

Министерство образования Республики Беларусь  
БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

---

Кафедра «Металлические и деревянные конструкции»

**РАСЧЕТ СТАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ, ПОДВЕРЖЕННЫХ  
ДЕЙСТВИЮ ОСЕВОЙ СИЛЫ И ИЗГИБАЮЩИХ МОМЕНТОВ  
ПО ТКП EN ЕВРОКОД 3**

Учебно-методическое пособие  
по металлическим конструкциям  
для студентов специальности 1– 70 02 01  
«Промышленное и гражданское строительство»

*Учебное электронное издание*

**М и н с к 2012**

**А в т о р ы :**

*Ю.С. Мартынов, В.В. Надольский, Ю.И. Лагун*

**Р е ц е н з е н т ы :**

*Г.Г.Круглов*, заведующий кафедрой «Гидротехническое и энергетическое строительство» БНТУ, кандидат технических наук, доцент.

*Н.А. Рак*, профессор кафедры «Железобетонные и каменные конструкции» БНТУ, кандидат технических наук, доцент.

В учебно-методическом пособии кратко изложены основные теоретические положения и примеры по расчету стальных элементов на действие осевой силы и изгибающих моментов на прочность и устойчивость согласно ТКП EN 1993-1-1 «Проектирование стальных конструкций. Общие правила и правила для зданий». Основной акцент сделан на примеры расчета элементов сечением классов 1-4, подверженных действию усилий с различными отношениями значений изгибающего момента и осевой силы.

Пособие предназначено для студентов специальности 1-70 02 01 «Промышленное и гражданское строительство» при изучении дисциплины «Металлические конструкции», также может быть использовано студентами других специальностей строительного профиля: 1-70 07 01 «Строительство тепловых и атомных электростанций», 1-70 04 01 «Водохозяйственное строительство».

Белорусский национальный технический университет  
пр-т Независимости, 65, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.(017)292-77-52 факс (017)292-91-37  
Регистрационный № БНТУ/ЭИ СФ68-92.2012

© БНТУ, 2011

© Мартынов Ю.С., Надольский В.В., Лагун Ю.И.

© Надольский В.В., компьютерный дизайн, 2011

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
1 Центрально-сжатые и центрально-растянутые элементы.....	4
1.1 Расчет на прочность .....	4
1.2 Расчет на устойчивость.....	5
1.3 Пример расчета .....	6
2 Сжато-изгибаемые (внецентренно-сжатые) элементы постоянного сечения по длине.....	11
2.1 Расчет на прочность сечения элементов, подверженных действию осевой силы и изгибающих моментов.....	11
2.2 Учет поперечной силы в расчетах сечений на прочность сжато-изгибаемых (внецентренно-сжатых) элементов.....	13
2.3 Расчет на устойчивость элементов, подверженных действию осевой силы и изгибающих моментов.....	13
2.4 Примеры расчета.....	14
2.4.1 Пример расчета внецентренно – сжатых и сжато-изгибаемых элементов сечением классов 1 и 2.	
2.4.2 Пример расчета внецентренно – сжатых и сжато-изгибаемых элементов сечением 3 класса.	
2.4.3 Пример расчета внецентренно – сжатых и сжато-изгибаемых элементов сечением 4 класса.	
2.4.4 Пример расчета элемента, подверженного сжатию и изгибу в двух главных плоскостях.	
Приложение А.....	43
Приложение Б.....	44
Приложение В.....	46
Литература.....	55

## Введение

Методическое пособие предназначено для студентов специальности 1-70 02 01 «Промышленное и гражданское строительство» при изучении дисциплины «Металлические конструкции» и направлено на оказание помощи студентам при изучении основных положений расчета элементов стальных конструкций по Европейским правилам расчета Еврокоду 3 «Проектирование стальных конструкций».

В методическом пособии приведены необходимые сведения по расчету элементов сечением класса 1, 2, 3 и 4, а также приведены числовые примеры определения несущей способности. В методическом пособии даны обозначения принятые в соответствии с ТКП EN 1993-1-1 [1] «Проектирование стальных конструкций. Общие правила и правила для зданий».

