) * \frac{b_{ef}}{2}] + 2 \left[b_{ef}(t - t_{m,p}) * \left[(b - t) - \frac{b_{ef}}{2} \right] \right] + [2b_{ef3}(t - t_{m,p})] * (b - t) \right]}{A_{eff}} = 36,76 \text{ мм}$$

Смещение нейтральной оси Z из положения для полного сечения до положения для эффективного сечения:

$$e_{Ny} = z_{ef} - z = 8,13 \text{ мм}$$

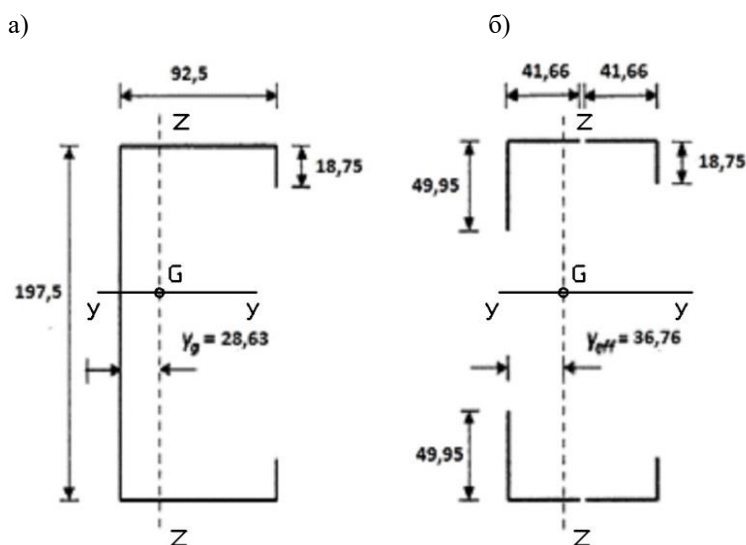


Рис. 5. Сечение С-образного гнутого профиля 200 x 95 x 2,5 мм:
а) идеализированное сечение; б) эффективное сечение (размеры в мм)

2.2 Определение геометрических характеристик эффективного сечения центрально-сжатого профиля с учетом потери устойчивости и изменением начальной формы сечения профиля

Предпосылки

Потеря устойчивости, сопровождающаяся изменением начальной формы сечения профиля в пределах упругой работы, происходит в тех случаях, когда концевые или внутренние элементы жесткости не в состоянии препятствовать локальному смещению узловых точек (либо на стыке полки с отгибом, либо в месте расположения промежуточных элементов жесткости).

Местная потеря устойчивости продольно сжатых полок, стенки профиля и изменения начальной формы сечения профиля в пределах упругой работы для профилей с концевыми и промежуточными элементами жесткости показаны на Рис. 6 и 7 соответственно.

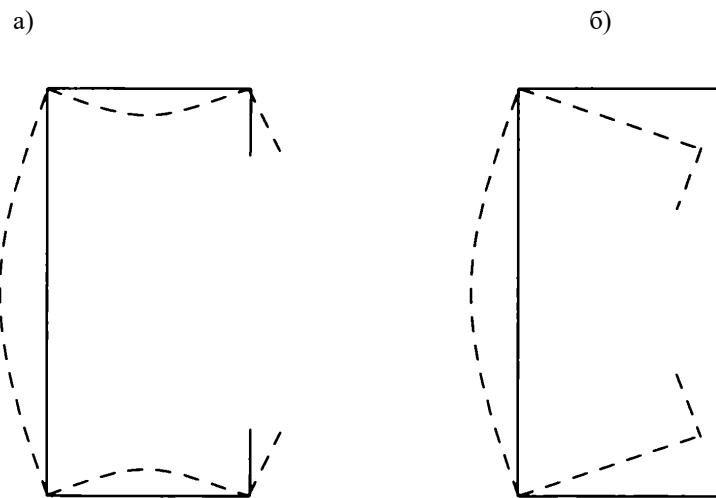


Рис. 6. Формы потери устойчивости гнутого профиля С-образного сечения при осевом сжатии:
 а) потеря местной устойчивости элементов сечения; б) потеря устойчивости, сопровождающаяся изменением начальной формы сечения профиля в пределах упругой работы с концевыми элементами жесткости

Описание расчетной модели

Описание расчетной модели сжатых элементов с концевыми или промежуточными элементами жесткости, учитывающее изменения начальной формы сечения профиля в пределах упругой работы приведено в п.7.3.2.2 СП

260.1325800.2016. Метод основан на предположении, согласно которому элемент жесткости ведет себя как сжатый стержень с непрерывным боковым раскреплением, представленным условной пружиной (жесткости K). Пружина действует на центр тяжести расчетного сечения элемента жесткости, как показано на Рис. 8.



Рис. 7. Формы потери устойчивости гнутого профиля С-образного сечения при осевом сжатии: а) потеря местной устойчивости элементов сечения; б) потеря устойчивости, сопровождающаяся изменением начальной формы сечения профиля в пределах упругой работы с элементами жесткости

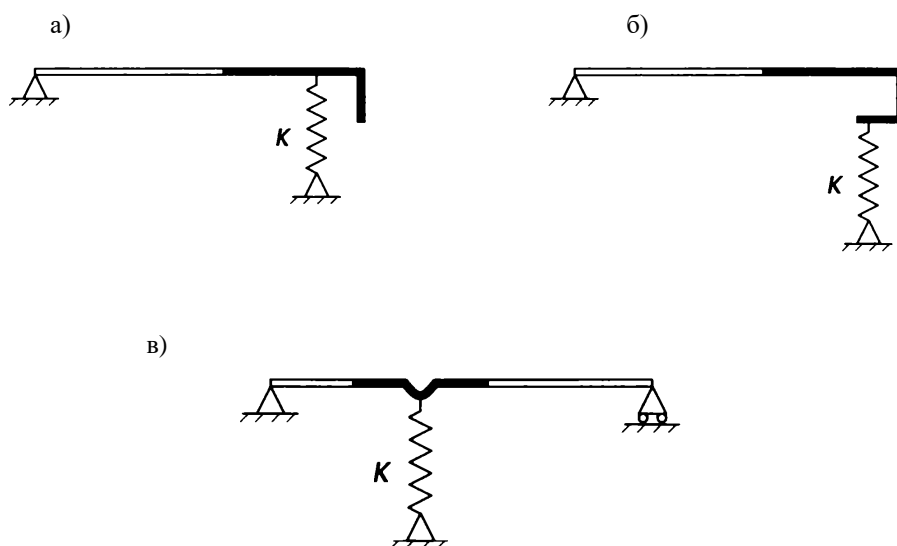


Рис. 8. Расчетные модели для концевых и промежуточных элементов жесткости: а) элемент жесткости с одинарным краевым отгибом; б) элемент жесткости с двойным краевым отгибом; в) промежуточный элемент жесткости

Жесткость условной пружины может быть получена путем расчета на единичную нагрузку, который должен учитывать изгибную жесткость рассматриваемого сжатого элемента и закрепление от поворота, обеспечиваемое примыкающими участками.

Условные пружины на концах сжатых элементов используются для моделирования закрепления от вращения примыкающими участками, при этом жесткость условной пружины S_θ зависит от изгибной жесткости и краевых условий для примыкающих участков, а также распределения напряжений, действующих в сечении.

Вычисление жесткости K условной пружины для гнутого профиля С-образного сечения и вычисление характеристик сечения в связи с потерей устойчивости при изменении начальной формы сечения профиля в пределах упругой работы рассматривается в Примере 2.

Пример 2. Расчет характеристик сечения профиля с учетом потери устойчивости при изменении начальной формы сечения профиля в пределах упругой работы:

В данном примере показан метод определения сопротивления поперечного сечения в связи с потерей местной устойчивости плоских участков гнутого профиля С-образного сечения и потерей устойчивости при изменении начальной формы сечения профиля в пределах упругой работы по СП 260.1325800.2016. В примере рассматривается гнутый профиль С-образного сечения 200 х 95 х 2,5 из примера 1 (см. раздел 2.1), где были определены характеристики эффективного сечения в связи с потерей местной устойчивости плоских участков сечения. Таким образом, параметры полного и эффективного поперечных сечений уже были вычислены в примере 1.

Геометрические характеристики полного сечения

$$A_g = 1033 \text{ мм}^2 \quad \bar{y}_g = 28,63 \text{ мм}$$

Как было показано в СП 260.1325800.2016, метод определения эффективных геометрических характеристик поперечного сечения в связи с потерей устойчивости гнутого профиля, сопровождающейся изменением начальной формы сечения профиля в пределах упругой работы, включает три этапа, которые приведены на Рис. 9.

Расчет по этим этапам выполнен в рассматриваемом примере.

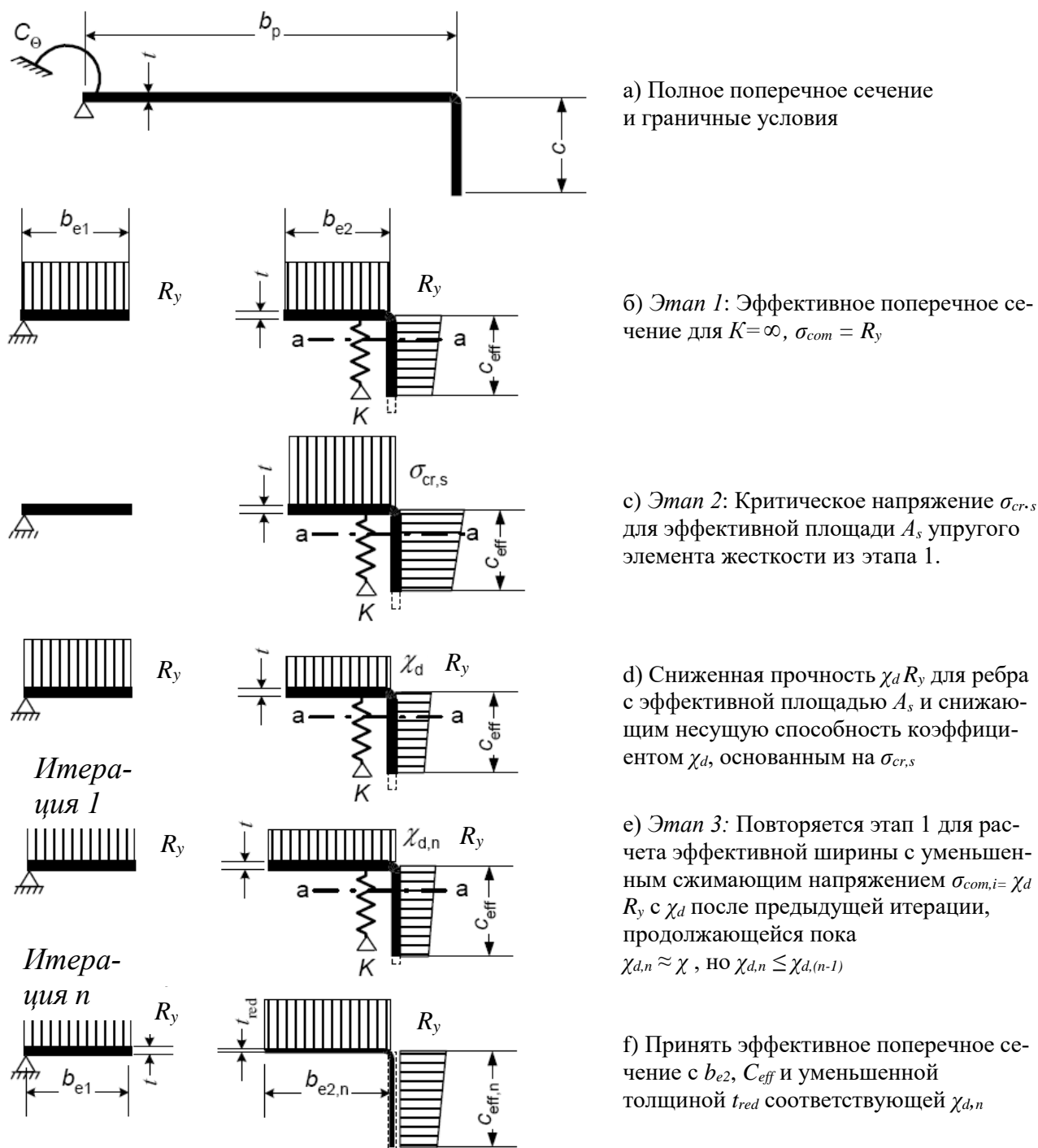


Рис. 9. Этапы расчета сопротивления сжатию полки с элементом жесткости в виде краевого отгиба в связи с потерей устойчивости сопровождающейся изменением начальной формы сечения профиля в пределах упругой работы

Этап 1: Определение начального эффективного сечения

Для стенки и полок начальное эффективное сечение определяется с учетом потери местной устойчивости, рассматривается в Примере 1 (см. раздел 2.1):

$$\text{Стенка: } b_{eff} = 99,89 \text{ мм}$$

$$\text{Полки: } b_{eff.s} = 83,32 \text{ мм}$$

Для отгибов (концевой элемент жесткости в виде краевого отгиба) коэффициент устойчивости k_σ определяется по формулам:

$$k_\sigma = 0,5 \text{ для } b_{p.c}/b_p \leq 0,35$$

$$k_\sigma = 0,5 + 0,83 * \sqrt[3]{\left(\frac{b_{p.c}}{b_p} - 0,35\right)^2} \text{ для } 0,35 \leq \frac{b_{p.c}}{b_p} \leq 0,60$$

Для рассматриваемого примера:

$$\frac{b_{p.c}}{b_p} = 0,203 \leq 0,35 \quad k_\sigma = 0,5$$

Поправочный коэффициент, зависящий от R_y :

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{R_y}} = 0,819$$

Условная гибкость пластины отгиба:

$$\lambda_p = \frac{\left(\frac{b_{ef3}}{t - t_{m.p}}\right)}{\sigma_{cr} * \varepsilon * \sqrt{k_\sigma}} = 0,463$$

$$\lambda_p < 0,748 \quad \rho = 1$$

Эффективная ширина пластины отгиба:

$$b_{ef4} = \rho * \left(c - \frac{t}{2}\right) = 18,75 \text{ мм}$$

Таким образом, начальное эффективное сечение — это сечение, полученное

с учетом местной потери устойчивости плоских участков сечения

В

Примере 1 (см. Рис. 5б).

Этап 2: Расчет приведенной толщины для эффективного сечения концевой элемента жесткости в виде краевого отгиба

Эффективное сечение концевой элемента жесткости, показанное на Рис. 10, здесь рассматривается отдельно с целью определения сопротивления сечения потере устойчивости при изменении начальной формы сечения профиля в пределах упругой работы.

Расчет геометрических характеристик эффективного сечения концевой элемента жесткости

(Обозначения см. на Рис. 10 и в приложении Б СП 260.1325800.2016).

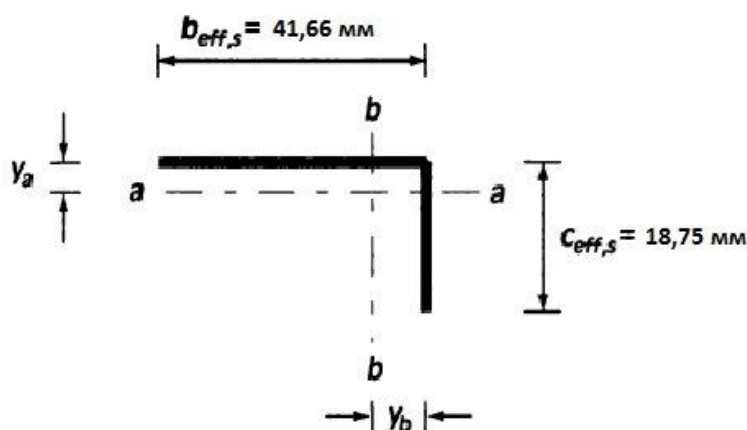


Рис. 10. Эффективное сечение с элементом жесткости в виде краевого отгиба

$$y_a = \frac{\left[\left(c - \frac{t}{2} \right) * (t - t_{m.p}) * \left[\frac{c - t/2}{2} \right] \right]}{\left[[b_{eff,s} * (c - t/2)] * (t - t_{m.p}) \right]} = 2,91 \text{ мм}$$

$$y_b = \frac{\left[b_{eff,y} * (t - t_{m.p}) * \left[\frac{b_{eff,y}}{2} \right] \right]}{\left[[b_{eff,y} * (c - t/2)] * (t - t_{m.p}) \right]} = 14,36 \text{ мм}$$

Площадь эффективного сечения концевой элемента жесткости:

$$A_s = \left[b_{effy} * \left(c - \frac{t}{2} \right) \right] * (t - t_{m.p}) = 148,61 \text{ мм}^2$$

Момент инерции эффективного сечения концевой элемента жесткости:

$$I_s = \left[\left[\frac{(b_{eff.s}/2 * (t - t_{m.p})^3)}{12} \right] + \left[\frac{(t - t_{m.p}) * (c - t/2)^3}{12} \right] + [b_{eff.s}/2 * (t - t_{m.p}) * ((y_a)^2)] \right] + \left[\frac{\left(c - \frac{t}{2} \right)}{2} - y_a \right]^2 = 4199 \text{ см}^2$$

Расчет жесткости K_1 условной пружины

Согласно п. 7.3.2.8 СП 260.1325800.2016:

$$K_1 = \left[\left[\frac{(E(t - t_{m.p})^3)}{4(1 - \vartheta^2)} \right] + \left[\frac{1}{b_1^2 * h_w + b_1^3 + 0.5 * b_1 * b_2 * h_w * k_f} \right] \right] = 0,38 \text{ Н/мм}^2$$

где $b_1 = b_2 = 78,136 \text{ мм}$;

$k_f = 1,0$ для симметричного сечения при центральном сжатии;

$\nu = 0,3$.

Критическое напряжение для эффективного сечения элемента жесткости

Согласно п. 7.3.2.7 СП 260.1325800.2016:

$$\sigma_{cr,s} = \frac{2 * \sqrt{K_1 * E * I_s}}{A_s} = 244,97 \text{ Н/мм}^2$$

Коэффициент снижения несущей способности χ_d при потере устойчивости концевой элемента жесткости сопровождающейся изменением начальной формы сечения профиля в пределах упругой работы

Относительная гибкость:

$$\lambda_d = \sqrt{\frac{R_y}{\sigma_{cr,s}}} = 1,195$$

$$0,65 \leq \lambda_d \leq 1,38$$

Согласно п. 7.3.2.9 СП 260.1325800.2016:

$$\chi_d = 1,47 - 0,723 * \lambda_d = 0,606$$

Скорректированная эффективная площадь и толщина расчетного сечения элемента жесткости в виде краевого отгиба:

$$A_{s,red} = \chi_d * A_s * \left[\frac{R_y}{\sigma_{com}} \right] = 95,5 \text{ мм}^2$$

$$t_{red} = (t - t_{m.p}) * \frac{A_{s,red}}{A_s} = 1,58 \text{ мм}^2$$

Определение характеристик эффективного сечения элемента при потере устойчивости концевого элемента жесткости, сопровождающейся с изменением начальной формы сечения профиля в пределах упругой работы

Эффективная площадь:

$$A_{ef} = [b_{ef} * (t - t_{m.p})] + [b_{eff.s}/2 * (t - t_{m.p})] + [2 * t_{red} * (b_{ef3} + b_{eff.s}/2)] = 528,26 \text{ мм}^2$$

Для сравнения в примере 1 эффективная площадь в связи с потерей местной устойчивости сжатых плоских участков сечения равнялась 747,9 мм².

Положение нейтральной оси Z относительно средней линии стенки для эффективного сечения:

Z_2

$$= \frac{\left[2 \left[b_{eff.s}/2 (t - t_{m.p}) * \frac{b_{eff.s}/2}{2} \right] + \left[2 * b_{eff.s}/2 (t_{red}) * \left[(b - t) - \frac{b_{eff.s}/2}{2} \right] \right] + 2 \left[[b_{ef3} * t_{red}] * (b - t) \right]}{A_{ef}}$$

$$= 35,59 \text{ мм}$$

Горизонтальное смещение нейтральной оси Z относительно средней линии стенки для эффективного сечения:

$$e_{Nz} = z_2 - z = 6,96 \text{ мм}$$

Этап 3: Последующие итерации выполняются в случае необходимости уточнения значения коэффициента снижения несущей способности χ_d .

Значение χ_d может быть уточнено итерационно с помощью измененных значений ρ , полученных при σ_{com} , равном $\chi_d \cdot R_y$ на этапе 1 для каждой итерации. Последовательные этапы представлены в этом примере (см. этапы 1 и 2).

Предельное сжимающее усилие сжатого элемента из гнутого профиля при потере устойчивости в связи с изменением начальной формы сечения профиля в пределах упругой работы равно:

$$N_{CRd} = A_{ef} \cdot R_y = 188,7 \text{ кН}$$

В связи со смещением нейтральной оси на 6,96 мм (от центра тяжести полного сечения к центру тяжести эффективного сечения) необходимо поперечное сечение проверить обязательно на комбинацию осевого сжатия и изгиба с изгибающим моментом равным действующей осевой нагрузке, умноженной на величину смещения нейтральной оси.

2.3 Определение геометрических характеристик эффективного сечения изгибаемого профиля с учетом потери местной устойчивости и изменением начальной формы сечения профиля

Вычисление характеристик эффективного сечения изгибаемого профиля С-образного сечения с учетом потери местной устойчивости плоских участков и изменением начальной формы сечения показано в Примере 3.

Пример 3. Расчет характеристик эффективного сечения изгибаемого профиля

В данном примере рассматривается гнутый профиль С-образного сечения 200 x 95 x 2,5 из Примера 1 (см. раздел 2.1), где были определены характеристики полного сечения. Геометрические размеры сечения представлены на Рис. 3. Таким образом, параметры полного поперечного сечения уже были вычислены в Примере 1.

Геометрические характеристики полного сечения

$$A_g = 1033 \text{ мм}^2 \quad \bar{y}_g = 28,63 \text{ мм}$$

Как было показано в СП 260.1325800.2016, метод определения эффективных геометрических характеристик поперечного сечения с учетом с потерей местной

устойчивости плоских участков и изменением начальной формы сечения в пределах упругой работы, включает три этапа, которые приведены на Рис. 9.

Расчет по этим этапам выполнен в рассматриваемом примере.

При поперечном изгибе распределение напряжений определяется после определения эффективной ширины сжатой полки и краевого отгиба.

Максимальное сжимающее напряжение в полке:

$$\sigma_{\text{com}} = R_y / \gamma_M = 350 / 1,05 = 333,3 \text{ Н/мм}^2$$

Этап 1: Определение начального эффективного сечения

Для сжатой полки шириной b эффективная ширина b_{ef} определяется следующим образом:

Коэффициент потери устойчивости для внутреннего элемента

при $\psi_1 = 1$ $k_\sigma = 4$ (СП 260.1325800.2016, Табл. 7.2).

Условная гибкость пластины:

$$\lambda_p = \frac{\left(\frac{(b-t)}{(t-t_{m,p})} \right)}{\sigma_{cr} * \varepsilon * \sqrt{k_\sigma}} = 0,808$$

Редукционный коэффициент:

$$\rho = \frac{(\lambda_p - 0,055 * (3 + \psi_1))}{\lambda_p^2} = 0,901$$

Эффективная ширина пластины:

$$b_{ef} = \rho * (b - t) = 83,32 \text{ мм}$$

$$b_{ef1} = \frac{b_{ef}}{2} = 41,66 \text{ мм}$$

Для краевого отгиба шириной c эффективная ширина c_{ef} определяется следующим образом:

Для отгибов (концевой элемент жесткости в виде краевого отгиба) коэффициент устойчивости k_σ определяется по формулам:

$$k_\sigma = 0,5 \text{ для } b_{p,c} / b_p \leq 0,35$$

$$k_{\sigma} = 0,5 + 0,83 * \sqrt[3]{\left(\frac{b_{p.c}}{b_p} - 0,35\right)^2} \text{ для } 0,35 \leq \frac{b_{p.c}}{b_p} \leq 0,60$$

Для рассматриваемого примера:

$$\frac{b_{p.c}}{b_p} = 0,203 \leq 0,35 \quad k_{\sigma} = 0,5$$

Поправочный коэффициент, зависящий от R_y :

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{R_y}} = 0,819$$

Условная гибкость пластины отгиба:

$$\lambda_p = \frac{\left(\frac{b_{ef3}}{t - t_{m.p}}\right)}{\sigma_{cr} * \varepsilon * \sqrt{k_{\sigma}}} = 0,463$$

$$\lambda_p < 0,748 \quad \rho = 1$$

Эффективная ширина пластины отгиба:

$$c_{eff} = \rho * \left(c - \frac{t}{2}\right) = 18,75 \text{ мм}$$

Начальное эффективное сечение с элементом жесткости в виде краевого отгиба показано на Рис. 11.

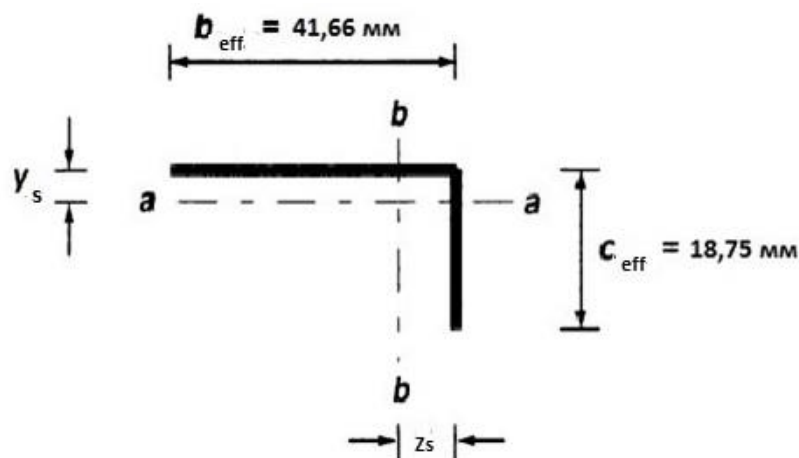


Рис. 11. Эффективное сечение с элементом жесткости в виде краевого отгиба

Полное и эффективное сечения изгибаемого профиля С-образного сечения с учетом потери местной устойчивости плоских участков

Полное и эффективное сечения с учетом с потери местной устойчивости плоских участков показаны на Рис. 12.

Характеристики эффективного сечения

Эффективная площадь:

$$A_{ef} = [b_{eff} * (t - t_{m.p})] + 2[b_{ef2} * (t - t_{m.p})] + [2 * b_{ef3} * (t - t_{m.p})] = 747,9 \text{ мм}^2$$

Смещение нейтральной оси Y из положения для полного сечения до положения для эффективного сечения:

$$Z_2 = \frac{- \left[\left[(b - t) - b_{ef1} - b_{ef1} \right] * (t - t_{m.p}) * \left(\frac{h_p}{2} \right) + \left[\left(c - \frac{t}{2} \right) - c_{eff} \right] * (t - t_{m.p}) * \left[\left(\frac{h_p}{2} \right) - \frac{c_{eff}}{2} \right] \right]}{(t - t_{m.p}) * \left[(c_{eff}) + (b - t) + h_p + b_{ef} + (c - \frac{t}{2}) \right]}$$

$$= -2,21 \text{ мм}$$

где $h_p = h - t = 197,5 \text{ мм}$

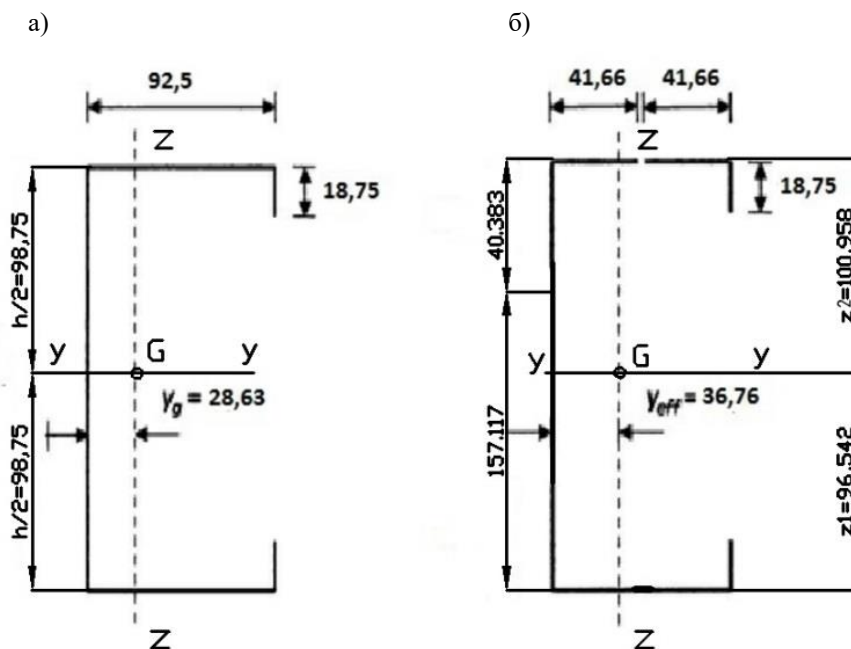


Рис. 12. Сечение С-образного гнутого профиля 200 x 95 x 2,5 мм:

- а) идеализированное сечение;
- б) эффективное сечение с учетом с потери местной устойчивости плоских участков (размеры в мм)

Соотношение напряжений, определенное по геометрическим характеристикам эффективного сечения поперечного сечения:

$$\psi_2 = - \left[\left(\frac{h_p}{2} \right) - z \right] * \left[\frac{h_p}{2} + z \right]^{-1} = -1,046$$

$$\text{где } h_p = h - t = 197,5 \text{ мм}$$

Коэффициент потери устойчивости стенки (СП 260.1325800.2016, Табл. 7.2):

$$k_\sigma = 7,81 + 6,29 * \psi_2 + 9,78 * \psi_2^2 = 25,083$$

Условная гибкость пластины стенки

$$\lambda_p = \frac{\left(\frac{h_p}{(t - t_{m,p})} \right)}{\sigma_{cr} * \varepsilon * \sqrt{k_\sigma}} = 0,689$$

Редукционный коэффициент:

$$\rho = \frac{(\lambda_p - 0,055 * (3 + \psi_2))}{\lambda_p^2} = 1,225$$

$$\rho > 1,0 \quad \rho = 1$$

Эффективная ширина пластины стенки:

$$h_{ef} = \rho \frac{(h_p)}{(1 - \psi_2)} = 118,28 \text{ мм}$$

$$h_{ef1} = 0,4 * h_{ef} = 47,31 \text{ мм}$$

$$h_{ef1} = 0,4 * h_{ef} + \left[h_p - \frac{(h_p)}{(1 - \psi_2)} \right] = 171,83 \text{ мм}$$

Потеря устойчивости, сопровождающаяся изменением начальной формы сечения профиля в пределах упругой работы, происходит в тех случаях, когда концевой элемент жесткости не в состоянии препятствовать локальному смещению узловой точки на стыке полки с отгибом.

Местная потеря устойчивости продольно сжатой полки стенки профиля и изменение начальной формы сечения профиля в пределах упругой работы для профилей с концевыми элементами жесткости показаны на Рис. 13.

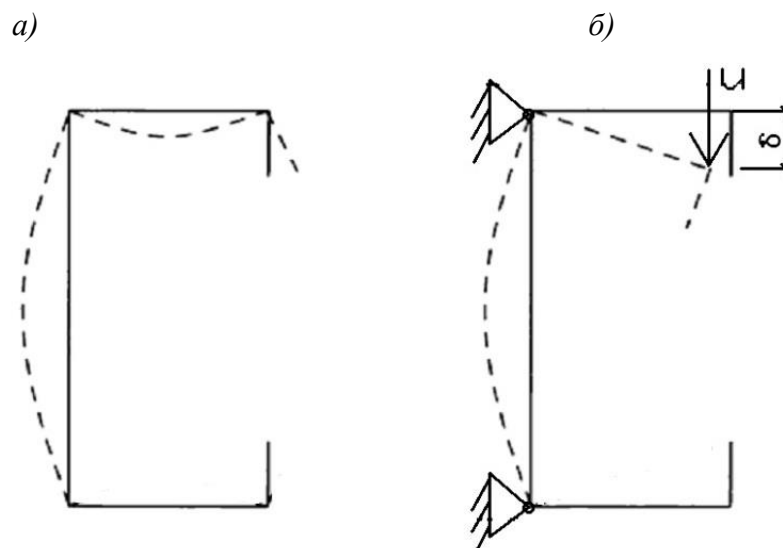


Рис. 13. Формы потери устойчивости гнутого профиля С-образного сечения при изгибе:
 а) - потеря местной устойчивости элементов сечения; б) - потеря устойчивости, сопровождающаяся изменением начальной формы сечения профиля в пределах упругой работы с концевыми элементами жесткости

Описание расчетной модели

Описание расчетной модели изгибаемого элемента с концевыми или промежуточными элементами жесткости, учитывающее изменения начальной формы сечения профиля в пределах упругой работы приведено в п. 7.3.2.2 СП 260.1325800.2016. Метод основан на предположении, согласно которому элемент жесткости ведет себя как сжатый стержень с непрерывным боковым раскреплением, представленным условной пружиной (жесткости K). Пружина действует на центр тяжести эффективного сечения элемента жесткости, как показано на Рис. 8.

Жесткость условной пружины может быть получена путем расчета на единичную нагрузку, который должен учитывать изгибную жесткость рассматриваемого изгибаемого элемента и закрепление от поворота, обеспечиваемое примыкающими участками, как показано на Рис. 13б.

Условная пружина на конце сжатой полки используются для моделирования закрепления от вращения примыкающим участком, при этом жесткость условной пружины S_{θ} зависит от изгибной жесткости и краевых условий для примыкающего участка, а также распределения напряжений, действующих в сечении.

Вычисление жесткости K условной пружины для изгибаемого гнутого профиля С-образного сечения и вычисление характеристик сечения в связи с потерей устойчивости при изменении начальной формы сечения профиля в пределах упругой работы рассматривается в примере 3 во 2 этапе расчета.

Этап 2: Расчет приведенной толщины для эффективного сечения концевой элемента жесткости в виде краевого отгиба

Эффективное сечение концевой элемента жесткости, показанное на Рис. 11, здесь рассматривается отдельно с целью определения сопротивления сечения потере устойчивости при изменении начальной формы сечения профиля в пределах упругой работы.

Расчет геометрических характеристик эффективного сечения концевой элемента жесткости

Характеристики сечения

Площадь эффективного сечения концевой элемента жесткости:

$$A_{c,ef} = (b_{ef1} - c_{eff}) * (t - t_{m,p}) = 148,61 \text{ мм}^2$$

Координаты центра тяжести эффективного сечения концевой элемента жесткости:

$$y_s = \frac{\left[(c_{eff}) * (t - t_{m,p}) * \left[\frac{c_{eff}}{2} \right] \right]}{[A_{c,ef}]} = 2,91 \text{ мм}$$

$$z_s = \frac{\left[(b_{ef1}) * (t - t_{m,p}) * \left[\frac{b_{ef1}}{2} \right] \right]}{[A_{c,ef}]} = 14,37 \text{ мм}$$

Момент инерции эффективного сечения концевой элемента жесткости:

$$I_s = \left[\left[\frac{(b_{ef1}(t - t_{m,p})^3)}{12} \right] + \left[\frac{(t - t_{m,p}) * (c_{eff})^3}{12} \right] + [b_{eff.s}/2 * (t - t_{m,p}) * ((y_s)^2)] \right] + (c_{eff}) * (t - t_{m,p}) * \left[\frac{(c_{eff})}{2} - y_s \right]^2 = 4199 \text{ см}^2$$

Расчет жесткости K условной пружины

Согласно п. 7.3.2.8 СП 260.1325800.2016:

Жесткость K_2 линейной пружины

$$K_1 = \left[\left[\frac{E(t^3)}{4(1-\vartheta^2)} \right] + \left[\frac{1}{b_1^2 * h_w + (b_1 - z_s)^3 + 0.5 * ((b_1 - z_s)^2) * h_w} \right] \right] = 0,48 \text{ Н/мм}^2$$

где $b_1 = b_2 = b - t - z_{sl}$ - расстояние от пересечения стенки и полки до центра тяжести эффективной площади краевого отгиба (включая эффективную часть b_{e2} полки) на сжатой полке 1 изгибаемого профиля;

$k_f = 0$ - полка 2 растянута (т. е. для изгибаемого профиля, изгибаемой относительно оси у-у);

$$v = 0,3.$$

Критическое напряжение для эффективного сечения элемента жесткости при $K_2=0,48 \text{ Н/мм}^2$:

$$\sigma_{cr,s} = \frac{2 * \sqrt{K_1 * E_2 * I_s}}{A_s} = 277,71 \text{ Н/мм}^2$$

Коэффициент снижения несущей способности χ_d для учета потери устойчивости при изменении начальной формы сечения профиля в пределах упругой работы:

Относительная гибкость:

$$\lambda_d = \sqrt{\frac{R_y}{\sigma_{cr}}} = 1,09$$

Коэффициент снижения несущей способности

$$\chi_d = 1,47 - 0,723 * \lambda_d = 0,682$$

Скорректированная эффективная площадь (и толщина) эффективного сечения элемента жесткости в виде краевого отгиба

$$A_{s,red} = \chi_d * A_s * \left[\frac{R_y}{\sigma_{com}} \right] = 95,87 \text{ мм}^2$$

$$t_{s,red} = \frac{A_{s,red}}{(b_{ef1} + c_{eff})} = 1,58 \text{ мм}$$

Определение характеристик эффективно сечения элемента при учете потери устойчивости в связи с изменением начальной формы сечения профиля в пределах упругой работы

Скорректированная эффективная площадь сечения профиля:

$$A_{ef} = (t - t_{m.p}) \left[(b - t) + \left(c - \frac{t}{2} \right) + h_{ef1} + h_{ef2} \right] + [t_{s,red} * (b_{ef1} + c_{eff})] = 908,57 \text{ мм}^2$$

Положение нейтральной оси Y профиля для скорректированного эффективного сечения профиля относительно оси сжатой полки:

$$z_1 =$$

$$= \frac{\left[\left[\left(c - \frac{t}{2} \right) (t - t_{m.p}) * \left[(h - t) - \frac{\left(c - \frac{t}{2} \right)}{2} \right] \right] + (b - t) * (t - t_{m.p}) * h_p + h_{ef2} * (t - t_{m.p}) * \left(h_p - \frac{h_{ef2}}{2} \right) \right] + \left[h_{ef1} * (t - t_{m.p}) * \frac{h_{ef1}}{2} \right] + (c_{eff} * t_{s,red} * \frac{c_{eff}}{2})}{A_{ef}}$$

$$= 114,27 \text{ мм}$$

$$z_2 = (h - t) - z_1 = 82,23 \text{ мм}$$

Момент инерции скорректированного эффективного сечения профиля

$$\begin{aligned} I_{effy} = & \frac{\left(\left(c - \frac{t}{2} \right)^3 \right) * (t - t_{m.p})}{12} + \left[\frac{h - t}{2} - \left(c - \frac{t}{2} \right) + \left(\left(c - \frac{t}{2} \right) / 2 \right) \right]^2 + (t - t_{m.p}) * \left(c - \frac{t}{2} \right) + \left[\frac{b_{ef1}^3 (t - t_{m.p})}{12} \right] \\ & + h_{ef2} * (t - t_{m.p}) * \left[\frac{\left((h - t) - h_{ef2} \right)^2}{2} \right] + h_{ef1} * (t - t_{m.p}) * \left[\frac{\left((h - t) - h_{ef1} \right)^2}{2} \right] \\ & + \left[\frac{h_{ef1}^3 (t - t_{m.p})}{12} \right] + b_{ef2} * (t - t_{m.p}) * \left[\frac{(h - t)^2}{2} \right] + \frac{(b_{ef1} * t_{s,red}^3)}{12} + c_{eff} * t_{s,red} \\ & * \left[\frac{h - t}{2} - \left(c - \frac{t}{2} \right) + \left(\frac{c_{eff}}{2} \right) \right]^2 + b_{ef1} * t_{s,red} * \left[\frac{h - t}{2} \right]^2 + (b - t)(t - t_{m.p}) * \left[\frac{(h - t)^2}{2} \right] \\ & + \left[\frac{h_{ef2}^3 (t - t_{m.p})}{12} \right] + \left[\frac{(b - t) * (t - t_{m.p})^3}{12} \right] = 73000 \text{ см}^4 \end{aligned}$$

Момент сопротивления скорректированного эффективного сечения профиля

$$W_{ef} = \frac{I_{effy}}{z_1} = 54890 \text{ мм}^3$$

Предельный изгибающий момент, воспринимаемый поперечным сечением, при изгибе относительно оси Y , элемента из гнутого профиля при потере устойчивости в связи с изменением начальной формы сечения профиля в пределах упругой работы равно:

$$M_{\text{crd}} = R_y \cdot W_{\text{ef}} = 17260 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Этап 3: Последующие итерации выполняются в случае необходимости уточнения значения коэффициента снижения несущей способности χ_d

Значение χ_d может быть уточнено итерационно с помощью измененных значений ρ , полученных при σ_{com} равном $\chi_d \cdot R_y$ на этапе 2.

$$\sigma_{\text{com.1}} = \chi_d \cdot R_y = 225,09 \text{ Н/мм}^2$$

Корректировка эффективной ширины сжатой полки при скорректированных значениях условной гибкости и редуцированного коэффициента

$$\lambda_{p1} = \lambda_p \cdot \sqrt{\chi_d} = 0,629$$

$$\rho = 1$$

$$b_{\text{ef}} = 0,5 \cdot \rho \cdot (b - t) = 46,25 \text{ мм}$$

Корректировка эффективной ширины отгиба при скорректированных значениях условной гибкости и редуцированного коэффициента

$$\lambda_{p2} = \lambda_p \cdot \sqrt{\chi_d} = 0,41$$

$$\rho_2 = 1$$

$$c_{\text{ef}} = \rho_2 \cdot \left(c - \frac{t}{2} \right) = 18,75 \text{ мм}$$

Геометрические характеристики эффективного сечения элемента жесткости в виде краевого отгиба

Площадь эффективного сечения концевой элемента жесткости:

$$A_{\text{ef},s} = [b_{\text{ef}} + c_{\text{ef}}] \cdot [(t - t_{\text{m.p}})] = 159,9 \text{ мм}^2$$

Координаты центра тяжести расчетного сечения концевой элемента жесткости равны:

$$y_c = \frac{\left[(t - t_{m.p}) * \left[c_{ef} * \left(\frac{c_{ef}}{2} \right) \right] \right]}{A_{effs}} = 2,71 \text{ мм}$$

$$z_c = \frac{\left[(t - t_{m.p}) * \left[b_{ef} * \left(\frac{b_{ef}}{2} \right) \right] \right]}{A_{ef,s}} = 16,46 \text{ мм}$$

Момент инерции эффективного сечения концевой элемента жесткости:

$$I_{ef} = \left[\left[\frac{(b_{ef}(t - t_{m.p})^3)}{12} \right] + \left[\frac{(t - t_{m.p}) * (c_{ef})^3}{12} \right] + [b_{ef} * (t - t_{m.p}) * ((y_c)^2)] \right] + (t - t_{m.p}) * (c_{ef}) \left[\frac{(c_{ef})}{2} - y_c \right]^2 = 4292 \text{ мм}^4$$

Расчет жесткости K условной пружины

Жесткость K_4 условной пружины:

$$K_1 = \left[\left[\frac{(E(t)^3)}{4(1 - \vartheta^2)} \right] + \left[\frac{1}{(b - t)^2 * h_w + [(b - t) - z_c]^3 + 0.5 * (b - t - z_c)^2 * k_{f1}} \right] \right] = 0,423 \text{ Н/мм}^2$$

где $k_{f1} = 0$ - полка 2 растянута (т. е. для изгибаемого профиля, изгибаемой относительно оси у-у);

$$\nu = 0,3.$$

Критическое напряжение для скорректированного эффективного сечения элемента жесткости при $K_4=0,423 \text{ Н/мм}^2$:

$$\sigma_{cr.s} = \frac{2 * \sqrt{K_4 * E * I_{ef}}}{A_{ef.s}} = 244,35 \text{ Н/мм}^2$$

Коэффициент снижения несущей способности χ_d для учета потери устойчивости при изменении начальной формы сечения профиля в пределах упругой работы:

Относительная гибкость

$$\lambda_d = \sqrt{\frac{R_y}{\sigma_{cs}}} = 1,163$$

Коэффициент снижения несущей способности: $\chi_{d41} = \chi_d (\lambda_{d4})$

$$\chi_d = 1,47 - 0,723 * \lambda_d = 0,629$$

Итерация может быть завершена, если $\chi_{d41} = \chi_d$

$$\chi_d = 0,629 < \chi_{d1} = 0,682$$

Поэтому значение χ_d уточняется следующей итерацией с помощью измененного значения ρ , полученного при $\sigma_{com.1}$ равном $\chi_d \cdot R_y$ на предыдущем шаге итерации.