Обозначения:

$f_y$  – предел текучести,

$f_u$  – предел прочности,

$N_{Ed}$ ,  $M_{Ed}$ ,  $V_{Ed}$  – соответственно расчетные значения осевой силы, изгибающего момента и поперечной силы,

$N_{Rd}$ ,  $M_{Rd}$ ,  $V_{Rd}$  – соответственно расчетные значения несущей способности по продольной силе, изгибающему моменту и поперечной силе.

## 1 Центральнo-сжатые и центральнo-растянутые элементы

### 1.1 Расчет на прочность

1.1 Прочность сечений растянутых элементов обеспечена, если выполняется следующее условие (пункт 6.2.3 [1]):

$$\frac{N_{Ed}}{N_{t,Rd}} \leq 1.0, \quad (1.1)$$

где  $N_{Ed}$  – расчетное значение осевой силы;

$N_{t,Rd} = N_{pl,Rd} = \frac{Af_y}{\gamma_{M0}}$  – расчетное значение несущей способности по прочности сечения брутто в пластической стадии;

$N_{t,Rd} = N_{u,Rd} = \frac{0.9A_{net}f_u}{\gamma_{M2}}$  – расчетное значение несущей способности по прочности сечения нетто в пластической стадии.

1.2 Прочность сечений сжатых элементов обеспечена, если выполняется следующее условие (6.2.4 [1]):

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1.0, \quad (1.2)$$

где  $N_{c,Rd} = \frac{Af_y}{\gamma_{M0}}$  – расчетное значение несущей способности по прочности сечения классов 1, 2 и 3;

$N_{c,Rd} = \frac{A_{eff}f_y}{\gamma_{M0}}$  – расчетное значение несущей способности по прочности сечения класса 4.

где  $A_{eff}$  – площадь эффективного сечения, вычисленная при действии равномерного сжатия (определяется по указаниям 4.3 [2]).

1.3 При смещении  $e_N$  центра тяжести эффективного сечения площадью  $A_{eff}$  относительно центра тяжести сечения брутто следует учитывать дополнительный изгибающий момент  $\Delta M_{Ed} = N_{Ed}e_N$ . В этом случае элемент должен рассчитываться на прочность как сжато-изгибаемый элемент (согласно 8.1.3 настоящего стандарта).

## 1.2 Расчет на устойчивость

2.1 Устойчивость центрально-сжатых элементов постоянного сечения по длине обеспечена, если выполняется условие (6.3.1 [1]):

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1.0, \quad (1.3)$$

где  $N_{b,Rd} = \frac{\chi Af_y}{\gamma_{M1}}$  – расчетное значение несущей способности по устойчивости элемента сечением классов 1, 2 и 3;

$N_{b,Rd} = \frac{\chi A_{eff}f_y}{\gamma_{M1}}$  – расчетное значение несущей способности по устойчивости элемента сечением класса 4.

$A_{eff}$  – площадь эффективного сечения, вычисленная при действии равномерного сжатия (определяется по указаниям 4.3 [2]).

$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \leq 1.0$  – понижающий коэффициент для соответствующей кривой потери устойчивости (6.3.1 [1]);

$$\Phi = 0.5 \left[ 1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0.2) + \bar{\lambda}^2 \right];$$

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

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

$\alpha$  – коэффициент, учитывающий начальные несовершенства принимаемый в зависимости от кривой потери устойчивости;

$N_{\text{cr}}$  – критическая сила для соответствующей формы потери устойчивости в упругой стадии, вычисленная по приложению А.2 настоящего стандарта с использованием характеристик поперечного сечения брутто.

2.2 Указание по выбору кривой потери устойчивости и коэффициента, учитывающего начальные несовершенства, приведены соответственно в таблицах 6.2 и 6.1 [1].

2.3 Значение коэффициента  $\chi$  можно определить для соответствующей кривой потери устойчивости по графику на рисунке 6.4 [1].

2.4 Для сечений 4 класса при смещении  $e_N$  центра тяжести эффективного сечения площадью  $A_{\text{eff}}$  относительно центра тяжести сечения брутто следует учитывать дополнительный изгибающий момент  $\Delta M_{Ed} = N_{Ed} e_N$ . В этом случае элемент должен рассчитываться на устойчивость как сжато-изгибаемый элемент (согласно 8.3.1 настоящего стандарта).

2.5 Элементы сечений открытого типа должны быть проверены на возможность потери устойчивости по крутильной или изгибно-крутильной форме (6.3.1.4 [1]).