Скорректированное сжимающее напряжение в полке σ_{com2} :

$$\sigma_{com2} = \chi_d \cdot R_y = 207,9 \text{ Н/мм}^2$$

Сжимающее напряжение в полке определенное в предыдущем шаге итерации σ_{com1} :

$$\sigma_{com1} = 225,09 \text{ Н/мм}^2$$

Скорректированная эффективная площадь (и толщина) эффективного сечения элемента жесткости в виде краевого отгиба

$$A_{sc} = \chi_d * A_{ef,s} * \left[\frac{(R_y)}{\sigma_{com}} \right] = 147,7 \text{ мм}^2$$

$$t_{reds} = \frac{A_{s,red}}{(b_{ef,c} + c_{ef,c})} = 2,27 \text{ мм}$$

Определение характеристик скорректированного эффективного сечения элемента после первой итерации

Скорректированная эффективная площадь сечения профиля

$$A_s = (t - q) \left[(b - t) + (c - \frac{t}{2}) + h_{ef1} + h_{ef2} \right] + t_r * (b_{ef,c} + c_{ef,c}) = 960,68 \text{ мм}^2$$

Скорректированное положение нейтральной оси Y профиля для скорректированного эффективного сечения профиля относительно оси сжатой полки:

$$z_1 = (h - t) - z = 89,3 \text{ мм}$$

$z =$

$$= \frac{\left[\left[\left(c - \frac{t}{2} \right) (t - t_{m.p}) * \left[(h - t) - \frac{(c - \frac{t}{2})}{2} \right] \right] + (b - t) * (t - t_{m.p}) * h_p + h_{ef2} * (t - t_{m.p}) * \left(h_p - \frac{h_{ef2}}{2} \right) \right] + \left[h_{ef1} * (t - t_{m.p}) * \frac{h_{ef1}}{2} \right] + (c_{eff} * t_{s.red} * \frac{c_{eff}}{2})}{A_s}$$

$$= 108,2 \text{ мм}$$

Момент инерции скорректированного эффективного сечения профиля

$$\begin{aligned} I_{cor} = & \frac{(c - \frac{t}{2})^3 * (t - t_{m.p})}{12} + \left[\frac{h - t}{2} - \left(c - \frac{t}{2} \right) + \left(\left(c - \frac{t}{2} \right) / 2 \right) \right]^2 + (t - t_{m.p}) * \left(c - \frac{t}{2} \right) + \left[\frac{b_{ef1}^3 (t - t_{m.p})}{12} \right] + h_{ef2} \\ & * (t - t_{m.p}) * \left[\frac{\left((h - t) - h_{ef2} \right)^2}{2} \right] + h_{ef1} * (t - t_{m.p}) * \left[\frac{\left((h - t) - h_{ef1} \right)^2}{2} \right] + \left[\frac{h_{ef1}^3 (t - t_{m.p})}{12} \right] \\ & + b_{ef1} * (t - t_{m.p}) * \left[\frac{(h - t)^2}{2} \right] + \frac{(b_{ef1} * t_{reds}^3)}{12} + \frac{(t_{reds} * c_{eff}^3)}{12} + c_{eff} * t_{reds} \\ & * \left[\frac{h - t}{2} - \left(c - \frac{t}{2} \right) + \left(\frac{c_{eff}}{2} \right) \right]^2 + b_{ef1} * t_{reds} * \left[\frac{h - t}{2} \right]^2 + (b - t)(t - t_{m.p}) * \left[\frac{(h - t)^2}{2} \right] \\ & + \left[\frac{h_{ef2}^3 (t - t_{m.p})}{12} \right] + \left[\frac{(b - t) * (t - t_{m.p})^3}{12} \right] = 6656000 \text{ мм}^4 \end{aligned}$$

Скорректированный момент сопротивления эффективного сечения профиля:

$$W_{cor} = \frac{I_{cor}}{z_5} = 74540 \text{ мм}^3$$

Скорректированный предельный изгибающий момент, воспринимаемый поперечным сечением, при изгибе относительно оси Y , элемента из гнутого профиля при потере устойчивости в связи с изменением начальной формы сечения профиля в пределах упругой работы равно:

$$M_y : = R_y \cdot W_{cor} = 24,62 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

Соотношение предельных изгибающих моментов, воспринимаемых поперечным сечением, определенных для текущей итерации и предыдущего расчета

$$M = \frac{M_y}{M_{crd}} = 1,426$$

Этап 3: Итерация 2 выполняется для уточнения значения коэффициента снижения несущей способности χ_d

Значение χ_d уточняется на следующем шаге итерации с помощью измененного значения ρ , полученного при $\sigma_{com.2}$ равном $\chi_{d41} \cdot R_y$ после 1-го шага итерации:

$$\sigma_{com.2} = \chi_d \cdot R_y = 207,87 \text{ МПа}$$

Корректировка эффективной ширины сжатой полки при скорректированных значениях условной гибкости и редуцированного коэффициента

$$\begin{aligned} \lambda_p &= \lambda_{ps} * \sqrt{\chi_d} = 0,547 \\ \rho &= 1,0 \\ b_{ef.2} &= 0,5 * \rho * (b - t) = 46,25 \text{ мм} \end{aligned}$$

Корректировка эффективной ширины отгиба при скорректированных значениях условной гибкости и редуцированного коэффициента $\rho = 1,0$

$$c_{ef,2} = \rho * \left(c - \frac{t}{2} \right) = 18,75 \text{ мм}$$

Геометрические характеристики эффективного сечения элемента жесткости в виде краевого отгиба

Площадь эффективного сечения концевой элемента жесткости:

$$A_{ef2} = [b_{ef,2} + c_{ef,2}] * [(t - t_{m.p})] = 159,9 \text{ мм}^2$$

Координаты центра тяжести эффективного сечения концевой элемента жесткости

$$y_{cs} = \frac{\left[(t - t_{m.p}) * \left[c_{ef2} * \left(\frac{c_{ef2}}{2} \right) \right] \right]}{A_{ef2}} = 2,71 \text{ мм}$$

$$z_{cs} = \frac{\left[(t - t_{m.p}) * \left[b_{ef2} * \left(\frac{b_{ef2}}{2} \right) \right] \right]}{A_{ef2}} = 16,55 \text{ мм}$$

Момент инерции эффективного сечения концевго элемента жесткости:

$$I_{cef2} = \left[\left[\frac{(b_{ef2}(t - t_{m.p})^3)}{12} \right] + \left[\frac{(t - q) * (c_{ef2})^3}{12} \right] + [b_{ef2} * (t - q) * ((y_{cs})^2)] \right] + (t - t_{m.p}) * (c_{ef2}) \left[\frac{(c_{ef2})}{2} - y_{cs} \right]^2 = 4293 \text{ мм}^4$$

Жесткость K линейной пружины

$$K_1 = \left[\left[\frac{(E(t^3))}{4(1 - \vartheta^2)} \right] + \left[\frac{1}{(b - t)^2 * h_w + [(b - t) - z_{cs}]^3 + 0.5 * (b - t - z_{cs})^2 * k_{f2}} \right] \right] = 0,423 \text{ Н/мм}^2$$

где $k_{f2} = 0$ - полка 2 растянута (т. е. для изгибаемого профиля, изгибаемой относительно оси у-у);

$$v = 0,3.$$

Критическое напряжение для скорректированного эффективного сечения элемента жесткости при $K = 0,42 \text{ Н/мм}^2$:

$$\sigma_{cs} = \frac{2 * \sqrt{K * E * I_{cef2}}}{A_{ef2}} = 244,35 \text{ Н/мм}^2$$

Коэффициент снижения несущей способности λ_d для учета потери устойчивости при изменении начальной формы сечения профиля в пределах упругой работы:

Относительная гибкость

$$\lambda_d = \sqrt{\frac{R_y}{\sigma_{cs}}} = 1,163$$

Коэффициент снижения несущей способности

$$\chi_d = 1,47 - 0,723 * \lambda_d = 0,629$$

Итерация может быть завершена $\chi_d = \chi_{d1}$

$$\chi_d = 0,629 = \chi_{d1} = 0,629$$

Скорректированное сжимающее напряжение в полке $\sigma_{com.3}$:

$$\sigma_{com.3} = \chi_{d2} \cdot R_y = 207,88 \text{ Н/мм}^2$$

Сжимающее напряжение в полке определенное в предыдущем шаге итерации $\sigma_{com,2}$:

$$\sigma_{com.2} = \chi_{d1} \cdot R_y = 207,88 \text{ Н/мм}^2$$

Скорректированная эффективная площадь (и толщина) эффективного сечения элемента жесткости в виде краевого отгиба

$$A_{ef3} = \chi_{d2} * A_{ef2} * \left[\frac{(R_y)}{\sigma_{com3}} \right] = 159,9 \text{ мм}^2$$

$$t_s = \frac{A_{ef3}}{(b_{ef1} + c_{efc})} = 2,65 \text{ мм}$$

Определение характеристик скорректированного эффективного сечения элемента после второй итерации

Скорректированная эффективная площадь сечения профиля

$$A_c = (t - t_{m.p}) \left[(b - t) + (c - \frac{t}{2}) + h_{ef1} + h_{ef2} \right] + t_s * (b_{ef1} + c_{efc}) = 972,9 \text{ мм}^2$$

Скорректированное положение нейтральной оси Y профиля для скорректированного эффективного сечения профиля относительно оси сжатой полки

$z_c =$

$$= \frac{\left[\left[\left[\left(c - \frac{t}{2} \right) (t - t_{m.p}) * \left[(h - t) - \frac{(c - \frac{t}{2})}{2} \right] \right] + (b - t) * (t - t_{m.p}) * h_p + h_{ef2} * (t - t_{m.p}) * \left(h_p - \frac{h_{ef2}}{2} \right) \right] + \left[h_{ef1} * (t - t_{m.p}) * \frac{h_{ef1}}{2} \right] + (c_{eff} * t_{s.ef} * \frac{c_{efc}}{2}) \right]}{A_c}$$

$$= 106,91 \text{ мм}$$

$$z_{c1} = (h - t) - z_c = 108,2 \text{ мм}$$

Момент инерции скорректированного эффективного сечения профиля

$$\begin{aligned}
 I_c = & \frac{(c - \frac{t}{2})^3 * (t - t_{m.p})}{12} + \left[\frac{h-t}{2} - \left(c - \frac{t}{2} \right) + \left(\left(c - \frac{t}{2} \right) / 2 \right) \right]^2 + (t - t_{m.p}) * \left(c - \frac{t}{2} \right) + \left[\frac{b_{ef1}^3 (t - t_{m.p})}{12} \right] \\
 & + h_{ef2} * (t - t_{m.p}) * \left[\frac{\left((h-t) - h_{ef2} \right)}{2} \right]^2 + h_{ef1} * (t - t_{m.p}) * \left[\frac{\left((h-t) - h_{ef1} \right)}{2} \right]^2 \\
 & + \left[\frac{h_{ef1}^3 (t - t_{m.p})}{12} \right] + b_{ef1} * (t - t_{m.p}) * \left[\frac{(h-t)}{2} \right]^2 + \frac{(b_{ef1} * t_{sef}^3)}{12} + \frac{(t_{sef} * c_{efc}^3)}{12} + c_{efc} \\
 & * t_{sef} * \left[\frac{h-t}{2} - \left(c - \frac{t}{2} \right) + \left(\frac{c_{eff}}{2} \right) \right]^2 + b_{ef1} * t_{sef} * \left[\frac{h-t}{2} \right]^2 + (b-t)(t - t_{m.p}) \\
 & * \left[\frac{(h-t)}{2} \right]^2 + \left[\frac{h_{ef2}^3 (t - t_{m.p})}{12} \right] + \left[\frac{(b-t) * (t - t_{m.p})^3}{12} \right] = 6865000 \text{ мм}^4
 \end{aligned}$$

Момент сопротивления скорректированного эффективного сечения профиля

$$W_{cor2} = \frac{I_{cor3}}{z_5} = 768800 \text{ мм}^3$$

Скорректированный предельный изгибающий момент, воспринимаемый поперечным сечением (Рис. 14), при изгибе относительно оси Y , элемента из гнутого профиля при потере устойчивости в связи с изменением начальной формы сечения профиля в пределах упругой работы равно:

$$M_{y1} := R_y \cdot W_{cor2} = 25,39 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

Соотношение предельных изгибающих моментов, воспринимаемых поперечным сечением, определенных для текущей итерации и предыдущего расчета

$$M = \frac{M_{y1}}{M_y} = 1,031$$

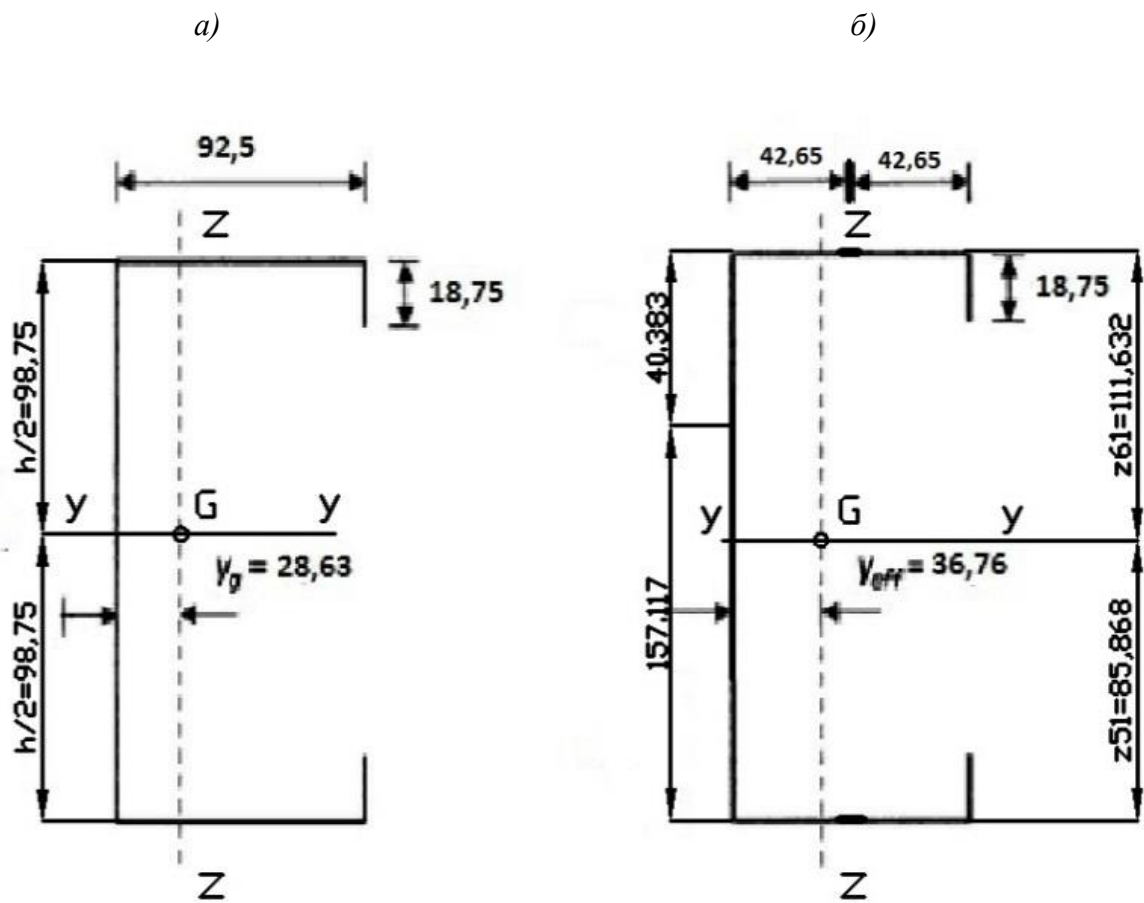


Рис. 14. Сечение С-образного гнутого профиля 200 x 95 x 2,5 мм: а) - идеализированное сечение; б) - эффективное сечение с учетом с потери местной устойчивости плоских участков при изменении начальной формы сечения профиля в пределах упругой работы (размеры в мм)

2.4 Определение геометрических характеристик составного сечения из двух гнутых профилей С-образного сечения

В примере 4 показана универсальная методика определения характеристик редуцированного сечения холодногнутых тонкостенных элементов, на примере спаренного С-образного профиля (см. рис. 15 а, б, в). Алгоритм реализован с помощью программного комплекса Microsoft Excel с использованием языка программирования Visual Basic [9].

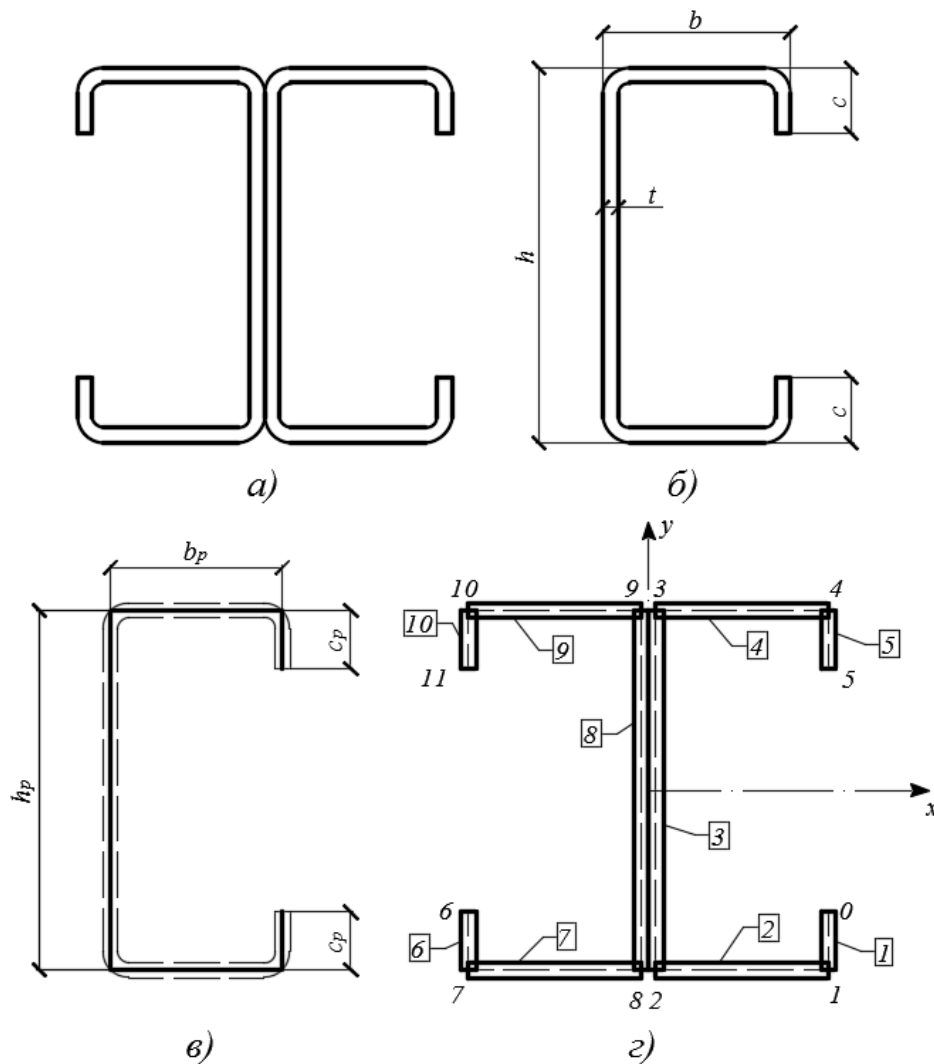


Рис. 15. Сечение из спаренных С-образных холодногнутых тонкостенных профилей:
 а) общий вид рассматриваемого сечения; б) геометрические параметры профиля; в) геометрические параметры средней линии; г) схема профиля, разбитого на отдельные пластинки с нумерацией характерных точек

В качестве исходных данных используются геометрические размеры рассматриваемого профиля, марка стали, а также относительные эксцентриситеты приложения продольной силы m_x , m_y (см. табл. 2).

Т а б л и ц а 2 — Исходные данные для определения эффективных характеристик сечения

h _p , мм	b _p , мм	c _p , мм	t, мм	R _y , N/мм ²	x*, мм	y*, мм	m _x	m _y
188	89	20	2	340	95	95	0.001	0.001

Введение относительных эксцентриситетов позволяет использовать универсальный способ определения напряжения в характерных точках сечения в безразмерных параметрах по формуле [9]:

$$\sigma = \bar{N}_{\text{пр}} \left(1 + m_x \frac{y}{y_*} + m_y \frac{x}{x_*} \right), \quad (2.4.1)$$

где $\bar{N}_{\text{пр}} = \frac{N_{\text{пр}}}{R_y A} = \frac{1}{1+m_x+m_y}$ - предельный параметр усилий; x_* , y_* - координаты наиболее напряженного волокна.

Используя формулу (2.4.1), определяется относительное напряжение в характерных точках сечения, как при изгибе, так и при сжатии, регулируя значения относительных эксцентриситетов, например, при сжатии $m_x=0.001$, $m_y=0.001$; при изгибе относительно оси x $m_x=200$, $m_y=0.001$; при изгибе относительно оси y $m_x=0.001$, $m_y=200$. Таким образом, используется аналогия с внецентренным сжатием, которая, путем введения малых или очень больших относительных эксцентриситетов, вырождается в центральное сжатие или изгиб.

По геометрическим размерам профиля, определяются координаты каждой точки сечения, разделенного на составляющие его пластинки, параметры относительных напряжений (см. табл. 3) и строится графическая схема срединной линии рассматриваемого сечения (см. рис. 15 г).

Таблица 3

Таблица 3 — Координаты характерных точек сечения и напряжения в них

№ точки	Координата x, мм	Координата y, мм	Относительные напряжения в точке
0	94	-74	0.7701
1	94	-94	0.9796
2	5	-94	0.9796
3	5	94	-0.9895
4	94	94	-0.9895
5	94	74	-0.7800
6	-94	-74	0.7701
7	-94	-94	0.9796
8	-5	-94	0.9796
9	-5	94	-0.9895
10	-94	94	-0.9895
11	-94	74	-0.7800

Далее необходимо указать способ закрепления каждой пластинки для определения величины и положения участков, выключающихся из работы (см. табл. 4). Для автоматизированного процесса вычисления написана программа (см. рис. 16), которая учитывает все возможные варианты редукции согласно [9]. Определяя редуцию в каждой пластинке, получаем графическое отображение частей сечения, выключающихся из расчета (см. рис. 17).

Таблица 4 — Координаты характерных точек сечения и напряжения в них

№ пл.	№ 1 узла	Координата x, мм	Координата y, мм	σ	№ 2 узла	Координата x, мм	Координата y, мм	σ	Количество закрепленных сторон (1, 2)
1	0	94	-74	0.770	1	94	-94	0.980	1
2	1	94	-94	0.980	2	5	-94	0.980	2
3	2	5	-94	0.980	3	5	94	-0.990	2
4	3	5	94	-0.990	4	94	94	-0.990	2
5	5	94	74	-0.780	4	94	94	-0.990	1
6	6	-94	-74	0.770	7	-94	-94	0.980	1
7	7	-94	-94	0.980	8	-5	-94	0.980	2
8	8	-5	-94	0.980	9	-5	94	-0.990	2
9	9	-5	94	-0.990	10	-94	94	-0.990	2
10	11	-94	74	-0.780	10	-94	94	-0.990	1

```

Dim ro As Double
If F_min < 0 Then
  If typec = 2 Then
    If sig1 <= sig2 Then
      psi = sig2 / sig1
      Ks = Find_Ks(psi, typec, sig1, sig2)
      Lp = b / (28.4 * t * Sqr(Ks * 235 / Ry))
      Lpred = Lp * Sqr(Abs(F_min))
      If Lpred > 0.673 Then
        ro = (1 - 0.055 * (3 + psi) / Lpred) / Lpred + 0.18 * (Lp - Lpred) / (Lp - 0.6)
        If ro > 1 Then
          ro = 1
        End If
        If ro < 1 Then
          If sig1 <= sig2 And sig1 <= 0 And sig2 <= 0 Then
            ret(1) = 2 * ro / (5 - psi)
            ret(2) = 1 - (ro * (psi - 3) / (psi - 5))
          ElseIf sig1 <= sig2 And sig1 <= 0 And sig2 >= 0 Then
            ret(1) = -0.4 * ro / (psi - 1)
            ret(2) = (3 * ro - 5) / (5 * (psi - 1))
          ElseIf sig2 <= sig1 And sig1 <= 0 And sig2 <= 0 Then
            ret(1) = ro * (psi - 3) / (psi - 5)
            ret(2) = 1 + (2 * ro / (psi - 5))
          ElseIf sig2 <= sig1 And sig2 <= 0 And sig1 >= 0 Then
            ret(1) = (5 * psi - 3 * ro) / (5 * (psi - 1))
            ret(2) = (2 * ro + 5 * psi - psi) / (5 * (psi - 1))
          End If
        End If
      End If
    ElseIf sig1 > sig2 Then
      Dim h As Double
      h = sig1
      sig1 = sig2
      sig2 = h
      psi = sig2 / sig1
      Ks = Find_Ks(psi, typec, sig1, sig2)
      Lp = b / (28.4 * t * Sqr(Ks * 235 / Ry))
      Lpred = Lp * Sqr(Abs(F_min))
      If Lpred > 0.673 Then
        ro = (1 - 0.055 * (3 + psi) / Lpred) / Lpred + 0.18 * (Lp - Lpred) / (Lp - 0.6)
        If ro > 1 Then
          ro = 1
        End If
        If ro < 1 Then
          If sig1 <= sig2 And sig1 <= 0 And sig2 <= 0 Then
            ret(1) = 2 * ro / (5 - psi)
            ret(2) = 1 - (ro * (psi - 3) / (psi - 5))
          ElseIf sig1 <= sig2 And sig1 <= 0 And sig2 >= 0 Then

```

Рис. 16. Фрагмент программного кода, описывающего редуцию в пластинках

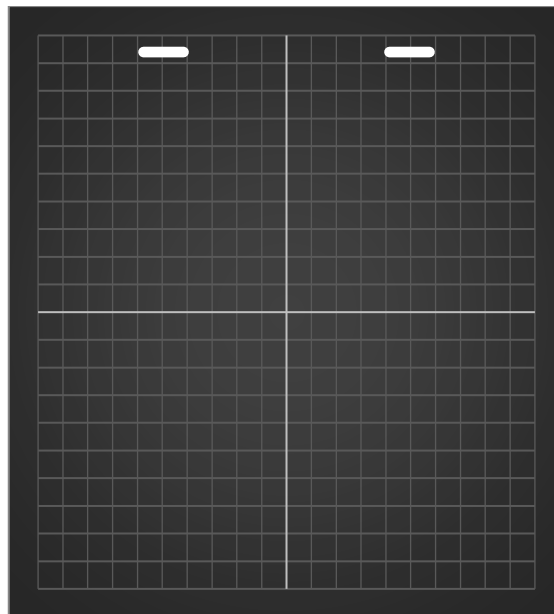


Рис. 17. Участки сечения, выключающиеся из расчета

На следующем этапе строится графическое отображение эффективного сечения относительно начальных осей x , y , необходимое для вычисления влияния потери устойчивости формы сечения. Для этого на участки пластин, закрепленных с двух сторон, добавляются точки, характеризующие предполагаемые места, выходящие из работы (см. рис. 18, б).

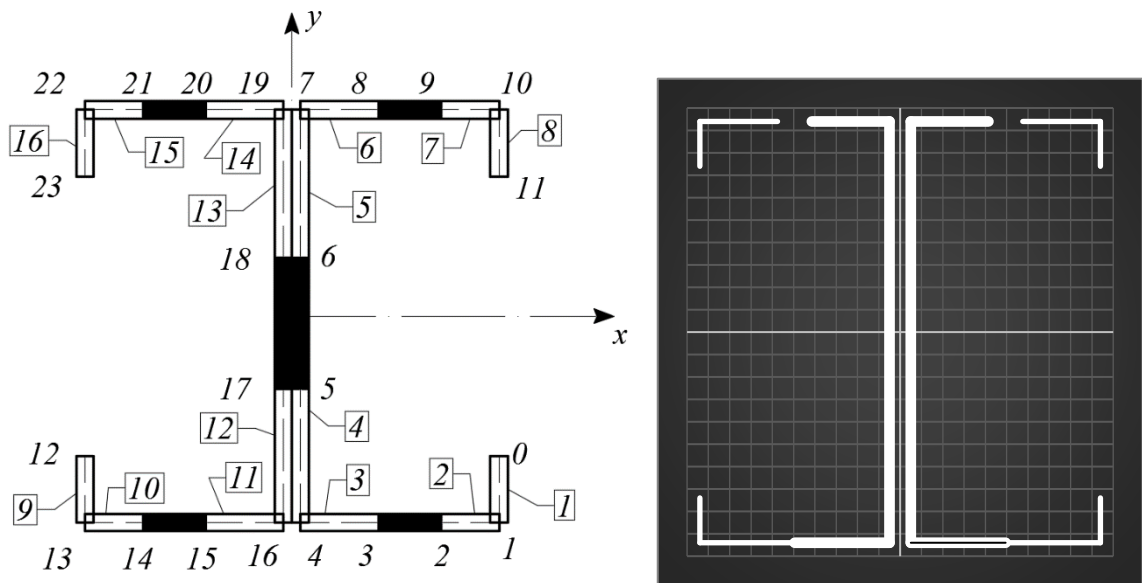
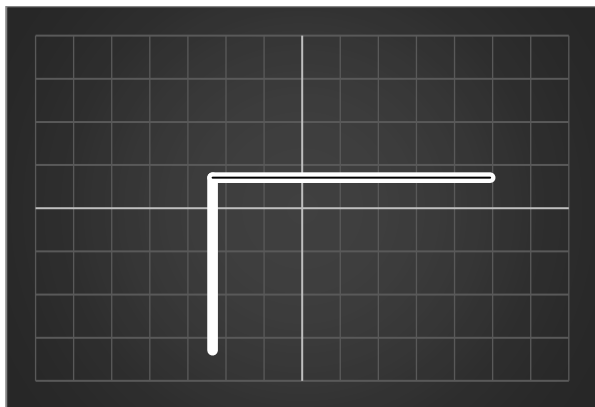


Рис. 18. Слева: схема сечения с промежуточными точками, характеризующими потерю устойчивости; справа: реальная картина редуцированного сечения

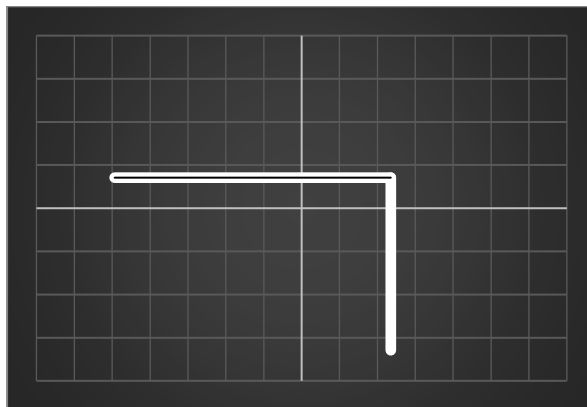
Далее рассматриваются части сечения, имеющие элементы жесткости или краевые отгибы. В СП 260.1325800.2016 предлагается рассматривать процесс потери устойчивости формы сечения при сжатии и изгибе отдельно. Однако очевидным является тот факт, что редуцироваться будут участки, испытывающие сжатие. Поэтому в данной работе методика расчета из СП 260.1325800.2016 применяется для каждого из участков (см. табл. 5). Далее определяется значение редуцированной толщины, которая распространяется на части сечения с краевыми отгибами, испытывающими сжатие (см. рис. 19). Использование такого подхода не противоречит СП 260.1325800.2016.

Таблица 5 — Результаты расчета редуцированной толщины участков сечения с краевыми отгибами

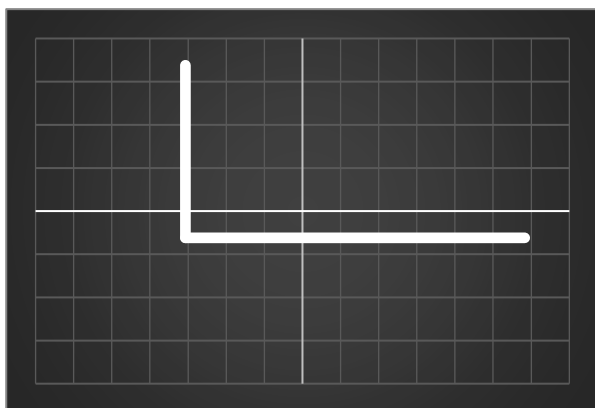
№ Уч.	№ ПЛ.	1 УЗЕЛ	Ко- орд. хр, мм	Ко- орд. ур, мм	2 УЗЕЛ	Коорд. хр, мм	Коорд. ур, мм	kf	К	$\sigma_{кр,s}$	λd	χd
1	ПЛ. 1	0	94	-74	1	94	-94	0.875	0.2329	217.247	1.251	0.566
	ПЛ. 2	1	94	-94	2	49.5	-94					
2	ПЛ. 7	9	57.55	94	10	94	94	1.143	0.2004	225.246	1.2286	0.582
	ПЛ. 8	10	94	94	11	94	74					
3	ПЛ. 9	12	-94	-74	13	-94	-94	0.875	0.2329	217.247	1.251	0.566
	ПЛ. 10	13	-94	-94	14	-49.5	-94					
4	ПЛ. 15	21	-57.55	94	22	-94	94	1.143	0.2004	225.246	1.2286	0.582
	ПЛ. 16	22	-94	94	23	-94	74					



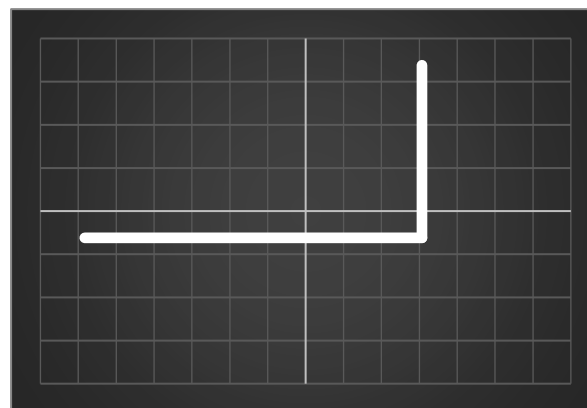
Участок 3



Участок 2



Участок 4



Участок 1

Рис. 19. Графическое отображение участков сечения с краевыми отгибами относительно их центральных осей

По параметрам редукиции каждой отдельной пластинки можно определить эффективную площадь сечения, реальное положение осей редуцированного сечения, а также моменты инерции (см. табл. 6, 7). Выбрав соответствующий параметр эффективного сечения в зависимости от указанных в начале расчета относительных эксцентриситетов, можно переходить к расчетам элементов на прочность при действии отдельных силовых факторов (N , M_x , M_y) относительно редуцированных сечений от данного фактора (A_{ef} – сжатие, $I_{x,ef}$ – изгиб относительно оси x , $I_{y,ef}$ – изгиб относительно оси y).

Таблица 6 — Параметры эффективного сечения с учетом смещения осей

№ ПЛ.	1 УЗЕЛ	Координата хр, мм	Координата ур, мм	2 УЗЕЛ	Координата хр, мм	Координата ур, мм	Длина, мм	Толщина, мм
ПЛ. 1	0	94	-83.965	1	94	-103.965	20	2
ПЛ. 2	1	94	-103.965	2	49.5	-103.965	44.5	2
ПЛ. 3	3	49.5	-103.965	4	5	-103.965	44.5	2
ПЛ. 4	4	5	-103.965	5	5	-103.965	0	2
ПЛ. 5	6	5	-103.965	7	5	84.035	188	2
ПЛ. 6	7	5	84.035	8	41.45	84.035	36.446	2
ПЛ. 7	9	57.55	84.035	10	94	84.035	36.446	1.163
ПЛ. 8	10	94	84.035	11	94	64.035	20	1.163
ПЛ. 9	12	-94	-83.965	13	-94	-103.965	20	2
ПЛ. 10	13	-94	-103.965	14	-49.5	-103.965	44.5	2
ПЛ. 11	15	-49.5	-103.965	16	-5	-103.965	44.5	2
ПЛ. 12	16	-5	-103.965	17	-5	-103.965	0	2
ПЛ. 13	18	-5	-103.965	19	-5	84.035	188	2
ПЛ. 14	19	-5	84.035	20	-41.45	84.035	36.446	2
ПЛ. 15	21	-57.55	84.035	22	-94	84.035	36.446	1.163
ПЛ. 16	22	-94	84.035	23	-94	64.035	20	1.163

Таблица 7 — Результаты расчета

х(ц.т.)	у(ц.т.)	A_{ef} , мм ²	$I_{x,ef}$, мм ⁴	$I_{y,ef}$, мм ⁴
0	-9.965	1465.1274	8731496.8	2835279.3

3 Определение несущей способности гнутого профиля при действии осевого растяжения и изгиба

Пример 5. Расчет гнутого профиля при действии осевого растяжения и изгиба

Требуется проверить несущую способность элемента из гнутого швеллера 300x107,5x4,0 при действии растягивающего усилия $N_{ed} = 100$ кН и изгибающего момента $M_{y,ed} = 10$ кН*м. Расчетная длина элемента $L=1,5$ м, по концам - шарниры, расчетная длина равна свободной длине. Предел текучести стали f_y составляет 350 Н/мм², модуль упругости - 210 000 Н/мм² и модуль сдвига - 80769 Н/мм². Покрытие в данном примере не учитывается.

Геометрические характеристики сечения определены в соответствии с требованиями СП 260.1325800.2016 по методике, изложенной в разделе 2 настоящего пособия:

$$A_{net} = 2008 \text{ мм}^2; \quad A_{eff} = 1122 \text{ мм}^2;$$

$$I_y = 22124000 \text{ мм}^4; \quad I_z = 62420 \text{ мм}^4; \quad W_{eff,y} = 133810 \text{ мм}^3.$$

Определение несущей способности выполнено в соответствии с п. 7.7.4 СП 260.1325800.2016.

Процедура определения несущей способности гнутого профиля при действии осевого растяжения и изгиба показано на блок-схеме, приведенной на рисунке 20.

Поперечное сечение при совместном действии осевого сжатия N_{Ed} и изгибающих моментов $M_{y,Ed}$ должны удовлетворять следующему критерию

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

где:

$N_{c,Rd}$ определяют как в 7.68 по п. 7.7.2.1 СП 260.1325800.2016;

$M_{cy,Rd,com}$ определяют по п. 7.7.3.1 СП 260.1325800.2016.

Дополнительный момент $\Delta M_{y,Ed}$ от смещения нейтральной оси определяются как

$$\Delta M_{y,Ed} = N_{Ed} e_{Ny}$$

где $e_{Ny} = 0$ мм – смещение нейтральной оси у-у относительно осевого усилия, по п. 7.7.2.3 СП 260.1325800.2016 (см. рис. 21).

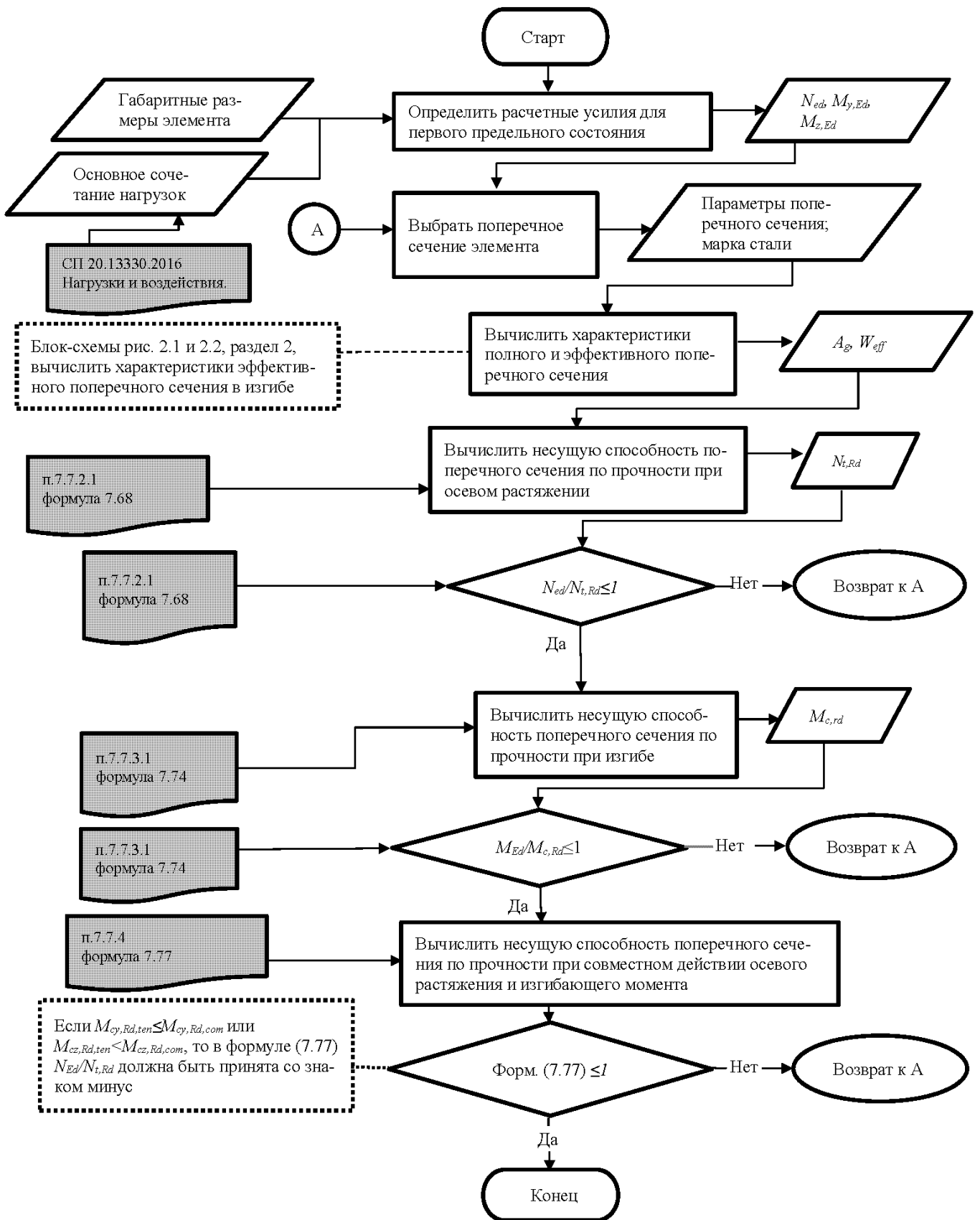


Рис. 20. Определение несущей способности гнутого профиля при действии осевого растяжения и изгиба

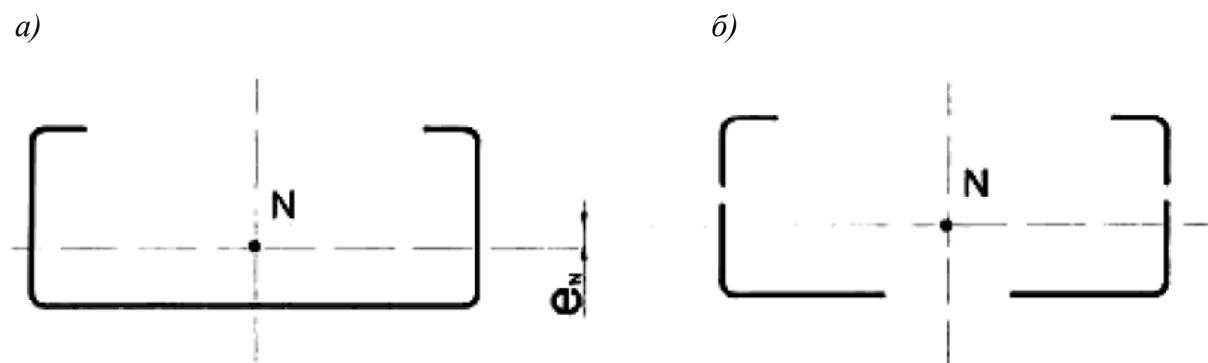


Рис. 21. Эффективное поперечное сечение при сжатии:
 а) - полное поперечное сечение; б) - эффективное поперечное сечение

$$\frac{N_{Ed}}{A_{net} * R_y} + \frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} * e_{Ny}}{W_{effy} * R_y} = 0,416 < 1$$

Несущая способность растянутой полки сечения гнутого швеллера обеспечена.

Для сжатой полки сечения гнутого швеллера должно быть удовлетворено следующее неравенство:

$$\frac{1}{\chi_{LT}} \left(\frac{M_{y,Ed} + N_{ed} * e_{Ny}}{W_{eff,y} * R_y} - \frac{N_{Ed}}{A_{net} * R_y} \right) \leq 1$$

где χ_{LT} – понижающий коэффициент при потере устойчивости из плоскости изгиба с кручением для соответствующей условной гибкости $\bar{\lambda}_{LT}$ должна определяться по кривой потери устойчивости «b», в соответствии с п. 7.7.8.4 или по формулам 7.94, 7.95 СП 260.1325800.2016:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\left[\phi_{LT} + (\sqrt{\phi_{LT}^2 - \lambda_{bLT}^2}) \right]} = 0,771$$

$$\phi_{LT} = 0,5 * [1 + \alpha_{LT} * (\lambda_{LT} - 0,2) + \lambda_{bLT}^2] = 0,799$$

α - поправочный коэффициент, определяемой по таблице 7.6
 СП 260.1325800.2016 в зависимости от принятой кривой потери устойчивости:

$$\alpha_{LT} = 0,49$$

Условная гибкость по формуле 7.96 СП 260.1325800.2016:

$$\lambda_{LT} = \sqrt{\frac{W_{effy} * R_y}{M_{cr}}} = 0,625$$

Критический момент при упругой потере устойчивости из плоскости изгиба с кручением определяется по формуле Г.1 (Приложение Г) СП 260.1325800.2016:

$$M_{cr} = C_1 * \frac{(\pi^2 * E * I_z)}{(k_z * L)^2} * \sqrt{\frac{I_\omega}{I_z} * \left(\frac{k_z}{k_w}\right)^2 + \frac{(k_z * L)^2 * G_1 * I_t}{(\pi^2 * E * I_z)}} = 120,01 \text{ кН} * \text{м}$$

где $k_z=1,0$; $k_w=1,0$; $I_z= 4620 \text{ мм}^4$; $I_\omega = 2,715 * 10^{11} \text{ мм}^6$;

$C_1=1,0$ по таблице В.2 (Приложение В) СП 260.1325800.2016: при эпюре изгибающего момента, условиях опирания и конечных моментах показанных на рис. 22:

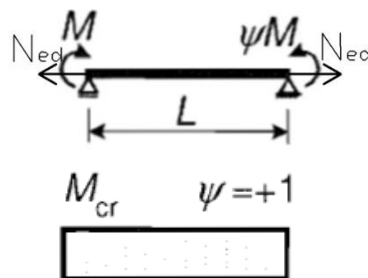


Рис. 22. Концевые моменты, условия опирания и эпюра изгибающих для рассчитываемого элемента

Проверяем несущую способность сжатой полки сечения гнутого швеллера

$$\frac{1}{\chi_{LT}} \left(\frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} * e_{Ny}}{W_{eff,y} * R_y} - \frac{N_{Ed}}{A_{net} * R_y} \right) = 0,152 < 1$$

Несущая способность сжатой полки сечения гнутого швеллера обеспечена.

4 Определение несущей способности гнутого профиля при центральном сжатии с учетом изгибной, крутильной и изгибно-крутильной форм потери устойчивости

Пример 6. Расчет гнутого профиля при центральном сжатии

Требуется определить несущую способность сжатой стойки из гнутого швеллера 200x90x2,5 при центральном сжатии с учетом изгибной, крутильной и изгибно-крутильной форм потери устойчивости. Расчетная длина стойки $L=1,5$ м, по концам - шарниры, расчетная длина равна свободной длине. Предел текучести стали f_y составляет 350 Н/мм^2 , модуль упругости $E = 210\,000 \text{ Н/мм}^2$ и модуль сдвига $G = 81\,000 \text{ Н/мм}^2$. Покрытие в данном примере не учитывается.

Геометрические параметры профиля приведены на рисунке 23.

Геометрические характеристики сечения определены в соответствии с требованиями СП 260.1325800.2016 по методике, изложенной в разделе 2 настоящего пособия:

$$\begin{array}{lll}
 A = 10,26 \text{ см}^2 & i_y = 9,31 \text{ см} & J_T = 0,2138 \text{ см}^4 \\
 A_{eff} = 4,65 \text{ см}^2 & i_z = 2,77 \text{ см} & J_w = 772 \text{ см}^6 \\
 J_y = 690,32 \text{ см}^4 & W_{el,y} = 50,65 \text{ см}^3 & y_0 = 2,05 \text{ см}^2 \\
 J_z = 11,26 \text{ см}^4 & W_{el,z} = 1,36 \text{ см}^3 & i_0 = 99,273 \text{ мм}
 \end{array}$$

Процедуры определения несущей способности гнутого профиля при центральном сжатии и при центральном сжатии с учетом изгибной, крутильной и изгибно-крутильной форм потери устойчивости показаны на блок-схемах, приведенных на рисунках 24 и 25 соответственно.