### 1.3 Пример расчета

Проверить несущую способность центрально–сжатого элемента при следующих исходных данных:

– расчетное значение осевой силы  $N_{Ed} = 3500 \text{ кН}$  ;

– оба конца элемента закреплены шарнирно от смещения и раскреплены от кручения относительно продольной оси X-X, расчетные длины  $l_{y,cr} = l_{z,cr} = 6 \text{ м}$  (рисунок 7.2);

– размеры поперечного сечения приведены на рисунке 7.1. Геометрические характеристики сечения:  $A = 173.87 \text{ см}^2$ ,  $I_y = 40296 \text{ см}^4$ ,  $W_y = 2302.6 \text{ см}^3$ ,  $i_y = 15.22 \text{ см}$ ,  $I_z = 13585.3 \text{ см}^4$ ,  $W_z = 776.3 \text{ см}^3$ ,  $i_z = 8.84 \text{ см}$ , момент инерции при свободном кручении  $I_t = 199.745 \text{ см}^4$ , секториальный момент инерции  $I_\omega = 3721047.5 \text{ см}^6$ . Отверстия в сечении отсутствуют;

– материал: сталь с пределом текучести  $f_y = 345 \text{ МПа}$ , коэффициент

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 0.825;$$

– частные коэффициенты безопасности согласно Национальному приложению к [1] равны:  $\gamma_{M0} = \gamma_m / \gamma_c = 1.025 / 1.1 = 0.932$ ,  
 $\gamma_{M1} = \gamma_m / \gamma_c = 1.025 / 1 = 1.025$ .

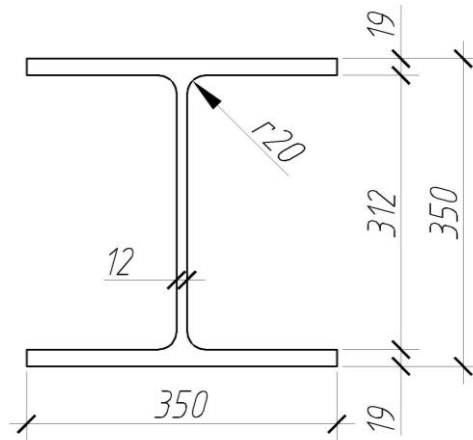


Рисунок 1.1 – Поперечное сечение

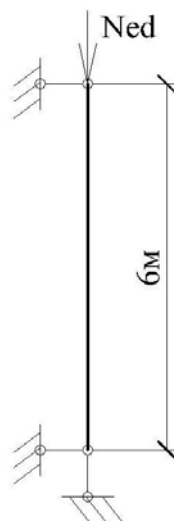


Рисунок 1.2 – Расчетная схема стержня.

1 Классификация поперечного сечения (5.5 [1])

Класс полки поперечного сечения:

$$c = \frac{b_f - t_w - 2r}{2} = \frac{350 - 12 - 2 \cdot 20}{2} = 149 \text{ мм}, \quad t = t_f = 19 \text{ мм}$$

$9\varepsilon = 7.43 < \frac{c}{t} = \frac{149}{19} = 7.84 < 10\varepsilon = 8.25$  – согласно таблице 5.2 [1] полка относится к 2 классу

Класс стенки поперечного сечения:

$$c = h - 2t_f - 2r = 350 - 2 \cdot 19 - 2 \cdot 20 = 272 \text{ мм}, \quad t = t_w = 12 \text{ мм}$$

$\frac{c}{t} = 22.7 < 33\varepsilon = 27.3$  – согласно таблице 5.2 [1] стенка относится к 1 классу

Таким образом, согласно 5.5.2 [1] сечение в целом относится к классу 2  
2 Проверка прочности поперечного сечения(6.2 [1])

Прочность центрально-сжатого элемента обеспечена, если выполняется условие (6.2.4(1) [1]):

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1$$

Расчетное значение несущей способности  $N_{c,Rd}$  поперечного сечения 2 класса(6.2.4(2) EN 1993-1-1):

$$N_{c,Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{173.87 \cdot 10^{-4} \cdot 345 \cdot 10^3}{0.932} = 6436 \text{ кН}$$

Проверка прочности

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} = \frac{3500}{6436} = 0.54 < 1$$

Несущая способность поперечного сечения по прочности обеспечена.