Определение несущей способности гнутого профиля

Расчет критических нагрузок

Расчетная критическая сила при изгибной форме потери устойчивости сжатого элемента относительно оси (y-y):

$$N_{cr,y} = \frac{3.14^2 * E * J_y}{(L)^2} = 6,533 * 10^3 \text{ кН}$$

Расчетная критическая сила при изгибной форме потери устойчивости сжатого элемента относительно оси (z-z):

$$N_{cr,y} = \frac{3.14^2 * E * J_y}{(L)^2} = 103,62 \text{ кН}$$

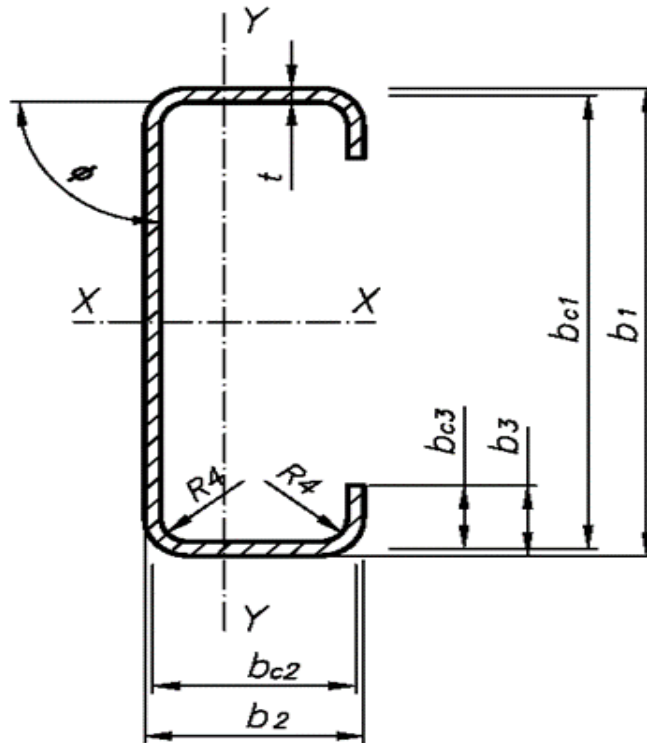


Рис. 23. Геометрические параметры сечения С – образного профиля

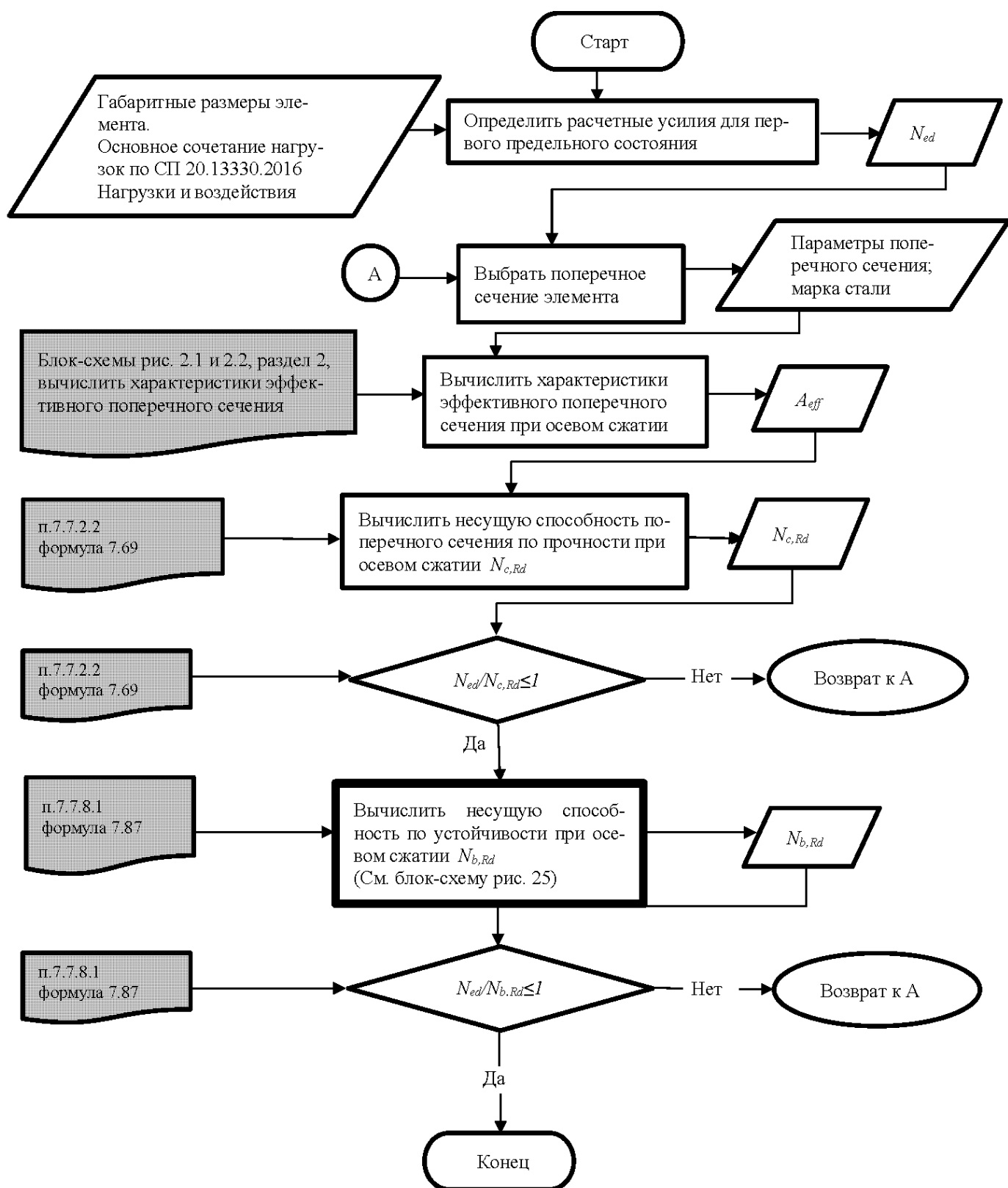


Рис. 24. Определение несущей способности гнутого профиля при центральном сжатии

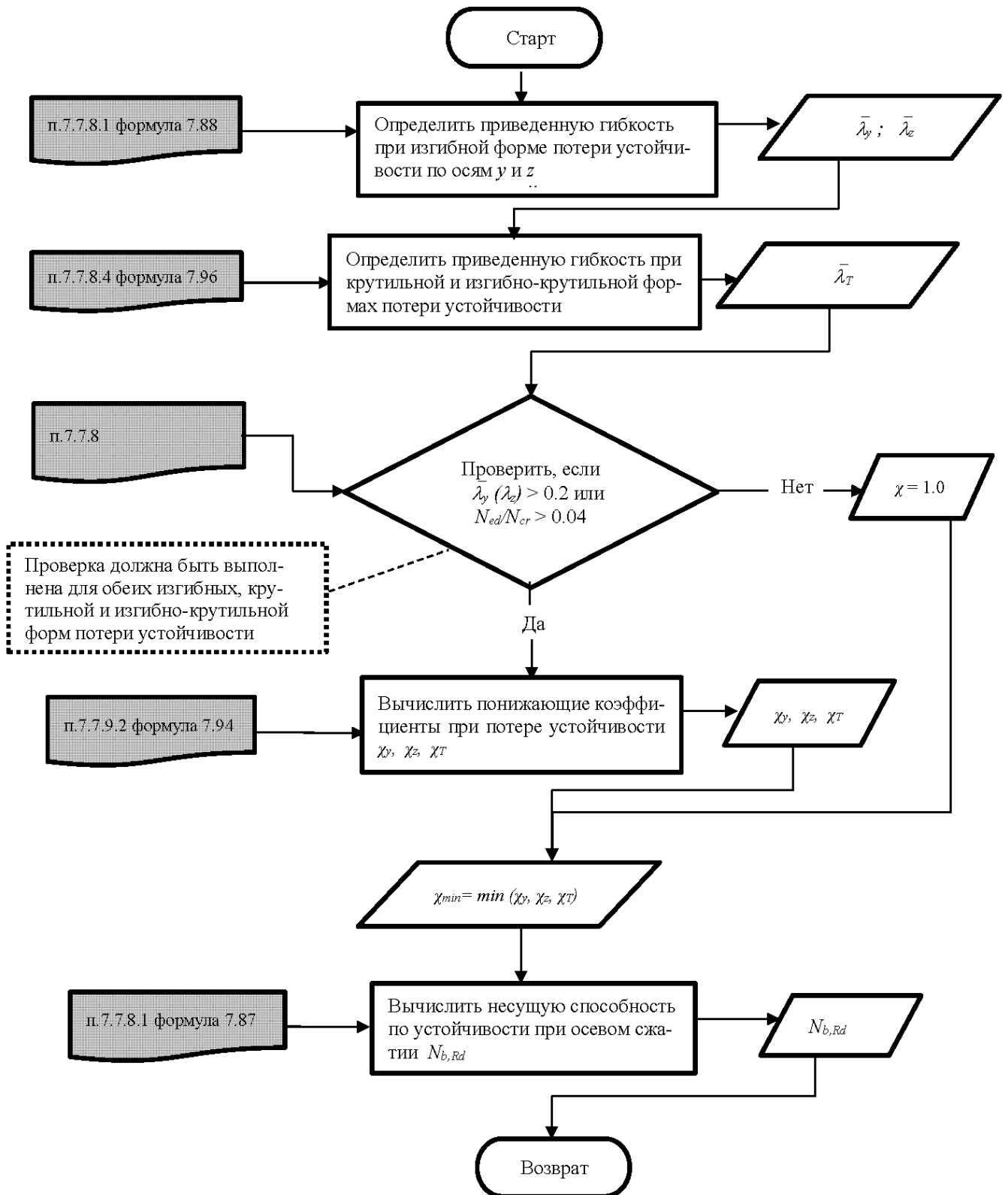


Рис. 25. Определение несущей способности гнутого профиля при центральном сжатии с учетом изгибной, крутильной и изгибно-крутильной форм потери устойчивости

Расчетная критическая сила для крутильной формы потери устойчивости в пределах упругой работы $N_{cr,T}$ элемента симметричного сечения относительно оси у-у определяется по формуле 7.89 СП 260.1325800.2016:

$$N_{cr.T} = \frac{1}{i_0^2} \left[GI_t * \frac{\pi^2 * E * J_\omega}{l_T^2} \right]$$

$$i_0^2 = i_y^2 + i_z^2 + y_0^2 + z_0^2 = 9855 \text{ мм}^2$$

$$N_{cr.T1} = \frac{1}{i_0^2} [GI_t] = 17,57 \text{ кН}$$

$$N_{cr.T2} = \frac{1}{i_0^2} \left[\frac{\pi^2 * E * J_\omega}{L^2} \right] = 721,662 \text{ кН}$$

$$N_{cr.T} = N_{cr.T1} + N_{cr.T2} = 739,23 \text{ кН}$$

Критическая сила для изгибно-крутильной формы потери устойчивости в пределах упругой работы $N_{cr,TF}$ для поперечных сечений симметричных относительно оси у-у (при $z_0 = 0$) определяется по формуле 7.92 СП 260.1325800.2016:

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

$$\beta = 1 - \left(\frac{y_0}{i_0}\right)^2 = 0,957$$

$$N_{cr,TF} = \frac{N_{cr,y}}{2\beta} \left[1 + \frac{N_{cr,T}}{N_{cr,y}} - \sqrt{\left(1 - \frac{N_{cr,T}}{N_{cr,y}}\right)^2 + 4 * \left(\frac{y_0}{i_0}\right)^2 * \frac{N_{cr,T}}{N_{cr,y}}} \right] = 735,13 \text{ кН}$$

Критической является изгибная форма потери устойчивости сжатого элемента относительно оси (z-z): $N_{cr,z} = 103,62$ кН.

Несущая способность элемента по устойчивости

Расчетная критическая нагрузка $N_{b,Rd}$ при потере устойчивости сжатого элемента должна определяться по СП 260.1325800.2016 с учетом:

- типа поперечного сечения по таблице 7.5 СП 260.1325800.2016;
- положения оси, относительно которой элемент теряет устойчивость;
- предела текучести стали;
- соответствующей кривой потери устойчивости по таблице 7.5 СП 260.1325800.2016;
- условной гибкости элемента.

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi A_{eff} R_y}{\gamma_{M1}} \quad \text{для сечений класса 4}$$

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

где

$$\chi = 0,5 * [1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2]$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff} R_y}{N_{cr}}} \quad \text{для сечений класса 4}$$

Условная гибкость для изгибно-крутильной формы потери устойчивости в пределах упругой работы элемента

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff} R_y}{N_{cr}}} \quad \text{для сечений класса 4}$$

$$\lambda = \sqrt{\frac{A_{eff} R_y}{N_{cr,z}}} = 1,253$$

Выбор кривой устойчивости и коэффициента несовершенств « α »

Для гнутых швеллеров используем кривую «с» см. таблицу 8 СП 260.1325800.2016.

Для кривой устойчивости «с», $\alpha = 0,49$, см. таблицу 7.6 СП 260.1325800.2016.

Определяем:

$$\phi_1 = 0,5 * [1 + \alpha * (\lambda - 0,2) + \lambda^2] = 1,543$$

$$\chi = \frac{1}{[\phi_1 + (\sqrt{\phi_1^2 - \lambda^2})]} = 0,409$$

Несущая способность элемента по устойчивости:

$$N_{bRd} = \chi \cdot A_{eff} \cdot R_y = 66,59 \text{ кН}$$

Несущая способность центрально сжатой стойки из гнутого швеллера 200 x 90 x 2,5 при центральной сжатии с учетом изгибной, крутильной и изгибо-крутильной форм потери устойчивости определяется при изгибной форме потери устойчивости сжатого элемента относительно оси (z-z) и составляет 66,59 кН.

5 Определение несущей способности гнутого профиля при действии продольной силы с изгибом с учетом изгибной, крутильной и изгибно-крутильной форм потери устойчивости

Пример 7. Расчет гнутого профиля при действии продольной силы и изгибающего момента

Требуется определить несущую способность колонны высотой $L_I=8,0$ м из 2-х гнутых С-образных профилей 360 x 80 x 22 x 3,5, соединённых друг с другом стенками при помощи болтов, расположенных по длине с шагом 500 мм по высоте колонны. Колонна нагружена постоянной и снеговой нагрузкой приложений по оси стойки. Полная сжимающая расчетная нагрузка $N_d = 40$ кН. Ветровая нагрузка к колонне передается через ригели стен, расположенных с шагом 2,0 м. Величина расчетной горизонтальной нагрузки, приложенной в узлах прикрепления ригелей стен $F_d = 8$ кН. Полки колонны снаружи раскреплены ригелями стен, расположенных с шагом $g=2000$ мм. Внутренние полки колонны раскреплены с шагом $f=4000$ мм. Узлы оголовка и базы колонны шарнирные.

Расчетная схема колонны приведена на рис. 26.

Предел текучести стали R_{yk} составляет 350 Н/мм^2 , модуль упругости - $210\,000 \text{ Н/мм}^2$ и модуль сдвига - $81\,000 \text{ Н/мм}^2$.

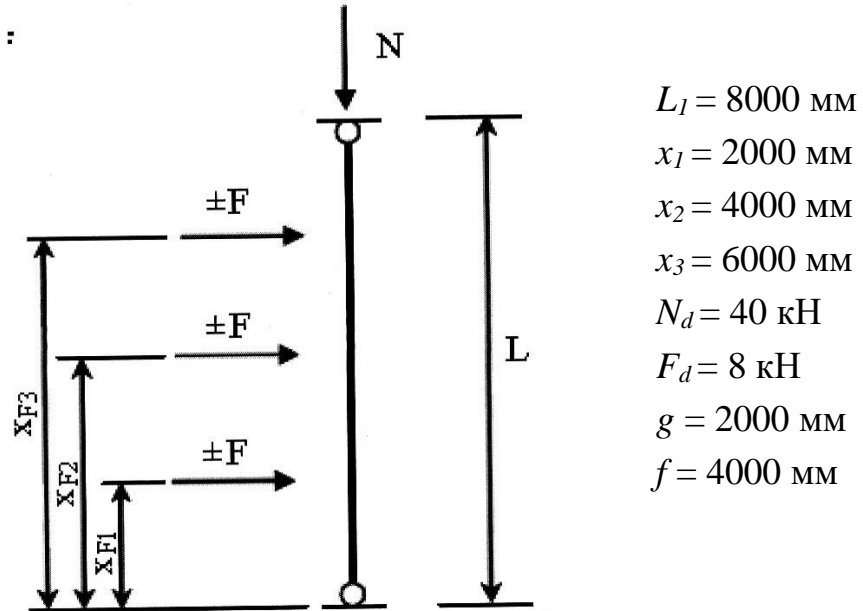


Рис. 26. Расчетная схема колонны

Определение расчетных усилий в колонне показанных на рис. 27:

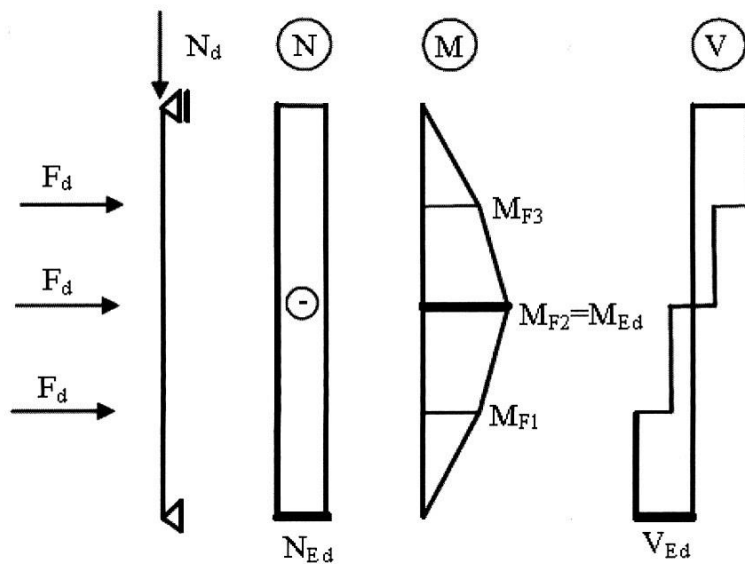


Рис. 27. Эпюры расчетных усилий

$$R_a = \frac{[F_d(L_1 - x_1) + F_d(L_1 - x_2) + F_d(L_1 - x_3)]}{L_1} = 12 \text{ кН}$$

$$R_b = \frac{[F_d(x_1) + F_d(x_2) + F_d(x_3)]}{L_1} = 12 \text{ кН}$$

$$M_{F1} = R_a * x_1 = 24 \text{ кН * м}$$

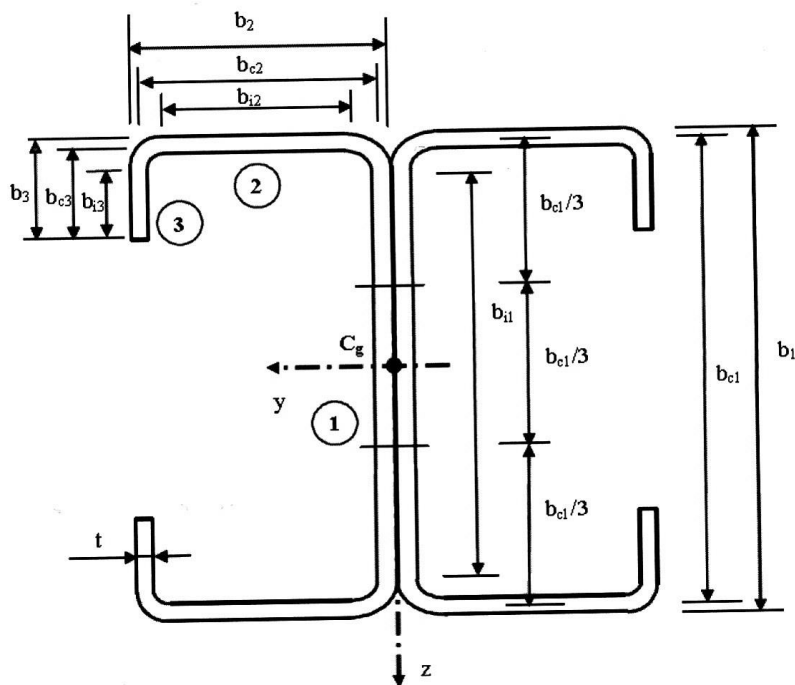
$$M_{F2} = R_a * x_2 - F_d(x_2 - x_1) = 32 \text{ кН * м}$$

$$M_{F3} = R_a * x_3 - F_d(x_3 - x_1) - F_d(x_3 - x_2) = 24 \text{ кН * м}$$

$$R_{ed}=12 \text{ кН}; \quad V_{ed}=R_{ed}=12 \text{ кН}; \quad N_{ed}=40 \text{ кН};$$

$$M_{ed} = R_a * x_2 - F_d(x_2 - x_1) = 32 \text{ кН * м}$$

Геометрические размеры сечения 2С 360х80х3.5 показаны на рис 28:



- $t = 3,5 \text{ мм}$
- $b = 360 \text{ мм}$
- $b_1 = 360 \text{ мм}$
- $b_2 = 80 \text{ мм}$
- $b_3 = 22 \text{ мм}$
- $b_{pl} = 360 \text{ мм}$
- $b_{c1} = b - t = 356,5 \text{ мм}$
- $b_{c2} = b_2 - t = 76,5 \text{ мм}$
- $b_{c3} = b_3 - t = 18,5 \text{ мм}$

Рис. 28. Геометрически размеры сечения колонны

Геометрические характеристики сечения определены в соответствии с требованиями СП 260.1325800.2016 по методике, изложенной в разделе 2 настоящего пособия:

$$A_{efc} = 2434 \text{ мм}; W_{eff} = 395480 \text{ мм}; I_y = 74176000 \text{ мм}; I_z = 4982000 \text{ мм};$$

$$i_y = 137,7 \text{ мм}; i_z = 37,1 \text{ мм}; y_0 = 0 \text{ мм}; z_0 = 0 \text{ мм};$$

Расчет дополнительных характеристик сечения колонны

Момент инерции полного сечения при свободном кручении [10]:

$$I_t = \frac{2}{3} * t^3 * \left[[b_{c1} + 2b_{c2} + 2b_{c3}] * \left(1 - 0.63 * \left[\frac{t}{b_{c1} + 2b_{c2} + 2b_{c3}} \right] \right) \right]$$

$$= 15,56 * 10^3 \text{ мм}^4$$

Секторальные характеристики при стесненном кручении [10]:

Эпюра секторальных площадей и координат показана на рис. 29

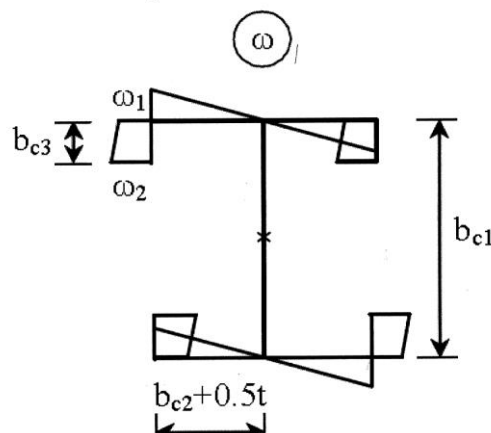


Рис. 29. Эпюра секторальных площадей и координат

$$\omega_1 = 0,5 * b_{c1} [b_{c2} + 0,5t] = 0,14 \text{ мм}^2$$

$$\omega_2 = \omega_1 + b_{c3} [b_{c2} + 0,5t] = 0,015 \text{ м}^2$$

Момент инерции полного сечения при стеснённом кручении

$$I_t = 4t * \left[\frac{1}{3} * \omega_1 * \omega_1 * (b_{c2} + 0.5t) + \frac{1}{6} * b_{c3} * (\omega_1 * (2\omega_1 + \omega_2) + \omega_2 * (2\omega_2 + \omega_1)) \right] = 1,268 * 10^{11} \text{ мм}^6$$

Расчет на прочность элементов под действием продольного сжатия с изгибом: 5

Процедуры определения несущей способности гнутого профиля при действии продольной силы с изгибом с учетом изгибной, крутильной и изгибно-крутильной форм потери устойчивости показаны на блок-схемах, приведенных на рисунках 30 и 31.

Для симметричного сечения $e_{Ny} = 0$ мм.

Расчет в соответствии с п. 7.7.2.2 и раздела 7.7.8 СП 260.1325800.2016

$$N_{c.Rd} = R_y \cdot A_{ef.c} = 811,3 \text{ кН}$$

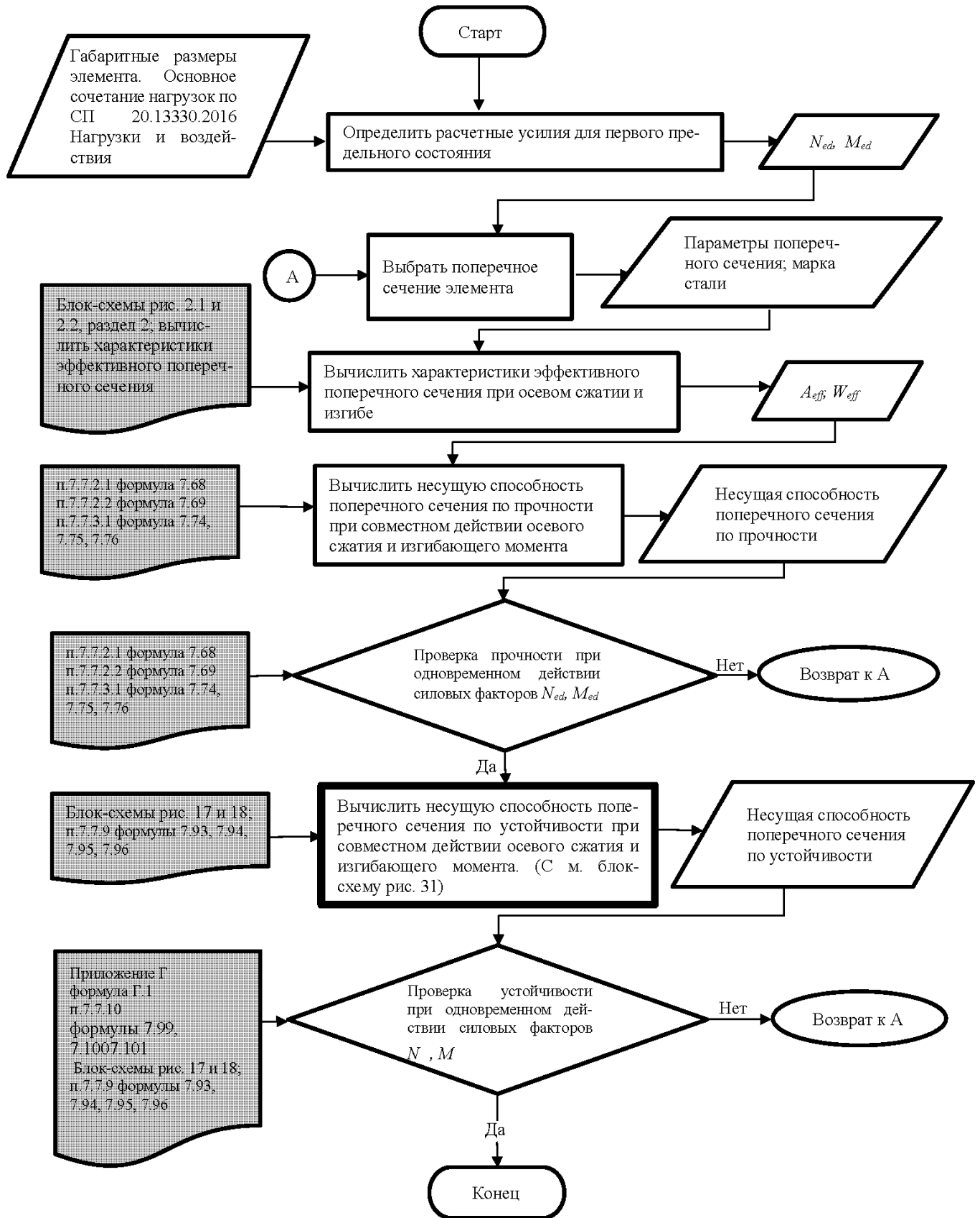


Рис. 30. Определение несущей способности гнутого профиля при действии продольной силы с изгибом

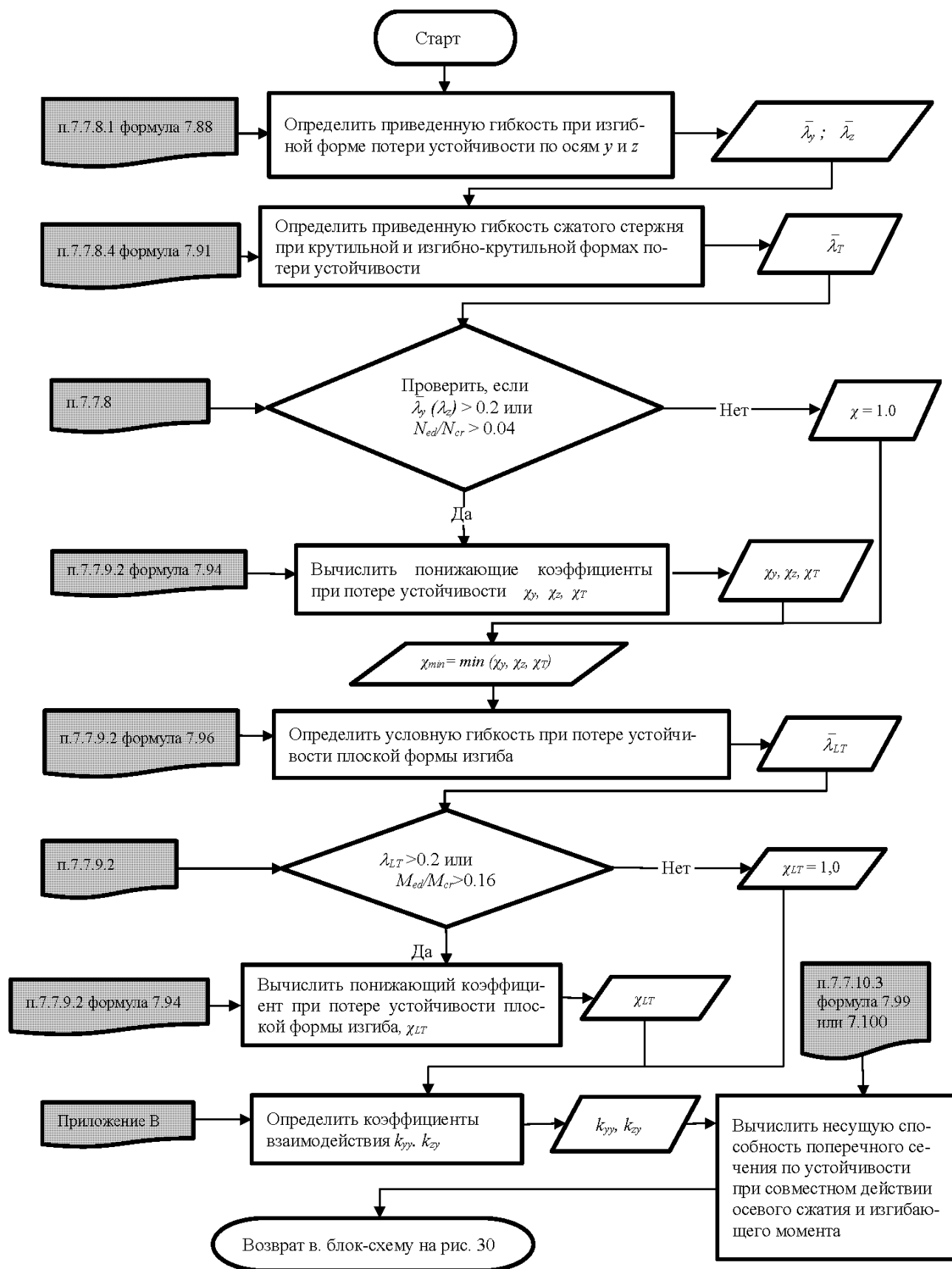


Рис. 31. Определение несущей способности гнутого профиля при действии продольной силы с изгибом с учетом изгибной, крутильной и изгибно-крутильной форм потери устойчивости

$$\frac{|N_{ed}|}{N_{c.Rd}} + \frac{(M_{ed} + N_{ed} \cdot e_{Ny})}{W_{eff} \cdot R_y} = 0,292 < 1$$

$$-\frac{|N_{ed}|}{N_{c.Rd}} + \frac{(M_{ed} + N_{ed} \cdot e_{Ny})}{W_{eff} \cdot R_y} = 0,193 < 1$$

$L_y=8000$ мм; $L_{bi}=4000$ мм; $L_z=2000$ мм; $L_T=4000$ мм; $L_{be}=2000$ мм;

Расчетная критическая сила при изгибной форме потери устойчивости сжатого элемента относительно оси (y-y):

$$N_{cr.y} = \frac{\pi^2 * E * J_y}{(L_y)^2} = 2,4 * 10^3 \text{ кН}$$

$$\lambda_{y1} = \sqrt{\frac{A_{ef.c} \cdot R_y}{N_{cr.y}}} = 0,596$$

$$\alpha_y = 0,21$$

$$\phi_y = 0,5 * [1 + \alpha_y * (\lambda_{y1} - 0,2) + \lambda_{y1}^2] = 0,719$$

$$\chi_y = \left(\frac{1}{\phi_y + \sqrt{\phi_y^2 - \lambda_{y1}^2}} \right) = 0,892$$

$$N_{b.Rd.y} = \chi_y \cdot A_{ef.c} \cdot R_y = 607,7 \text{ кН}$$

$$ratio_{Ny} = \frac{N_{ed}}{N_{bRdy}} = 0,066$$

Устойчивость сжатого элемента относительно оси (y-y) обеспечена.

Расчетная критическая сила при изгибной форме потери устойчивости сжатого элемента относительно оси (z-z):

$$N_{cr.z} = \frac{\pi^2 * E * J_z}{(L_z)^2} = 2,58 * 10^3 \text{ кН}$$

$$\lambda_z = \sqrt{\frac{A_{ef.c} \cdot R_y}{N_{cr.z}}} = 0,574$$

$$\alpha_z = 0,34$$

$$\phi_z = 0,5 * [1 + \alpha_z * (\lambda_z - 0,2) + \lambda_z^2] = 0,729$$

$$\chi_y = \left(\frac{1}{\phi_z + \sqrt{\phi_z^2 - \lambda_z^2}} \right) = 0,85$$

$$\chi_z := \frac{1}{\left(\phi_z + \sqrt{\phi_z^2 - \lambda_z^2} \right)} = 0.85$$

$$N_{b.Rd.z} = \chi_z \cdot A_{ef.c} \cdot R_y = 579.07 \text{ кН}$$

Расчетная критическая сила для крутильной формы потери устойчивости в пределах упругой работы $N_{cr,T}$ элемента симметричного сечения относительно оси y-y:

$$N_{cr.T} = \frac{1}{i_0^2} \left[GI_t * \frac{\pi^2 * E * J_\omega}{l_T^2} \right] = 437,4 \text{ кН}$$

$$\lambda_T = \sqrt{\frac{A_{ef.c} \cdot R_y}{N_{cr.T}}} = 1.396$$

$$\alpha_T = 0,34$$

$$\phi_T = 0,5 * [1 + \alpha_T * (\lambda_T - 0,2) + \lambda_T^2] = 1,677$$

$$\chi_T = \frac{1}{[\phi_T + (\sqrt{\phi_T^2 - \lambda_T^2})]} = 0,384$$

$$N_{b.Rd.T} = \chi_T \cdot A_{ef.c} \cdot R_y = 261,4 \text{ кН}$$

Критический момент при упругой потере устойчивости из плоскости изгиба с кручением при отрицательном изгибающем моменте определяется по п.7.3.3 СП 260.1325800.2016:

$$k_z=1.0$$

$$k_w=1.0$$

$$\psi = \frac{M_{F1}}{M_{F2}} = 0,75$$

$$C_1 = 1.141$$

$$C_2 = 0$$

$$M_{cr,y} = C_1 * \frac{(\pi^2 * E * I_z)}{(k_z * L_{be})^2} * \sqrt{\frac{I_\omega}{I_z} + \frac{(L_{be})^2 * G_1 * I_t}{(\pi^2 * E * I_z)}} = 470,6 \text{ кН * м}$$

$$\lambda_{bLT} = \sqrt{\frac{W_{eff} \cdot R_y}{M_{cr,y}}} = 0,542$$

$$\alpha_{LT} = 0,34$$

$$\phi_{LT} = 0,5 * [1 + \alpha_{bLT} * (\lambda_{bLT} - 0,2) + \lambda_{bLT}^2] = 0,705$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{[\phi_{LT} + (\sqrt{\phi_{LT}^2 - \lambda_{bLT}^2})]} = 0,865$$

$$M_{b.Rd.suct} = \chi_{LT} \cdot W_{eff} \cdot R_y = 95,78 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

Критический момент при упругой потере устойчивости из плоскости изгиба с кручением при положительном изгибающем моменте определяется по формуле Г.1 (Приложение Г) СП 260.1325800.2016:

$$\psi_1 = \frac{0}{M_{F2}} = 0$$

$$C_3=1.879; C_4=0$$

$$\phi_1 = 0,5 * [1 + \alpha * (\lambda - 0,2) + \lambda^2] = 0,462$$

$$M_{cr,y2} = C_3 * \frac{(\pi^2 * E * I_z)}{(k_z * L_{be})^2} * \sqrt{\frac{I_\omega}{I_z} + \frac{(L_{be})^2 * G_1 * I_t}{(\pi^2 * E * I_z)}} = 774,98 \text{ кН} * \text{м}$$

$$\lambda_{bLT} = \sqrt{\frac{W_{eff} \cdot R_y}{M_{cr,y2}}} = 0,423$$

$$\alpha_{LT2} = 0,34$$

$$\phi_{LT2} = 0,5 * [1 + \alpha_{LT2} * (\lambda_{bLT} - 0,2) + \lambda_{bLT}^2] = 0,627$$

$$\chi_{LT2} = \left(\frac{1}{\phi_{LT2} + \sqrt{\phi_{LT2}^2 - \lambda_{bLT}^2}} \right) = 0,917$$

$$M_{b.Rd.suct} = \chi_{LT2} \cdot W_{eff} \cdot R_y = 101,54 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

Расчет на устойчивость элемента при действии продольной силы с изгибом по п.7.7.10.5 СП 260.1325800.2016 при:

$$e_{Ny}=0,00 \text{ мм}$$

$$\Delta_M = N_{ed} * e_{Ny} = 0$$

$$ratio_{MNpres} = \left[\frac{|N_{ed}|}{N_{bRdT}} \right]^{0.8} * \left[\frac{M_{ed} + \Delta_M}{M_{bRdpres}} \right]^{0.8} = 0,639 < 1$$

Устойчивость элемента при действии продольной силы и изгибающего момента обеспечена.

6 Определение несущей способности изгибаемого элемента из гнутого профиля с учетом крутильной и изгибно-крутильной форм потери устойчивости

Пример 8. Расчет однопролетного изгибаемого элемента из холодногнутого профиля.

Требуется проверить несущую способность изгибаемого элемента С – образного сечения 340 х 120 х 3,0. Однопролетная балка загружена равномерной распределенной нагрузкой $q_s = 5.0$ кН/м (Рис.33). Граничные условия на концах элемента шарниры. Расчетная длина элемента в плоскости и из плоскости действия изгибающего момента $L = 6.0$ м. Ширина опирания элемента на опоры $b_0 = 70$ мм.

Характеристики материала:

- Предел текучести стали $R_{yn} = 350$ Н/мм²;
- Модуль упругости $E = 206\,000$ Н/мм²;
- Коэффициент Пуассона $\nu = 0.3$
- Модуль сдвига $G = E/[2 \cdot (1 + \nu)]^{-1} = 79230$ Н/мм²

Геометрические параметры профиля приведены на рисунке 32.

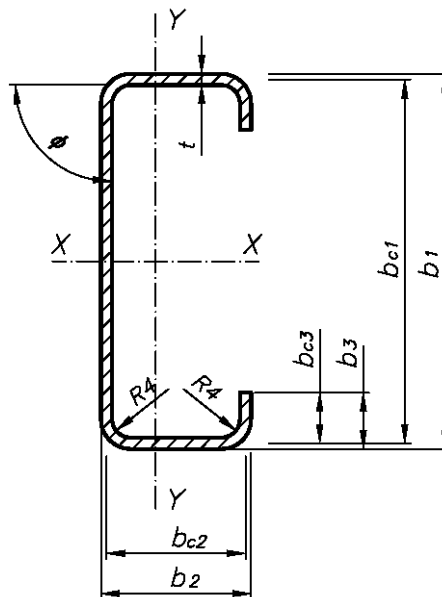


Рис. 32. Геометрические параметры сечения С – образного профиля

Высота сечения профиля $b_1 = 340$ мм;

Толщина металла $t = 3.0$ мм;

Высота сечения профиля по средней линии $b_{c1} = b_1 - t = 337$ мм;

Ширина полки $b_2 = 120$ мм;

Ширина полки по средней линии $b_{c2} = b_2 - t = 117$ мм;

Высота отгиба $b_3 = 20$ мм;

Внутренний радиус гiba $r = 4$ мм;

Угол между полкой и стенкой $\phi = 90^\circ$.

Геометрические характеристики сечения определены в соответствии с требованиями СП 260.1325800.2016 по методике, изложенной в разделе 2 настоящего пособия:

- Полная площадь поперечного сечения $A_{net} = 18.0$ см²;
- Редуцированная площадь (при сжатии) $A_{eff} = 9.35$ см²;
- Момент инерции не редуцированного (полного) поперечного сечения профиля относительно оси X : $I_x = 3164.2$ см⁴;
- Момент инерции не редуцированного (полного) поперечного сечения профиля относительно оси Y : $I_y = 304.5$ см⁴;
- Момент инерции не редуцированного (полного) поперечного сечения профиля при кручении: $I_t = 3468.7$ см⁴;
- Секторальный момент инерции не редуцированного (полного) поперечного сечения профиля: $I_\omega = 64573$ см⁶;
- Момент инерции редуцированного поперечного сечения профиля относительно оси X : $I_{eff,x} = 2781.4$ см⁴;
- Момент инерции редуцированного поперечного сечения профиля относительно оси Y : $I_{eff,y} = 248.4$ см⁴;
- Минимальный момент сопротивления редуцированного поперечного сечения профиля относительно оси X : $W_{eff,x} = 152.08$ см³;
- Минимальный момент сопротивления редуцированного поперечного сечения профиля относительно оси Y : $W_{eff,y} = 31.66$ см³;

Определение внутренних силовых факторов.

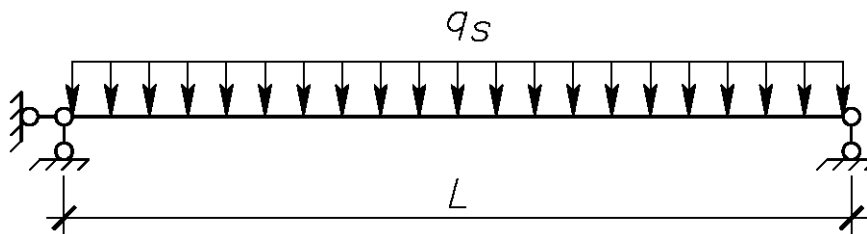


Рис. 33. Расчетная схема элемента

Изгибающий момент в середине пролета равен:

$$M_{x.Ed} = q_s * \frac{L^2}{8} = 22,5 \text{ кН} * \text{м}$$

Опорная реакция:

$$R_A = q_s * \frac{L}{2} = 15 \text{ кН}$$

Процедуры определения несущей способности изгибаемого элемента из гнутого профиля с учетом крутильной и изгибно-крутильной форм потери устойчивости показаны на блок-схеме, приведенной на рисунке 34.

Расчет изгибаемого элемента на прочность.

Расчет на прочность изгибаемого элемента выполняем по п. 7.7.3.1 СП 260.1325800.2016:

$$\frac{M_{x.Ed}}{W_{eff.x} \cdot R_y} = 0,444 < 1$$

Условие прочности выполнено!

Расчет изгибаемого элемента на устойчивость.

Расчет на устойчивость изгибаемого элемента выполняем по п. 7.3.3 СП 260.1325800.2016.

Критический момент потери устойчивости плоской формы изгиба в упругой стадии по формуле Г.1 (Приложение Г) СП 260.1325800.2016:

$$M_{cr.y} = C_1 * \frac{(\pi^2 * E * I_z)}{(k_z * L)^2} * \sqrt{\frac{I_\omega}{I_z} * \left(\frac{k_z}{k_w}\right)^2 + \frac{(L)^2 * G_1 * I_t}{(\pi^2 * E * I_y)}} = 770,48 \text{ кН} * \text{м}$$

где $C_1 = 1.12$ – коэффициент определяемые по таблице Г.1 (Приложение Г) СП 260.1325800.2016:

$k_z = 1.0$ – коэффициент расчетной длины при упругой потере устойчивости из плоскости изгиба, определяемый по таблице 10 в зависимости от условий закрепления;

$k_w = 1.0$ – коэффициент расчетной длины при упругой потере устойчивости из плоскости изгиба с кручением.

Условная гибкость:

$$\lambda_{LT} = \sqrt{\frac{W_{eff.y} \cdot R_y}{M_{cr.y}}} = 0,12$$

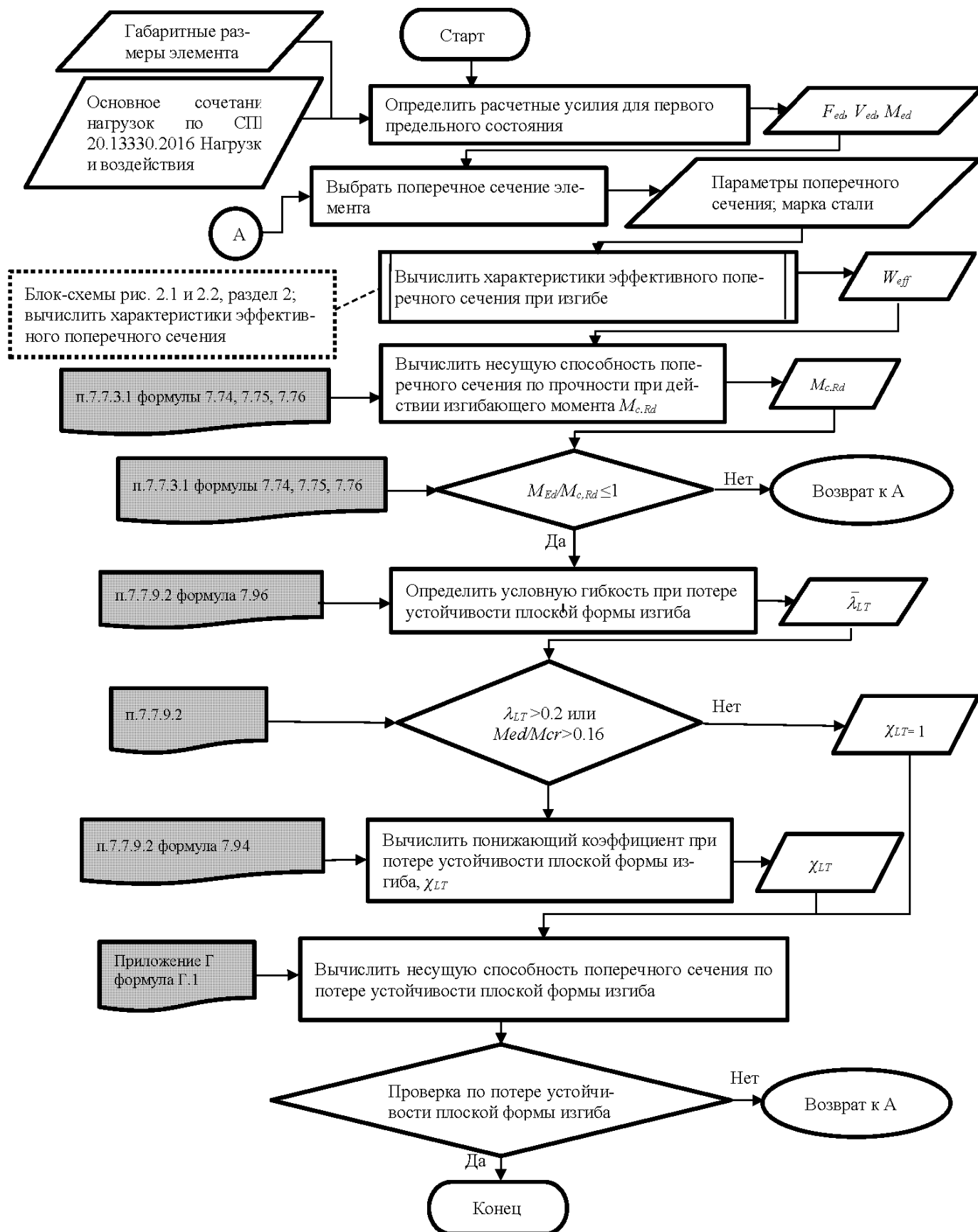


Рис. 34. Определение несущей способности изгибаемого элемента из гнутого профиля с учетом крутильной и изгибно-крутильной форм потери устойчивости

Условие устойчивости изгибаемого элемента проверяем по формуле:

$$\frac{M_{x.Ed}}{\chi_{LT} \cdot W_{eff.x} \cdot R_y} = 0,528 < 1$$

где $\chi_{LT} = 1$ – коэффициент устойчивости плоской формы изгиба определяться по кривой «b», по п. 7.7.8.4 или по формуле 7.94 СП 260.1325800.2016, но не более 1:

$$\chi_{LT} = \left(\frac{1}{\phi_{LT} + \sqrt{\phi_{LT}^2 - \lambda_{LT}^2}} \right) = 1,028$$

$$\phi_{LT} = 0,5 * [1 + \alpha_{LT} * (\lambda_{LT} - 0,2) + \lambda_{LT}^2] = 0,494$$

где: $\alpha_{LT} = 0.34$ - поправочный коэффициент, определяемой по таблице 7.6 СП 260.1325800.2016 в зависимости от принятой кривой потери устойчивости.

Условие устойчивости выполнено!

Расчет местной устойчивости стенки профиля при сосредоточенной нагрузке (опорной реакции).

Предельная сосредоточенная нагрузка (реакция R_A) на опорное сечение элемента рассчитывается по формуле 7.108 СП 260.1325800.2016:

$$Q_{w,F} = \gamma_c \cdot C \cdot t^2 \cdot R_y \left(1 - C_r \sqrt{\frac{r}{t}} \right) \left(1 + C_b \cdot \sqrt{\frac{b_o}{t}} \right) \left(1 - C_h \cdot \sqrt{\frac{h}{t}} \right) = 17,92 \text{ кН}$$

где: $C = 4$ коэффициент по таблице 7.9 СП 260.1325800.2016;
 $C_r = 0.14$ коэффициент по таблице 7.9 СП 260.1325800.2016;
 $C_b = 0.35$ коэффициент по таблице 7.9 СП 260.1325800.2016;
 $C_h = 0.02$ коэффициент по таблице 7.9 СП 260.1325800.2016;
 $h = b_{c1} = 337$ мм

$$P_n = 17,918 \text{ кН} > R_A = 15.0 \text{ кН}$$

Местная устойчивость стенки изгибаемого элемента на опоре обеспечена!

7 Определение несущей способности изгибаемого элемента с учетом местной устойчивости стенки при сосредоточенной нагрузке

Пример 9

Пример проверки местной устойчивости стенки прогона из одиночного профиля зетобразного сечения Z-200x70/62x2.5 с опиранием на нижележащую конструкцию. Прогон выполнен из стали марки 350.

Рассмотрим этот прогон, установленный по неразрезной двухпролетной схеме (Рис. 35) и опирающийся на верхний пояс фермы шириной 120 мм. Шаг прогонов – 1,5 м, пролет – 6 м. расчетная нагрузка на покрытие – 2,40 кПа.

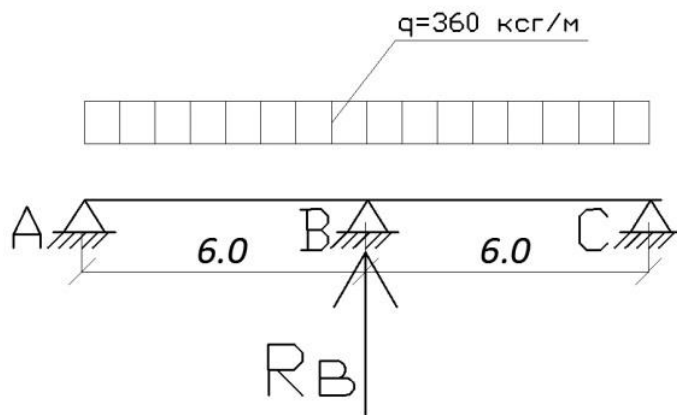


Рис. 35. Расчетная схема балки

Процедуры определения несущей способности изгибаемого элемента из гнутого профиля с учетом местной устойчивости стенки при сосредоточенной нагрузке показаны на блок-схеме, приведенной на рисунке 36.

Расчет на прочность изгибаемого элемента выполняем по п. 7.7.3.1 СП 260.1325800.2016:

$$\sigma_B = \frac{q \cdot l^2}{8 \cdot W_x} = \frac{3,60 \cdot 6^2 \cdot 1000}{8 \cdot 48,3} = 335 \approx R_y = 330 \text{ МПа}$$

Профиль проходит по прочности.

Расчет на прочность изгибаемого элемента с учетом местной устойчивости стенки при сосредоточенной нагрузке:

$$R_B = 1,25 \cdot 3,60 \cdot 6 = 27 \text{ кН}$$

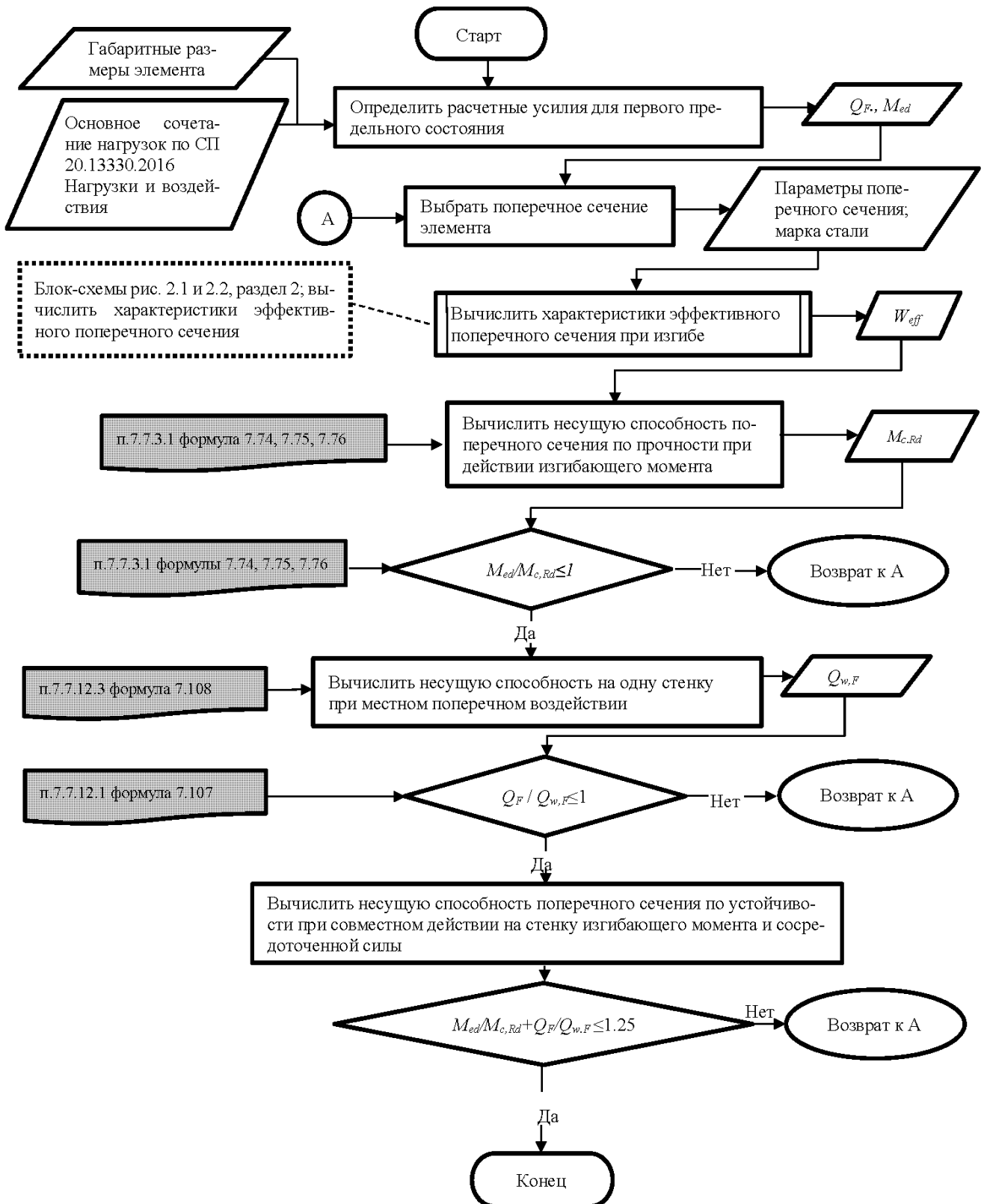


Рис. 36. Определение несущей способности изгибаемого элемента с учетом местной устойчивости стенки при сосредоточенной нагрузке

Предельная сосредоточенная нагрузка (реакция R_B на средней опоре) на опорное сечение прогона рассчитывается по формуле 7.108 СП 260.1325800.2016

$$Q_{w,F} = \gamma_c \cdot C \cdot t^2 \cdot R_y \left(1 - C_r \sqrt{\frac{r}{t}} \right) \left(1 + C_b \cdot \sqrt{\frac{b_0}{t}} \right) \left(1 - C_h \cdot \sqrt{\frac{h}{t}} \right),$$

где $C = 13$; $t = 2,5$ мм; $r = 4$ мм;

$R_y = 330$ МПа ; $C_r = 0.23$; $C_b = 0.14$; $C_h = 0.01$

C, C_r, C_b, C_h – коэффициенты по таблице 7.10 СП 260.1325800.2016

$b_0 = 120$ мм; $h = h_{ef} = 200 - 2r = 200 - 8 = 192$ мм

$$Q_{w,F} = 0,8 \cdot 13 \cdot 2,5^2 \cdot 33 \left(1 - 0,23 \sqrt{\frac{4}{2,5}} \right) \left(1 + 0,14 \sqrt{\frac{120}{2,5}} \right) \left(1 - 0,01 \sqrt{\frac{192}{2,5}} \right) \\ = 28,80 \text{ кН} > 27,00 \text{ кН}$$

Местная устойчивость стенки прогона на средней опоре обеспечена.

Пример 10

Рассмотрим неразрезную многопролетную балку (прогибы) из одиночных зетобразных профилей с соединениями на промежуточных опорах внахлест при равномерно распределенной нагрузке (Рис. 37)

Перехлест балок на опорах – 1,6 м (по 0,8 м - симметрично относительно оси опоры)

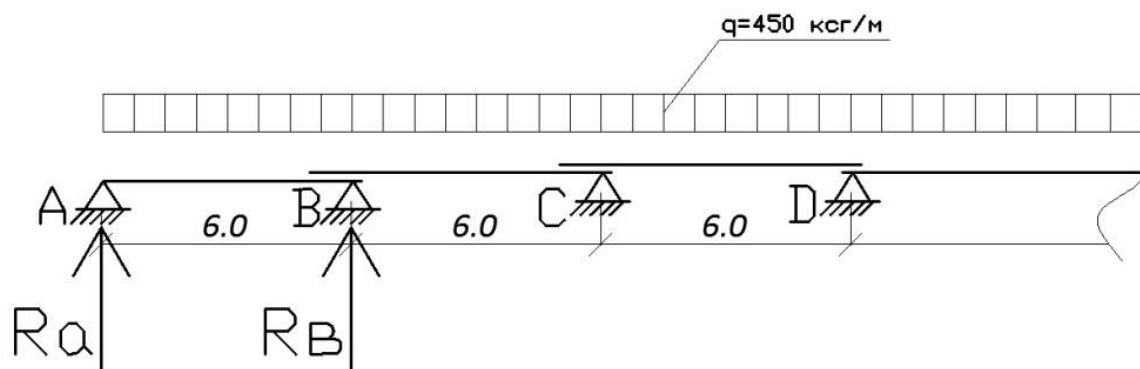


Рис. 37. Расчетная схема балки

Подбираем сечение балки по максимальному изгибающему моменту в крайнем пролете

$$M_1 = 0,078 \cdot ql^2 = 0,078 \cdot 4,50 \cdot 6^2 = 12,64 \text{ кНм}$$

$$W_{\text{тр}} = M \cdot Ry = 12,64 \cdot 330 \cdot 0,01 = 41,71 \text{ см}^3$$

Принимаем профиль Z 200x70/62x2,5 ($W_x = 48,29 \text{ см}^3$), как в Примере 9.

Проверяем местную устойчивость стенки профиля на крайней опоре А. Ширина опоры – $l_0 = 60 \text{ мм}$.

Предельная сосредоточенная нагрузка на опорное сечение прогона определяется по формуле (7.108) СП 260.1325800.2016 с коэффициентами по таблице 7.10 для закрепленного профиля на крайней опоре

$$C = 4; \quad C_r = 0,14; \quad C_b = 0,35; \quad C_h = 0,02$$

$$Q_{w,F} = 0,8 \cdot 13 \cdot 2,5^2 \cdot 33 \left(1 - 0,14 \sqrt{\frac{4}{2,5}} \right) \left(1 + 0,35 \sqrt{\frac{60}{2,5}} \right) \left(1 - 0,02 \sqrt{\frac{192}{2,5}} \right) \\ = 12,70 \text{ кН}$$

Реакция на крайней опоре балки равна

$$R_A = 0,395 \cdot ql = 0,395 \cdot 4,50 \cdot 6 = 10,67 \text{ кН} < Q_{w,F}$$

Реакция на опоре В равна

$$R_B = 1,132 \cdot ql = 1,132 \cdot 4,50 \cdot 6 = 30,56 \text{ кН}$$

В связи с тем, что на промежуточных опорах сечение балки состоит из сдвоенных профилей, местная устойчивость стенки балки обеспечена (см. Пример 9), т.к.

$$R_B < 2 \cdot 28,80 = 57,60 \text{ кН}$$

8 Расчет соединений ЛСТК

В примерах рассмотрены процедуры расчета соединений ЛСТК на вытяжных заклепках, самосверлящих самонарезающих винтах и болтах на основе разработанной изменённой редакции СП 260.1325800.2016 [11].

8.1 Расчет соединений на вытяжных заклепках и самосверлящих самонарезающих винтах

При работе соединений тонкостенных конструкций из оцинкованного холоднокатаного листа на вытяжных заклепках и самосверлящих самонарезающих винтах на срез и растяжение, следует рассматривать приведённые на рисунке 38 основные типы отказа соединений.

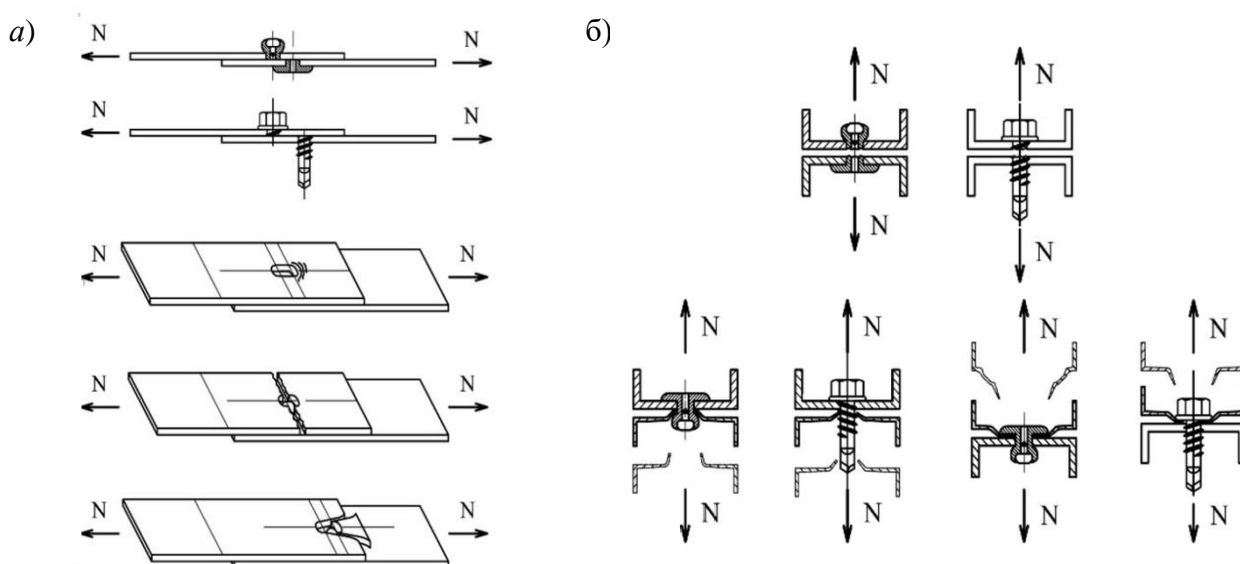


Рис. 38. Типы отказов соединений ЛСТК на вытяжных заклепках и самосверлящих самонарезающих винтах - а) соединения, работающие на срез: срез заклёпки (винта); смятие листа; разрыв листа по сечению; выкол листа; б) соединения, работающие на растяжение: разрыв заклёпки(винта); вырыв из листа; отрыв листа через пресс шайбу (бурт).

Для соединений, работающих на срез:

- срез заклёпки (винта);
- смятие листа;
- разрыв листа по сечению;
- выкол листа.

Для соединений, работающих на растяжение:

- разрыв заклепки(винта);
- скручивание головки винта;
- вырыв из листа;
- отрыв листа через пресс шайбу (бурт);
- отрыв прикрепляемого листа через пресс-шайбу.

8.1.1. Расчет соединений на вытяжных заклепках:

Изменение № 1 от 2018 г. [11] к СП 260.1325800.2016 [1], в котором изложены в новой редакции пункты, касающиеся расчета соединений на вытяжных заклёпках:

«10.1.3 Несущая способность соединений на вытяжных заклёпках определяется по следующим формулам:

- при смятии более тонкого элемента основного металла определяется по выражению:

$$F_{bp} = \alpha \cdot \gamma_c \cdot R_{bp} \cdot d \cdot t, \quad (10.1)$$

где α принимается по таблице 10.1 (СП 260.1325800.2016 [1]);

R_{bp} – расчётное сопротивление смятию соединяемых элементов по таблице Г6 СП 16.13330.2017 [14];

d – диаметр заклёпки;

t – толщина более тонкого элемента в соединении.

- при работе на растяжение с учётом разрыва тела заклёпки или возможного отрыва более тонкого соединяемого элемента определяется по результатам испытаний (смотри пункт 10.1.2 СП 260.1325800.2016 [1]);

- при работе заклёпочного соединения на срез по прочности наиболее тонкого из соединяемых элементов:

$$F_{bp} = A_{net} \cdot \gamma_c \cdot R_y, \quad (10.2)$$

где A_{net} – площадь сечения нетто наиболее тонкого, соединяемого элемента;

R_y – расчётное сопротивление металла соединяемого элемента.»

Подраздел 10.2 дополнить пунктом 10.2.3 и таблицей 10.3:

«10.2.3 Значения коэффициента γ_{m2} для винтовых и заклёпочных соединений в зависимости от характера их работы приведены в таблице 10.3.

Таблица 10.3 [11]

Характер работы соединения		γ_{m2}	
		самонарезающие винты	заклёпки
Соединения с метизами, работающими на срез			
Смятие соединяемых элементов	$0,5 \leq t \leq 0,7$	1,6	1,5
	$0,7 < t \leq 2$ мм	1,45	
Разрыв соединяемого элемента по сечению нетто		1,1	1,1
Соединения с метизами, работающими на растяжение			
Отрыв элемента через пресс-шайбу		1,2	1,25
Вырыв винта из элемента		1,1	
Во всех других случаях работы соединений		$\gamma_{m2} = 1,25$	

Пример 11

Исходные данные:

Профилированный настил, выполняющий функцию горизонтальных связей в покрытии здания, показанный на рисунке 39 прикреплен на опоре к несущим прогонам в каждом гофре самосверлящими самонарезающими винтами. На продольных стыках листы настила соединены вытяжными стальными заклепками. Требуется определить несущую способность соединения вытяжными заклепками если на каждом погонном метре продольного стыка настила установлены 4 вытяжные стальные заклепки с диаметром $d = 4,8$ мм.

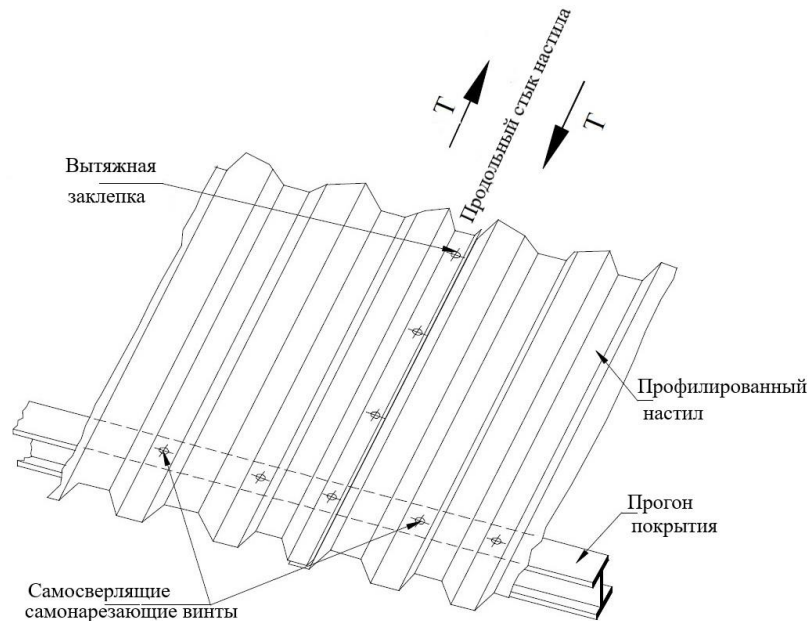


Рис. 39. Соединение профилированного настила выполняющий функцию горизонтальных связей в покрытии здания

Материалы конструкций и соединений

Материал профилированного листа толщиной $t = 0,7$ мм - сталь С350 с классом цинкового покрытия 275 по ГОСТ Р 52246 [8]:

$$R_{yn} = 350 \text{ Н/мм}^2; R_{un} = 420 \text{ Н/мм}^2$$

$$E = 210000 \text{ Н/мм}^2; \nu = 0,3; G = 210000 \text{ Н/мм}^2.$$

Вытяжные стальные заклепки из углеродистой стали $d = 4,8$ мм.

$F_{vsn} = 2900$ Н – прочность на срез вытяжной стальной заклепки, устанавливаемая по стандарту производителя;

Расчет соединения выполнен с учетом новой редакции раздела расчета болтовых соединений по СП 260.1325800.2016 [11], которые приведены выше по тексту.

Несущая способность соединения на вытяжных заклёпках при смятии более тонкого элемента основного металла определяется по выражению:

$$F_{bp} = \alpha \cdot R_{bp} \cdot d \cdot t / \gamma_{m2}, \quad (10.1)$$

где α принимается по таблице 10.1 (СП 260.1325800.2016 [1]);

R_{bp} – расчётное сопротивление смятию соединяемых элементов по таблице Г6 СП 16.13330.2017 [14];

d – диаметр заклёпки;

t – толщина более тонкого элемента в соединении.

$$t = t_1 = 0,7 \text{ мм}; \quad t / t_1 = 1$$

$$\alpha = 3,6\sqrt{t/d} = 3,6 \cdot \sqrt{0,7/4,8} = 1,375 \text{ т.к. } \alpha \leq 2,1 \text{ при } t=t_1 = 0,7 \text{ мм.}$$

$$F_{bp} = \frac{\alpha \cdot R_{bp} \cdot d \cdot t}{\gamma_{m2}} = \frac{1,375 \cdot 515 \cdot 4,8 \cdot 0,7}{1,5} = 1586 \text{ Н} = 1,59 \text{ кН}$$

Таким образом несущая способность одной вытяжной заклепки при смятии более тонкого элемента основного металла профилированного листа составляет:

$$F_{bp} = 1,59 \text{ кН.}$$

Несущая способность соединений на вытяжных заклепках при срезе тела заклепки:

$$F_{vs} = F_{vsn} / \gamma_{m2} \quad ;$$

где F_{vsn} – прочность на срез заклепки, устанавливаемая по стандарту производителя или по результатам испытаний.

Значение коэффициента γ_{m2} при срезе тела заклепки в соединении работающем на срез по таблице 10.3 [11]: $\gamma_{m2} = 1,25$.

$$F_{vs} = F_{vsn} / \gamma_{m2} = \frac{2900}{1,25} = 2320 \text{ Н} = 2,32 \text{ кН.}$$

$$F_{vs} = 2,32 \text{ кН} > F_{bp} = 1,59 \text{ кН}$$

Несущая способность соединения вытяжными заклепками определяется несущей способностью вытяжной заклепки при смятии основного металла профилированного листа и при установке 4 вытяжных стальных заклепок с диаметром $d = 4,8$ мм, на каждом погонном метре продольного стыка настила, T составит:

$$T = 4 \cdot F_{bp} = 4 \cdot 1,59 = 6,36 \text{ кН/м}$$

8.1.2. Расчет соединений на самосверлящих самонарезающих винтах:

Изменение № 1 от 2018 г. [11] к СП 260.1325800.2016 [6], в котором изложены в новой редакции пункты, касающиеся соединений на самонарезающих винтах:

«10.1.4 Несущая способность соединений на самонарезающих винтах:

- при срезающем усилии по смятию более тонкого листа соединения:

$$F_{bp} = \alpha \cdot \gamma_c \cdot R_{bp} \cdot d \cdot t, \quad (10.3)$$

где α принимается по таблице 10.1 (СП 260.1325800.2016 [1]);

R_{bp} – расчётное сопротивление смятию соединяемых элементов по таблице Г6 СП 16.13330.2017;

d – номинальный диаметр винта;

t – толщина более тонкого элемента в соединении.

- при разрыве соединяемого элемента определяется по формуле:

$$F_{bp} = A_{net} \cdot \gamma_c \cdot R_y, \quad (10.4)$$

где A_{net} – площадь сечения соединяемого элемента;

- при срезе тела винта $F_{vs} = F_{vsn} / \gamma_{m2}$,

где F_{vsn} – прочность на срез винта, устанавливаемая по стандарту производителя или по результатам испытаний (см. 10.1.2 СП 260.1325800.2016);

- при работе соединения на растяжение и отрыве более тонкого элемента через пресс-шайбу определяется при статических нагрузках по формуле:

$$F_{vt} = \gamma_c \cdot d_w \cdot t \cdot R_y, \quad (10.5)$$

где d_w – диаметр пресс-шайбы или головки винта.

- при работе соединения на растяжение и при вырыве из более толстого листа определяется по формуле:

$$F_{vt} = 0,45 \cdot \gamma_c \cdot d \cdot t_{sup} \cdot R_u; \quad \text{при } t_{sup} / S < 1 \quad (10.6)$$

или

$$F_{vt} = 0,65 \cdot \gamma_c \cdot d \cdot t_{sup} \cdot R_u; \quad \text{при } t_{sup} / S \geq 1 \quad (10.7)$$

где t_{sup} – толщина более толстого из соединяемых элементов;

S – шаг резьбы винта.

Прочность винта на разрыв определяется по стандарту производителя или по результатам испытаний.»

Подраздел 10.2 дополнить пунктом 10.2.3 и таблицей 10.3:

«10.2.3 Значения коэффициента γ_{m2} для винтовых соединений в зависимости от характера их работы приведены в таблице 10.3.

Таблица 10.3 [11]

Характер работы соединения		γ_{m2}	
		самонарезающие винты	заклёпки
Соединения с метизами, работающими на срез			
Смятие соединяемых элементов	$0,5 \leq t \leq 0,7$	1,6	1,5
	$0,7 < t \leq 2$ мм	1,45	
Разрыв соединяемого элемента по сечению нетто		1,1	1,1
Соединения с метизами, работающими на растяжение			
Отрыв элемента через пресс-шайбу		1,2	1,25
Вырыв винта из элемента		1,1	
Во всех других случаях работы соединений		$\gamma_{m2} = 1,25$	

Процедуры определения несущей способности соединения на самонарезающих винтах показаны на блок-схемах, приведенных на рисунках 40 и 41.

Пример 12

Исходные данные:

Соединение подвески стропильной фермы из ЛСТК с нижним поясом фермы, показанного на рисунке 42, выполнено оцинкованными самонарезающими винтами из углеродистой стали. Качество винтов отвечает требованиям DIN 7504 и подтверждаться сертификатом.

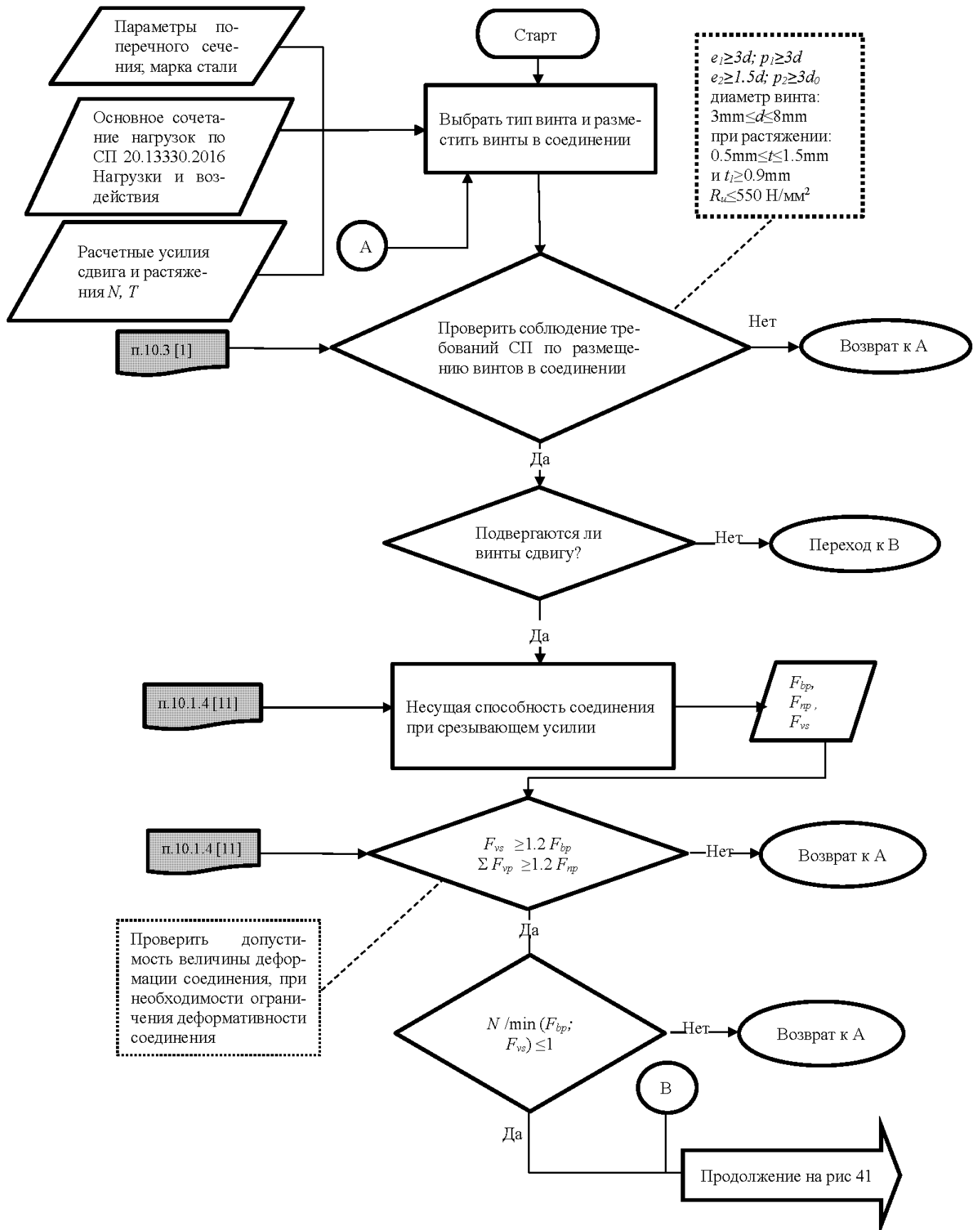


Рис. 40 Расчет несущей способности соединения на самонарезающих винтах (продолжение на рис. 41)

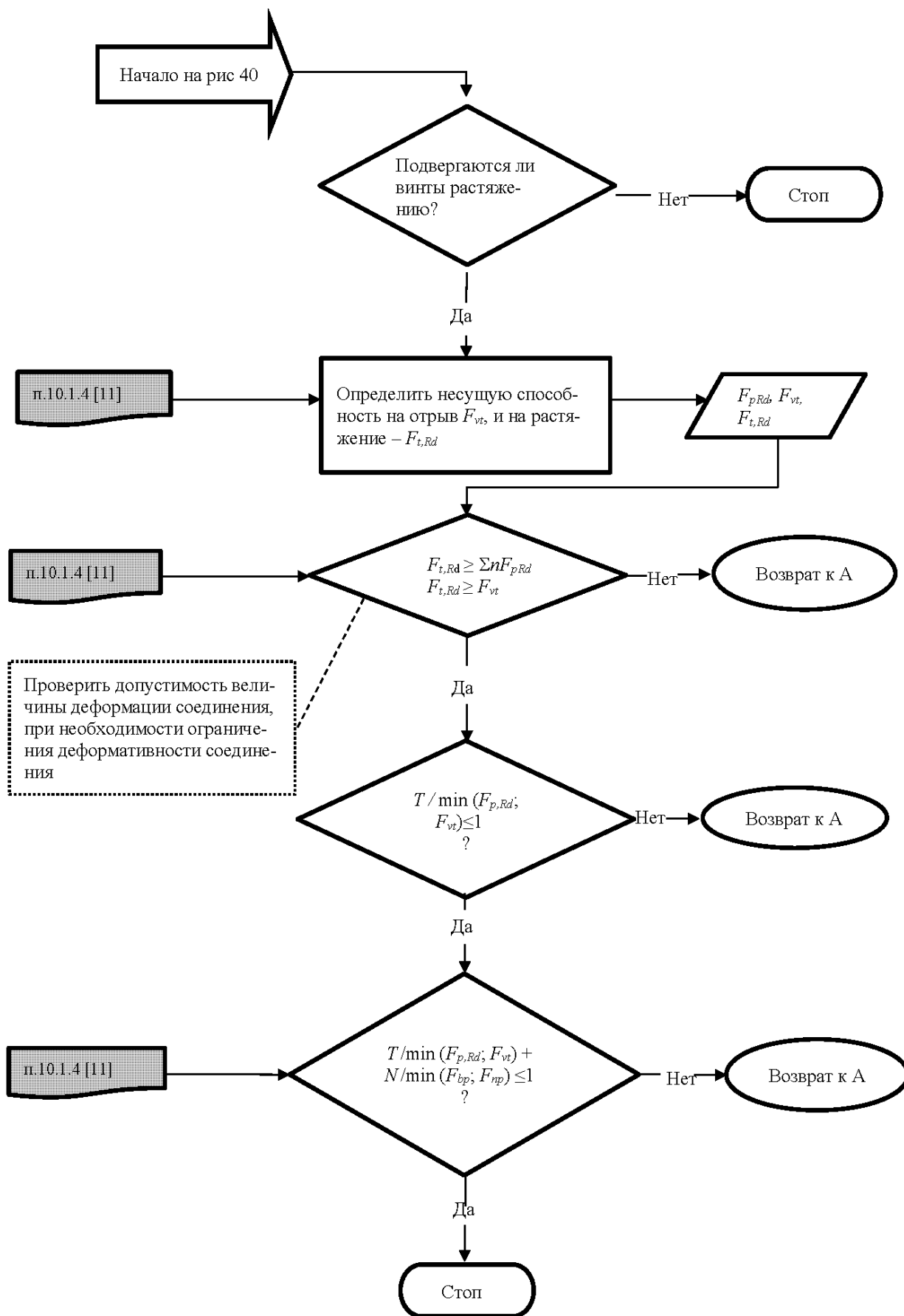


Рис. 41 Расчет несущей способности соединения на самонарезающих винтах (начало на рис. 40)

Материалы конструкций и соединений

В срезных соединениях (рис.42) применены 4 винта диаметром $d = 4,8\text{мм}$

Схема расстановки винтов показана на рисунке 43:

$$e_1 = 15 \text{ мм}; e_2 = 15 \text{ мм}; p_1 = 15 \text{ мм}$$

Размеры подвески:

$$h_1 = 150 \text{ мм}; b_1 = 50 \text{ мм}; c_1 = 15 \text{ мм}; t_{1nom} = 1,46 \text{ мм}; t_1 = 1,5 \text{ мм};$$

$$A_1 = 415 \text{ мм}^2;$$

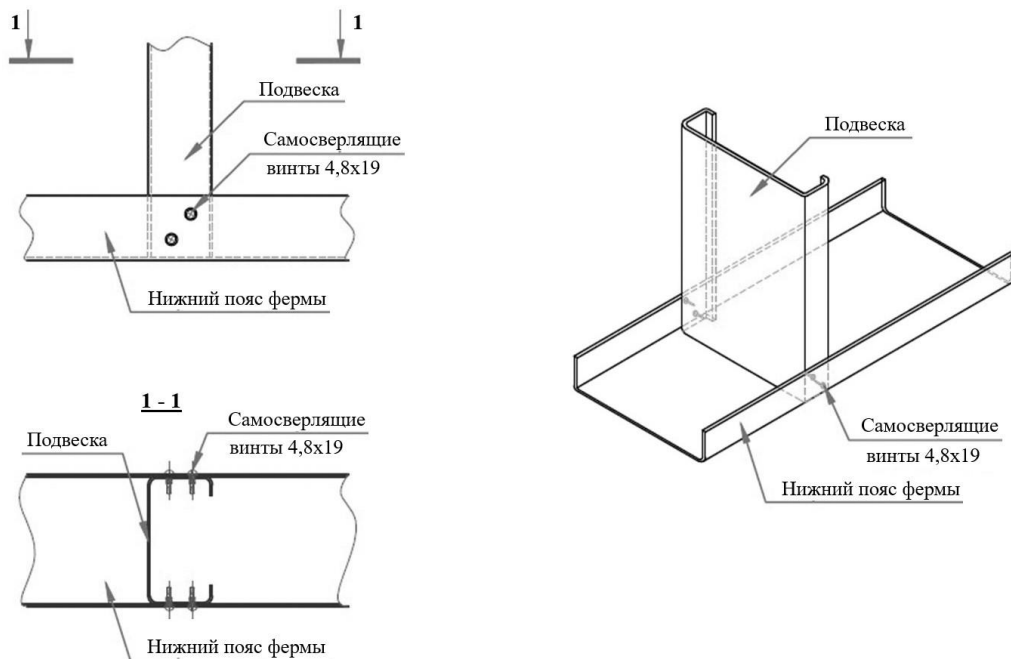


Рис. 42. Соединение подвески фермы с нижним поясом

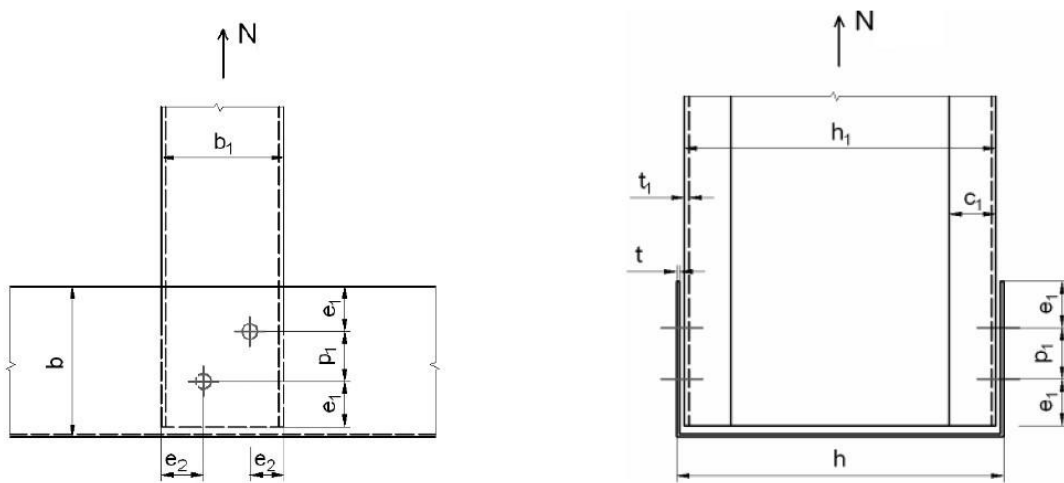


Рис. 43 - Схема расположения самосверлящих самонарезающих винтов в соединении

Размеры нижнего пояса фермы:

$$h = 154 \text{ мм}; b = 50 \text{ мм}; t_{1nom} = 1,5 \text{ мм}; t_1 = 1,46 \text{ мм};$$

Материал гнутых тонкостенных профилей - сталь С320 с классом цинкового покрытия 275 по ГОСТ Р 52246 [8]:

$$R_{yn} = 320 \text{ Н/мм}^2; R_{un} = 390 \text{ Н/мм}^2$$

$$E = 210000 \text{ Н/мм}^2; \nu = 0,3; G = 210000 \text{ Н/мм}^2.$$

Расчет соединения выполнен с учетом новой редакции раздела расчета соединений на самосверлящих самонарезающих винтах по СП 260.1325800.2016 [11], которые приведены выше по тексту.

Винт самонарезающий самосверлящий

$$e_1 \geq 3d; p_1 \geq 3d; e_2 \geq 1,5d; 3,0 \leq d \leq 8,0$$

$$e_1 = 15 \text{ мм};$$

$$e_2 = 15 \text{ мм};$$

$$p_1 = 15 \text{ мм};$$

$$3,0 \leq d = 4,8 \text{ мм} \leq 8,0$$

Исходные данные по материалам соединений:

$R_y = 310 \text{ МПа}$ – расчётное сопротивление стали соединяемых элементов по таблице 6.2 СП 260.1325800.2016;

$R_{bp} = 515 \text{ МПа}$ – расчётное сопротивление смятию соединяемых элементов по таблице Г6 СП 16.13330.2017;

$F_{vsn} = 5560 \text{ Н}$ – прочность на срез винта, устанавливаемая по стандарту производителя или по результатам испытаний;

Несущая способность соединений на самонарезающих винтах:

- при срезающем усилии по смятию более тонкого листа соединения:

$$F_{bp} = \alpha \cdot R_{bp} \cdot d \cdot t / \gamma_{m2}, \quad (10.3)$$

где α принимается по таблице 10.1 (СП 260.1325800.2016 [1]);

$$\text{при } t=t_1=1,5 \text{ мм} \quad \alpha = 3,2\sqrt{t/d} = 3,2\sqrt{1,46/4,8} = 1,76 \text{ т.к. } \alpha \leq 2,1$$

Значение коэффициента γ_{m2} для винтовых соединений на самонарезающих винтах, работающими на срез при $0,7 < t \leq 2$ мм по таблице 10.3 [11]:

$$\gamma_{m2} = 1,45$$

$$F_{bp} = \alpha \cdot R_{bp} \cdot d \cdot t / \gamma_{m2} = 1,76 \cdot 515 \cdot 4,8 \cdot \frac{1,46}{1,45} = 4381 \text{ Н} = 4,38 \text{ кН}$$

Несущая способность соединяемого элемента по ослабленному сечению определяется по формуле:

$$F_{bp} = A_{net} \cdot \gamma_c \cdot R_y / \gamma_{m2}, \quad (10.4)$$

где A_{net} – площадь сечения соединяемого элемента;

$$A_{net} = 415 - 2 \cdot d \cdot t_1 = 415 - 2 \cdot 4,8 \cdot 1,46 = 401 \text{ мм}^2$$

Значение коэффициента γ_{m2} при разрыве соединяемого элемента по сечению нетто элементов соединенных на самонарезающих винтах, работающими на срез по таблице 10.3 [11]: $\gamma_{m2} = 1,1$.

$$F_{bp} = A_{net} \cdot R_y / \gamma_{m2} = 401 \cdot \frac{310}{1,1} = 113009 \text{ Н} = 113 \text{ кН}$$

Несущая способность соединений на самонарезающих винтах при срезе тела винта:

$$F_{vs} = F_{vsn} / \gamma_{m2} ;$$

где F_{vsn} – прочность на срез винта, устанавливаемая по стандарту производителя или по результатам испытаний.

Значение коэффициента γ_{m2} при срезе самонарезающего винта в соединении работающем на срез по таблице 10.3 [11]: $\gamma_{m2} = 1,25$.

$$F_{vs} = F_{vsn} / \gamma_{m2} = \frac{5560}{1,25} = 4448 \text{ Н} = 4,48 \text{ кН}.$$

Несущая способность соединения подвески стропильной фермы из ЛСТК с нижним поясом определяется срезающим усилием по смятию более тонкого листа соединения:

$$F_{bp} = 4,38 \text{ кН}$$

При установке 4 оцинкованных самонарезающих винтов из углеродистой стали винтов диаметром $d = 4,8$ мм (рис. 41) предельная несущая способность соединения N равна:

$$N = 4 \cdot F_{bp} = 4 \cdot 4,38 = 17,52 \text{ кН}$$

Пример 13

Исходные данные:

Соединение профилированного листа покрытия с прогоном, показанное на рисунке 44, выполнено оцинкованными самонарезающими винтами из углеродистой стали. Качество винтов отвечает требованиям DIN 7504 и подтверждаться сертификатом.

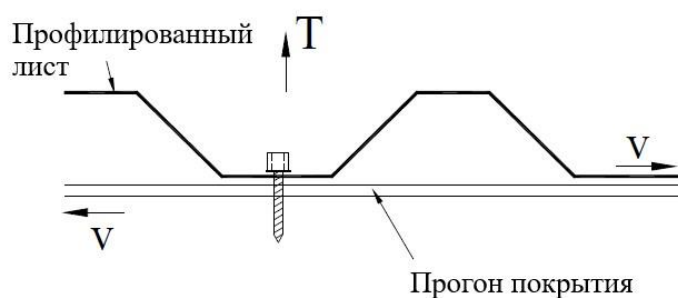


Рис. 44. Соединение профилированного листа самосверлящим самонарезающим винтом с прогоном покрытия

Материалы конструкций и соединений

Материал профилированного листа толщиной $t = 0,6$ мм - сталь С250 с классом цинкового покрытия 275 по ГОСТ Р 52246 [8]:

$$R_{yn} = 250 \text{ Н/мм}^2; R_{un} = 330 \text{ Н/мм}^2$$

$$E = 210000 \text{ Н/мм}^2; \nu = 0,3; G = 210000 \text{ Н/мм}^2.$$

Материал прогона $t = 2,5$ мм - сталь С350 с классом цинкового покрытия 275 по ГОСТ Р 52246 [8]:

$$R_{yn} = 350 \text{ Н/мм}^2; R_{un} = 420 \text{ Н/мм}^2$$

Самонарезающие винты из углеродистой стали $d = 4,8$ мм.

Диаметр пресс-шайбы винтов $d_w = 16$ мм.

$F_{vsn} = 5560$ Н – прочность на срез винта, устанавливаемая по стандарту производителя;

$F_{t,Rd} = 5000$ Н – прочность винта на разрыв определяется по стандарту производителя.

Шаг винтов $p_l = 36$ мм $> 3d$

Расстояние от центра последнего винта до края профилированного листа $e_l = 36$ мм $> 3d$.

Расчет соединения выполнен с учетом новой редакции раздела расчета болтовых соединений по СП 260.1325800.2016 [11], которые приведены выше по тексту.

Несущая способность соединения с винтами, работающими на растяжение, при отрыве более тонкого элемента через пресс-шайбу при действии ветровых нагрузок определяется по формуле (10.5) [11]:

$$F_{p,Rd} = 0,5 \cdot d_w \cdot t \cdot R_u / \gamma_{m2} = 0,5 \cdot 16 \cdot 0,6 \cdot \frac{330}{1,2} = 1320 \text{ Н} = 1,32 \text{ кН}$$

Значение коэффициента γ_{m2} при отрыве более тонкого элемента через пресс-шайбу в соединении работающем на растяжение по таблице 10.3 [11]: $\gamma_{m2} = 1,2$.

Несущая способность соединения с винтами, работающими на растяжение при вырыве из более толстого листа при $t_{sup} / S \geq 1$ определяется по формуле:

$$F_{vt} = 0,65 \cdot \gamma_c \cdot d \cdot t_{sup} \cdot R_u; \quad (10.7) [11]$$

где $t_{sup} = 2,5$ мм – толщина более толстого из соединяемых элементов;

$S = 1,59$ мм – шаг резьбы винта.

$$t_{sup} / S = 1,57 > 1$$

$$F_{vt} = 0,65 \cdot d \cdot t_{sup} \cdot \frac{R_u}{\gamma_c} = 0,65 \cdot 4,8 \cdot 2,5 \cdot \frac{420}{1,1} = 2978 \text{ Н} = 2,98 \text{ кН}.$$

Значение коэффициента γ_{m2} при вырыве из более толстого листа в соединении работающем на растяжение по таблице 10.3 [11]: $\gamma_{m2} = 1,1$.

Несущая способность винта на разрыв по стандарту производителя, определенная по результатам испытаний равна:

$$F_{t,Rd} = 5,0 \text{ кН} > F_{p,Rd} = 1,32 \text{ кН}$$

следовательно, несущая способность соединения с винтами при воздействии растягивающего усилия T (рис.41) определяется при отрыве более тонкого элемента через пресс-шайбу при действии ветровых нагрузок и составляет:

$$F_{p,Rd} = 1,32 \text{ кН.}$$

Несущая способность соединений на самонарезающих винтах при воздействии срезающего усилия V (рис.41) определяется исходя из следующих условий:

- при срезающем усилии по смятию профилированного листа толщиной $t = 0,6$ мм соединения:

$$F_{bp} = \alpha \cdot R_{bp} \cdot d \cdot t / \gamma_{m2}, \quad (10.3)$$

где α принимается по таблице 10.1 (СП 260.1325800.2016 [1]);

при $t_1/t = 2,5 / 0,6 = 4,17$ и $t_1 > 2,5 t = 2,5 \cdot 0,6 = 1,5$; $t = 0,6 < 1,0$

$$\alpha = 3,2 \sqrt{t/d} = 3,2 \sqrt{0,6/4,8} = 1,13 \text{ т.к. } \alpha < 2,1 \text{ принимаем } \alpha = 1,13$$

Значение коэффициента γ_{m2} для винтовых соединений на самонарезающих винтах, работающими на срез при $0,5 \leq t \leq 0,7$ мм по таблице 10.3 [11]:

$$\gamma_{m2} = 1,6$$

$$F_{bp} = \alpha \cdot R_{bp} \cdot d \cdot t / \gamma_{m2} = 1,13 \cdot 424 \cdot 4,8 \cdot \frac{0,6}{1,6} = 862 \text{ Н} = 0,86 \text{ кН}$$

$R_{bp} = 424$ МПа – расчётное сопротивление смятию соединяемых элементов по таблице 5 СП 16.13330.2017;

Несущая способность соединений на самонарезающих винтах при срезе тела винта:

$$F_{vs} = F_{vsn} / \gamma_{m2} ;$$

где F_{vsn} – прочность на срез винта, устанавливаемая по стандарту производителя.