3 Проверка устойчивости при продольном изгибе (6.3.1.1 [1])

Устойчивость элементов 2 классов обеспечена, если выполняется условие (6.3.1.1(1) [1]):

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

$$\text{где } N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \text{ (6.3.1.1(3) [1])}$$

3.1 Определение понижающих коэффициентов при плоской форме потери устойчивости  $\chi_y$  и  $\chi_z$  (6.3.1.2 [1]):

$$\chi_y = \frac{1}{\Phi_y + \sqrt{\Phi_y^2 - \bar{\lambda}_y^2}}, \quad \chi_z = \frac{1}{\Phi_z + \sqrt{\Phi_z^2 - \bar{\lambda}_z^2}}$$

Вычисление условных гибкостей элемента (6.3.1.3 [1]):

$$\bar{\lambda}_y = \frac{l_{y,cr}}{i_y \cdot 93.9 \cdot \varepsilon} = \frac{600}{15.22 \cdot 93.9 \cdot 0.825} = 0.509,$$

$$\bar{\lambda}_z = \frac{l_{z,cr}}{i_z \cdot 93.9 \cdot \varepsilon} = \frac{600}{8.84 \cdot 93.9 \cdot 0.825} = 0.876$$

Выбор кривых потери устойчивости:



– относительно оси у-у: при  $h/b = 350/350 = 1 < 1.2$  и  $t_f \leq 40 \text{ мм}$  (таблица 6.2 [1]) – кривая *b*. Коэффициент, учитывающий начальные несовершенства элемента для этой кривой  $\alpha_y = 0.34$  (таблица 6.1 [1]).

– относительно оси z-z: при  $h/b = 350/350 = 1 < 1.2$  и  $t_f \leq 40 \text{ мм}$  (таблица 6.2 [1]) – кривая *c*. Коэффициент, учитывающий начальные несовершенства элемента для этой кривой  $\alpha_z = 0.49$  (таблица 6.1 [1]).

$$\Phi_y = 0.5 \left[ 1 + \alpha_y (\bar{\lambda}_y - 0.2) + \bar{\lambda}_y^2 \right] = 0.5 \left[ 1 + 0.34 (0.509 - 0.2) + 0.509^2 \right] = 0.682$$

$$\Phi_z = 0.5 \left[ 1 + \alpha_z (\bar{\lambda}_z - 0.2) + \bar{\lambda}_z^2 \right] = 0.5 \left[ 1 + 0.49 (0.876 - 0.2) + 0.876^2 \right] = 1.05$$

$$\chi_y = \frac{1}{0.682 + \sqrt{0.682^2 - 0.509^2}} = 0.88$$

$$\chi_z = \frac{1}{1.05 + \sqrt{1.05^2 - 0.876^2}} = 0.614$$

$$\chi_{\min} = 0.614$$

**3.2 Расчетное значение несущей способности по устойчивости при продольном изгибе:**

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi_{\min} \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0.614 \cdot 173.87 \cdot 10^{-4} \cdot 345 \cdot 10^3}{1.025} = 3593.3 \text{ кН}$$

**Проверка устойчивости при продольном изгибе**

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} = \frac{3500}{3593.3} = 0.974 < 1$$

Несущая способность поперечного сечения по устойчивости при продольном изгибе обеспечена.

**4 Проверка устойчивости при крутильной и изгибно-крутильной форме потери устойчивости (6.3.1.4 [1])**

Устойчивость элементов 2 класса при крутильной и изгибно-крутильной форме потери устойчивости обеспечена, если выполняется условие:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,T,Rd}} \leq 1$$

$$\text{где } N_{b,T,Rd} = \frac{\chi_T \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}}$$

Для сечения с двумя осями симметрии потеря устойчивости по изгибно-крутильной форме не свойственна, поэтому делаем проверку только по крутильной форме потери устойчивости.