Значение коэффициента γ_{m2} при срезе самонарезающего винта в соединении работающем на срез по таблице 10.3 [11]: $\gamma_{m2} = 1,25$.

$$F_{vs} = F_{vsn} / \gamma_{m2} = \frac{5560}{1,25} = 4448 \text{ Н} = 4,48 \text{ кН.}$$

$$F_{vs} > 1,2 \cdot F_{bp} = 1,2 \cdot 0,86 = 1,03 \text{ кН.}$$

Требуемые условия по ограничению деформативности соединения соблюдаются при $1,2 \cdot F_{bp} = 1,2 \cdot 0,86 = 1,03$ кН:

Несущая способность соединения с винтами профилированного листа покрытия с прогоном, показанного на рисунке 42 при воздействии срезающего усилия V определяется по смятию профилированного листа и составляет -1,03 кН, при воздействии растягивающего усилия T определяется при отрыве более тонкого элемента через пресс-шайбу при действии ветровых нагрузок и составляет -1,32 кН.

8.2 Расчет соединений на болтах

Изменение № 1 от 2018 г. [11] к СП 260.1325800.2016 [1], в котором изложены в новой редакции пункты, касающиеся расчета болтовых соединений:

«10.1.7 Несущая способность одно болтового соединения следует определять в зависимости от вида напряженного состояния по формулам:

$$\text{- при срезе: } N_{bs} = R_{bs} \cdot A_b \cdot n_s \cdot \gamma_b \cdot \gamma_c; \quad (10.12)$$

$$\text{- при смятии: } N_{bp} = R_{bp} \cdot d_b \cdot \sum t \cdot \gamma_b \cdot \gamma_c; \quad (10.13)$$

$$\text{- при растяжении: } N_{bt} = R_{bt} \cdot A_{bn} \cdot \gamma_c, \quad (10.14)$$

где R_{bs}, R_{bp}, R_{bt} - расчетные сопротивления одно болтовых соединений при срезе, смятии и растяжении в соответствии с таблицами Г.5 и Г.6 СП 16.13330 [14];

A_b, A_{bn} - площадь сечения стержня болта брутто и резьбовой части нетто соответственно;

n_s – число расчетных срезов одного болта;

d_b – наружный диаметр стержня болта;

$\sum t$ – наименьшая суммарная толщина соединяемых элементов, сминаемых в одном направлении;

γ_c – коэффициент условия работы по СП 16.13330;

γ_b – коэффициент условия работы соединения, определяемый по таблице 41 СП 16.13330»

«10.1.7.1 При действии на болтовое соединение силы N , проходящей через центр тяжести соединения, распределение этой силы между болтами следует принимать равномерными. В этом случае количество болтов « n » в соединении следует определять по формуле:

$$n_f \geq N/N_{min},$$

где N_{min} – наименьшее из значений, вычисленных согласно 10.1.7;

10.1.7.2 При действии на болтовое соединение момента, вызывающего сдвиг соединяемых элементов, распределение усилий на болты следует принимать пропорционально расстояниям от центра тяжести соединения до рассматриваемого болта.

Усилие в наиболее нагруженном болте N_{bmax} не должно превышать меньшего из значений N_{bs} и N_{bp} , вычисленных по п. 10.1.7.»

«10.2.1. Таблицу 10.2 Минимальные допустимые расстояния между метизами и от их осей до краев соединяемых элементов В СП 260.1325800.2016 [1] дополнить:

- во второй графе строка « e_1 » дополнить сноской « d_o^{**} »;
- в третьей и четвёртой графах заменить « d_o » на « d »;
- в пятой графе строка « e_1 » « $2,0 d_o$ » заменить на « $2,0 d_o$ (при $t > 2,0$) », « $3,0 d_o$ (при $t \leq 2,0$)».

Добавить сноску « $**d_o$ » – диаметр отверстия под заклёпку или болт».

Процедуры определения несущей способности соединения на болтах показаны на блок-схемах, приведенных на рисунках 45 и 46.

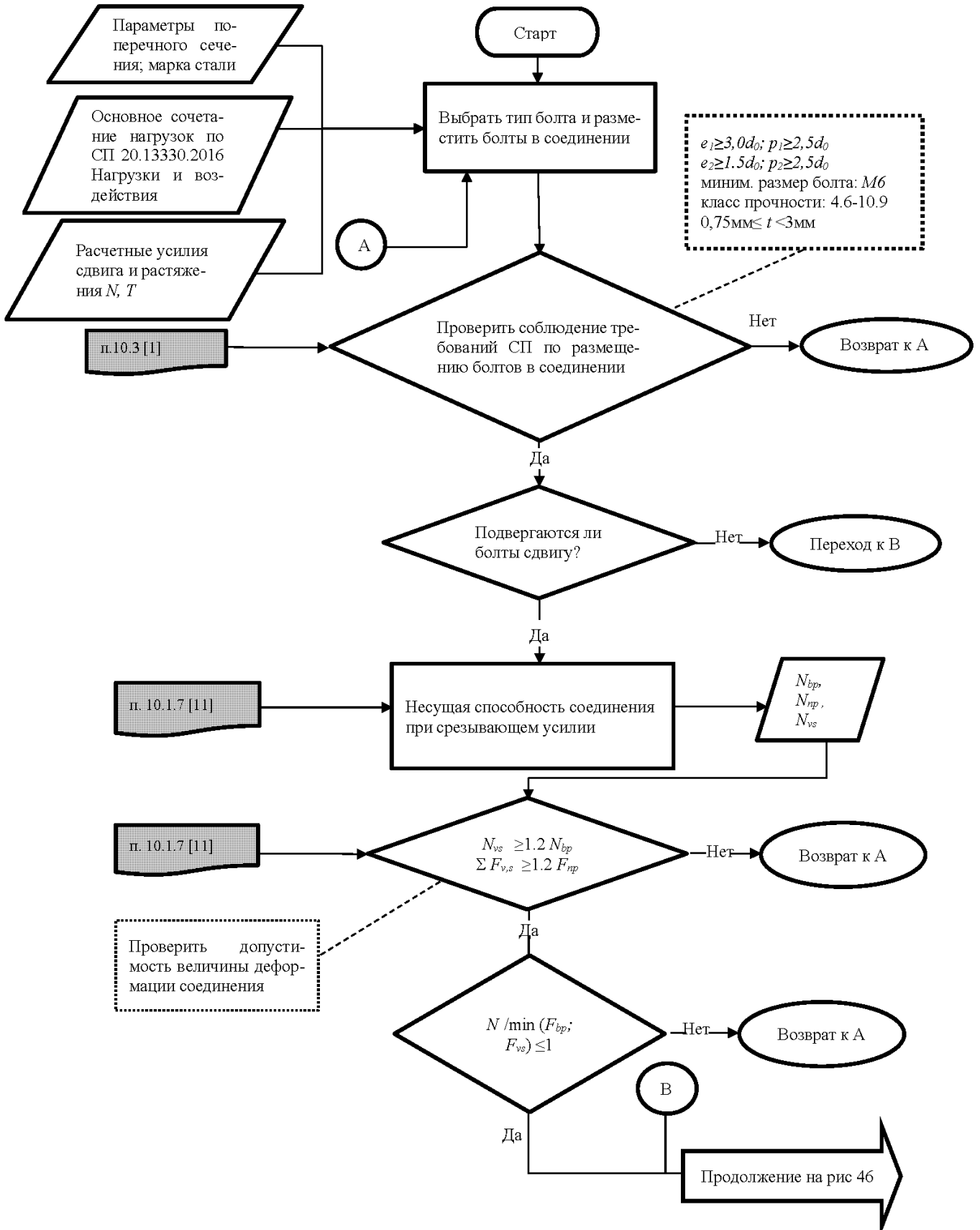


Рис 45. Расчет несущей способности соединения на болтах (продолжение на рис. 46)

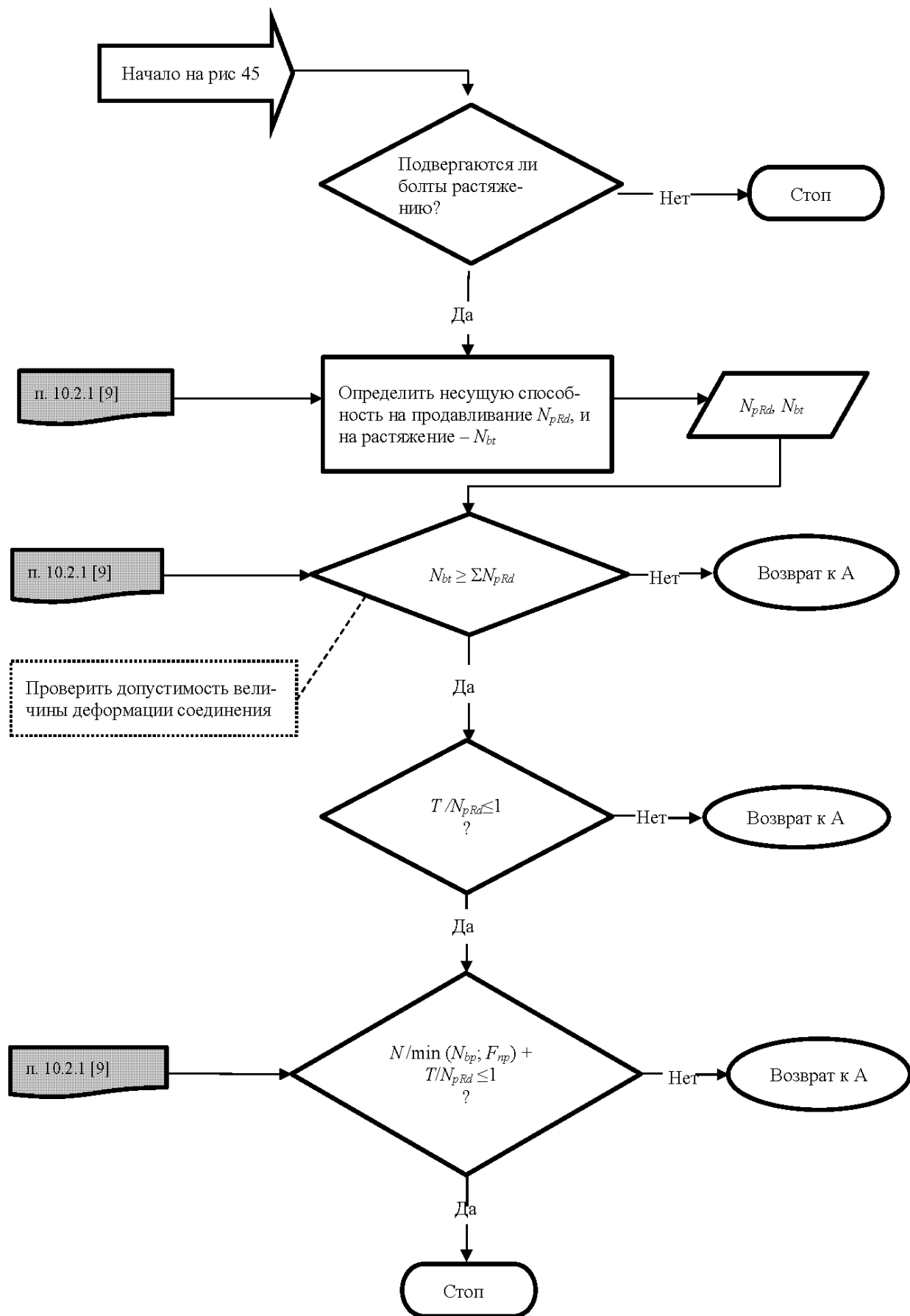


Рис 46. Расчет несущей способности соединения на болтах (начало на рис. 45)

Пример 14

Исходные данные:

Монтажные узлы отправочных элементов рамы каркаса, показанной на рисунке 47, выполнены на болтах. В примере рассматривается расчет болтовых соединений карнизного узла 1 рамы каркаса.

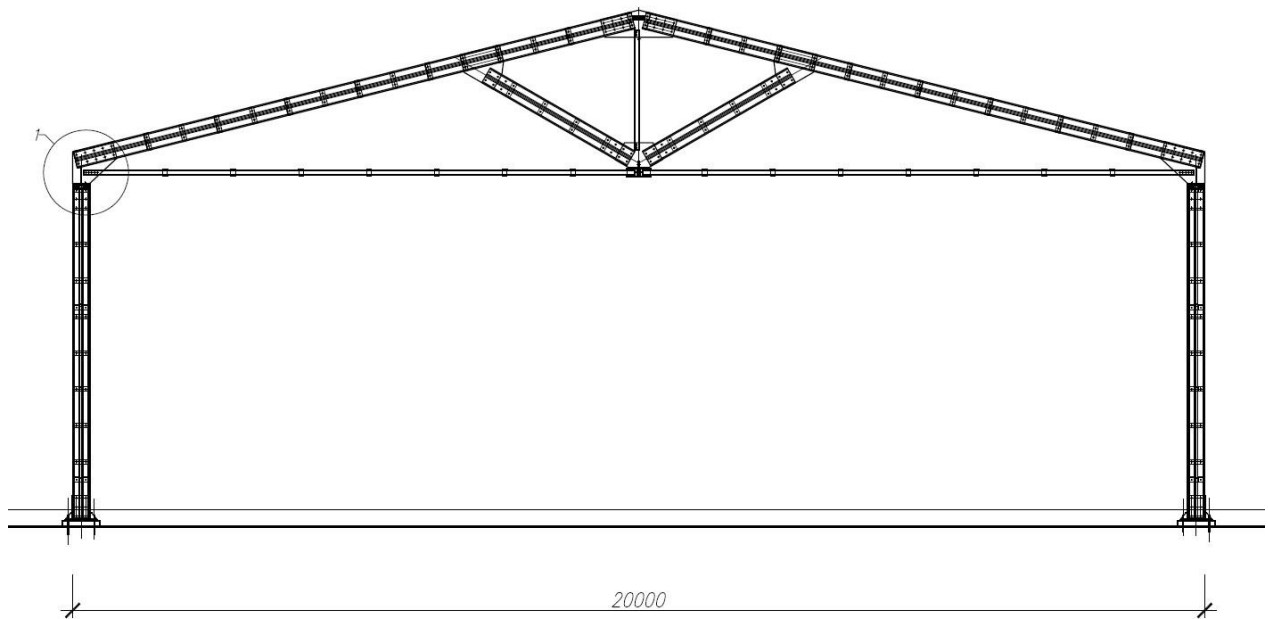


Рис. 47. Конструктивная схема рамы каркаса

Материалы конструкций и соединений

Материал гнутых тонкостенных профилей (ригель: 2 Сигма 300x100x2,5 – 2 профиля толщиной 2,5 мм и колонна: 2 Сигма 300x100x2,0 - 2 профиля толщиной 2,0 мм) - сталь С350 с классом цинкового покрытия 275 по ГОСТ Р 52246 [8].

Материал прокатных уголковых профилей затяжки ригеля (2 уголка 80x80x6) и узловых деталей - сталь С345-3 ГОСТ 27772-2015 [12].

В срезных монтажных болтовых соединениях применены болты нормальной точности М16 класса прочности 5.8 ГОСТ 7798, гайки М16 класса прочности 5 по ГОСТ 5915-70. В соединениях, под все головки болтов и под гайки установлены шайбы по ГОСТ 11371. Во избежание раскручивания предусмотрены контргайки.

Технические требования к болтам, гайкам и шайбам приняты по ГОСТ 1789.0-87, ГОСТ Р 52627-2006, ГОСТ Р 52628-2006, ГОСТ 18123-82.

Состав болтовых соединений:

- для болтов М16: болт, 2 шайбы, гайка, контргайка, шайбы установлены под гайку и головку болта.

Расчет узла 1 рамной системы выполнен с учетом новой редакции раздела расчета болтовых соединений по СП 260.1325800.2016 [11], которые приведены выше по тексту.

Исходные данные по материалам соединений:

$R_{bs} = 210$ МПа – расчетное сопротивление одно болтовых соединений при срезе в соответствии с таблицей Г.5 СП 16.13330 болтов класса прочности 5.8;

$R_{bp} = 565$ МПа – расчетное сопротивление смятию элементов из стали марки С350, соединяемых болтами класса точности «В» в соответствии с таблицей Г.6 СП 16.13330;

$R_{bt} = 561$ МПа – расчетное сопротивление одно болтовых соединений при растяжении в соответствии с таблицей Г.5 СП 16.13330 болтов класса прочности 10.9;

$d_b = 16$ мм – наружный диаметр стержня болта М16;

$d_o = 18$ мм – диаметр отверстия для постановки болта М16;

$A_b = 2,01$ см² – площадь сечения стержня болта брутто болта М16;

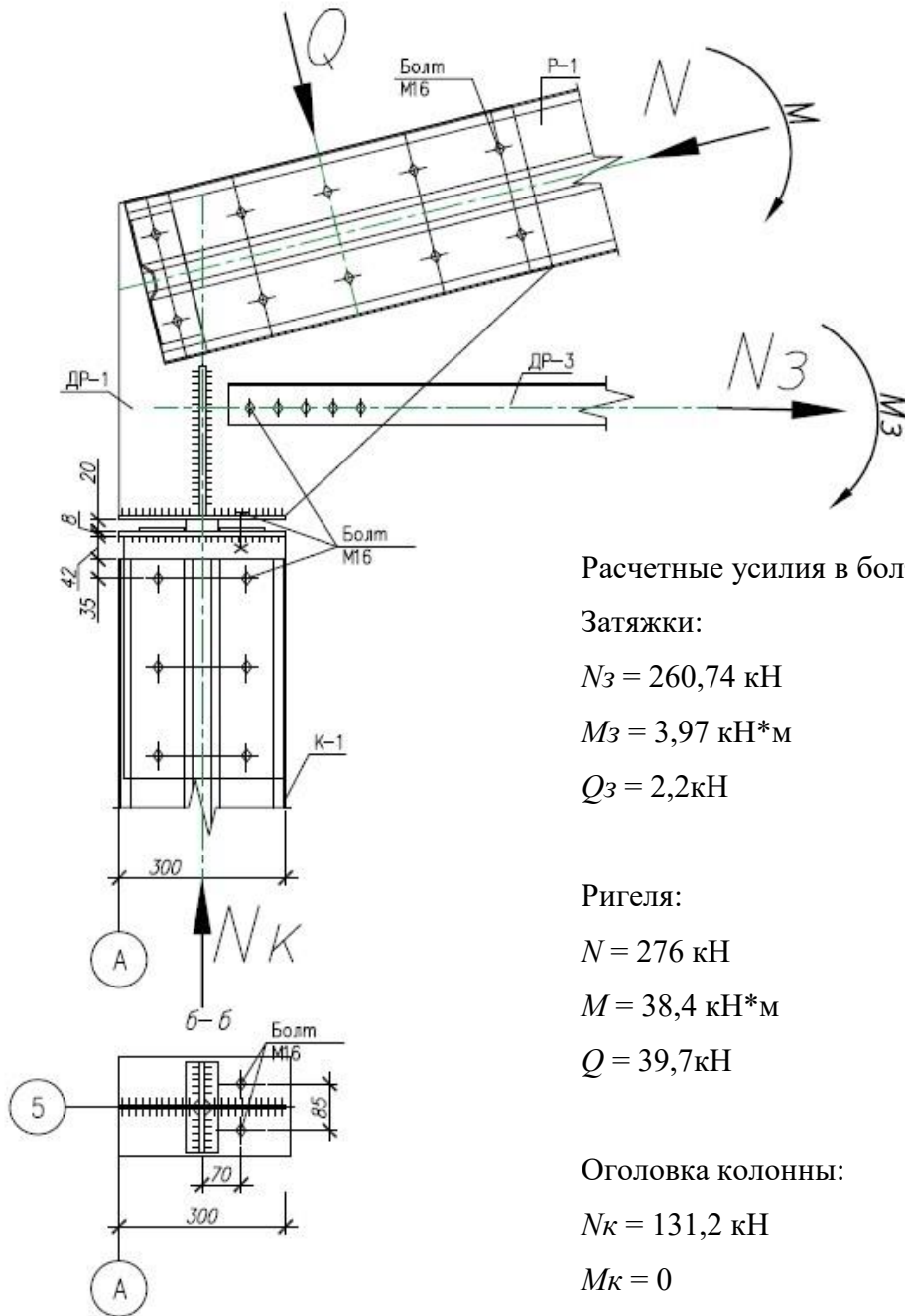
$n_s = 2$ – число расчетных срезов одного болта М16;

$\gamma_c = 1,0$ – коэффициент условия работы по СП 16.13330;

$\gamma_b = 0,9$ – коэффициент условия работы многоболтового соединения при болтах класса точности «В» для расчетов на срез и смятие, определяемый по таблице 41 СП 16.13330;

Пример расчета карнизного узла 1 (см. рис. 45)

Стропильная конструкция выполнена в виде двускатного ригеля с затяжкой и со шпренгельной системой. Опирание стропильной конструкции на колонны выполнено шарнирным. Конструктивное решение узла 1 показано на рисунке 48. Расчетные усилия в элементах рамы.



Расчетные усилия в болтовых соединениях

Затяжки:

$$N_z = 260,74 \text{ кН}$$

$$M_z = 3,97 \text{ кН*м}$$

$$Q_z = 2,2 \text{ кН}$$

Ригеля:

$$N = 276 \text{ кН}$$

$$M = 38,4 \text{ кН*м}$$

$$Q = 39,7 \text{ кН}$$

Оголовка колонны:

$$N_k = 131,2 \text{ кН}$$

$$M_k = 0$$

$$Q_k = 0$$

Рис. 48. Конструктивное решение узла 1 и расчетные усилия в элементах ригеля и затяжки

Детали соединения ригеля и затяжки в узле 1 показаны на рисунке 49.

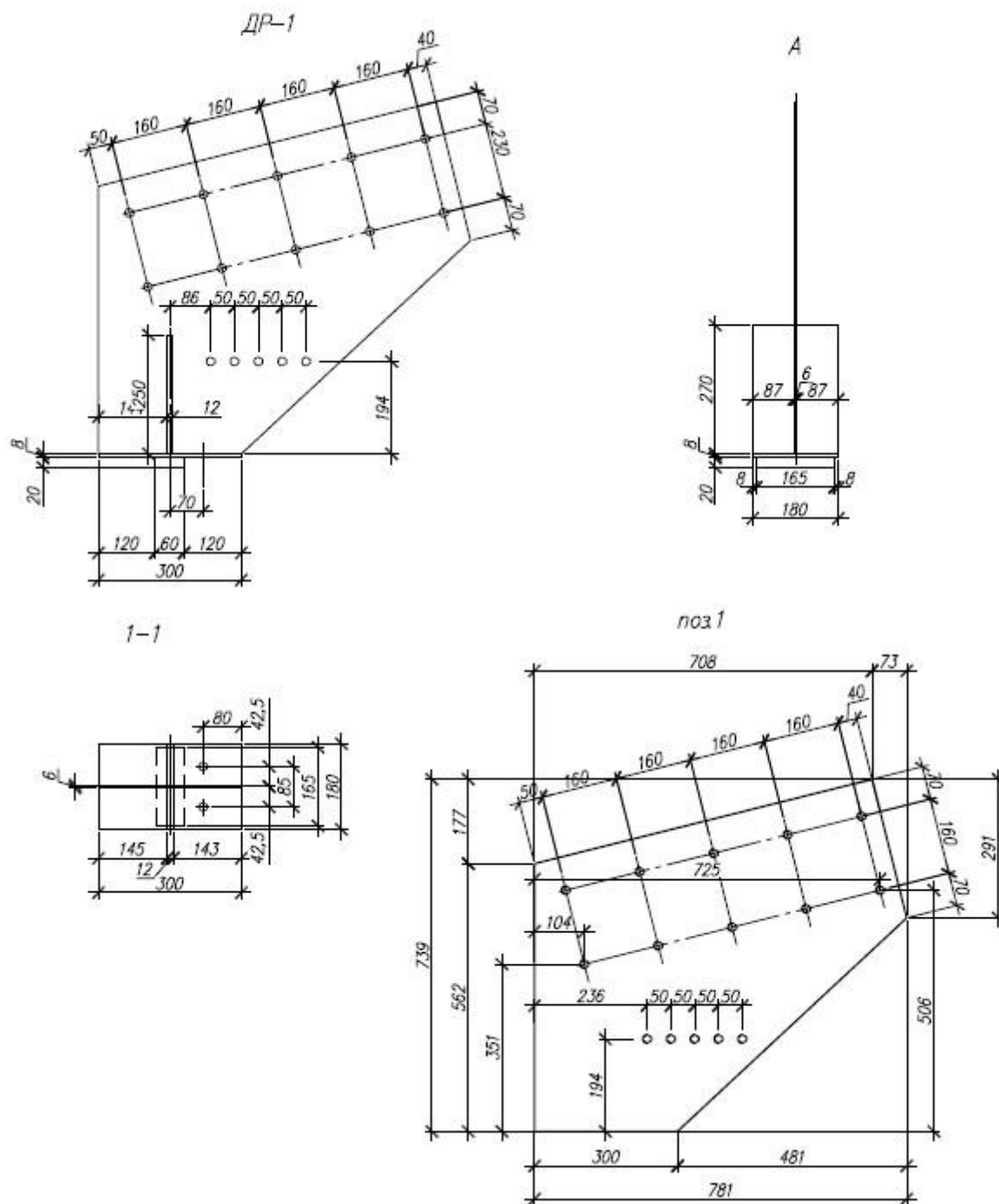


Рис. 49. Схемы расстановки болтов в элементах опорного узла 1 ригеля рамы

В узле 2 в болтовом соединении затяжки силы N_3 и Q_3 , проходят через центр тяжести соединения, распределение этих сил между болтами принято равномерное. Количество болтов « n » в соединении 5 шт.

Максимальное усилие N_I от действия момента M_3 в затяжке возникает в болтах, наиболее удаленных от центра болтового поля в узле соединения затяжки.

$$N_1 \geq \frac{M_3 \cdot h_{max}}{\sum h_i^2} = 0,02 \text{ кН}$$

где h_i^2 – сумма квадратов расстояний между болтами равноудаленными от центра болтового поля.

Расчетное усилие в максимально нагруженном болте N_{max} , который наиболее удалён от центра болтового поля, определяется суммой векторов усилий от N_3 , M_3 и Q_3 .

$$N_{max} = \sqrt{\left(\frac{N_3}{n}\right)^2 + \left(\frac{Q_3}{n} + N_1\right)^2} = 5,22 \text{ кН};$$

Несущая способность одного болта многоболтового соединения определена по п. 10.7 [10]:

$$\text{при срезе болта: } N_{bs} = R_{bs} * A_b * n_s * \gamma_b * \gamma_c = 76,0 \text{ кН};$$

$$\text{при смятии: } N_{bp} = R_{bp} * d_b * \sum t * \gamma_b * \gamma_c = 55,73 \text{ кН};$$

$R_{bp} = 645$ МПа – расчетное сопротивление смятию элементов из стали марки С345, соединяемых болтами класса точности «В» в соответствии с таблицей Г.6 СП 16.13330.

Несущая способность болтового соединения затяжки определяется несущей способностью ослабленного отверстиями сечения затяжки так как коэффициент использования по прочности ослабленного сечения составляет 0,96 (п.7.1.4 [23]).

$$\sigma = \frac{N}{A_n} + \frac{M}{W_x} = 359,6 < R_y * \gamma_c = 374 \text{ Мра}$$

Таблица 8 – Коэффициент использования

Проверено по СП	Проверка	Коэффициент использования
п.10.1.7 [11]	смятие пластины узловой фасонки	0,09
п.10.1.7 [11]	срез болтов	0,07
п.7.1.4 [23]	прочность ослабленного сечения	0,96

В болтовом соединении ригеля в узле 1 силы N и Q , проходят через центр тяжести соединения (рис. 50), распределение этих сил между болтами принято равномерное. Количество болтов « n » в соединении 10 шт.

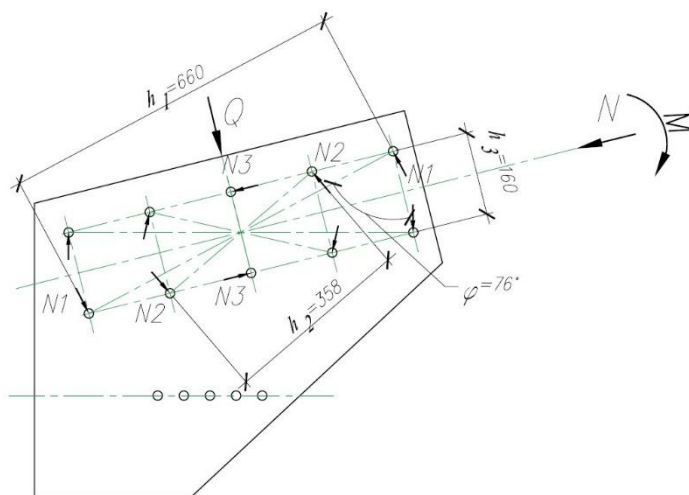


Рис. 50. Расчетная схема соединения на болтах ригеля в опорном узле 1

Максимальное усилие N_1 от действия момента M в ригеле возникает в болтах, наиболее удаленных от центра болтового поля в узле соединения затяжки (рис. 48).

$$N_1 \geq \frac{M \cdot h_{max}}{\sum h_i^2} = 21,04 \text{ кН}$$

где h_i^2 – сумма квадратов расстояний между болтами равноудаленными от центра болтового поля.

Расчетное усилие в максимально нагруженном болте N_{max} , который наиболее удалён от центра болтового поля, определяется суммой векторов усилий от N , M и Q .

$$N_{max} = \sqrt{\left(\frac{N}{n} + N_1 \cdot \cos \varphi\right)^2 + \left(\frac{Q}{n} + N_1 \cdot \cos(90 - \varphi)\right)^2} = 40,78 \text{ кН};$$

Несущую способность одного болта много болтового соединения определяем по п. 10.7 [10]:

$$\text{при срезе болта: } N_{bs} = R_{bs} * A_b * n_s * \gamma_b * \gamma_c = 76,0 \text{ кН};$$

$$\text{при смятии: } N_{bp} = R_{bp} * d_b * \sum t * \gamma_b * \gamma_c = 40,68 \text{ кН};$$

Несущая способность болтового соединения ригеля определяется наименьшим из значений N_{bs} и N_{bp} :

$$N_{min} = 40,68 \text{ кН}$$

где N_{min} – наименьшее из значений, вычисленных согласно 10.1.7 [11].

Так как

$$N_{max} = 40,78 \text{ кН} \approx N_{min} = 40,68 \text{ кН}$$

Несущая способность болтового соединения ригеля обеспечена.

Таблица 9 – Коэффициент использования

Проверено по СП [11]	Проверка	Коэффициент использования
п.10.1.7	смятие стенки гнутого профиля	1,00
п.10.1.7	срез болтов	0,54

Коэффициент использования 1,00 - смятие стенки гнутого профиля.

Детали оголовка колонны в узле 1 и расчетные усилия в оголовке колонны показаны на рис 51.

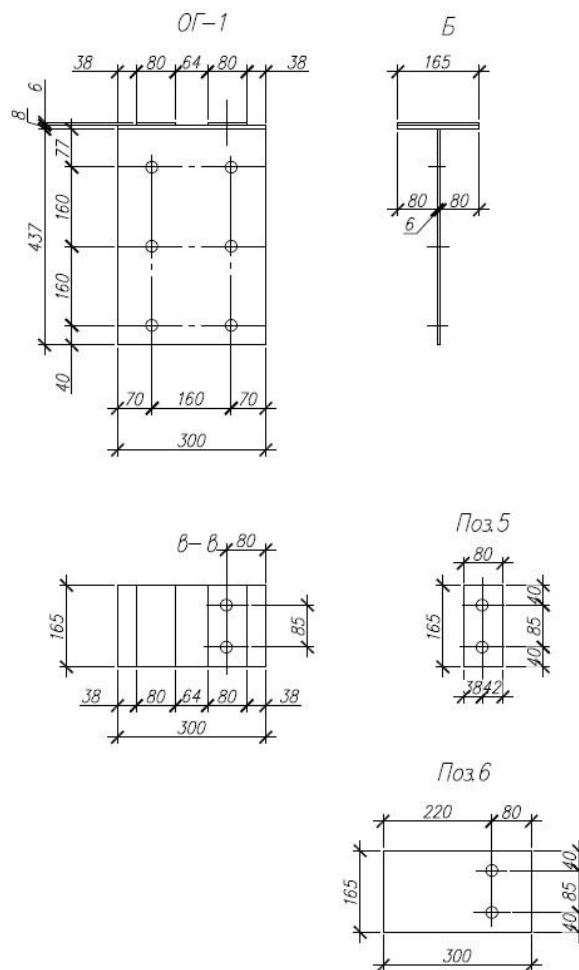


Рис. 51. Схемы расстановки болтов в элементах оголовка колонны и расчетные усилия в оголовке колонны

В болтовом соединении оголовка колонны сила N , проходит через центр тяжести соединения, распределение этой силы между болтами принято равномерное. В этом случае требуемое количество болтов « n » в соединении определено по формуле:

$$n_f \geq N/N_{min},$$

где N_{min} – наименьшее из значений, вычисленных согласно 10.1.7 [10].

Несущую способность одного болта много болтового соединения определяем по п. 10.7 [10]:

при срезе болта: $N_{bs} = R_{bs} * A_b * n_s * \gamma_b * \gamma_c = 76,0$ кН;

при смятии: $N_{bp} = R_{bp} * d_b * \sum t * \gamma_b * \gamma_c = 32,5$ кН ;

минимальная несущая способность $N_{min} = N_{bp} = 32.5$ кН;

требуемое количество болтов:

$$n_f \geq \frac{N}{N_{min}} = 4$$

По проекту число болтов: $n = 6$. Несущая способность болтового соединения оголовка колонны обеспечена.

Т а б л и ц а 1 0 – Коэффициент использования

Проверено по СП	Проверка	Коэффициент использования
п.10.1.7	смятие стенки гнутого профиля	0,67
п.10.1.7	срез болтов	0,29

Коэффициент использования 0,67 - смятие стенки гнутого профиля

Библиография

1. СП 260.1325800.2016 Конструкции стального каркаса из тонкостенных холодногнутых профилей для малоэтажных зданий различного назначения. Проектирование
2. Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-3: General rules – Supplementary rules for cold-formed members and sheeting
3. Eurocode 3: Design of steel structures – Part 1-5: Plated structural elements
4. Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1-1: General rules and rules for buildings.
5. North American Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members (AISI), 2016
6. ГОСТ Р 58384-2019 Профили стальные гнутые из холоднокатаной стали для строительства. Сортамент
7. ГОСТ Р 58385-2019 Профили стальные гнутые из холоднокатаной стали для строительства. Технические условия
8. ГОСТ Р 52246-2016 «Прокат листовой горячеоцинкованный. Технические условия».
9. Смирнов М. О. Совершенствование методики определения редуцированных сечений стержней из холодногнутого профиля при однопараметрическом нагружении // Вестник гражданских инженеров. 2020. № 2 (79). С. 60–67.
10. Бычков Д.В. Строительная механика стержневых тонкостенных конструкций. М., 1962
11. Разработка изменений в СП 260.1325800.2016 «Конструкции стальные тонкостенные из холодногнутого оцинкованного и гофрированного листов. Правила проектирования». Научно-технический отчет. Шифр 11-3643 - ЦНИИПСК им. Мельникова, М., 2018 [[https://steel-development.ru/normativno-tekhnicheskiy-tsentr/proekty/СП%20260/ОТЧЕТ%20ДЛЯ%20АРСС.%20\(1\)4%20ЭТАП%20\(3%20АКЛЮЧИТЕЛЬНЫЙ\)%2027.12.18.pdf](https://steel-development.ru/normativno-tekhnicheskiy-tsentr/proekty/СП%20260/ОТЧЕТ%20ДЛЯ%20АРСС.%20(1)4%20ЭТАП%20(3%20АКЛЮЧИТЕЛЬНЫЙ)%2027.12.18.pdf)]
12. ГОСТ 27772-2015. Прокат для строительных стальных конструкций. Общие технические условия
13. СТО 0065-2014. Винты самонарезающие и самосверлящие "HARPOON" для крепления стеновых и кровельных конструкций из стального оцинкованного холоднокатаного листа. Проектирование, изготовление, монтаж. М., 2014
14. СП 16.13330.2017 "Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81*" (с Поправкой, с Изменением N 1)

15. ГОСТ 27751-2014 Надежность строительных конструкций и оснований. Основные положения. / Стандартинформ. – М.: 2015г.
16. СП 20.13330.2016. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85* - М., 2016.
17. ТУ 1120-011-54108389-2014 Профили стальные гнутые несущих и ограждающих конструкций зданий и сооружений. – Тюмень, 2014.
18. СП 14.13330.2014 Строительство в сейсмических районах. Актуализированная редакция СНиП II-7-81*.
19. СП 131.13330.2018 Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99*.
20. Разработка изменений в СП 260.1325800.2016 «Конструкции стальные тонкостенные из холодногнутой оцинкованной и гофрированной листов. Правила проектирования».(Выпуск 03-8586 от 29.10.2019) - ЦНИИПСК им. Мельникова, М., 2019
21. ТУ 1122-001-18201124-2009. Профиль и термопрофиль из тонколистовой оцинкованной стали для строительных конструкций. – М.: 2009г.
22. ГОСТ 14918-80. Сталь тонколистовая оцинкованная с непрерывных линий. Технические условия
23. СП 294.1325800.2017. Свод правил. Конструкции стальные. Правила проектирования.

Приложения

П.1. Определение геометрических характеристик эффективного сечения центрально сжатого несимметричного профиля с учетом потери местной устойчивости

Вычисление характеристик эффективного сечения центрально сжатого профиля с учетом с потери местной устойчивости плоских участков С-образного сечения показано в Примере П1. Однако для такого сечения необходимо также учитывать потерю устойчивости при изменении начальной формы сечения профиля в пределах упругой работы, которая рассматривается в Примере П2.

Пример П1. Расчет характеристик сечения с учетом местной устойчивости пластин:

Требуется найти эффективную площадь и горизонтальное смещение нейтральной оси в связи с эффектом потери местной устойчивости для гнутого профиля С-образного сечения 200 х 45х41 х 2,0, изготовленного из оцинкованной стали с номинальным пределом текучести 350 Н/мм² и модулем Юнга 210000 Н/мм² при осевом сжатии. Цинковое покрытие составляет 0,04 мм при толщине профиля 2,0 мм, и не учитывается в расчете.

Геометрические характеристики сечения

Геометрические размеры сечения представлены на Рис. П1.1.

$h = 200$ мм
 $b_1 = 45$ мм
 $b_2 = 41$ мм
 $c_1 = 15$ мм
 $c_2 = 15$ мм
 $t = 2.0$ мм
 $r = 5$ мм
 $t_{m.p} = 0,04$ мм

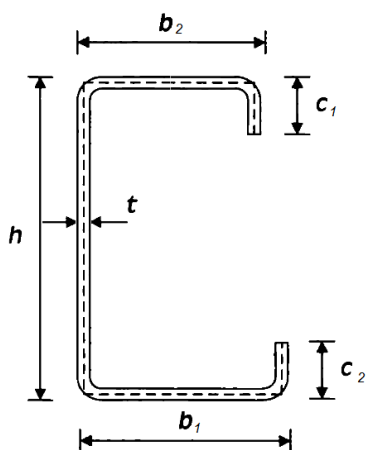


Рис. П.1.1. Геометрические размеры сечения С-образного гнутого профиля 200 х 45 х 2.0 мм

$$f_u = 448 \text{ Н/мм}^2; f_{yb} = 448 \text{ Н/мм}^2$$

$$R_y = 333 \text{ Н/мм}^2$$

$$\nu = 0,3$$

Размеры полного сечения для средней линии

$$h_p = h_1 - t_1 = 198 \text{ мм}$$

$$\varphi_1 = \frac{(\pi - \alpha_1)}{2} = -43,44 \quad \varphi_2 = \frac{(\pi - \alpha_2)}{2} = -43,44$$

$$\Delta_1 = \tan(\varphi_1) \frac{t_1}{2} = 0,605 \text{ мм}$$

$$\Delta_2 = \tan(\varphi_2) \frac{t_1}{2} = 0,605 \text{ мм}$$

$$b_{11} = b_1 - \frac{t_1}{2} - \Delta_1 = 43,4 \text{ мм} \quad b_{22} = b_2 - \frac{t_1}{2} - \Delta_2 = 39,4 \text{ мм}$$

$$c_{11} = c_1 - \Delta_1 = 14,395 \text{ мм}$$

$$c_{22} = c_2 - \Delta_2 = 14,395 \text{ мм}$$

$$b_{32} = b_{22} - g_{21} - g_{21} = 35,89 \text{ мм}$$

$$b_{31} = b_{11} - g_{11} - g_{12} = 41,12 \text{ мм}$$

$$c_{21} = c_1 - g_{12} = 14,48 \text{ мм}$$

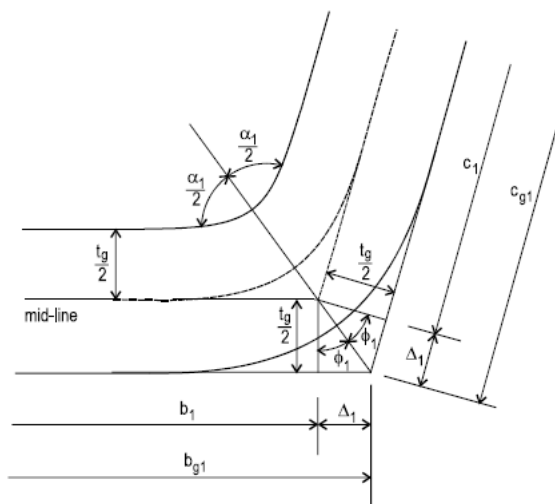
$$c_{22} = c_2 - g_{12} = 14,48 \text{ мм}$$

$$g_{11} = \left(r + \frac{t}{2}\right) \left(\tan\left(\frac{\pi}{4}\right) - \sin\left(\frac{\pi}{4}\right)\right) = 1,752 \text{ мм}$$

$$g_{12} = \left(r + \frac{t}{2}\right) (\tan(\varphi_1) - \sin(\varphi_1)) = 0,523 \text{ мм}$$

$$g_{21} = \left(r + \frac{t}{2}\right) \left(\tan\left(\frac{\pi}{4}\right) - \sin\left(\frac{\pi}{4}\right)\right) = 1,752 \text{ мм}$$

$$g_{22} = \left(r + \frac{t}{2}\right) (\tan(\varphi_1) - \sin(\varphi_1)) = 0,523 \text{ мм}$$



Размеры полного сечения

Размеры полного сечения показаны на рис. П.1.2.

Расчет геометрических характеристик полного сечения

Полная площадь:

$$A_g = h_{11}(t - t_{m.p}) + b_{32}(t - t_{m.p}) + b_{32}(t - t_{m.p}) + 2c_{21}(t - t_{m.p}) = 566,85 \text{ мм}^2$$

Положение нейтральной оси Z относительно средней линии стенки для полного сечения:

$$y_g = \frac{\left[\left[(b_{31} - t)(t) * \left[\frac{(b_{31} - t)}{2} \right] \right] + (b_{32} - t)(t) * \left[\frac{(b_{32} - t)}{2} \right] + \left(c_{21} - \frac{t}{2} \right) (t) * \left[\frac{(b_{31} - t)}{2} \right] + \left(c_{21} - \frac{t}{2} \right) (t) * \left[\frac{(b_{32} - t)}{2} \right] \right]}{A_g} = 8,053 \text{ мм}$$

Момент инерции полного сечения:

$$I_g = \frac{(h - t)^3 * (t - t_{m.p})}{12} + 2 * \left(\frac{(t - t_{m.p})^3 * (b - t)}{12} \right) + (b - t) * (t - t_{m.p}) * \left[\frac{((h - t))}{2} \right]^2 + 2 \left[\frac{(c - t/2)^3 (t - t_{m.p})}{12} \right] * \left[\frac{((h - t))}{2} \right]^2 + (t - t_{m.p}) * (c - \frac{t}{2}) \left[\frac{((h - t))}{2} \right]^2 + (c - \frac{t}{2})^2 + \left[\frac{(c - t/2)}{2} \right]^2 = 3169598 \text{ мм}^4$$

Момент сопротивления полного сечения:

$$W_x = I_g * \left(\frac{h_{11} - t}{2} \right)^{-1} = 3,292 * 10^4 \text{ мм}^3$$

$$\begin{aligned}
 h - t &= 197,5 \text{ мм} \\
 b_1 - t &= 43 \text{ мм} \\
 b_2 - t &= 39 \text{ мм} \\
 c - t/2 &= 14 \text{ мм} \\
 t - t_{m,p} &= 1,96 \text{ мм}
 \end{aligned}$$

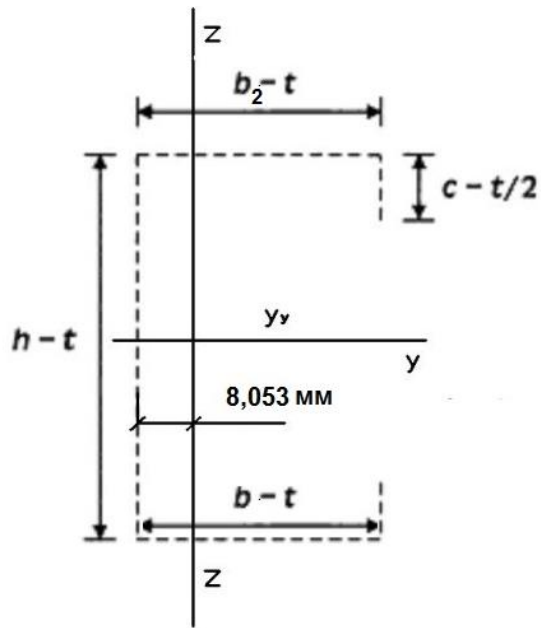


Рис. П.1.2. Геометрические размеры полного сечения С-образного гнутого профиля 200 х 45 х 2,0 мм

Определение эффективной ширины пластин в связи с эффектом потери устойчивости

Стенка профиля:

$$\begin{aligned}
 \sigma_{c,max} &= \frac{f_{yb}}{\gamma_M} \\
 \sigma_{t,max} &= -\sigma_{c,max}
 \end{aligned}$$

Напряжение в средней линии сжатого участка:

$$\sigma_{w1} = \sigma_{t,max} + (\sigma_{c,max} - \sigma_{t,max}) * \left(\frac{0.5t + g_{11}}{h_p + t} \right) = -3,404 * 10^8 \text{ Па}$$

$$\sigma_{w2} = \sigma_{t,max} + (\sigma_{c,max} - \sigma_{t,max}) * \left(\frac{h_p + 0.5t - g_{21}}{h_p + t} \right) = 3,404 * 10^8 \text{ Па}$$

При $\frac{\sigma_{w1}}{\sigma_{w2}} = -1$; $\varphi = -1$; $k_{\sigma h} = 23,9$

Коэффициент потери устойчивости, зависящий от граничных условий и характера напряжений в пластине $k_{\sigma} = 23,9$ для внутреннего элемента при осевом сжатии при $\psi = -1$ (СП 260.1325800.2016, Табл. 7.2)

Поправочный коэффициент, зависящий от R_y

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{R_y}} = 0,819$$

Условная гибкость пластины:

$$\lambda_p = \frac{h_{11}}{t} \sqrt{\frac{12 * (1 - \nu^3) R_y}{\pi^2 * E * k_{\sigma h}}} = 0,85$$

При $\lambda_p \geq 0,673$

Редукционный коэффициент и эффективная ширина пластины:

$$\lambda_{p,red} = h_{pw} \sqrt{\frac{\sigma_{w2} * \gamma}{R_y}} = 0,86$$

$$h_{red} = \frac{h_{11}}{(1 - \frac{\sigma_{w1}}{\sigma_{w2}})} = 97,248 \text{ мм}$$

$$\rho = \frac{(\lambda_{p,red} - 0.055 * (3 + \psi))}{\lambda_{p,red}^2} + 0.18 \left(\frac{\lambda_{pw} - \lambda_{p,red}}{\lambda_{pw} - 0.6} \right) = 1,008$$

Эффективные и неэффективные участки:

$$h_{ef} = h_{11} - h_{red} = 97,248 \text{ мм}$$

$$h_{ef1} = \rho * h_{red} - h_{ef,c} = 58,349 \text{ мм}$$

$$h_{ef,c} = 0,4 * \rho * h_{red} = 38,899 \text{ мм}$$

$$h_{ei} = h_{red} - h_{ef,c} - h_{ef1} = 0 \text{ мм}$$

$$\lambda_e = 0.5 + \sqrt{0,25 - 0,055 * (3 + \frac{\sigma_{w1}}{\sigma_{w2}})} = 0,874$$

$$\lambda_e = \frac{\lambda_{pw}}{\lambda_e} = 0,973$$

Полки профиля: расчет эффективной ширины полки, прилегающей к стенке

Коэффициент потери устойчивости $k_{\sigma} = 4,0$ для внутреннего элемента при осевом сжатии при $\psi = 1$ (СП 260.1325800.2016, Табл. 7.2)

Рассматривается полка 45 мм

Поправочный коэффициент, зависящий от R_y :

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{R_y}} = 0,819$$

Условная гибкость пластины:

$$\lambda_p = \frac{b_{31}}{t} \sqrt{\frac{12 * (1 - \nu^2) * R_y}{\pi^2 * E * k_{\sigma 2}}} = 0,439$$

Редукционный коэффициент:

При $\lambda_p \leq 0,673$ $\rho = 1$

$$\lambda_{pr2} = \lambda_p \sqrt{\frac{\sigma_{fl} * \gamma}{R_y}} = 0,448$$

Эффективная ширина пластины:

$$b_{ef2} = \rho \frac{[(b_{31} - t)]}{2} = 19,58 \text{ мм}$$

$$\lambda_{e2} = 0,5 + \sqrt{0,25 - 0,055 * (3 + \frac{\sigma_{w1}}{\sigma_{w2}})} = 0,874$$

$$\lambda_{e1} = \frac{\lambda_p}{\lambda_{e2}} = 0,503$$

Рассматривается полка 41 мм:

$$\lambda_p = \frac{b_{32}}{t} \sqrt{\frac{12 * (1 - \nu^2) * R_y}{\pi^2 * E * k_{\sigma 2}}} = 0,384$$

Редукционный коэффициент:

При $\lambda_p \leq 0,673$ $\rho = 1$

$$\lambda_{pr3} = \lambda_{p3} \sqrt{\frac{\sigma_{fl} * \gamma}{R_y}} = 0,391$$

Эффективная ширина пластины:

$$b_{ef3} = \rho \frac{[(b_{32} - t)]}{2} = 16,966 \text{ мм}$$

$$\lambda_{e3} = 0,5 + \sqrt{0,25 - 0,055 * (3 + \frac{\sigma_{w1}}{\sigma_{w2}})} = 0,874$$

$$\lambda_{e4} = \frac{\lambda_{p3}}{\lambda_{e3}} = 0,439$$

Полки профиля: расчет эффективной ширины полки, прилегающей к отгибу

Коэффициент потери устойчивости $k_\sigma = 4,0$ для внутреннего элемента при осевом сжатии при $\psi = 1$ (СП 260.1325800.2016, Табл. 7.2)

Рассматривается полка 45 мм

Поправочный коэффициент, зависящий от R_y :

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{R_y}} = 0,819$$

Условная гибкость пластины:

$$\lambda_{p1} = \frac{b_{31}}{t} \sqrt{\frac{12 * (1 - \nu^2) * R_y}{\pi^2 * E * k_{\sigma 2}}} = 0,439$$

Редукционный коэффициент:

При $\lambda_p \leq 0,673$ $\rho = 1$

Эффективная ширина пластины:

$$b_{ef2} = \frac{[\rho(b_{31} - t)]}{2} = 19,58 \text{ мм}$$

$$b_{ei} = b_1 - b_{ef2} - b_{ef12} = 5,84 \text{ мм}$$

$$\lambda_{e1} = 0.5 + \sqrt{0,25 - 0,055 * (3 + \frac{\sigma_{w1}}{\sigma_{w2}})} = 0,874$$

$$\lambda_{e1} = \frac{\lambda_{p2}}{\lambda_{e2}} = 0,503$$

Рассматривается полка 41 мм:

$$\lambda_p = \frac{b_{31}}{t} \sqrt{\frac{12 * (1 - \nu^2) * R_y}{\pi^2 * E * k_{\sigma 2}}} = 0,384$$

Редукционный коэффициент:

$$\text{При } \lambda_p \leq 0,673 \quad \rho = 1$$

Эффективная ширина пластины:

$$b_{ef} = \rho \frac{[(b_{32} - t)]}{2} = 16,966 \text{ мм}$$

$$b_{ei3} = b_2 - b_{ef3} - b_{ef} = 7,068 \text{ мм}$$

$$\lambda_{e1} = 0.5 + \sqrt{0,25 - 0,055 * (3 + \frac{\sigma_{w1}}{\sigma_{w2}})} = 0,874$$

$$\lambda_{re3} = \frac{\lambda_{p3}}{\lambda_{e3}} = 0,439$$

Отгиб c_1 :

Коэффициент потери устойчивости $k_{\sigma} = 0,5$ для выступающего элемента при осевом сжатии при (СП 260.1325800.2016, Табл. 7.3)

$$k_{\sigma} = \left[\frac{c_{21}}{b_{31}} \right] * \sin(90) = 0,315 \quad k_{\sigma 4} \leq 0,35$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{R_y}} = 0,819$$

$$\lambda_{p2} = \frac{c_{21}}{t} \sqrt{\frac{12 * (1 - \nu^2) * R_y}{\pi^2 * E * k_\sigma}} = 0,449$$

$$\sigma_{dist} = \frac{R_y}{\gamma} = 3,33 * 10^8 \text{ Па}$$

$$\lambda_{pr4} = \lambda_{p4} \sqrt{\frac{\sigma_{dist} * \gamma}{R_y}} = 0,46$$

$$\lambda_{pr4} < 0,748 \quad \rho = 1$$

Эффективная ширина пластины и неэффективный участок:

$$c_{eff} = \rho(c_{21} - t/2) = 13,497 \text{ мм}$$

$$c_{i1} = c_{21} - c_{eff} = 0,98 \text{ мм}$$

$$\lambda_{e1} = 0,5 + \sqrt{0,25 - 0,055 * \left(3 + \frac{\sigma_{w1}}{\sigma_{w2}}\right)} = 0,874$$

$$\lambda_{rt1} = \frac{\lambda_{p4}}{\lambda_{e2}} = 0,513$$

Отгиб c_2 :

Коэффициент потери устойчивости $k_\sigma = 0,54$ для выступающего элемента при осевом сжатии при (СП 260.1325800.2016, Табл. 7.3)

Для отгибов (концевой элемент жесткости в виде краевого отгиба) коэффициент устойчивости k_σ определяется по формулам:

$$k_\sigma = 0,5 \text{ для } b_{p.c}/b_p \leq 0,35$$

$$k_\sigma = 0,5 + 0,83 * \sqrt[3]{\left(\frac{b_{p.c}}{b_p} - 0,35\right)^2} \text{ для } 0,35 \leq \frac{b_{p.c}}{b_p} \leq 0,60$$

$$\frac{b_{p.c}}{b_p} = 0,203 \leq 0,35 \quad k_\sigma = 0,5$$

$$k_{\sigma5} = \left[\frac{c_2}{b_{32}}\right] * \sin(90) = 0,361 \quad k_{\sigma4} \geq 0,35$$

$$k_{\sigma 5} = 0,5 + 0,83 * \sqrt[3]{\left(\frac{c_2}{b_{32}} \sin(90) - 0,35\right)^2} = 0,54$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{R_y}} = 0,819$$

$$\lambda_{p5} = \frac{c_{22}}{t} \sqrt{\frac{12 * (1 - \nu^2) * R_y}{\pi^2 * E * k_{\sigma 5}}} = 0,421$$

$$\lambda_{pr5} = \lambda_{p5} \sqrt{\frac{\sigma_{dist} * \gamma}{R_y}} = 0,432$$

$$\lambda_{pr5} < 0,748 \quad \rho = 1$$

Эффективная ширина пластины отгиба и неэффективный участок:

$$c_{ef} = \rho(c_2 - t/2) = 13,497 \text{ мм}$$

$$c_{i2} = c_2 - c_{ef} = 0,98 \text{ мм}$$

$$\lambda_e = 0,5 + \sqrt{0,25 - 0,055 * \left(3 + \frac{\sigma_{w1}}{\sigma_{w2}}\right)} = 0,874$$

$$\lambda_{r2} = \frac{\lambda_{p5}}{\lambda_e} = 0,482$$

Полное и расчетное сечения

Полное и эффективное сечения показаны на Рис. П.1.3.

Характеристики эффективного сечения

Эффективная площадь:

$$\begin{aligned} A_g &= h_{ef} * t + h_{ef1} * t + b_{ef2} * t + b_{ef3} * t + b_{ef12} * t + b_{ef13} * t + c_{eff} * t + c_{ef} * t \\ &= 577,38 \text{ мм}^2 \end{aligned}$$

Положение нейтральной оси Z относительно средней линии стенки для эффективного сечения:

$$y_{eff} = \frac{\left[\left[(b_{ef12})(t - t_{m,p}) * \left[b_{31} - t \right] - \frac{b_{ef12}}{2} \right] + (b_{ef13})(t - t_{m,p}) * \left[b_{32} - t - \frac{b_{ef13}}{2} \right] + b_{ef2}(t - t_{m,p}) * \left[(b_{31} - t) - \frac{(b_{ef2})}{2} \right] \right] + b_{ef3}(t - t_{m,p}) * \left[(b_{32} - t) - \frac{(b_{ef3})}{2} \right] + c_{ef}(t) * (b_{31} - t) + c_{ef}(t) * (b_{32} - t) \right]}{A_g}$$

= 10,184 мм

Смещение нейтральной оси Z из положения для полного сечения до положения для эффективного сечения:

$$e_{Ny} = y_{eff} - y_g = 2,132 \text{ мм}$$

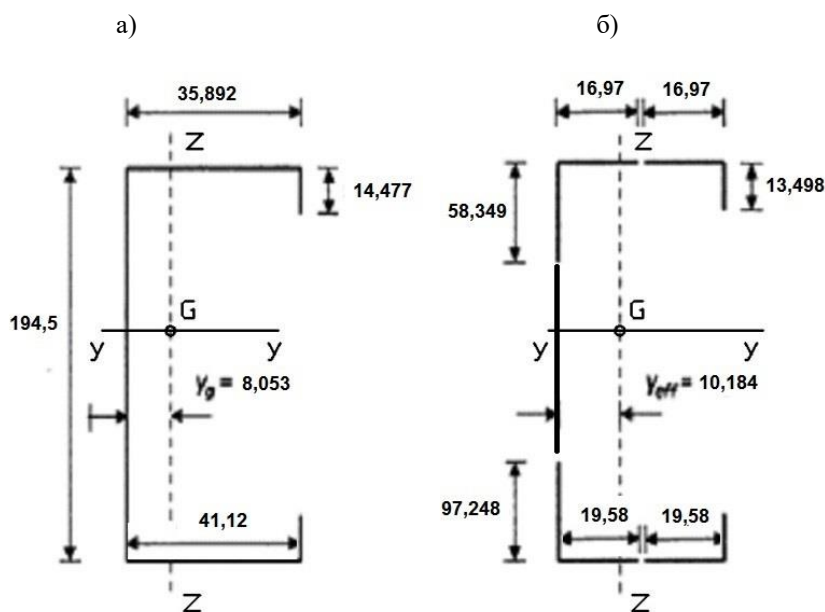


Рис. П.1.3. Сечение С-образного гнутого профиля 200 х 45 х 2,5 мм:
а) идеализированное сечение; б) эффективное сечение (размеры в мм)

П.2. Определение геометрических характеристик эффективного сечения центрально-сжатого несимметричного профиля с учетом потери устойчивости и изменением начальной формы сечения профиля

Предпосылки

Потеря устойчивости, сопровождающаяся изменением начальной формы се-

чения профиля в пределах упругой работы, происходит в тех случаях, когда концевые или внутренние элементы жесткости не в состоянии препятствовать локальному смещению узловых точек (либо на стыке полки с отгибом, либо в месте расположения промежуточных элементов жесткости).

Местная потеря устойчивости продольно сжатых полок, стенки профиля и изменения начальной формы сечения профиля в пределах упругой работы для профилей с концевыми и промежуточными элементами жесткости показаны на Рис. П.2.1 и П.2.2 соответственно.

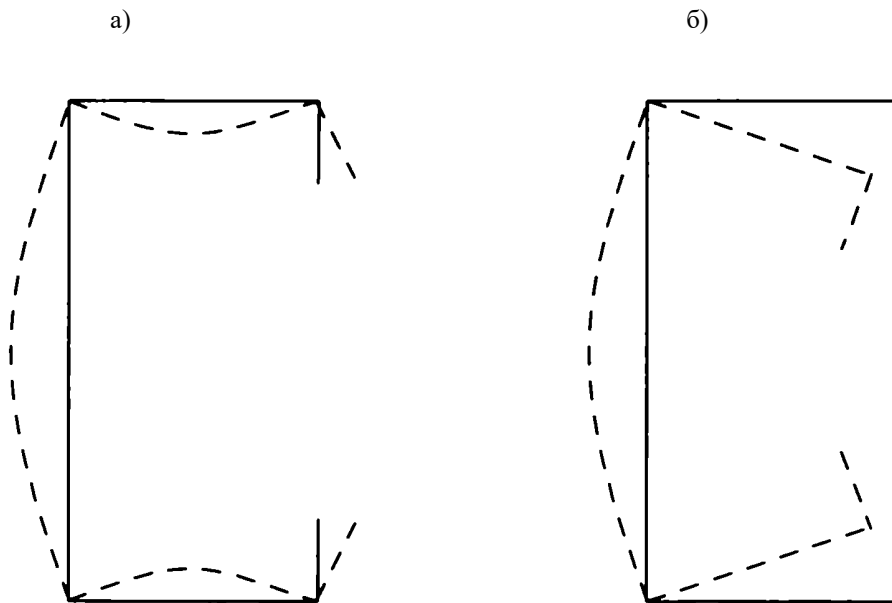


Рис. П.2.1. Формы потери устойчивости гнутого несимметричного профиля С-образного сечения при осевом сжатии:

- а) потеря местной устойчивости элементов сечения; б) потеря устойчивости, сопровождающаяся изменением начальной формы сечения профиля в пределах упругой работы с концевыми элементами жесткости

Описание расчетной модели

Описание расчетной модели сжатых элементов с концевыми или промежуточными элементами жесткости, учитывающее изменения начальной формы сечения профиля в пределах упругой работы приведено в п.7.3.2.2 СП 260.1325800.2016. Метод основан на предположении, согласно которому элемент жесткости ведет себя как сжатый стержень с непрерывным боковым

раскреплением, представленным условной пружиной (жесткости K). Пружина действует на центр тяжести расчетного сечения элемента жесткости, как показано на Рис. П.2.3.



Рис. П.2.2. Формы потери устойчивости гнутого профиля несимметричного С-образного сечения при осевом сжатии: а) потеря местной устойчивости элементов сечения; б) потеря устойчивости, сопровождающаяся изменением начальной формы сечения профиля в пределах упругой работы с элементами жесткости

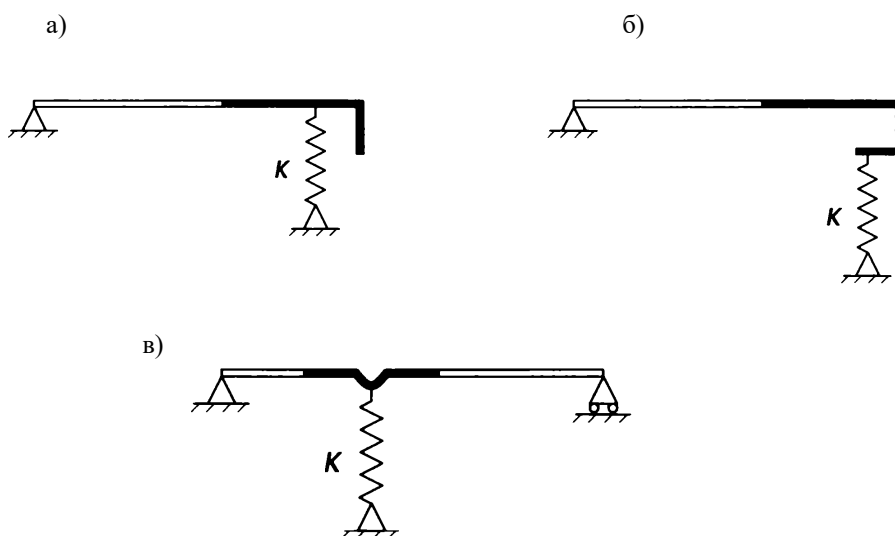


Рис. П.2.3. Расчетные модели для концевых и промежуточных элементов жесткости: а) элемент жесткости с одинарным краевым отгибом; б) элемент жесткости с двойным краевым отгибом; в) промежуточный элемент жесткости

Жесткость условной пружины может быть получена путем расчета на единичную нагрузку, который должен учитывать изгибную жесткость рассматриваемого сжатого элемента и закрепление от поворота, обеспечиваемое примыкающими участками.

Условные пружины на концах сжатых элементов используются для моделирования закрепления от вращения примыкающими участками, при этом жесткость

условной пружины C_θ зависит от изгибной жесткости и краевых условий для прилегающих участков, а также распределения напряжений, действующих в сечении.

Вычисление жесткости K условной пружины для гнутого профиля С-образного сечения и вычисление характеристик сечения в связи с потерей устойчивости при изменении начальной формы сечения профиля в пределах упругой работы рассматривается в Примере П.2.

Пример П.2. Расчет характеристик сечения профиля с учетом потери устойчивости при изменении начальной формы сечения профиля в пределах упругой работы:

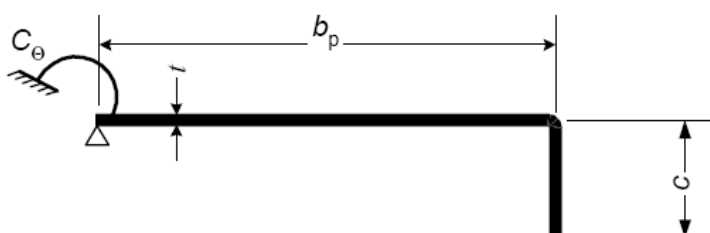
В данном примере показан метод определения сопротивления поперечного сечения в связи с потерей местной устойчивости плоских участков гнутого профиля С-образного сечения и потерей устойчивости при изменении начальной формы сечения профиля в пределах упругой работы по СП 260.1325800.2016. В данном примере рассматривается несимметричный гнутый профиль С-образного сечения 200 x 45 x 41 x 2,0 из примера П.1 (см. раздел П.1 приложения), где были определены характеристики эффективного сечения в связи с потерей местной устойчивости плоских участков сечения. Таким образом, параметры полного и эффективного поперечных сечений уже были вычислены в примере П.1.

Геометрические характеристики полного сечения

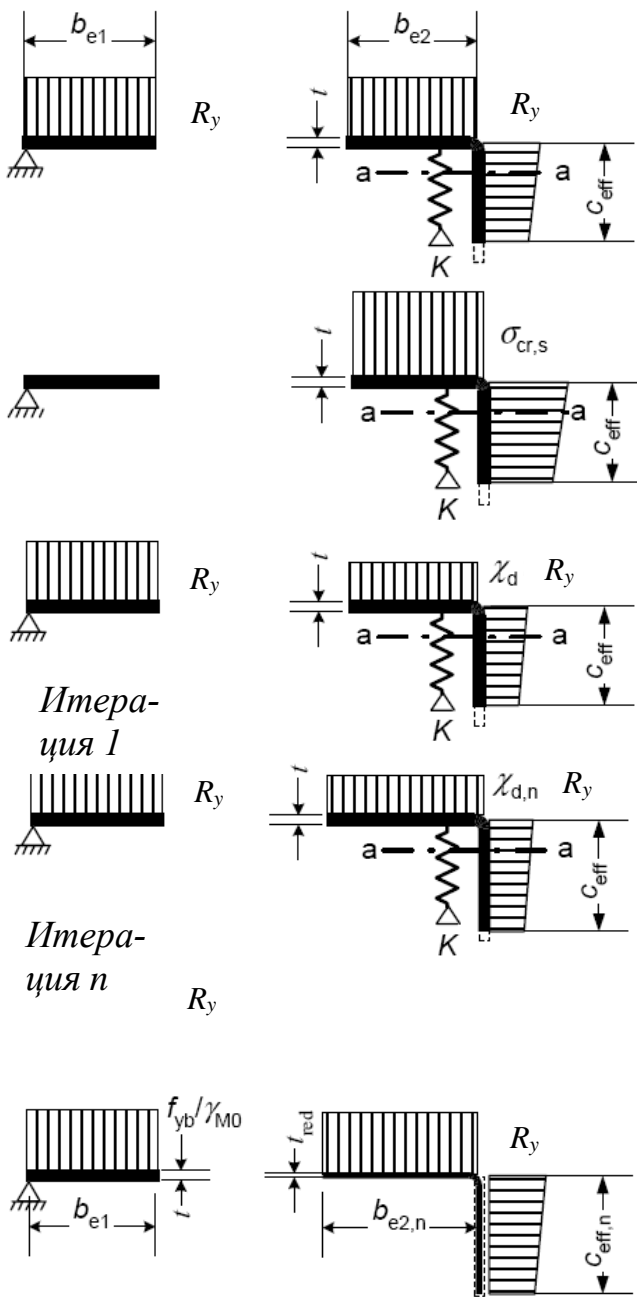
$$A_g = 566,849 \text{ мм}^2 \quad \bar{y}_g = 8,053 \text{ мм}$$

Как было показано в СП 260.1325800.2016, метод определения эффективных геометрических характеристик поперечного сечения в связи с потерей устойчивости гнутого профиля, сопровождающейся изменением начальной формы сечения профиля в пределах упругой работы, включает три этапа, которые приведены на рис. П.2.4.

Расчет по этим этапам выполнен в рассматриваемом примере.



а) Полное поперечное сечение и граничные условия



б) *Этап 1:* Эффективное поперечное сечение для $K=\infty$, основанное на $\sigma_{com} = R_y$

с) *Этап 2:* Критическое напряжение $\sigma_{cr,s}$ для эффективной площади A_s упругого элемента жесткости ИЗ этапа 1.

д) Сниженная прочность $\chi_d R_y$ для ребра с эффективной площадью A_s и снижающим коэффициентом χ_d , основанным на $\sigma_{cr,s}$

е) *Этап 3:* Произвольно повторяется этап 1 для расчета эффективной ширины с уменьшенным сжимающим напряжением $\sigma_{com,i} = \chi_d R_y$ с χ_d после предыдущей итерации, продолжающейся пока

$$\chi_{d,n} \approx \chi, \text{ но } \chi_{d,n} \leq \chi_{d,(n-1)}$$

ф) Выбрать эффективное поперечное сечение с b_{e2} , C_{eff} и уменьшенной толщиной t_{red} соответствующей $\chi_{d,n}$

Рис. П.2.4. Этапы расчета сопротивления сжатию полки с элементом жесткости в виде краевого отгибав связи с потерей устойчивости сопровождающейся изменением начальной формы сечения профиля в пределах упругой работы

Этап 1: Определение начального эффективного сечения

Для стенки и полок начальное эффективное сечение определяется с учетом потери местной устойчивости, рассматривается в Примере П.1 (см. раздел П.1 в приложении):

Стенка: $h_{ef} = 97,248$ мм
 Полки: $b_{ef1} = 39,16$ мм; $b_{ef2} = 33,932$ мм
 Отгибы: $c_{ef1} = 13,497$ мм; $c_{ef2} = 13,497$ мм

Таким образом начальное эффективное сечение - это сечение, полученное с учетом местной потери устойчивости плоских участков сечения в примере П.1 (см. рис. П.1.3).

Этап 2: Расчет приведенной толщины для эффективного сечения концевого элемента жесткости в виде краевого отгиба

Эффективное сечение концевого элемента жесткости, показанное на Рис. 10, здесь рассматривается отдельно с целью определения сопротивления сечения потере устойчивости при изменении начальной формы сечения профиля в пределах упругой работы.

Расчет геометрических характеристик эффективного сечения концевого элемента жесткости

(Обозначения см. на рис. П.2.5 и в приложении Б СП 260.1325800.2016).

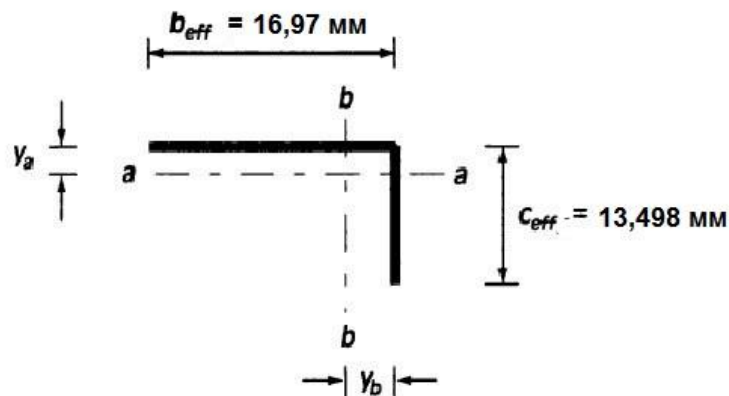


Рис. П.2.5. Эффективное сечение с элементом жесткости в виде краевого отгиба

$$y_a = \frac{\left[\left(c_{ef} - \frac{t}{2} \right) * (t - t_{m.p}) * \left[\frac{c_{ef} - t/2}{2} \right] \right]}{\left[[b_{ef1} * (c_{ef} - t/2)] * (t) \right]} = 2,657 \text{ мм}$$

$$y_b = \frac{\left[b_{ef1} * (t - t_{m.p}) * \left[\frac{b_{ef1}}{2} \right] \right]}{\left[[b_{ef1} * (c_{ef} - t/2)] * (t - t_{m.p}) \right]} = 4,882 \text{ мм}$$

Площадь эффективного сечения концевго элемента жесткости:

$$A_s = \left[b_{ef1} * \left(c_{ef} - \frac{t}{2} \right) \right] * (t - t_{m.p}) = 57,786 \text{ мм}^2$$

Момент инерции эффективного сечения концевго элемента жесткости:

$$I_s = \left[\left[\frac{(b_{ef1}(t - t_{m.p})^3)}{12} \right] + \left[\frac{(t - t_{m.p}) * (c_{ef} - t/2)^3}{12} \right] + [b_{ef1} * (t - t_{m.p}) * ((y_a)^2)] \right] + (t - t_{m.p}) * \left(c_{ef} - \frac{t}{2} \right) \left[\frac{(c_{ef} - \frac{t}{2})}{2} - y_a \right]^2 = 879,09 \text{ см}^2$$

Расчет жесткости K_1 условной пружины

Согласно п. 7.3.2.8 СП 260.1325800.2016:

$$K_1 = \left[\left[\frac{(E(t)^3)}{4(1 - \vartheta^2)} \right] + \left[\frac{1}{b_{b1}^2 * h_{11} + b_{b1}^3 + 0.5 * b_{b1} * b_{32} * h_{11} * k_f} \right] \right] = 1,498 \text{ Н/мм}^2$$

$$b_{b1} = b_{32} - t - y_b = 29,05 \text{ мм}$$

$$b_{c1} = c_{ef} - t - y_b = 6,66 \text{ мм}$$

где

$k_f = 1,0$ для симметричного сечения при центральном сжатии;

$\nu = 0,3$.

$$\sigma_{st} = \sigma_{t,max} + (\sigma_{c,max} - \sigma_{t,max}) * \left(\frac{h_p + 0.5t - y_b}{h_p + t} \right) = 3,295 * 10^8 \text{ Па}$$

Критическое напряжение для эффективного сечения элемента жесткости

Согласно п. 7.3.2.7 СП 260.1325800.2016:

$$\sigma_{crs} = \frac{2 * \sqrt{K_1 * E * I_s}}{A_s} = 575,495 \text{ Н/мм}^2$$

Коэффициент снижения несущей способности χ_d при потере устойчивости концевой элемента жесткости сопровождающейся изменением начальной формы сечения профиля в пределах упругой работы

Относительная гибкость:

$$\lambda_d = \sqrt{\frac{R_y}{\sigma_{crs}}} = 0,761$$

$$0,65 \leq \lambda_d \leq 1,38$$

Согласно п. 7.3.2.9 СП 260.1325800.2016:

$$\chi_d = 1,47 - 0,723 * \lambda_{d1} = 0,92$$

Скорректированная эффективная площадь и толщина расчетного сечения элемента жесткости в виде краевого отгиба:

$$A_{sred} = \chi_d * A_s * \left[\frac{(R_y)}{\sigma_{comEd}} \right] = 53,11 \text{ мм}^2$$

$$t_{red} = \frac{A_{sred}}{(b_{ef1} + c_{ef})} = 1,765 \text{ мм}$$

Определение характеристик эффективного сечения элемента при потере устойчивости концевой элемента жесткости сопровождающейся с изменением начальной формы сечения профиля в пределах упругой работы

Эффективная площадь:

$$A_{effs} = h_{ef}(t - t_{m.p}) + [(b_{ef1} * t) + 2t_{red}(c_{ef} + b_{ef1})] = 345,73 \text{ мм}^2$$

Для сравнения в примере 1 эффективная площадь в связи с потерей местной устойчивости сжатых плоских участков сечения равнялась 777,381 мм².

Положение нейтральной оси Z относительно средней линии стенки для эффективного сечения:

$$y_{eN} = \frac{\left[\left[(b_{ef1})(t - t_{m,p}) * \left[\frac{b_{ef1}}{2} \right] \right] + 2b_{ef1} * t_{red} * (b_{32} - t) - \frac{b_{ef1}}{2} \right] + 2(c_{eff} * t_{s.red} * (b_{32} - t))}{A_{eff.s}} = 11,63 \text{ мм}$$

Горизонтальное смещение нейтральной оси Z относительно средней линии стенки для эффективного сечения:

$$e_{Ny} = y_{eN} - y_g = 3,577 \text{ мм}$$

Этап 3: Последующие итерации выполняются в случае необходимости уточнения значения коэффициента снижения несущей способности χ_d

Значения χ_d может быть уточнено итерационно с помощью измененных значений ρ , полученных при σ_{com} , равном $\chi_{dfyb} R_y$ а этапе 1 для каждой итерации. Последовательные этапы представлены в этом примере (см. этапы 1 и 2).

Предельное сжимающее усилие сжатого элемента из гнутого профиля при потере устойчивости в связи с изменением начальной формы сечения профиля в пределах упругой работы равно:

$$N_{cRd} = A_{eff.s} * R_y = 115,126 \text{ кН}$$

В связи со смещением нейтральной оси на 3,577 мм (от центра тяжести полного сечения к центру тяжести эффективного сечения) необходимо поперечное сечение проверить обязательно на комбинацию осевого сжатия и изгиба с изгибающим моментом равным действующей осевой нагрузке, умноженной на величину смещения нейтральной оси.

П.3. Определение геометрических характеристик эффективного сечения изгибаемого несимметричного профиля с учетом потери местной устойчивости и изменением начальной формы сечения профиля

Вычисление характеристик эффективного сечения изгибаемого профиля С-образного сечения с учетом потери местной устойчивости плоских участков и изменением начальной формы сечения показано в Примере 3.

Пример П.3. Расчет характеристик эффективного сечения изгибаемого профиля

В данном примере рассматривается несимметричный гнутый профиль С-образного сечения 200 x 45x41 x 2,0 из Примера 1 (см. раздел 2.1), где были определены характеристики полного сечения. Геометрические размеры сечения представлены на Рис. 3. Таким образом, параметры полного поперечного сечения уже были вычислены в Примере 1.

Геометрические характеристики полного сечения

$$A_g = 566,849 \text{ мм}^2 \quad \bar{y}_g = 8,053 \text{ мм}$$

Как было показано в СП 260.1325800.2016, метод определения эффективных геометрических характеристик поперечного сечения с учетом с потерей местной устойчивости плоских участков и изменением начальной формы сечения в пределах упругой работы, включает три этапа, которые приведены на Рис. 9.

Расчет по этим этапам выполнен в рассматриваемом примере.

При поперечном изгибе распределение напряжений определяется после определения эффективной ширины сжатой полки и краевого отгиба.

Максимальное сжимающее напряжение в полке:

$$\sigma_{com} = R_y = 333.333 \text{ мПа}$$

Этап 1: Определение начального эффективного сечения

Для сжатой полки шириной b эффективная ширина b_{ef} определяется следующим образом:

Коэффициент потери устойчивости для внутреннего элемента при $\psi_1 = 1$

$$k_\sigma = 4 \quad (\text{СП 260.1325800.2016, Табл. 7.2}).$$

Условная гибкость пластины:

$$\lambda_p = \frac{b_{31}}{t} \sqrt{\frac{12 * (1 - \nu^2) * R_y}{\pi^2 * E * k_\sigma}} = 0,384$$

При $\lambda_p \leq 0,673$

Редукционный коэффициент:

$$\rho = 1$$

Эффективная ширина пластины:

$$b_{ef} = \rho(b_2 - t) = 39,04 \text{ мм}$$

$$b_{eff} = \frac{b_{ef}}{2} = 19,52 \text{ мм}$$

Для краевого отгиба шириной c эффективная ширина c_{ef} определяется следующим образом:

Для отгибов (концевой элемент жесткости в виде краевого отгиба) коэффициент устойчивости k_σ определяется по формулам:

$$k_\sigma = 0,5 \text{ для } b_{p.c}/b_p \leq 0,35$$

$$k_\sigma = 0,5 + 0,83 * \sqrt[3]{\left(\frac{b_{p.c}}{b_p} - 0,35\right)^2} \text{ для } 0,35 \leq \frac{b_{p.c}}{b_p} \leq 0,60$$

Для рассматриваемого примера:

$$\frac{b_{p.c}}{b_p} = 0,203 \leq 0,35 \quad k_\sigma = 0,5$$

$$k_\sigma = 0,5$$

Поправочный коэффициент, зависящий от R_y :

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{R_y}} = 0,819$$

Условная гибкость пластины отгиба:

$$\lambda_p = \frac{c_1}{t} \sqrt{\frac{12 * (1 - \nu^2) * R_y}{\pi^2 * E * k_{\sigma 7}}} = 0,16$$

$$\lambda_p < 0,748 \quad \rho = 1$$

Эффективная ширина пластины отгиба:

$$c_{eff} = \rho(c_1 - t) = 13,04 \text{ мм}$$

Начальное эффективное сечение с элементом жесткости в виде краевого отгиба показано на рис. П.3.1.

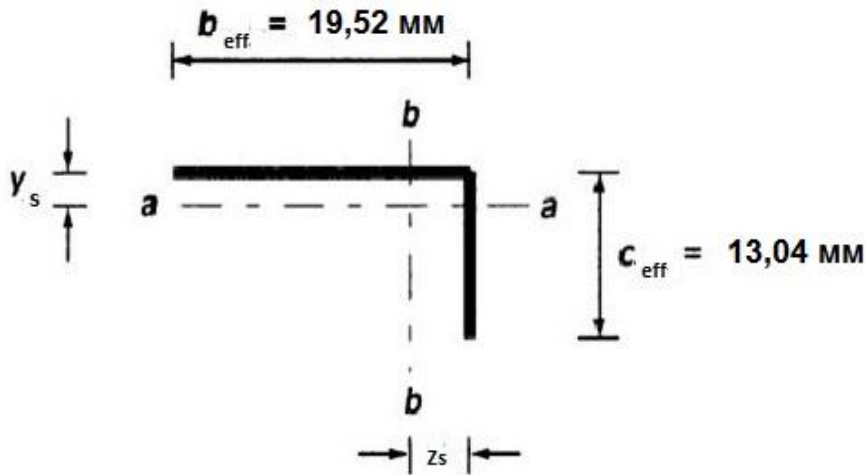


Рис. П.3.1. Эффективное сечение с элементом жесткости в виде краевого отгиба

Полное и эффективное сечения изгибаемого профиля С-образного сечения с учетом потери местной устойчивости плоских участков

Характеристики эффективного сечения

Эффективная площадь:

$$A_{ef} = h_{ef} * t + 2b_{ef2} * t + 2b_{ef3} * t + 2c_{eff} * t = 386,773 \text{ мм}^2$$

Смещение нейтральной оси Y из положения для полного сечения до положения для эффективного сечения:

$$Z_n = \frac{-\left[[(b_1 - t) - b_{ef} - b_{ef}] * (t - t_{m,p}) * (h_{ef}) + \left(c_1 - \frac{t}{2}\right) - c_{eff}\right] * (t - t_{m,p}) * \left(\frac{h_{ef}}{2} - \frac{c_{eff}}{2}\right)}{(t - t_{m,p}) \left[c_{eff} + (b_1 - t) + h_p + b_{ef} + \left(c_1 - \frac{t}{2}\right)\right]}$$

$$= -0,77 \text{ мм}$$

где $h_p = h - t = 198$ мм

Соотношение напряжений, определенное по геометрическим характеристикам эффективного сечения поперечного сечения:

$$\psi_2 = - \left[\left(\frac{h_p}{2} \right) - z_n \right] * \left[\frac{h_p}{2} + z_n \right]^{-1} = -0,985$$

где $h_p = h - t = 196$ мм

Коэффициент потери устойчивости стенки (СП 260.1325800.2016, Табл. 7.2):

$$k_\sigma = 7,81 + 6,29 * \psi_2 + 9,78 * \psi_2^2 = 23,485$$

Условная гибкость пластины стенки

$$\lambda_p = \frac{h_p}{t} \sqrt{\frac{12 * (1 - \nu^2) R_y}{\pi^2 * E * k_\sigma}} = 0,873$$

При $\lambda_p \geq 0,673$

Редукционный коэффициент:

$$\rho = \frac{(\lambda_p - 0.055 * (3 + \psi_2))}{\lambda_p^2} = 1$$

Эффективная ширина пластины стенки:

$$h_{ef} = \rho \frac{(h_p)}{(1 - \psi_2)} = 99,76 \text{ мм}$$

$$h_{ef1} = 0,4 * h_{ef} = 39,9 \text{ мм}$$

$$h_{ef2} = 0,6 * h_{ef} + \left[h_p - \frac{(h_p)}{(1 - \psi_2)} \right] = 156,58 \text{ мм}$$

Потеря устойчивости, сопровождающаяся изменением начальной формы сечения профиля в пределах упругой работы, происходит в тех случаях, когда концевой элемент жесткости не в состоянии препятствовать локальному смещению узловой точки на стыке полки с отгибом.

Местная потеря устойчивости продольно сжатой полки стенки профиля и изменение начальной формы сечения профиля в пределах упругой работы для профилей с концевыми элементами жесткости показаны на рис. П.3.2а.

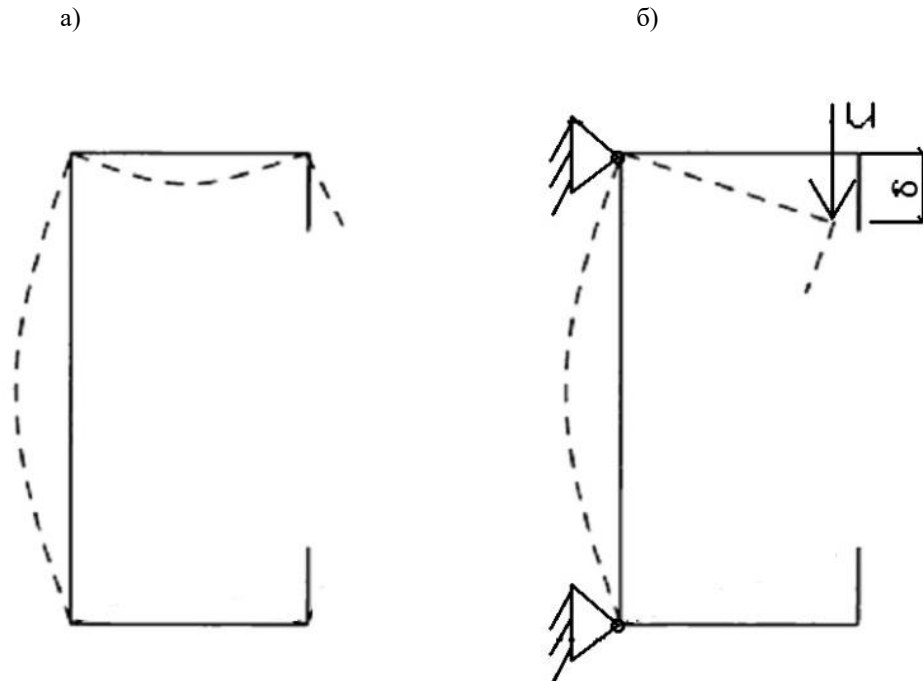


Рис. П.3.2. Формы потери устойчивости гнутого профиля С-образного сечения при изгибе: а) потеря местной устойчивости элементов сечения; б) потеря устойчивости, сопровождающаяся изменением начальной формы сечения профиля в пределах упругой работы с концевыми элементами жесткости

Описание расчетной модели

Описание расчетной модели изгибаемого элемента с концевыми или промежуточными элементами жесткости, учитывающее изменения начальной формы сечения профиля в пределах упругой работы приведено в п. 7.3.2.2 СП 260.1325800.2016. Метод основан на предположении, согласно которому элемент жесткости ведет себя как сжатый стержень с непрерывным боковым раскреплением, представленным условной пружиной (жесткости K). Пружина действует на центр тяжести эффективного сечения элемента жесткости, как показано на рис. П2.3.

Жесткость условной пружины может быть получена путем расчета на единичную нагрузку, который должен учитывать изгибную жесткость рассматривае-

мого изгибаемого элемента и закрепление от поворота, обеспечиваемое примыкающими участками, как показано на Рис. 13б.

Условная пружина на конце сжатой полки используются для моделирования закрепления от вращения примыкающим участком, при этом жесткость условной пружины C_θ зависит от изгибной жесткости и краевых условий для примыкающего участка, а также распределения напряжений, действующих в сечении.

Вычисление жесткости K условной пружины для изгибаемого гнутого профиля С-образного сечения и вычисление характеристик сечения в связи с потерей устойчивости при изменении начальной формы сечения профиля в пределах упругой работы рассматривается в примере 3 во 2 этапе расчета.

Этап 2: Расчет приведенной толщины для эффективного сечения концевго элемента жесткости в виде краевого отгиба

Эффективное сечение концевго элемента жесткости, показанное на Рис. 11, здесь рассматривается отдельно с целью определения сопротивления сечения потере устойчивости при изменении начальной формы сечения профиля в пределах упругой работы.

Расчет геометрических характеристик эффективного сечения концевго элемента жесткости

Характеристики сечения

Площадь эффективного сечения концевго элемента жесткости:

$$A_{ef} = (b_{ef} - c_{eff}) * (t - t_{m.p}) = 62,52 \text{ мм}^2$$

Координаты центра тяжести эффективного сечения концевго элемента жесткости:

$$y_s = \frac{\left[(c_{eff}) * (t - t_{m.p}) * \left[\frac{c_{eff}}{2} \right] \right]}{[A_c]} = 2,61 \text{ мм}$$

$$z_s = \frac{\left[(b_{ef}) * (t - t_{m.p}) * \left[\frac{b_{ef}}{2} \right] \right]}{[A_s]} = 5,85 \text{ мм}$$

Момент инерции эффективного сечения концевой элемента жесткости:

$$I_s = \left[\left[\frac{(b_{ef}(t - t_{m.p})^3)}{12} \right] + \left[\frac{(t - t_{m.p}) * (c_{eff})^3}{12} \right] + [b_{eff} * (t - t_{m.p}) * ((y_s)^2)] \right] + (c_{eff}) * (t - t_{m.p}) * \left[\frac{(c_{eff})}{2} - y_s \right]^2 = 1005 \text{ мм}^4$$

Расчет жесткости K условной пружины

Согласно п. 7.3.2.8 СП 260.1325800.2016:

Жесткость K_2 линейной пружины

$$K_2 = \left[\left[\frac{(E(t)^3)}{4(1 - \vartheta^2)} \right] + \left[\frac{1}{(b_{b1} - z_s)^2 * h_{11} + (b_{b1} - z_s)^3 + 0.5 * ((b_1 - z_s)^2) * h_{11} * k_f} \right] \right] = 3,485 \text{ Н/мм}^2$$

где $b_1 = b_2 = b - t - z_{s1}$ - расстояние от пересечения стенки и полки до центра тяжести эффективной площади краевого отгиба (включая эффективную часть b_{e2} полки) на сжатой полке 1 изгибаемого профиля;

$k_f = 0$ - полка 2 растянута (т. е. для изгибаемого профиля, изгибаемой относительно оси у-у);

$$\nu = 0,3.$$

Критическое напряжение для эффективного сечения элемента жесткости при $K_2=3,485 \text{ Н/мм}^2$:

$$\sigma_{cr.s} = \frac{2 * \sqrt{K_1 * E_2 * I_{s1}}}{A_s} = 867,73 \text{ Н/мм}^2$$

Коэффициент снижения несущей способности χ_d для учета потери устойчивости при изменении начальной формы сечения профиля в пределах упругой работы:

Относительная гибкость

$$\lambda_d = \sqrt{\frac{R_y}{\sigma_{cr.s}}} = 0,619$$

Коэффициент снижения несущей способности

$$\chi_d = 1,47 - 0,723 * \lambda_d = 1,022$$

Скорректированная эффективная площадь (и толщина) эффективного сечения элемента жесткости в виде краевого отгиба

$$A_{s.red} = \chi_d * A_s * \left[\frac{(R_y)}{\sigma_{com}} \right] = 63,83 \text{ мм}^2$$

$$t_{s.red} = \frac{A_{s.red}}{(b_{ef} + c_{eff})} = 1,96 \text{ мм}$$

Определение характеристик эффективно. сечения элемента при учете потери устойчивости в связи с изменением начальной формы сечения профиля в пределах упругой работы

Скорректированная эффективная площадь сечения профиля:

$$A_{eff} = (t - t_{m.p}) \left[(b_{ef} - t) + \left(c_{eff} - \frac{t}{2} \right) + h_{ef2} \right] + [t_{sred} * (b_{ef} + c_{eff})] = 421,34 \text{ мм}^2$$

Положение нейтральной оси Y профиля для скорректированного эффективного сечения профиля относительно оси сжатой полки:

$$z_1 = \frac{\left[\left[\left(c_{eff} - \frac{t}{2} \right) (t - t_{m.p}) * \left[(h_{11} - t) - \frac{(c_{eff} - \frac{t}{2})}{2} \right] \right] + (b_{32} - t) * (t - t_{m.p}) * h_p + h_{ef2} * (t - t_{m.p}) * \left(h_p - \frac{h_{ef2}}{2} \right) \right] + \left[h_{ef1} * (t - t_{m.p}) * \frac{h_{ef1}}{2} \right] + (c_{eff} * t_{s.red} * \frac{c_{eff}}{2})}{A_{eff}} = 133,01 \text{ мм}$$

$$z_2 = h_{11} - z_1 = 61,5 \text{ мм}$$

Момент инерции скорректированного эффективного сечения профиля

$$\begin{aligned}
I_g &= \frac{((c_{eff} - \frac{t}{2})^3) * (t - t_{m.p})}{12} + \left[\frac{h_{11} - t}{2} - (c_{eff} - \frac{t}{2}) + (\frac{c_{eff} - t}{2}) \right]^2 + (t - t_{m.p}) * (c_{eff} - \frac{t}{2}) \\
&+ \left[\frac{b_{ef}^3 (t - t_{m.p})}{12} \right] + b_{ef} * t \left[\frac{((h_{11} - t))}{2} \right]^2 + \left[\frac{(b_{ef} * t_{s.red}^3)}{12} \right] + \left[\frac{(t_{s.red} * c_{eff}^3)}{12} \right] + t_{s.red} \\
&* c_{eff} * \left[\frac{h_{11} - t}{2} - (c_{eff} - \frac{t}{2}) + (\frac{c_{eff}}{2}) \right]^2 + h_{ef2} * (t - t_{m.p}) * \left[\frac{((h_{11} - t) - h_{ef2})}{2} \right]^2 \\
&+ h_{ef1} * (t - t_{m.p}) * \left[\frac{((h_{11} - t) - h_{ef1})}{2} \right]^2 + \left[\frac{h_{efl}^3 (t - t_{m.p})}{12} \right] + b_{ef} * t_{s.red} * \left[\frac{h_{11} - t}{2} \right]^2 \\
&+ (b_{32} - t)(t - t_{m.p}) * \left[\frac{(h_{11} - t)}{2} \right]^2 + \left[\frac{h_{ef2}^3 (t - q)}{12} \right] + \left[\frac{(b_{32} - t) * (t - t_{m.p})^3}{12} \right] \\
&= 2,91 * 10^6 \text{ мм}^4
\end{aligned}$$

Момент сопротивления скорректированного эффективного сечения профиля

$$W_{ef,y} = \frac{I_{ef,y}}{z_1} = 21880 \text{ мм}^3$$

Предельный изгибающий момент, воспринимаемый поперечным сечением, при изгибе относительно оси Y , элемента из гнутого профиля при потере устойчивости в связи с изменением начальной формы сечения профиля в пределах упругой работы равно:

$$M_{crd} = R_y \cdot W_{ef,y} = 7,285 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

Этап 3: Последующие итерации выполняются в случае необходимости уточнения значения коэффициента снижения несущей способности χ_d

Значение χ_d может быть уточнено итерационно с помощью измененных значений ρ , полученных при σ_{com} равном $\chi_d \cdot R_y$ на Этапе 2.

$$\sigma_{com.1} = \chi_d \cdot R_y = 340,364 \text{ Н/мм}^2$$

Корректировка эффективной ширины сжатой полки при скорректированных значениях условной гибкости и редуцированного коэффициента

$$\lambda_{p,r} = \lambda_p * \sqrt{\chi_d} = 0,368$$

$$\rho = 1$$

$$b_{eff} = 0,5 * \rho * (b_{32} - t) = 16,97 \text{ мм}$$

Корректировка эффективной ширины отгиба при скорректированных значениях условной гибкости и редуционного коэффициента

$$\lambda_{r,c} = \lambda_p * \sqrt{\chi_d} = 0,368$$

$$\rho = 1$$

$$c_{ef2} = \rho * \left(c_{eff} - \frac{t}{2} \right) = 12,06 \text{ мм}$$

Геометрические характеристики эффективного сечения элемента жесткости в виде краевого отгиба

Площадь эффективного сечения концевго элемента жесткости:

$$A_{ef,s} = [b_{eff} + c_{ef2}] * [(t - t_{m,p})] = 55,73 \text{ мм}^2$$

Координаты центра тяжести расчетного сечения концевго элемента жесткости равны:

$$y_c = \frac{\left[(t - q) * \left[c_{ef2} * \left(\frac{c_{ef2}}{2} \right) \right] \right]}{A_{ef,s}} = 2,51 \text{ мм}$$

$$z_c = \frac{\left[(t - q) * \left[b_{eff} * \left(\frac{b_{eff}}{2} \right) \right] \right]}{A_{ef,s}} = 4,96 \text{ мм}$$

Момент инерции эффективного сечения концевго элемента жесткости:

$$I_{cef} = \left[\left[\frac{(b_{eff}(t - t_{m.p})^3)}{12} \right] + \left[\frac{(t - t_{m.p}) * (c_{ef2})^3}{12} \right] + [b_{eff} * (t - t_{m.p}) * ((y_c)^2)] \right] + (t - t_{m.p}) * (c_{ef2}) \left[\frac{(c_{ef2})}{2} - y_c \right]^2 = 782,78 \text{ мм}^4$$

Расчет жесткости K условной пружины

$$K = \left[\left[\frac{(E(t)^3)}{4(1 - \nu^2)} \right] + \left[\frac{1}{(b_{32} - z_c)^2 * h_{11} + [(b_{32}) - z_c]^3 + 0.5 * (b_{32} - z_c)^2 * h_{11}} \right] \right] = 1,89 \text{ Н/мм}^2$$

Жесткость K_4 условной пружины

где $k_{fl} = 0$ - полка 2 растянута (т. е. для изгибаемого профиля, изгибаемой относительно оси у-у);

$$\nu = 0,3.$$

Критическое напряжение для скорректированного эффективного сечения элемента жесткости при $K_4 = 1,893 \text{ Н/мм}^2$:

$$\sigma_{cr,s} = \frac{2 * \sqrt{K_4 * E * I_{cef}}}{A_{ef,s}} = 633,07 \text{ Н/мм}^2$$

Коэффициент снижения несущей способности χ_d для учета потери устойчивости при изменении начальной формы сечения профиля в пределах упругой работы:

Относительная гибкость:

$$\lambda_d = \sqrt{\frac{R_y}{\sigma_{cr,s}}} = 0,725$$

Коэффициент снижения несущей способности $\chi_d = \chi_d (\lambda_{d4})$

$$\chi_d = 1,47 - 0,723 * \lambda_d = 0,946$$

Итерация может быть завершена, если $\chi_{d41} = \chi_{d1}$

$$\chi_d = 0,946 < \chi_{d2} =$$

Поэтому значение χ_d уточняется следующей итерацией с помощью измененного значения ρ , полученного при $\sigma_{com.1}$ равном $\chi_{d41} \cdot R_y$ на предыдущем шаге итерации.