Вычисление условной гибкости элемента при крутильной форме потери устойчивости (6.3.1.4(2) [1]):

$$\bar{\lambda}_T = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr.T}}}$$

где  $N_{cr.T}$  – критическая сила потери устойчивости в упругой стадии по крутильной форме (приложение А.2):

$$N_{cr.T} = \frac{1}{i_0^2} \left( G \cdot I_t + \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_\omega}{l^2} \right)$$

$$i_0 = \sqrt{i_y^2 + i_z^2} = \sqrt{15.22^2 + 8.84^2} = 17.6 \text{ см}$$

$$N_{cr.T} = \frac{1}{(17.6 \cdot 10^{-2})^2} \left( 0.81 \cdot 10^5 \cdot 199.745 \cdot 10^{-8} + \frac{\pi^2 \cdot 2.1 \cdot 10^5 \cdot 3721047.5 \cdot 10^{-12}}{6^2} \right) =$$

$$= 12.132 \text{ МН} = 12132 \text{ кН}$$

$$\bar{\lambda}_T = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr.T}}} = \sqrt{\frac{173.87 \cdot 10^{-4} \cdot 345 \cdot 10^3}{12132}} = 0.703$$

Выбор кривых потери устойчивости (6.3.1.4(3) [1]): при  $h/b = 350/350 = 1 < 1.2$  и  $t_f \leq 40 \text{ мм}$  (таблица 6.2 [1]) – кривая *c*. Коэффициент, учитывающий начальные несовершенства элемента для этой кривой  $\alpha = 0.49$  (таблица 6.1 [1]).

$$\Phi = 0.5 \left[ 1 + \alpha (\bar{\lambda}_T - 0.2) + \bar{\lambda}_T^2 \right] = 0.5 \left[ 1 + 0.49(0.703 - 0.2) + 0.703^2 \right] = 0.87$$

$$\chi_T = \frac{1}{0.87 + \sqrt{0.87^2 - 0.703^2}} = 0.723$$

Расчетное значение несущей способности по устойчивости при крутильной форме потери устойчивости поперечного сечения 2 класса (6.3.1.4(2) [1]):

$$N_{b,T,Rd} = \frac{\chi_T \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{0.723 \cdot 173.87 \cdot 10^{-4} \cdot 345 \cdot 10^3}{1.025} = 4653 \text{ кН}$$

Проверка устойчивости:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,T,Rd}} = \frac{3500}{4653} = 0.75 < 1$$

Несущая способность поперечного сечения по устойчивости при крутильной форме потери устойчивости обеспечена.

## 2 Сжато-изгибаемые (внецентренно-сжатые) элементы постоянного сечения по длине

### 2.1 Расчет на прочность сечения элементов, подверженных действию осевой силы и изгибающих моментов

1.1 Прочность сечений классов 1 и 2 обеспечена, если выполняется условие (6.2.9.1 [1]):

$$M_{Ed} \leq M_{N,Rd} \quad (2.1)$$

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

$M_{N,Rd}$  – расчетное значение несущей способности сечения на изгиб в пластической стадии, уменьшенное вследствие действия осевой силы  $N_{Ed}$ .

1.1.1 Для прокатных и сварных равнополочных двутавров, при расчете которых не учитываются отверстия (6.2.4(3) [1]), расчетное значение  $M_{N,Rd}$  допускается определять по формулам (6.36)...(6.38) [1]:

– при действии изгибающего момента относительно оси у-у:

$$M_{N,y,Rd} = M_{pl,y,Rd} (1-n)/(1-0,5a) \quad \text{при} \quad M_{N,y,Rd} \leq M_{pl,y,Rd}$$

– при действии изгибающего момента относительно оси z-z:

$$M_{N,z,Rd} \leq M_{pl,z,Rd} \quad \text{при} \quad n \leq a,$$

$$M_{N,z,Rd} \leq M_{pl,z,Rd} \cdot \left[ 1 - \left( \frac{n-a}{1-a} \right)^2 \right] \quad \text{при} \quad n > a,$$

где  $n = N_{Ed}/N_{pl,Rd}$  ;

$$a = (A - 2bt_f)/A \leq 0.5.$$

$M_{pl,y,Rd} = W_{pl,y} \cdot f_y / \gamma_{M0}$  – расчетное значение несущей способности сечения на изгиб в пластической стадии относительно оси у-у.

$M_{pl,z,Rd} = W_{pl,z} \cdot f_y / \gamma_{M0}$  – расчетное значение несущей способности сечения на изгиб в пластической стадии относительно оси z-z.