Скорректированное сжимающее напряжение в полке $\sigma_{com.1}$:

$$\sigma_{com.1} = \chi_{d41} \cdot R_y = 314,896 \text{ МПа}$$

Сжимающее напряжение в полке определенное в предыдущем шаге итерации σ_{com} :

$$\sigma_{com} = 223,16 \text{ Н/мм}^2$$

Скорректированная эффективная площадь (и толщина) эффективного сечения элемента жесткости в виде краевого отгиба

$$A_{sc} = \chi_d * A_{ef.s} * \left[\frac{(R_y)}{[\sigma_{com}]} \right] = 52,65 \text{ мм}^2$$

$$t_{r.s} = \frac{A_{sc}}{(b_{eff} + c_{ef})} = 1,82 \text{ мм}$$

Определение характеристик скорректированного эффективного сечения элемента после первой итерации

Скорректированная эффективная площадь сечения профиля

$$A_{ef2} = (t - t_{m.p}) \left[(b_{32} - t) + (c_{ef2} - \frac{t}{2}) + h_{ef1} + h_{ef2} \right] + t_{r.s} * (b_{eff} + c_{ef}) = 525,98 \text{ мм}^2$$

Скорректированное положение нейтральной оси Y профиля для скорректированного эффективного сечения профиля относительно оси сжатой полки

$$z_n = \frac{\left[\left[\left(c - \frac{t}{2} \right) (t - t_{m.p}) * \left[(h_{11} - t) - \frac{(c - \frac{t}{2})}{2} \right] \right] + (b_{32} - t) * (t - t_{m.p}) * h_p + h_{ef2} * (t - t_{m.p}) * \left(h_p - \frac{h_{ef2}}{2} \right) \right]}{A_{ef2}} = 132,3 \text{ мм}$$

$$z = (h_{11} - t) - z_n = 60,25 \text{ мм}$$

Момент инерции скорректированного эффективного сечения профиля

$$\begin{aligned}
I_{cor} = & \frac{(c_{ef} - \frac{t}{2})^3 * (t - t_{m.p})}{12} + \left[\frac{h_{11} - t}{2} - \left(c_{eff} - \frac{t}{2} \right) + \left((c_{eff} - \frac{t}{2}) / 2 \right) \right]^2 + (t - t_{m.p}) \\
& * \left(c_{ef} - \frac{t}{2} \right) + \left[\frac{b_{ef}^3 (t - t_{m.p})}{12} \right] + h_{ef2} * (t - t_{m.p}) * \left[\frac{\left((h_{11} - t) - h_{ef2} \right)}{2} \right]^2 + h_{ef1} \\
& * (t - t_{m.p}) * \left[\frac{\left((h_{11} - t) - h_{ef1} \right)}{2} \right]^2 + \left[\frac{h_{efl}^3 (t - t_{m.p})}{12} \right] + b_{ef1} * (t - t_{m.p}) \\
& * \left[\frac{(h_{11} - t)}{2} \right]^2 + \frac{(b_{ef} * t_{r.s})^3}{12} + \frac{(t_r * c_{eff})^3}{12} + c_{eff} * t_{rs} \\
& * \left[\frac{h_{11} - t}{2} - \left(c_{eff} - \frac{t}{2} \right) + \left(\frac{c_{ef}}{2} \right) \right]^2 + b_{ef} * t_{rs} * \left[\frac{h_{11} - t}{2} \right]^2 + (b_{32} - t)(t - t_{m.p}) \\
& * \left[\frac{(h_{11} - t)}{2} \right]^2 + \left[\frac{h_{ef2}^3 (t - t_{m.p})}{12} \right] + \left[\frac{(b_{32} - t) * (t - t_{m.p})^3}{12} \right] = 2858000 \text{ мм}^4
\end{aligned}$$

Скорректированный момент сопротивления эффективного сечения профиля

$$W_{ef2} = \frac{I_{ef}}{z_1} = 2200 \text{ мм}^3$$

Скорректированный предельный изгибающий момент, воспринимаемый поперечным сечением, при изгибе относительно оси Y , элемента из гнутого профиля при потере устойчивости в связи с изменением начальной формы сечения профиля в пределах упругой работы равно:

$$M_{crd2} := R_y \cdot W_{ef2} = 6,976 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

Соотношение предельных изгибающих моментов, воспринимаемых поперечным сечением, определенных для текущей итерации и предыдущего расчета

$$M = \frac{M_{crd2}}{M_{crd}} = 0,958$$

Этап 3: Итерация 2 выполняются для уточнения значения коэффициента снижения несущей способности χ_d

Значение χ_d уточняется на следующем шаге итерации с помощью измененного значения ρ , полученного при $\sigma_{com.2}$ равном $\chi_{d41} \cdot R_y$ после 1-го шага итерации:

$$\sigma_{com.2} = \chi_{d41} \cdot R_y = 314,896 \text{ МПа}$$

Корректировка эффективной ширины сжатой полки при скорректированных значениях условной гибкости и редуционного коэффициента

$$\lambda_{pr3} = \lambda_p \cdot \sqrt{\chi_{d1}} = 0,373$$

$$\rho = 1,0$$

$$\chi_{d1} = 1,47 - 0,723 \cdot \lambda_{pr3} = 1,2$$

$$b_{ef1} = 0,5 \cdot \rho \cdot (b_{32} - t) = 16,97 \text{ мм}$$

Корректировка эффективной ширины отгиба при скорректированных значениях условной гибкости и редуционного коэффициента $\rho = 1,0$

$$c_{ef2} = \rho \cdot \left(c_1 - \frac{t}{2} \right) = 14,02 \text{ мм}$$

Геометрические характеристики эффективного сечения элемента жесткости в виде краевого отгиба

Площадь эффективного сечения концевго элемента жесткости:

$$A_{ef2} = [b_{ef1} + c_{ef2}] \cdot [(t - t_{m.p})] = 64,51 \text{ мм}^2$$

Координаты центра тяжести эффективного сечения концевго элемента жесткости:

$$y_c = \frac{\left[(t - t_{m.p}) \cdot \left[c_{ef2} \cdot \left(\frac{c_{ef2}}{2} \right) \right] \right]}{A_{ef2}} = 2,93 \text{ мм}$$

$$z_c = \frac{\left[(t - t_{m.p}) \cdot \left[b_{ef1} \cdot \left(\frac{b_{ef1}}{2} \right) \right] \right]}{A_{ef2}} = 5,71 \text{ мм}$$

Момент инерции эффективного сечения концевго элемента жесткости:

$$I_{c.ef} = \left[\left[\frac{(b_{ef1}(t - t_{m.p})^3)}{12} \right] + \left[\frac{(t - t_{m.p}) * (c_{ef2})^3}{12} \right] + [b_{ef1} * (t - t_{m.p}) * ((y_c)^2)] \right] + (t - t_{m.p}) * (c_{ef2}) \left[\frac{(c_{ef2})}{2} - y_c \right]^2 = 1223 \text{ мм}^4$$

Жесткость K_1 линейной пружины

$$K_1 = \left[\left[\frac{(E(t)^3)}{4(1 - \vartheta^2)} \right] + \left[\frac{1}{(b_{32} - t)^2 * h_w + [(b_{32} - t) - z_c]^3 + 0.5 * (b_{32} - t - z_c)^2 * k_f} \right] \right] = 1,703 \text{ Н/мм}^2$$

где $k_f = 0$ - полка 2 растянута (т. е. для изгибаемого профиля, изгибаемой относительно оси у-у);

$$\nu = 0,3.$$

Критическое напряжение для скорректированного эффективного сечения элемента жесткости при $K_1 = 1,703 \text{ Н/мм}^2$:

$$\sigma_{cr.s} = \frac{2 * \sqrt{K_1 * E * I_{c.ef}}}{A_{ef2}} = 648,4 \text{ Н/мм}^2$$

Коэффициент снижения несущей способности χ_d для учета потери устойчивости при изменении начальной формы сечения профиля в пределах упругой работы:

Относительная гибкость

$$\lambda_d = \sqrt{\frac{R_y}{\sigma_{cs}}} = 0,717$$

Коэффициент снижения несущей способности

$$\chi_d = 1,47 - 0,723 * \lambda_d = 0,952$$

Итерация может быть завершена $\chi_{d12} = \chi_d$

$$\chi_{d1} = 0,946 = \chi_d = 0,952$$

Скорректированное сжимающее напряжение в полке $\sigma_{com.3}$:

$$\sigma_{com.3} = \chi_d \cdot R_y = 316,97 \text{ Н/мм}^2$$

Сжимающее напряжение в полке определенное в предыдущем шаге итерации $\sigma_{com,Ed2}$:

$$\sigma_{com.2} = \chi_{d1} \cdot R_y = 314,896 \text{ Н/мм}^2$$

Скорректированная эффективная площадь (и толщина) эффективного сечения элемента жесткости в виде краевого отгиба

$$A_s = \chi_d * A_{eff} * \left[\frac{(R_y)}{\sigma_{com}} \right] = 81,89 \text{ мм}^2$$

$$t_s = \frac{A_s}{(b_{ef1} + c_{ef2})} = 2,59 \text{ мм}$$

Определение характеристик скорректированного эффективного сечения элемента после второй итерации

Скорректированная эффективная площадь сечения профиля

$$A_{ef} = (t - t_{m.p}) \left[(b_{32} - t) + (c_{ef2} - \frac{t}{2}) + h_{ef1} + h_{ef2} \right] + t_s * (b_{ef} + c_{ef2}) = 555,22 \text{ мм}^2$$

Скорректированное положение нейтральной оси Y профиля для скорректированного эффективного сечения профиля относительно оси сжатой полки

$$z = \frac{\left[\left[\left(c - \frac{t}{2} \right) (t - t_{m.p}) * \left[\left(h_{11} - t \right) - \frac{(c - \frac{t}{2})}{2} \right] \right] + (b_{31} - t) * (t - t_{m.p}) * h_p + h_{ef2} * (t - t_{m.p}) * \left(h_p - \frac{h_{ef2}}{2} \right) \right]}{A_{ef}} = 136,77 \text{ мм}$$

$$z_1 = (h_{11} - t) - z = 55,77 \text{ мм}$$

Момент инерции скорректированного эффективного сечения профиля

$$\begin{aligned}
I_{ef} = & \frac{(c_{ef2} - \frac{t}{2})^3 * (t - t_{m.p})}{12} + \left[\frac{h_{11} - t}{2} - \left(c_{ef2} - \frac{t}{2} \right) + \left((c_{ef2} - \frac{t}{2}) / 2 \right) \right]^2 + (t - t_{m.p}) \\
& * \left(c_{ef2} - \frac{t}{2} \right) + \left[\frac{b_{ef8}^3 (t - q)}{12} \right] + h_{ef2} * (t - t_{m.p}) * \left[\frac{\left((h_{11} - t) - h_{ef2} \right)}{2} \right]^2 + h_{ef1} \\
& * (t - t_{m.p}) * \left[\frac{\left((h - t) - h_{ef1} \right)}{2} \right]^2 + \left[\frac{h_{ef1}^3 (t - t_{m.p})}{12} \right] + b_{ef8} * (t - t_{m.p}) \\
& * \left[\frac{(h_{11} - t)^2}{2} \right] + \frac{(b_{ef8} * t_s^3)}{12} + \frac{(t_s * c_{ef9}^3)}{12} + c_{ef9} * t_s \\
& * \left[\frac{h_{11} - t}{2} - \left(c_{ef2} - \frac{t}{2} \right) + \left(\frac{c_{eff}}{2} \right) \right]^2 + b_{ef8} * t_s * \left[\frac{h_{11} - t}{2} \right]^2 + (b_{32} - t)(t - t_{m.p}) \\
& * \left[\frac{(h_{11} - t)^2}{2} \right] + \left[\frac{h_{ef2}^3 (t - t_{m.p})}{12} \right] + \left[\frac{(b_{32} - t) * (t - t_{m.p})^3}{12} \right] = 3084000 \text{ мм}^4
\end{aligned}$$

Момент сопротивления скорректированного эффективного сечения профиля

$$W_{ef} = \frac{I_{ef}}{z_1} = 22550 \text{ мм}^3$$

Скорректированный предельный изгибающий момент, воспринимаемый поперечным сечением (рис. П.3.3), при изгибе относительно оси Y , элемента из гнутого профиля при потере устойчивости в связи с изменением начальной формы сечения профиля в пределах упругой работы равно:

$$M_{crd} = R_y \cdot W_{ef} = 7,509 \text{ кН} \cdot \text{м}$$

Соотношение предельных изгибающих моментов, воспринимаемых поперечным сечением, определенных для текущей итерации и предыдущего расчета

$$M = \frac{M_{crd}}{M_{crd2}} = 1,076$$

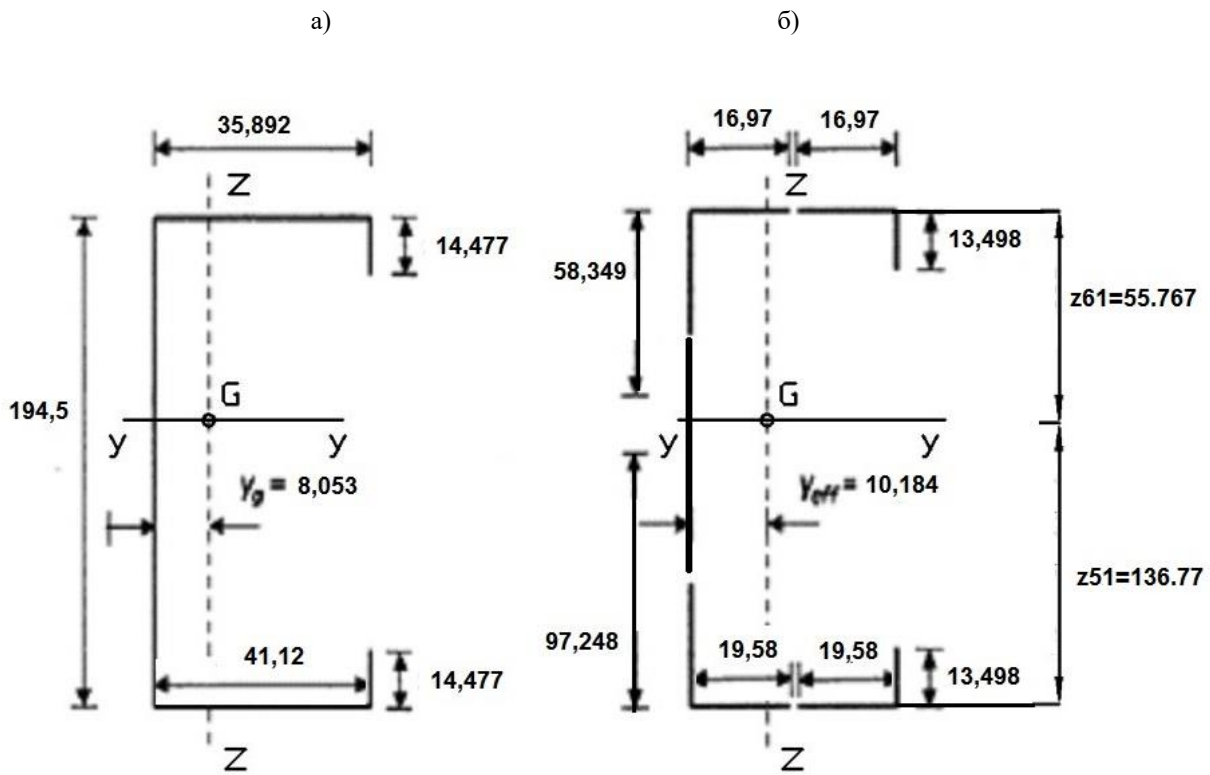


Рис. П.3.3. Сечение С-образного гнутого профиля 200 x 45x41 x 2,0 мм: а) идеализированное сечение; б) эффективное сечение с учетом с потери местной устойчивости плоских участков при изменении начальной формы сечения профиля в пределах упругой работы (размеры в мм)

П.4. Расчет рамы каркаса производственного здания из спаренных гнутых Σ - образных профилей

В примере показан расчет элементов рамного каркаса производственного здания. Оценка несущей способности элементов стального каркаса здания из спаренных гнутых Σ – образных профилей выполнен в соответствии с требованиями свода правил СП 260.1325800.2016 [1] и действующих нормативных документов [3, 4, 5, 14, 15, 16]. Расчетные усилия в сечениях элементов рамного каркаса определены при сочетаниях нагрузок согласно СП 20.13330.

Исходные данные

Производственное здание с рамным каркасом одноэтажное отапливаемое, имеет прямоугольную в плане форму с размерами в осях 20.0x50.0 м. Высота до низа стропильных конструкций – 5.95 м. Каркас здания в рассматриваемом примере выполнен из стальных тонкостенных холодногнутых профилей по ТУ 1120-011-54108389-2014 [13]. Колонны каркаса опираются на монолитные железобетонные фундаменты. Сопряжение колонн с фундаментами жесткое.

Ригель рамы выполнен в виде шпренгельной фермы с уклоном верхнего пояса 25%. Опирание ригеля на колонны рамы выполнено шарнирным.

Покрытие здания выполнено с прогонами. Прогоны однопролетные и располагаются в уровне ригеля.

Ограждающие конструкции выполнены из наборного сэндвича.

Конструктивная схема рамы каркаса показана на рисунке П.4.1. Конструктивная схема ригеля рамы показана на рисунке П.4.2.

Геометрическая неизменяемость и пространственная жесткость каркаса обеспечивается защемлением колонн в фундаментах и системой связей. Связевую систему каркаса составляют:

- вертикальные связи по колоннам;
- горизонтальные связи по покрытию;
- вертикальные связи по покрытию;
- распорки в уровне нижнего пояса фермы;
- система прогонов.

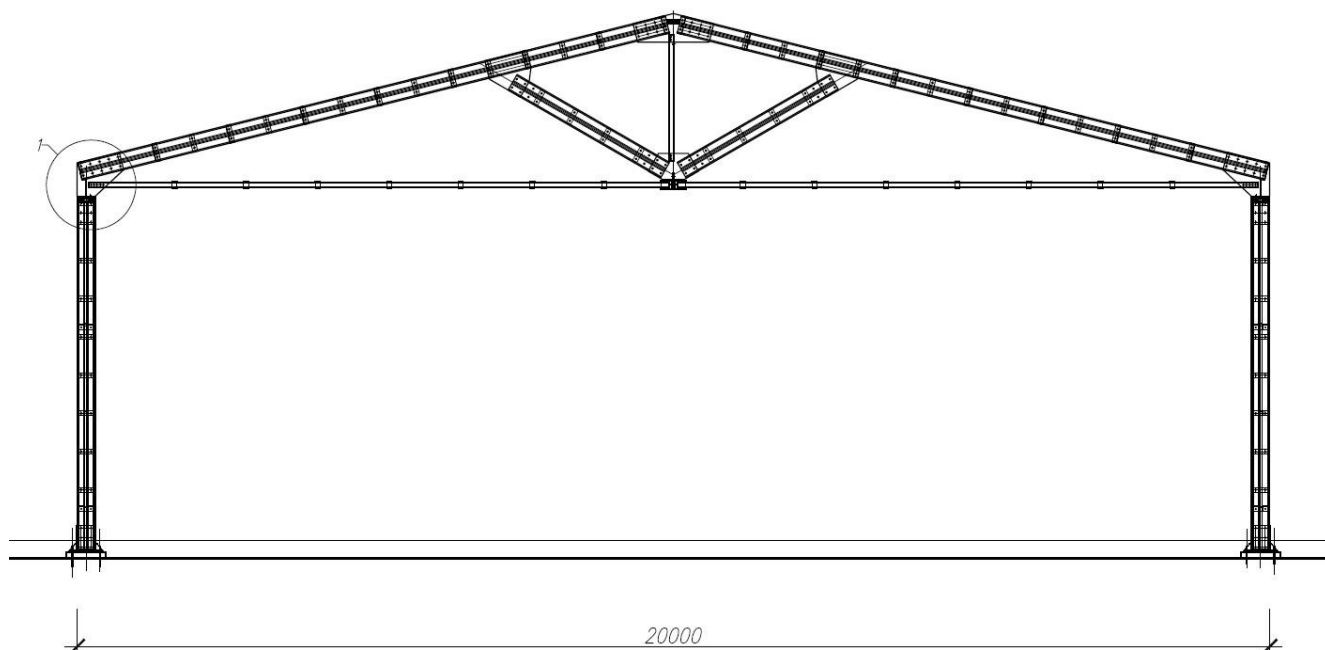


Рис. П.4.1 – Конструктивная схема рамы каркаса

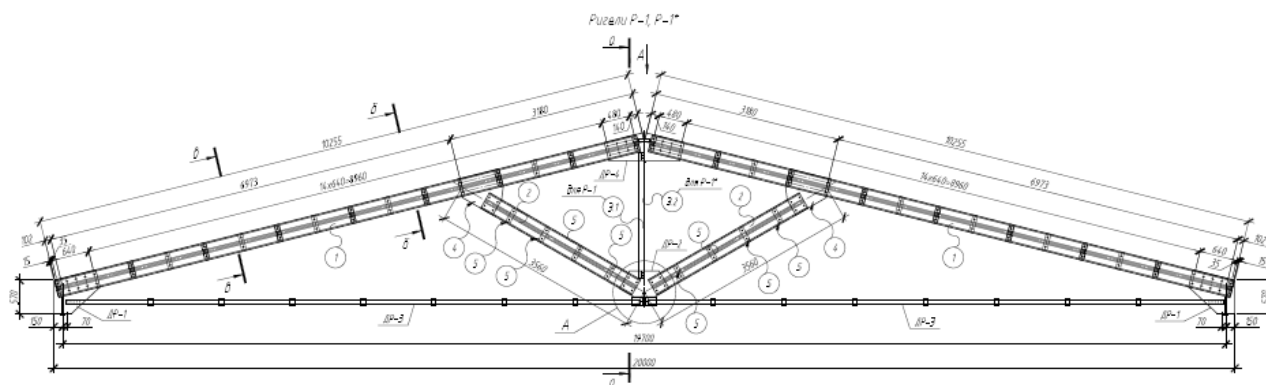


Рис. П.4.2 – Конструктивная схема ригеля рамы

Материалы

Несущие конструкции каркаса здания выполнены из стальных тонкостенных холодногнутох профилей по ТУ 1120-011-54108389-2014 [17]. Материал холодногнутох профилей рулонная сталь по ГОСТ Р 52246 [8]. Расчетные характеристики стали согласно [14, 20] приведены в таблице П.4.1.

Таблица П.4.1 – Расчетные характеристики стали

Марка	R_y , [МПа]	R_{yk} , [МПа]	R_{tk} , [МПа]	E , [МПа]	ν	Примечание
420	400	420	480	206000	0.3	[20]
C345	340	345	490			[14]

Нагрузки и воздействия на несущий каркас здания

Согласно нормативным документам [15, 16, 18, 19]

Расчеты несущего каркаса здания выполнялись из условия расположения здания в районе:

- со снеговой нагрузкой по [16] – III (нормативное значение нагрузки 1.286 кПа);
- с ветровой нагрузкой по [16] – I (нормативное значение нагрузки 0.23 кПа);
- с температурой по [19] наиболее холодных суток с обеспеченностью 0,95 минус 40°C;
- с сейсмичностью площадки по [18] 5 баллов.

В соответствии с нормативными документами [15, 16] расчеты несущих конструкций выполнены на сочетании нагрузок, которые включают:

- постоянную нагрузку (вес несущих конструкций каркаса, вес ограждающих конструкций и др. частей здания);
- временную длительную технологическую нагрузку;
- кратковременную снеговую и ветровую нагрузки.

Процедуры сбора нагрузок на каркас условно не показаны.

Сочетания нагрузок

Неблагоприятные усилия в конструкции определялись из расчёта при различных комбинациях расчётных значений нагрузок: G – собственный вес конструкций; P – технологическая нагрузка; S – снеговые нагрузки; W_s – ветровая статическая

нагрузка; W_f – ветровая статическая и динамическая нагрузка. Используемые значения коэффициентов сочетаний при одновременном воздействии всех указанных нагрузок на конструкцию представлены в Таблице П.4.2.

Таблица П.4.2 – Расчетные характеристики стали

№	Загружение	РСН и коэффициенты сочетаний										
		РСН1	РСН2	РСН3	РСН4	РСН5	РСН6	РСН7	РСН8	РСН9	РСН10	РСН11
1	G	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	P	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	S1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
4	S2	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0
5	Ws1	0	0	0.9	0.9	0	0	0	0	0	0	0
6	Ws2	0	0	0	0	0.9	0.9	0	0	0	0	0
7	Ws3	0	0	0	0	0	0	0.9	0.9	0	0	0
8	$W_f(W_{s1})$ (G+P+S1)	0	0	0	0	0	0	0	0	0.9	0	0
9	$W_f(W_{s1})$ (G+P+S2)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.9	0
10	$W_f(W_{s3})$ (G+P+S1)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.9

Расчётная модель и основные положения расчета

Расчет стального каркаса здания выполнен методом конечных элементов с использованием ПК Лира.

Для расчета каркаса здания принята оболочечно-стержневая модель конструкций (см. рис. П.4.3). Элементы каркаса: колонны, ригели, прогоны, связи моделировались стержневыми 3d КЭ. Карнизный узел стыковки балки ригеля и затяжки моделировался оболочечными КЭ. Соединение элементов связей, прогонов, стоек ригеля и раскосов принято по шарнирной схеме. Опирание колонн на фундаменты принято жесткозащемленным. Опирание ригеля на колонны принято шарнирным.

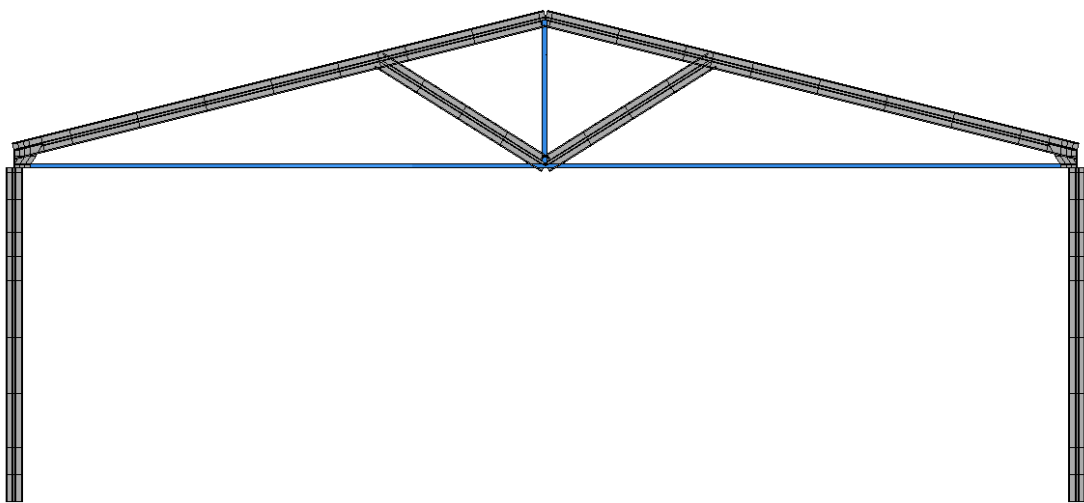
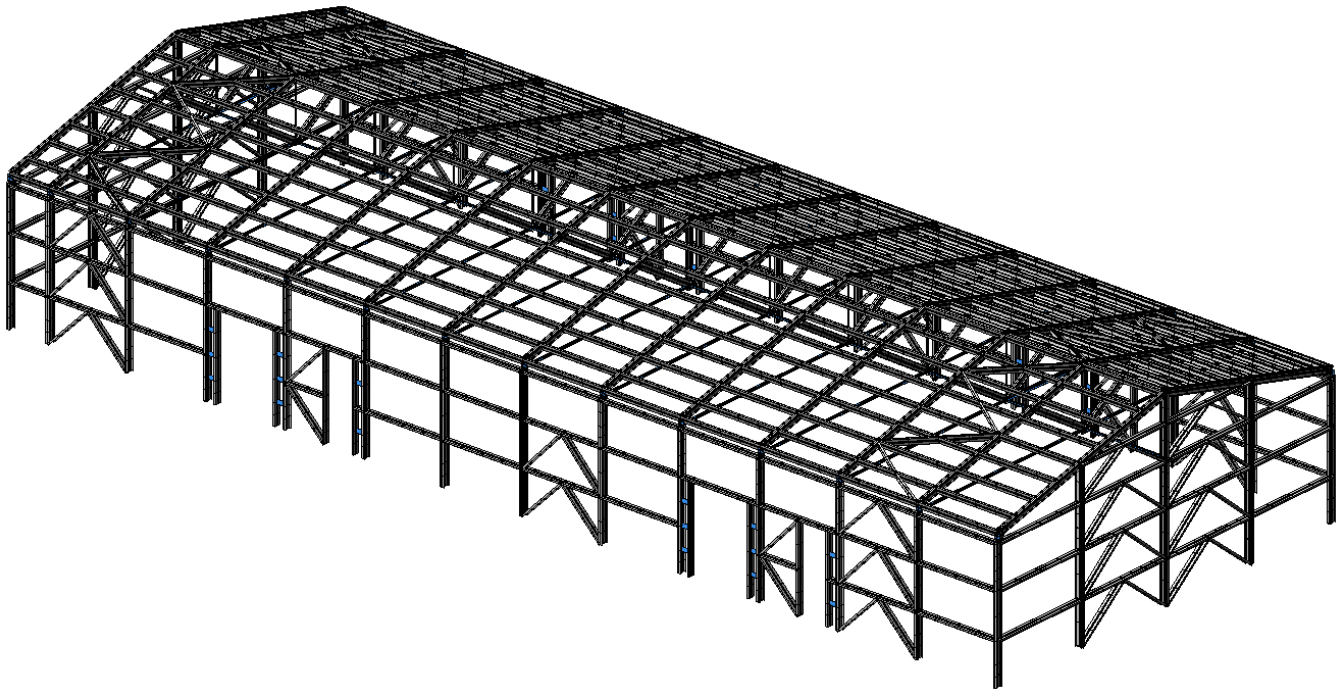


Рис. П.4.3 – Общий вид КЭ модели каркаса

Результаты расчета

В результате статического расчета получены усилия в элементах рамы каркаса здания. Графическое представление результатов расчёта по отдельным конструктивным элементам рамы каркаса здания приведено на рисунках П.4.4 – П.4.9.

РСН9(СП 20.13330.2016_1)
Эпюра N
Единицы измерения - кН

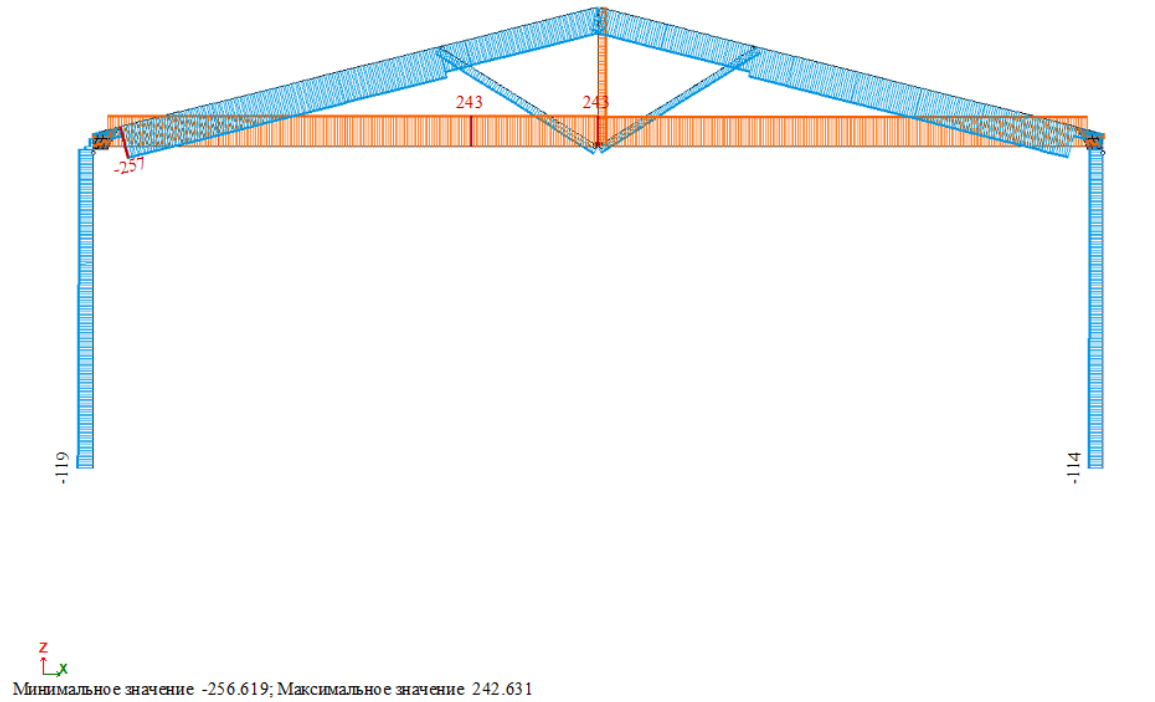


Рис. П.4.4 – Эпюра продольных сил N

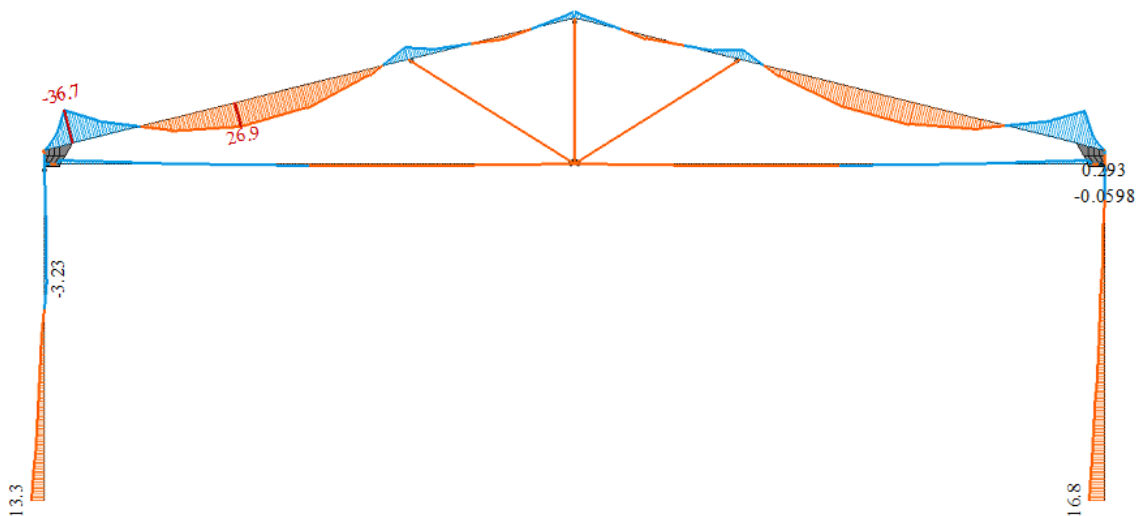
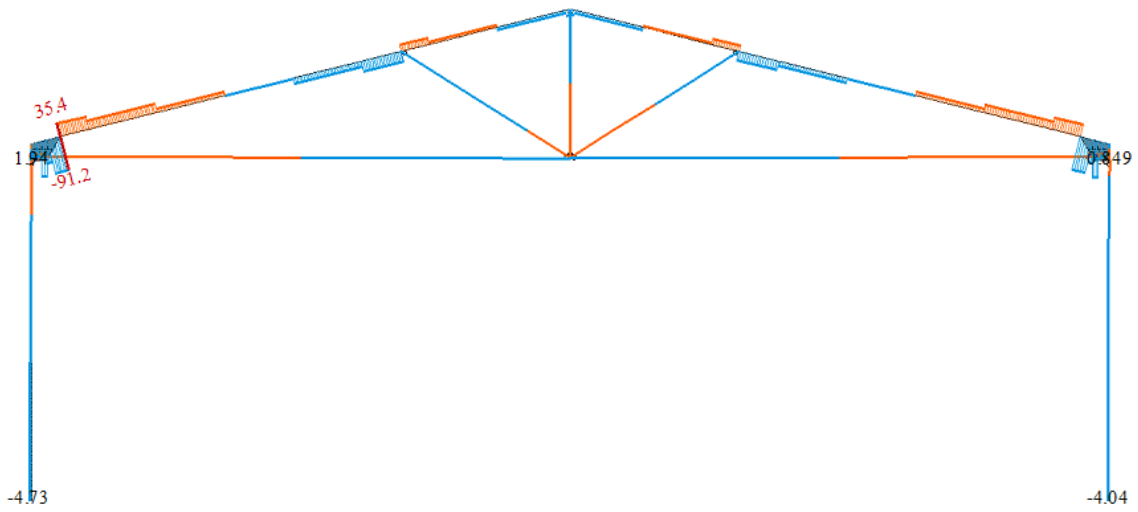


Рис. П.4.5 – Эпюра изгибающих моментов M_x

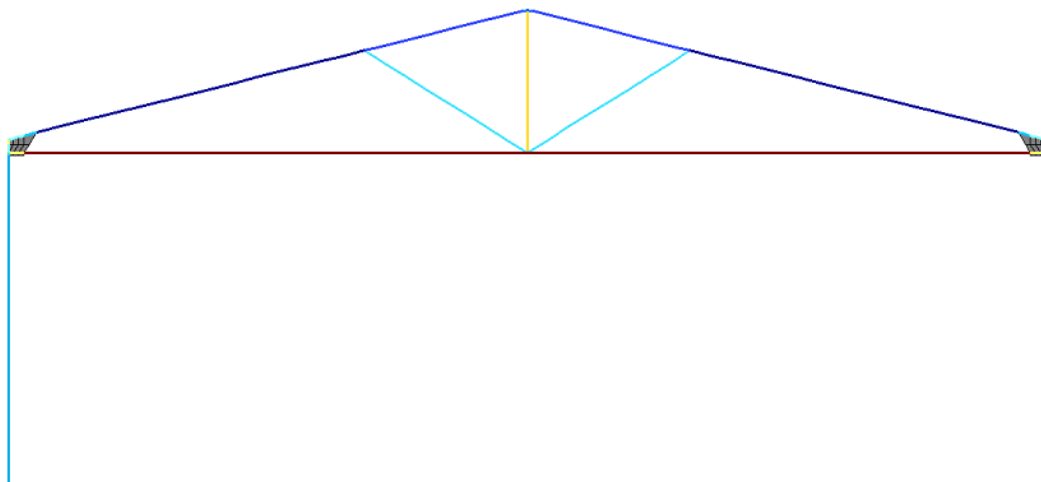
РСН9(СП 20.13330.2016_1)
 Эпюра Qz
 Единицы измерения - кН



z
 x
 Минимальное значение -91.1603; Максимальное значение 35.3681

Рис. П.4.6 – Эпюра поперечных сил Q

-257 -225 -192 -160 -128 -96.2 -64.2 -32.1 -2.43 2.43 32.1 64.2 96.2 128 160 192 225 243
 РСН9(СП 20.13330.2016_1)
 Мозаика N
 Единицы измерения - кН



z
 x

Рис. П.4.7 – Мозаика продольных сил N

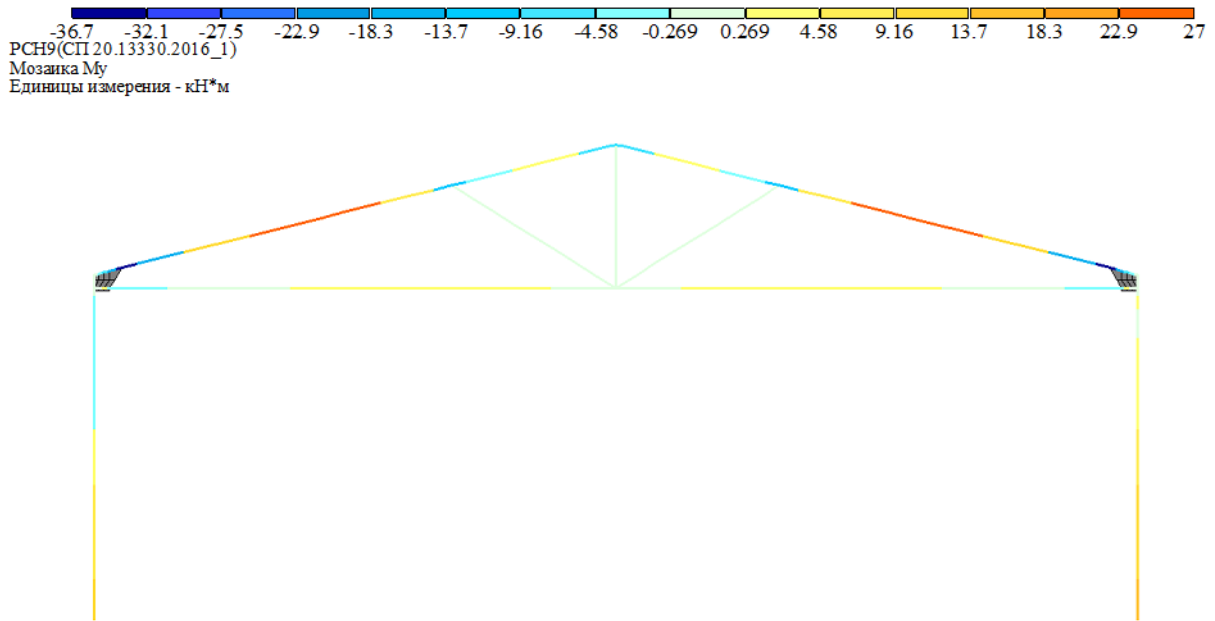


Рис. П.4.8 – Мозаика изгибающих моментов M_x

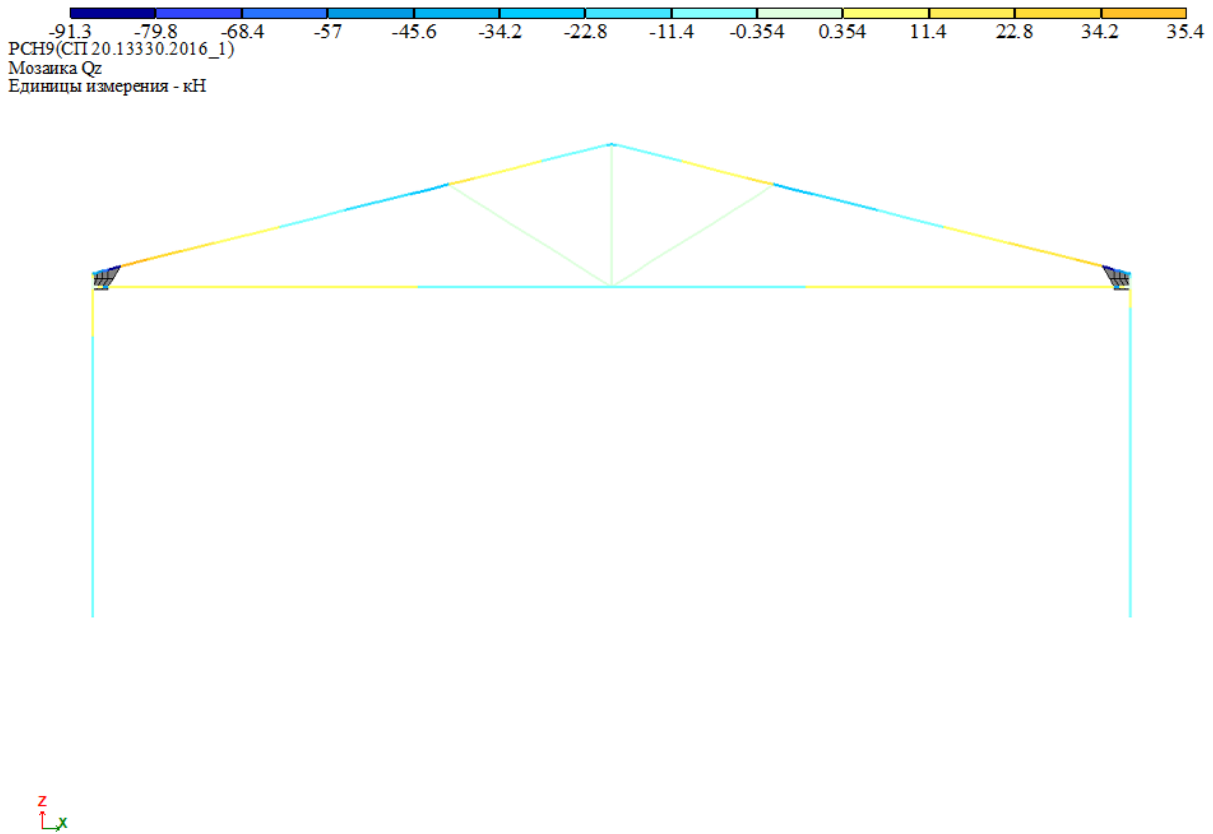


Рис. П.4.9 – Мозаика перерезывающих сил Q

Конструктивные расчеты колонны и ригеля рамы

Сечение колонны - 2 Сигма 300x100x2,0 - сталь С420 по ГОСТ Р 52246 [8].

Сечение балки ригеля - 2 Сигма 300x100x2,5 - сталь С420 по ГОСТ Р 52246 [8].

Коэффициенты μ для определения расчетной длины элементов рамы приняты в зависимости от условия закрепления концов и характера нагружения по СП 16.13330.

Коэффициент расчетной длины μ для колонны постоянного сечения с длиной 5,9 м в плоскости рамы при жестком закреплении основания колонн и шарнирном креплении ригелей к верхним концам колонн равен 2,0.

Из плоскости рамы концы колонн закреплены шарнирно. Колонны дополнительно шарнирно раскреплены из плоскости рамы ригелями стен, установленными с максимальным шагом 2,0 м по длине колонны. Коэффициент расчетной длины μ для колонны постоянного сечения из плоскости рамы при шарнирном закреплении расчетных участков равен 1,0.

Коэффициент расчетной длины μ для балки ригеля постоянного сечения равен 1,0 для расчетного участка балки ригеля от опорного узла до соединения с раскосом ригеля равной 6,9 м.

Из плоскости рамы балка ригеля шарнирно раскреплена прогонами покрытия, установленными с шагом 1,28 м по длине ригеля. Коэффициент расчетной длины μ для расчетного участка ригеля постоянного сечения из плоскости рамы при шарнирном закреплении принят равным 1,0.

Общие вывод по результатам расчетов колонны и ригеля рамы приведенным далее: несущая способность элементов рамы каркаса здания из стальных тонкостенных холодногнутых профилей в рассматриваемом конструктивном при возведении в районе строительства с нормативной снеговой нагрузкой 1,286 кПа и с нормативной ветровой нагрузкой 0,23 кПа обеспечена.

Расчет колонны рамы (сжато-изгибаемый элемент)

Параметры материала

Расчетное сопротивление растяжения/сжатию	$R_y := 400 \cdot \text{МПа}$
Модуль упругости	$E_s := 2.06 \cdot 10^5 \cdot \text{МПа}$
Модуль сдвига	$G_s := 7.9 \cdot 10^4 \cdot \text{МПа}$
Коэффициент условия работы	$\gamma_c := 0.95$

Характеристики элемента

Длина элемента	$L := 5.9 \cdot \text{м}$
Расчетная длина относительно оси X	$l_{\text{ef},x} := 2 \cdot L = 11.8 \cdot \text{м}$
Расчетная длина относительно оси Y	$l_{\text{ef},y} := 2.0 \cdot \text{м}$
Расчетная длина при потере устойчивости плоской формы изгиба	$l_{LT} := 2.0 \cdot \text{м}$
Расчетная длина при потере устойчивости по крутильной форме	$l_T := 2.0 \cdot \text{м}$

Характеристики сечения

Сечение - 2 Сигма 300x100x2

Высота сечения	$H_s := 300 \cdot \text{мм}$
Толщина стенки	$t_w := 2 \cdot \text{мм}$
Площадь полная	$A_{\text{full}} := 22.1 \cdot \text{см}^2$
Площадь редуцированная	$A_{\text{red}} := 17.02 \cdot \text{см}^2$
Момент инерции X	$I_x := 2972.23 \cdot \text{см}^4$
	$I_{x,\text{red}} := 2601.5 \cdot \text{см}^4$
Момент инерции Y	$I_y := 513.2 \cdot \text{см}^4$
	$I_{y,\text{red}} := 399.99 \cdot \text{см}^4$
Момент инерции при кручении	$I_t := 0.2947 \cdot \text{см}^4$
Секториальный момент инерции	$I_w := 53143.0 \cdot \text{см}^6$
Привязка центра сечения	$r_{xt} := 150 \cdot \text{мм}$
	$r_{xt,\text{red}} := 162.0 \cdot \text{мм}$
Привязка центра сечения	$r_{yl} := 103 \cdot \text{мм}$
	$r_{yl,\text{red}} := 108.2 \cdot \text{мм}$
Смещение центральной оси x-x	$e_{N,x} := 0$
	$e_{N,y} := 0$

Момент сопротивления

$$W_x := \frac{I_x}{r_{xt}} = 198.149 \cdot \text{см}^3 \quad W_y := \frac{I_y}{r_{yl}} = 49.825 \cdot \text{см}^3$$

$$W_{x,\text{red}} := \frac{I_{x,\text{red}}}{r_{xt,\text{red}}} = 160.586 \cdot \text{см}^3 \quad W_{y,\text{red}} := \frac{I_{y,\text{red}}}{r_{yl,\text{red}}} = 36.968 \cdot \text{см}^3$$

Характеристики ребра стенки

Радиус инерции

$$i_x := \sqrt{\frac{I_x}{A_{\text{full}}}} = 11.597 \cdot \text{см} \quad i_y := \sqrt{\frac{I_y}{A_{\text{full}}}} = 4.819 \cdot \text{см}$$

$$i_{s,r} := 0.5787 \cdot \text{см}^4$$

$$s_d := 31.551 \cdot \text{см}$$

Усилия в расчетном сечении

Продольная сила $N := 114.92 \cdot \text{кН}$

Изгибающий момент и поперечная сила

$Q_y := 4.04 \cdot \text{кН}$ $M_x := 16.79 \cdot \text{кН} \cdot \text{м}$

$Q_x := 0 \cdot \text{кН}$ $M_y := 0 \cdot \text{кН} \cdot \text{м}$

Расчет на прочностьНесущая способность поперечного сечения от действия поперечной силы

Расчетная высота стенки $h_w := H_s - 2 \cdot t_w = 0.296 \text{ м}$

Условная гибкость стенки

$$k_t := 5.34 + \frac{2.1}{t_w} \cdot \sqrt[3]{\frac{I_{s,r}}{s_d}} = 8.109 \quad \lambda'_w := \max \left(0.346 \cdot \frac{s_d}{t_w} \cdot \sqrt{\frac{5.34 \cdot R_y}{k_t \cdot E_s}}, 0.346 \cdot \frac{h_w}{t_w} \cdot \sqrt{\frac{R_y}{E_s}} \right) = 2.256$$

Расчетное сопротивление при сдвиге

$$R_s := \begin{cases} 0.58 \cdot R_y & \text{if } \lambda'_w \leq 0.83 \\ \frac{0.48 \cdot R_y}{\lambda'_w} & \text{if } 0.83 < \lambda'_w < 1.4 \\ \frac{0.67 \cdot R_y}{\lambda'^2_w} & \text{if } \lambda'_w \geq 1.4 \end{cases} \quad R_s = 52.634 \cdot \text{МПа}$$

$$Q_w := 2 \cdot \gamma_c \cdot h_w \cdot t_w \cdot R_s = 59.203 \cdot \text{кН} \quad . > . \quad 2 \cdot Q_y = 8.08 \cdot \text{кН}$$

Прочность при совместном действии продольной силы и изгибающего момента

$$\sigma_s := \frac{N}{A_{\text{red}}} + \frac{M_x + N \cdot e_{N,x}}{W_{x,\text{red}}} + \frac{M_y + N \cdot e_{N,y}}{W_{y,\text{red}}} = 172.075 \cdot \text{МПа} \quad . < . \quad R_y = 400 \cdot \text{МПа}$$

$$\Delta_\sigma := \frac{R_y - \sigma_s}{R_y} \cdot 100 = 56.981 \quad \%$$

Расчет на устойчивость

Гибкость

$$\lambda_x := \frac{l_{\text{ef},x}}{i_x} = 101.751$$

$$\lambda_y := \frac{l_{\text{ef},y}}{i_y} = 41.503$$

Условная гибкость

$$\lambda'_x := \lambda_x \cdot \sqrt{\frac{R_y \cdot A_{\text{red}}}{E_s \cdot A_{\text{full}}}} = 3.935$$

$$\lambda'_y := \lambda_y \cdot \sqrt{\frac{R_y \cdot A_{\text{red}}}{E_s \cdot A_{\text{full}}}} = 1.605$$

Определение понижающих коэффициентов при плоской форме потери устойчивости относительно оси X

Коэффициенты $\alpha_{t1} := 0.03$ $\beta_{t1} := 0.06$

$$\delta_x := \pi^2 \cdot (1 - \alpha_{t1} + \beta_{t1} \cdot \lambda'_x) + \lambda'^2_x = 27.386$$

$$\varphi_x := \frac{0.5 \cdot \left(\delta_x - \sqrt{\delta_x^2 - 39.48 \cdot \lambda'^2_x} \right)}{\lambda'^2_x} = 0.504$$

Относительно оси Y

$$\text{Коэффициенты} \quad \alpha_{t2} := 0.04 \quad \beta_{t2} := 0.09$$

$$\delta_y := \pi^2 \cdot (1 - \alpha_{t2} + \beta_{t2} \cdot \lambda'_y) + \lambda'_y{}^2 = 13.476$$

$$\varphi_y := \frac{0.5 \cdot (\delta_y - \sqrt{\delta_y^2 - 39.48 \cdot \lambda'_y{}^2})}{\lambda'_y{}^2} = 0.881$$

Критический момент потери устойчивости плоской формы изгиба

Коэффициенты зависящие от формы приложения нагрузки и условий закреплений на опорах

$$\text{Деформации на опорах ограничены} \quad k_y := 0.7 \quad k_w := 0.7$$

$$\text{Эшора моментов} \quad \psi := 0.575$$

$$\text{Коэффициенты} \quad C_1 := 1.293 \quad C_2 := 0 \quad C_3 := 1$$

$$\text{Координата приложения нагрузки} \quad y_g := \frac{H_s}{2} = 150 \cdot \text{мм}$$

$$\text{Степень асимметрии сечения} \quad y_j := 0$$

$$M_{cr} := C_1 \cdot \frac{\pi^2 \cdot E_s \cdot I_y}{(k_y \cdot l_{LT})^2} \cdot \left[\sqrt{\left(\frac{k_y}{k_w} \right)^2 \cdot \frac{I_w}{I_y} + \frac{(k_y \cdot l_{LT})^2 \cdot G_s \cdot I_t}{\pi^2 \cdot E_s \cdot I_y}} + (C_2 \cdot y_g - C_3 \cdot y_j)^2 - (C_2 \cdot y_g - C_3 \cdot y_j) \right] = 701.9 \cdot \text{кН} \cdot \text{м}$$

Условная гибкость при потере устойчивости плоской формы изгиба

$$\lambda'_{LT} := \sqrt{\frac{W_{x,red} \cdot R_y}{M_{cr}}} = 0.303$$

$$\text{Коэффициент учитывающий начальные несовершенства} \quad \alpha_{LT} := 0.34$$

$$\Phi_{LT} := 0.5 \left[1 + \alpha_{LT} \cdot (\lambda'_{LT} - 0.2) + \lambda'_{LT}{}^2 \right] = 0.563$$

$$X_{LT,0} := \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \lambda'_{LT}{}^2}} = 0.963$$

$$X_{LT} := \min(X_{LT,0}, 1) = 0.963$$

Критическая сила при крутильной форме потери устойчивости в упругой стадии

$$i_0 := \sqrt{i_x^2 + i_y^2} = 125.583 \cdot \text{мм}$$

$$N_{cr,T} := \frac{1}{i_0^2} \cdot \left(G_s \cdot I_t + \frac{\pi^2 \cdot E_s \cdot I_w}{I_T^2} \right) = 1.727 \times 10^3 \cdot \text{кН}$$

Условная гибкость при крутильной форме потери устойчивости

$$\lambda'_T := \sqrt{\frac{A_{red} \cdot R_y}{N_{cr,T}}} = 0.628$$

$$\text{Коэффициенты} \quad \alpha_{t1} = 0.03 \quad \beta_{t1} = 0.06$$

$$\delta_{x2} := \pi^2 \cdot (1 - \alpha_{t1} + \beta_{t1} \cdot \pi \cdot \lambda'_T) + (\pi \cdot \lambda'_T)^2 = 14.631$$

$$\varphi_{x2} := \frac{0.5 \cdot [\delta_{x2} - \sqrt{\delta_{x2}^2 - 39.48 \cdot (\pi \cdot \lambda'_T)^2}]}{(\pi \cdot \lambda'_T)^2} = 0.881$$

Устойчивость элемента по упрощенной методике

$$\left(\frac{N}{\varphi_X \cdot A_{\text{red}} \cdot R_y} \right)^{0.8} + \left(\frac{M_X}{X_{LT} \cdot W_{x,\text{red}} \cdot R_y} \right)^{0.8} = 0.769 \quad .<1$$

Устойчивость элемента по уточненной методике

Критические силы потери устойчивости относительно осей X и Y

$$N_{\text{cr},x} := \frac{\pi^2 \cdot E_s \cdot I_x}{l_{\text{ef},x}^2} = 433.996 \cdot \text{кН} \quad N_{\text{cr},y} := \frac{\pi^2 \cdot E_s \cdot I_y}{l_{\text{ef},y}^2} = 2608.517 \cdot \text{кН}$$

Вычисляем коэффициенты взаимодействия

$$\mu_x := \frac{1 - \frac{N}{N_{\text{cr},x}}}{1 - \varphi_x \cdot \frac{N}{N_{\text{cr},x}}} = 0.848 \quad \mu_y := \frac{1 - \frac{N}{N_{\text{cr},y}}}{1 - \varphi_y \cdot \frac{N}{N_{\text{cr},y}}} = 0.995$$

$$C_{\text{mx},0} := 0.79 + 0.21 \cdot \psi + 0.36 \cdot (\psi - 0.33) \cdot \frac{N}{N_{\text{cr},x}} = 0.934$$

$$\varepsilon_x := \frac{M_x}{N} \cdot \frac{A_{\text{red}}}{W_{x,\text{red}}} = 1.548 \quad C_{\text{my},0} := 0.79 + 0.21 \cdot \psi + 0.36 \cdot (\psi - 0.33) \cdot \frac{N}{N_{\text{cr},y}} = 0.915$$

$$\alpha_{\text{LT},0} := 1 - \frac{I_t}{I_x} = 1$$

$$C_{\text{mx}} := C_{\text{mx},0} + (1 - C_{\text{mx},0}) \cdot \frac{\sqrt{\varepsilon_x} \cdot \alpha_{\text{LT},0}}{1 + \sqrt{\varepsilon_x} \cdot \alpha_{\text{LT},0}} = 0.971 \quad C_{\text{my}} := C_{\text{my},0} = 0.915$$

$$C_{\text{m,LT}} := C_{\text{mx}} \cdot \frac{\alpha_{\text{LT},0}}{\sqrt{\left(1 - \frac{N}{N_{\text{cr},y}}\right) \cdot \left(1 - \frac{N}{N_{\text{cr},T}}\right)}} = 0.997$$

$$k_{\text{xx}} := C_{\text{mx}} \cdot C_{\text{m,LT}} \cdot \frac{\mu_x}{1 - \frac{N}{N_{\text{cr},x}}} = 1.117 \quad k_{\text{xy}} := C_{\text{my}} \cdot \frac{\mu_x}{1 - \frac{N}{N_{\text{cr},y}}} = 0.812$$

$$k_{\text{yx}} := C_{\text{mx}} \cdot C_{\text{m,LT}} \cdot \frac{\mu_y}{1 - \frac{N}{N_{\text{cr},x}}} = 1.309 \quad k_{\text{yy}} := C_{\text{my}} \cdot \frac{\mu_y}{1 - \frac{N}{N_{\text{cr},y}}} = 0.952$$

Прочность при совместном действии продольной силы и изгибающего момента

$$\sigma'_{s1} := \frac{N}{\varphi_X \cdot A_{\text{red}} \cdot R_y} + k_{\text{xx}} \cdot \frac{M_X + N \cdot e_{N,x}}{X_{LT} \cdot W_{x,\text{red}} \cdot R_y} + k_{\text{xy}} \cdot \frac{M_y + N \cdot e_{N,y}}{W_{y,\text{red}} \cdot R_y} = 0.638 \quad .<1$$

$$\sigma'_{s2} := \frac{N}{\varphi_y \cdot A_{\text{red}} \cdot R_y} + k_{\text{yx}} \cdot \frac{M_X + N \cdot e_{N,x}}{X_{LT} \cdot W_{x,\text{red}} \cdot R_y} + k_{\text{yy}} \cdot \frac{M_y + N \cdot e_{N,y}}{W_{y,\text{red}} \cdot R_y} = 0.547 \quad .<1$$

$$\Delta_{\text{NM},1} := \frac{1 - \sigma'_{s1}}{1} \cdot 100 = 36.195 \quad \%$$

$$\Delta_{\text{NM},2} := \frac{1 - \sigma'_{s2}}{1} \cdot 100 = 45.298 \quad \%$$

Расчет ригеля рамы (расчет сжато-изгибаемого элемента)

Параметры материала

Расчетное сопротивление растяжения/сжатию	$R_y := 400 \cdot \text{МПа}$
Модуль упругости	$E_s := 2.06 \cdot 10^5 \cdot \text{МПа}$
Модуль сдвига	$G_s := 7.9 \cdot 10^4 \cdot \text{МПа}$
Коэффициент условия работы	$\gamma_c := 0.95$

Характеристики элемента

Длина элемента	$l_{\text{ww}} := 10.15 \cdot \text{м}$
Расчетная длина относительно оси X	$l_{\text{ef.x}} := 6.9 \cdot \text{м}$
Расчетная длина относительно оси Y	$l_{\text{ef.y}} := 1.28 \cdot \text{м}$
Расчетная длина при потере устойчивости плоской формы изгиба	$l_{LT} := 1.28 \cdot \text{м}$
Расчетная длина при потере устойчивости по крутильной форме	$l_T := 1.28 \cdot \text{м}$

Характеристики сечения

Сечение - 2 Сигма 300x100x2.5

Высота сечения	$H_s := 300 \cdot \text{мм}$
Толщина стенки	$t_w := 2.5 \cdot \text{мм}$
Площадь полная	$A_{\text{full}} := 27.46 \cdot \text{см}^2$
Площадь редуцированная	$A_{\text{red}} := 22.4 \cdot \text{см}^2$
Момент инерции X	$I_x := 3662.6 \cdot \text{см}^4$
Момент инерции Y	$I_y := 634.74 \cdot \text{см}^4$
Момент инерции при кручении	$I_t := 0.5723 \cdot \text{см}^4$
Секториальный момент инерции	$I_w := 64623 \cdot \text{см}^6$
Привязка центра сечения	$r_{xt} := 150 \cdot \text{мм}$
Привязка центра сечения	$r_{xt_{\text{red}}} := 160 \cdot \text{мм}$
Смещение центральной оси x-x	$r_{yl} := 103 \cdot \text{мм}$
	$r_{yl_{\text{red}}} := 109 \cdot \text{мм}$
	$e_{N.x} := 0$
	$e_{N.y} := 0$

Момент сопротивления

$$W_x := \frac{I_x}{r_{xt}} = 244.173 \cdot \text{см}^3 \quad W_y := \frac{I_y}{r_{yl}} = 61.625 \cdot \text{см}^3$$

$$W_{x,\text{red}} := \frac{I_{x,\text{red}}}{r_{xt_{\text{red}}}} = 204.337 \cdot \text{см}^3 \quad W_{y,\text{red}} := \frac{I_{y,\text{red}}}{r_{yl_{\text{red}}}} = 44.851 \cdot \text{см}^3$$

Радиус инерции

$$i_x := \sqrt{\frac{I_x}{A_{\text{full}}}} = 11.549 \cdot \text{см} \quad i_y := \sqrt{\frac{I_y}{A_{\text{full}}}} = 4.808 \cdot \text{см}$$

Характеристики ребра стенки

$$I_{s,r} := 0.715 \cdot \text{см}^4$$

$$s_d := 31.551 \cdot \text{см}$$

Усилия в расчетном сечении

Продольная сила $N_{ww} := 276 \cdot \text{кН}$
 Изгибающий момент и поперечная сила
 $Q_y := 39.7 \cdot \text{кН}$ $M_x := 38.4 \cdot \text{кН} \cdot \text{м}$
 $Q_x := 0 \cdot \text{кН}$ $M_y := 0 \cdot \text{кН} \cdot \text{м}$

Расчет на прочность

Несущая способность поперечного сечения от действия поперечной силы

Расчетная высота стенки $h_w := H_s - 2 \cdot t_w = 0.295 \text{ м}$

Условная гибкость стенки

$$k_t := 5.34 + \frac{2.1}{t_w} \cdot \sqrt[3]{\frac{I_{s,r}}{s_d}} = 7.717$$

$$\lambda'_w := \max \left(0.346 \cdot \frac{s_d}{t_w} \cdot \sqrt{\frac{5.34 \cdot R_y}{k_t \cdot E_s}}, 0.346 \cdot \frac{h_w}{t_w} \cdot \sqrt{\frac{R_y}{E_s}} \right) = 1.799$$

Расчетное сопротивление при сдвиге

$$R_s := \begin{cases} 0.58 \cdot R_y & \text{if } \lambda'_w \leq 0.83 \\ \frac{0.48 \cdot R_y}{\lambda'_w} & \text{if } 0.83 < \lambda'_w < 1.4 \\ \frac{0.67 \cdot R_y}{\lambda'^2_w} & \text{if } \lambda'_w \geq 1.4 \end{cases} \quad R_s = 82.799 \cdot \text{МПа}$$

$Q_w := 2 \cdot \gamma_c \cdot h_w \cdot t_w \cdot R_s = 116.022 \cdot \text{кН} > . \quad 2 \cdot Q_y = 79.4 \cdot \text{кН}$

Прочность при совместном действии продольной силы и изгибающего момента

$$\sigma_s := \frac{N}{A_{red}} + \frac{M_x + N \cdot e_{N,x}}{W_{x,red}} + \frac{M_y + N \cdot e_{N,y}}{W_{y,red}} = 311.139 \cdot \text{МПа} < . \quad R_y = 400 \cdot \text{МПа}$$

$$\Delta_\sigma := \frac{R_y - \sigma_s}{R_y} \cdot 100 = 22.215 \quad \%$$

Расчет на устойчивость

Гибкость

$$\lambda_x := \frac{l_{ef,x}}{i_x} = 59.745$$

$$\lambda_y := \frac{l_{ef,y}}{i_y} = 26.623$$

Условная гибкость

$$\lambda'_x := \lambda_x \cdot \sqrt{\frac{R_y \cdot A_{red}}{E_s \cdot A_{full}}} = 2.378$$

$$\lambda'_y := \lambda_y \cdot \sqrt{\frac{R_y \cdot A_{red}}{E_s \cdot A_{full}}} = 1.06$$

Определение понижающих коэффициентов при плоской форме потери устойчивости относительно оси X

Коэффициенты $\alpha_{t1} := 0.03 \quad \beta_{t1} := 0.06$

$$\delta_x := \pi^2 \cdot (1 - \alpha_{t1} + \beta_{t1} \cdot \lambda'_x) + \lambda'^2_x = 16.636$$

$$\varphi_x := \frac{0.5 \cdot \left(\delta_x - \sqrt{\delta_x^2 - 39.48 \cdot \lambda'^2_x} \right)}{\lambda'^2_x} = 0.824$$

Относительно оси Y

Коэффициенты $\alpha_{t2} := 0.04$ $\beta_{t2} := 0.09$

$$\delta_y := \pi^2 \cdot (1 - \alpha_{t2} + \beta_{t2} \cdot \lambda'_y) + \lambda'_y{}^2 = 11.539$$

$$\varphi_y := \frac{0.5 \cdot \left(\delta_y - \sqrt{\delta_y^2 - 39.48 \cdot \lambda'_y{}^2} \right)}{\lambda'_y{}^2} = 0.942$$

Критический момент потери устойчивости плоской формы изгиба

Коэффициенты зависящие от формы приложения нагрузки и условий закреплений на опорах

Деформации на опорах ограничены $k_y := 0.7$ $k_w := 0.7$

Эпюра моментов $\psi := 0.438$

Коэффициенты $C_1 := 1.401$ $C_2 := 0$ $C_3 := 1$

Координата приложения нагрузки $y_g := \frac{H_s}{2} = 150 \text{ мм}$

Степень асимметрии сечения $y_j := 0$

$$M_{cr} := C_1 \cdot \frac{\pi^2 \cdot E_s \cdot I_y}{(k_y \cdot l_{LT})^2} \cdot \left[\sqrt{\left(\frac{k_y}{k_w} \right)^2 \cdot \frac{I_w}{I_y} + \frac{(k_y \cdot l_{LT})^2 \cdot G_s \cdot I_t}{\pi^2 \cdot E_s \cdot I_y} + (C_2 \cdot y_g - C_3 \cdot y_j)^2} - (C_2 \cdot y_g - C_3 \cdot y_j) \right] = 2275.5 \cdot \text{кН} \cdot \text{м}$$

Условная гибкость при потере устойчивости плоской формы изгиба

$$\lambda'_{LT} := \sqrt{\frac{W_{x,red} \cdot R_y}{M_{cr}}} = 0.19$$

Коэффициент учитывающий начальные несовершенства $\alpha_{LT} := 0.34$

$$\Phi_{LT} := 0.5 \cdot \left[1 + \alpha_{LT} \cdot (\lambda'_{LT} - 0.2) + \lambda'_{LT}{}^2 \right] = 0.516$$

$$X_{LT,0} := \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \lambda'_{LT}{}^2}} = 1.004$$

$$X_{LT} := \min(X_{LT,0}, 1) = 1$$

Критическая сила при крутильной форме потери устойчивости в упругой стадии

$$i_0 := \sqrt{i_x^2 + i_y^2} = 125.098 \text{ мм}$$

$$N_{cr,T} := \frac{1}{i_0^2} \cdot \left(G_s \cdot I_t + \frac{\pi^2 \cdot E_s \cdot I_w}{l_T^2} \right) = 5153.195 \text{ кН}$$

Условная гибкость при крутильной форме потери устойчивости

$$\lambda'_T := \sqrt{\frac{A_{red} \cdot R_y}{N_{cr,T}}} = 0.417$$

Коэффициенты $\alpha_{t1} = 0.03$ $\beta_{t1} = 0.06$

$$\delta_{x2} := \pi^2 \cdot (1 - \alpha_{t1} + \beta_{t1} \cdot \pi \cdot \lambda'_T) + (\pi \cdot \lambda'_T)^2 = 12.065$$

$$\varphi_{x2} := \frac{0.5 \cdot \left[\delta_{x2} - \sqrt{\delta_{x2}^2 - 39.48 \cdot (\pi \cdot \lambda'_T)^2} \right]}{(\pi \cdot \lambda'_T)^2} = 0.945$$

Устойчивость элемента по упрощенной методике

$$\left(\frac{N}{\varphi_x \cdot A_{red} \cdot R_y}\right)^{0.8} + \left(\frac{M_x}{X_{LT} \cdot W_{x,red} \cdot R_y}\right)^{0.8} = 1.001 > 1$$

Устойчивость элемента по уточненной методике

Критические силы потери устойчивости относительно осей X и Y

$$N_{cr,x} := \frac{\pi^2 \cdot E_s \cdot I_x}{l_{ef,x}^2} = 1.564 \times 10^3 \cdot \text{кН} \quad N_{cr,y} := \frac{\pi^2 \cdot E_s \cdot I_y}{l_{ef,y}^2} = 7876.674 \cdot \text{кН}$$

Вычисляем коэффициенты взаимодействия

$$\mu_x := \frac{1 - \frac{N}{N_{cr,x}}}{1 - \varphi_x \cdot \frac{N}{N_{cr,x}}} = 0.964 \quad \mu_y := \frac{1 - \frac{N}{N_{cr,y}}}{1 - \varphi_y \cdot \frac{N}{N_{cr,y}}} = 0.998$$

$$C_{mx,0} := 0.79 + 0.21 \cdot \psi + 0.36 \cdot (\psi - 0.33) \cdot \frac{N}{N_{cr,x}} = 0.889$$

$$\varepsilon_x := \frac{M_x}{N} \cdot \frac{A_{red}}{W_{x,red}} = 1.525 \quad C_{my,0} := 0.79 + 0.21 \cdot \psi + 0.36 \cdot (\psi - 0.33) \cdot \frac{N}{N_{cr,y}} = 0.883$$

$$\alpha_{LT,0} := 1 - \frac{l_t}{l_x} = 1$$

$$C_{mx} := C_{mx,0} + (1 - C_{mx,0}) \cdot \frac{\sqrt{\varepsilon_x \cdot \alpha_{LT,0}}}{1 + \sqrt{\varepsilon_x \cdot \alpha_{LT,0}}} = 0.95 \quad C_{my} := C_{my,0} = 0.883$$

$$C_{m,LT} := C_{mx}^2 \cdot \frac{\alpha_{LT,0}}{\sqrt{\left(1 - \frac{N}{N_{cr,y}}\right) \cdot \left(1 - \frac{N}{N_{cr,T}}\right)}} = 0.945$$

$$k_{xx} := C_{mx} \cdot C_{m,LT} \cdot \frac{\mu_x}{1 - \frac{N}{N_{cr,x}}} = 1.051 \quad k_{xy} := C_{my} \cdot \frac{\mu_x}{1 - \frac{N}{N_{cr,y}}} = 0.882$$

$$k_{yx} := C_{mx} \cdot C_{m,LT} \cdot \frac{\mu_y}{1 - \frac{N}{N_{cr,x}}} = 1.088 \quad k_{yy} := C_{my} \cdot \frac{\mu_y}{1 - \frac{N}{N_{cr,y}}} = 0.913$$

Прочность при совместном действии продольной силы и изгибающего момента

$$\sigma'_{s1} := \frac{N}{\varphi_x \cdot A_{red} \cdot R_y} + k_{xx} \cdot \frac{M_x + N \cdot e_{N,x}}{X_{LT} \cdot W_{x,red} \cdot R_y} + k_{xy} \cdot \frac{M_y + N \cdot e_{N,y}}{W_{y,red} \cdot R_y} = 0.867 < 1$$

$$\sigma'_{s2} := \frac{N}{\varphi_y \cdot A_{red} \cdot R_y} + k_{yx} \cdot \frac{M_x + N \cdot e_{N,x}}{X_{LT} \cdot W_{x,red} \cdot R_y} + k_{yy} \cdot \frac{M_y + N \cdot e_{N,y}}{W_{y,red} \cdot R_y} = 0.838 < 1$$

$$\Delta_{NM,1} := \frac{1 - \sigma'_{s1}}{1} \cdot 100 = 13.269 \quad \%$$

$$\Delta_{NM,2} := \frac{1 - \sigma'_{s2}}{1} \cdot 100 = 16.181 \quad \%$$

П.5. Расчет балки междуэтажного перекрытия здания детского сада из спаренных гнутых С – образных профилей

В примере показан расчет балки междуэтажного перекрытия здания детского сада из спаренных гнутых С – образных профилей. Оценка несущей способности балки междуэтажного перекрытия выполнен в соответствии с требованиями свода правил СП 260.1325800.2016 [1] и действующих нормативных документов [3, 4, 5, 14, 15, 16]. Расчетные усилия в сечениях балки междуэтажного перекрытия определены при сочетаниях нагрузок согласно СП 20.13330 [16].

Исходные данные

Здание детского сада двухэтажное с размерами в плане 31,0×61,6 м. Каркас здания в рассматриваемом примере выполнен из стальных тонкостенных холодно-гнутой профилей по ТУ 1122-001-18201124-2007 [21].

Материал профилей – оцинкованная сталь марки 08пс толщиной 2,5 мм по ГОСТ 14918 [22].

Соединения профилей каркаса выполняются на самонарезающих винтах диаметром 3,5 мм.

Балки перекрытий над 1-ым и 2-ым этажами выполнены из спаренных гнутых С-образных профилей высотой 250 мм, которые опираются на каркас стен. Максимальный пролет балок – 9,2 м.

Схема расположения балок перекрытия над 1-ым этажом приведен на рисунке П.5.1.

Пространство в пределах шага профилей стен заполнен пенобетоном марки D 300 между стекломагневыми листами, примененными в качестве оставляемой опалубки.

Нагрузки и воздействия на балки перекрытия

Нагрузки на несущие стальные конструкции перекрытий здания детского сада определены в таблице П.5.1 по СП 20.13330.2016.

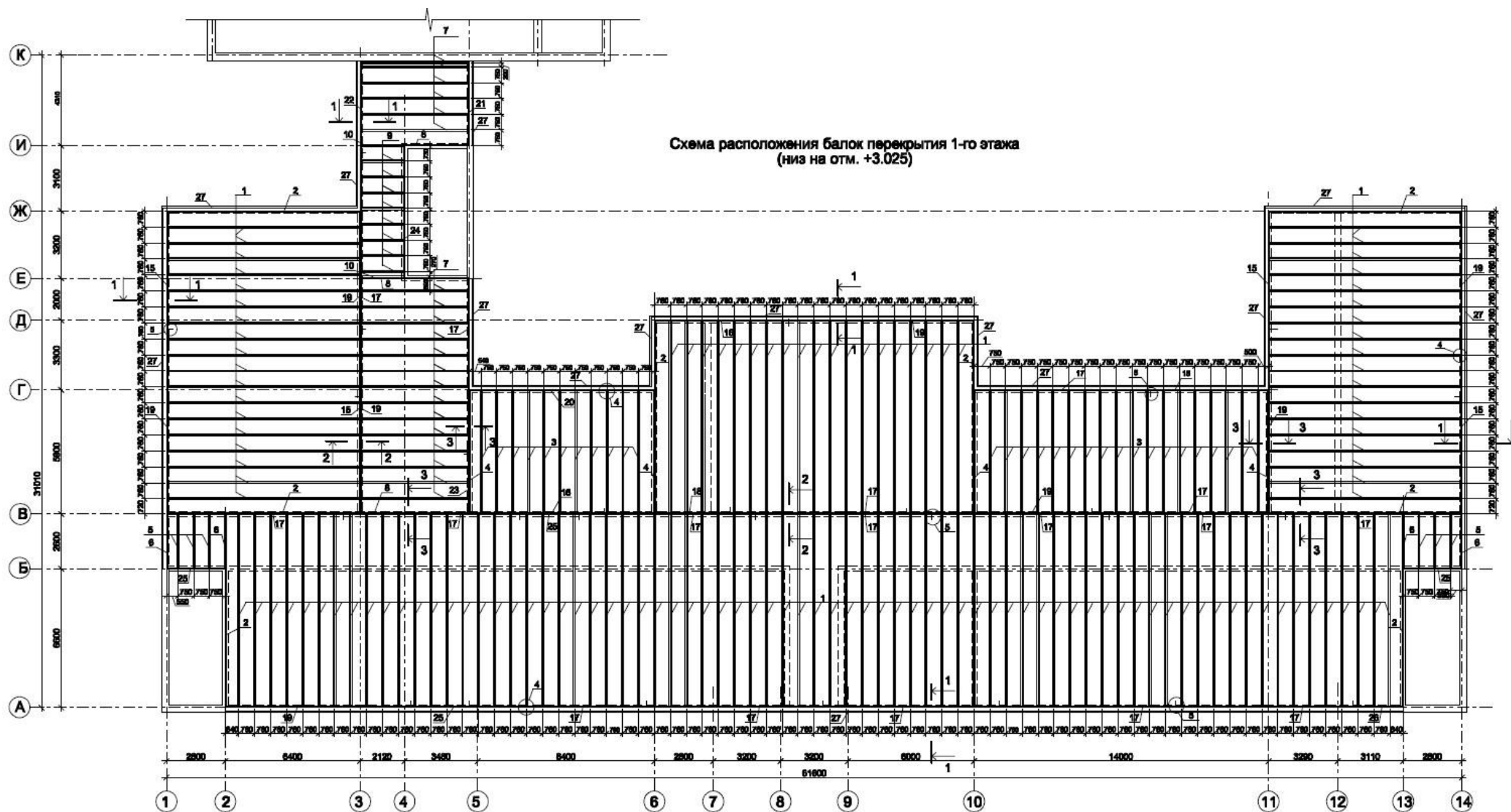


Рис. П.5.1 – План раскладки балок перекрытия над первым этажом

Таблица П.5.1 Нагрузки на несущие стальные конструкции перекрытий здания детского сада

Тип нагрузки	№ п/п	Наименование помещения Наименование нагрузки	Нормативная нагрузка, кгс/м ²	Коэффициент надежности по нагрузке	Расчетная нагрузка кгс/м ²
1	2	3	4	5	6
Групповые комнаты в осях 2-13					
Постоянная	1	Кварцвиниловая плитка t=3,2 мм	6,5	1,2	7,8
	2	ЦСП t=16 мм, γ=1400 кг/м ³	22,4	1,2	26,8
	3	2 ПС 250x50x2,5	19,4	1,05	20,3
	4	Пенобетон D300 t=250 мм, γ=300 кг/м ³	75	1,3	97,5
	5	Стекломагниевый лист, 2 слоя, t=24 мм, γ=850 кг/м ³	20,4	1,2	24,5
	6	Перегородки	50,0	1,3	65,0
		Итого	194,0		241,8
Временная			150,0	1,3	195,0
		Полная нагрузка	344,0		436,8
Коридор в осях 2-13					
Постоянная	1	Кварцвиниловая плитка t=3,2 мм	6,5	1,2	7,8
	2	ЦСП t=16 мм, γ=1400 кг/м ³	22,4	1,2	26,8
	3	2 ПС 250x50x2,5	19,4	1,05	20,3
	4	Пенобетон D300 t=250 мм, γ=300 кг/м ³	75,0	1,3	97,5
	5	Стекломагниевый лист, 2 слоя, t=24 мм, γ=850 кг/м ³	20,4	1,2	24,5
		Итого	144,0		177,0
Временная		Коридор (без перегородок)	300,0	1,2	360
		Полная нагрузка	344,0		537,0

Сравнительный расчет характеристик профилей, включенных в ТУ 1122-001-18201124-2007 [21], выполнялся по СП 260.1325800 [1], учитывающему редуцирование рабочего сечения профиля (Таблица П.5.2).

Таблица П.5.2 Сравнение расчетных характеристик профилей по ТУ 1122-001-18201124 и СП 260.1325800

Тип профиля	Сечение профиля Н/В, мм	Толщина металла, мм	Площадь сечения, см ²		I _x , см ⁴	W _x , см ³	I _y , см ⁴	W _y , см ³
			F _p	F _{сж}				
ПС 250-2,5	250 / 50	2,5	9,34 (9,25)	– (6,69)	774,15 (749,17)	61,43 (59,93)	24,63 (22,69)	6,09 (5,84)
Примечание: В скобках даны значения расчетных характеристик профилей, рассчитанных по СП 260.1325800								

Сравнение результатов показало, что значения моментов инерции и моментов сопротивления профилей в ТУ 1122-001-18201124-2007 завышены по сравнению с соответствующими значениями, рассчитанными по СП 260.1325800 [1], что приводит к ошибочному завышению расчетной несущей способности профилей в расчетах балок перекрытия.

Расчет балок перекрытия в осях 2-13 под групповыми комнатами по ряду А-Б с временными нагрузками 150 кг/м² и коридора по ряду Б-В с временными нагрузками 300 кг/м².

Балки перекрытия работают по неразрезной двух пролётной схеме с пролетами 6,6 и 2,6 м.

По проекту балки из спаренных профилей 2ПС 250×2,5, расположены с шагом 750 см.

Нагрузки на несущие стальные конструкции перекрытий равномерно распределенные по длине балки:

- расчетная постоянная нагрузка в групповых комнатах в осях 2-13:

$$q_{pn1} = 242 \times 0,75 = 182 \text{ кг/м}$$

- нормативная постоянная нагрузка в групповых комнатах в осях 2-13:

$$q_{np1} = 194 \times 0,75 = 145 \text{ кг/м}$$

- расчетная временная нагрузка в групповых комнатах в осях 2-13:

$$q_{pв1} = 195 \times 0,75 = 146 \text{ кг/м}$$

- нормативная временная нагрузка в групповых комнатах в осях 2-13:

$$q_{нв1} = 150 \times 0,75 = 113 \text{ кг/м}$$

- расчетная постоянная нагрузка в коридоре в осях 2-13:

$$q_{pп2} = 177 \times 0,75 = 133 \text{ кг/м}$$

- нормативная постоянная нагрузка в коридоре в осях 2-13:

$$q_{нп2} = 144 \times 0,75 = 108 \text{ кг/м}$$

- расчетная временная нагрузка в коридоре в осях 2-13:

$$q_{pв2} = 360 \times 0,75 = 270 \text{ кг/м}$$

- нормативная временная нагрузка в коридоре в осях 2-13:

$$q_{нв2} = 300 \times 0,75 = 225 \text{ кг/м}$$

Для определения РСУ были составлены следующие загрузки:

- Загрузка 1 (постоянная нагрузка):



- Загрузка 2 (временная нагрузка по схеме 1):



- Загрузка 3 (временная нагрузка по схеме 2):



- Загрузка 4 (временная нагрузка по схеме 3):



При расчете принималось, что балки свободно опираются на стены и раскреплены из плоскости пенобетоном.

Результаты усилий и прогиба неразрезной балки при различных сочетаниях нагрузок в пролетах приводятся в таблице П.5.3.

Таблица П.5.3 Усилия в сечениях балок перекрытий

№ Элемента	№ Сечения	Усилия		№ Загружения
		Мх кН*м	Qy кН	
2	2	11,225	-1,906	1 3
2	2	10,917	-1,999	1 2
3	1	11,225	-1,906	1 3
3	1	10,917	-1,999	1 2
4	2	-13,195	-12,614	1 2
5	1	-13,195	10,213	1 2
6	1	-8,607	5,685	1 3
6	1	-7,392	7,644	1 2
<p>Опорные реакции: Q_A= -8.709 кН (левая опора, ось А); Q_Б= -22.827 кН (средняя опора, ось Б); Q_В= 3,142 кН (правая опора, ось В);</p> <p>Прогиб: f_{max}= 12,4 мм (в осях А-Б) f_{max}= 1,14 мм (в осях Б-В)</p>				

Процедуры определения несущей способности изгибаемого элемента из гнутого профиля с учетом местной устойчивости стенки при сосредоточенной нагрузке показаны на блок-схеме, приведенной на рисунке 36.

Расчет на прочность изгибаемого элемента выполняем по п. 7.7.3.1 СП 260.1325800.2016:

$$\sigma_x = \frac{M_x y}{I_{xn,red}} = \frac{13195 \cdot 12.5}{1498.34} = 110,08 \text{ МПа} < R_y = 233 \text{ МПа}$$

Профиль проходит по прочности.

Проверяем местную устойчивость стенок спаренных профилей неразрезной балки на средней опоре.

Несущая способность стенки балки на средней опоре при местном поперечном воздействии $Q_{w,F}$ определяется по формуле 7.108 [1]:

$$Q_{w,F} = \gamma_c \cdot C \cdot t^2 \cdot R_y \left(1 - C_r \sqrt{\frac{r}{t}} \right) \left(1 + C_b \cdot \sqrt{\frac{b_o}{t}} \right) \left(1 - C_h \cdot \sqrt{\frac{h}{t}} \right),$$

где C, C_r, C_b, C_h – коэффициенты по таблице 7.9 СП 260.1325800.2016;

$C = 13$ - коэффициент по таблице 7.9 [1];

$C_r = 0,23$ - коэффициент, зависящий от радиусагиба профиля;

$C_b = 0,14$ - коэффициент, зависящий от ширины опоры $b_o \geq 20$ мм;

$C_h = 0,01$ - коэффициент, зависящий от гибкости стенки $h = 250$ мм;

$t = 5$ мм - толщина стенки балки, равная удвоенной толщине профиля;

$R_y = R_{yn}/\gamma_m = 250/1,05 = 2380$ кгс/см² – расчетное сопротивление стали профилей

$$\begin{aligned} Q_{w,F} &= 0,8 \cdot 13 \cdot 5^2 \cdot 23,8 \left(1 - 23 \sqrt{\frac{5}{5}} \right) \left(1 + 0,14 \sqrt{\frac{40}{5}} \right) \left(1 - 0,01 \sqrt{\frac{250}{5}} \right) \\ &= 6160 \text{ кгс} = 60,43 \text{ кН} \end{aligned}$$

В связи с тем, что $Q_{w,F} > Q_B = -22,83$ кН, местная устойчивость стенки балки на опоре обеспечена.

Вертикальный прогиб неразрезной двухпролетной балки от постоянных и временных нагрузок:

- в групповых комнатах (в осях А-Б)

$$f_{v,max} = 12,4 \text{ мм} = \frac{1}{528} < f_{v,u} = \frac{1}{205}$$

- в коридоре (в осях Б-В)

$$f_{v,max} = 1,14 \text{ мм} = \frac{1}{2280} < f_{v,u} = \frac{1}{144}$$

Условие выполняется.

Предельный прогиб балок из профилей 2ПС 250×2,5 в групповых комнатах исходя из физиологических требований, определяется по СП 20.13330 по формуле:

$$f_u = \frac{g(p + p_1 + q)}{30n^2(bp + p_1 + q)} = \frac{9,81(0,25 + 0,525 + 1,93)}{30 \cdot 1,5^2(100,5 \cdot 0,25 + 0,525 + 1,93)} = 14,25 \text{ мм}$$

где $g = 9,81 \text{ м/сек}^2$;

$p = 0,25 \text{ кПа}$ – нормативное значение нагрузки от людей возбуждающих колебания по табл. Е2 СП 20.13330;

$p_1 = 0,525 \text{ кПа}$ – пониженная нагрузка на перекрытие по табл. Е2;

$n = 1,5 \text{ Гц}$ – частота приложения нагрузки при ходьбе человека;

$q = 1,93 \text{ кПа}$ – нормативная нагрузка от собственного веса конструкций;

$b = 125 \sqrt{\frac{q}{\alpha \cdot p \cdot a \cdot l}} = 125 \sqrt{\frac{0,8}{1 \cdot 0,25 \cdot 0,75 \cdot 6,6}} = 100,5$ – коэффициент, по табл. Е2;

$\alpha = 1$ – коэффициент, принимаемый по табл. Е2 СП 20.13330;

$a = 0,75 \text{ м}$ – шаг балок;

$l = 6,6 \text{ м}$ – расчетный пролет балки;

В коридоре:

$$f_u = \frac{g(p + p_1 + q)}{30n^2(bp + p_1 + q)} = \frac{9,81(0,5 + 1,05 + 1,44)}{30 \cdot 1,5^2(113,2 \cdot 0,5 + 1,05 + 1,44)} = 7,4 \text{ мм}$$

Прогиб балки, исходя из физиологических требований, следует определять от суммы пониженных нагрузок $\varphi_1 p + p_1 + q$, где $\varphi_1 = 0,63$ – по СП 20.13330, п. 8.2.4;

Нагрузка в групповых комнатах:

$$\varphi_1 p + p_1 + q = 0,63 \cdot 0,25 + 0,525 + 1,94 = 2,6 \text{ кН/м}$$

Нагрузка в коридоре:

$$\varphi_1 p + p_1 + q = 0,74 \cdot 0,5 + 1,05 + 1,44 = 2,86 \text{ кН/м}$$

Прогиб балки в групповых комнатах (в осях А-Б):

$$f_{f,max} = 12,9 \text{ мм} = \frac{1}{512} < f_u = 14,25 = \frac{1}{463}$$

Прогиб балки в коридоре (в осях Б-В):

$$f_{f,max} = 0,6 \text{ мм} = \frac{1}{4333} < f_u = 7,4 = \frac{1}{351}$$

Условие выполняется, прогиб балки исходя из физиологических требований не превышает предельную величину по СП 20.13330.