1.1.2 При проверке прочности двутавровых бисимметричных сечений или других типов сечений с полками классов 1 и 2 влияние осевой силы  $N_{Ed}$  на изгибающий момент  $M_{pl}$  не учитывается, если:

– при действии изгибающего момента относительно оси у-у:

$$N_{Ed} \leq 0,25N_{pl,Rd} \quad \text{и} \quad N_{Ed} \leq \frac{0,5h_w t_w f_y}{\gamma_{M0}}$$

– при действии изгибающего момента относительно оси z-z:  $N_{Ed} \leq \frac{h_w t_w f_y}{\gamma_{M0}}$ .

1.1.3 Прочность замкнутых сечений классов 1 и 2 следует проверять по формулам (6.39)...(6.41) [1]

1.1.4 При совместном действии изгибающих моментов относительно осей у-у и z-z прочность сечений классов 1 и 2 допускается проверять по формуле (6.41) [1]

$$\left[ \frac{M_{y,Ed}}{M_{N,y,Rd}} \right]^\alpha + \left[ \frac{M_{z,Ed}}{M_{N,z,Rd}} \right]^\beta \leq 1, \quad (2.2)$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  – параметры, которые принимаются равными единице (с некоторым запасом) или вычисленным значениям:

$\alpha = 2; \beta = 5n \geq 1$  – для двутавровых сечений;

$\alpha = 2; \beta = 2$  – для круглых труб;

$\alpha = \beta = \frac{1.66}{1-1.13n} \leq 6$  – для прямоугольных труб;

1.2 Прочность элементов сечения класса 3 обеспечена, если максимальные напряжения  $\sigma_{x,Ed}$ , от действия осевой силы и изгибающего момента, вычисленные в необходимых случаях (6.2.3, 6.2.4 и 6.2.5 [1]) с учетом отверстий для болтов, удовлетворяют условию (6.2.9.2 [1]):

$$\sigma_{x,Ed} = \frac{N_{Ed}}{A} + \frac{M_{y,Ed}}{W_{el,y}} + \frac{M_{z,Ed}}{W_{el,z}} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M0}} \quad (2.3)$$

1.3 Прочность элементов сечения класса 4 обеспечена, если максимальные напряжения  $\sigma_{x,Ed}$  от действия осевой силы и изгибающего момента, вычисленные с использованием геометрических характеристик эффективного сечения, а также в необходимых случаях (6.2.3, 6.2.4 и 6.2.5 [1]) с учетом отверстий для болтов, удовлетворяют условию (6.2.9.3 [1]):

$$\sigma_{x,Ed} = \frac{N_{Ed}}{A_{eff}} + \frac{M_{y,Ed} + N_{Ed}e_{N,y}}{W_{eff,y,min}} + \frac{M_{z,Ed} + N_{Ed}e_{N,z}}{W_{eff,z,min}} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M0}}, \quad (2.4)$$

где  $A_{eff}$  – площадь эффективного сечения, вычисленного при действии только равномерного сжатия;

$W_{eff,y,min}, W_{eff,z,min}$  – минимальные моменты сопротивления эффективного сечения, вычисленного при действии только изгибающего момента относительно осей у-у и z-z соответственно.

$e_{N,y(z)}$  – смещения центра тяжести эффективного сечения, вычисленного при действии только равномерного сжатия, относительно центра тяжести сечения brutto.

Примечание- знаки осевых сил и изгибающих моментов зависят от сочетания напряжений от этих усилий.

## 2.2 Учет поперечной силы в расчетах сечений на прочность сжато-изгибаемых (внецентренно-сжатых) элементов

2.1 Если расчетные значения поперечной силы  $V_{Ed}$  не превышают  $0,5V_{pl,Rd}$  для сечений всех классов, а для сечения класса 4 дополнительно удовлетворяется условие:  $V_{Ed} \leq 0,5V_{b,Rd}$ , то поперечная сила при проверке прочности сечения не учитывается. Значение  $V_{pl,Rd}$  и  $V_{b,Rd}$  приведено в 6.3 настоящего стандарта.

2.2 Если условия 8.2.1 не соблюдаются, то прочность сечения при совместном действии осевой силы и изгибающего момента следует определять по уменьшенному значению предела текучести стали:

$$(1-\rho)f_y,$$

$$\text{где } \rho = \left( \frac{2V_{Ed}}{V_{pl,Rd}} - 1 \right)^2.$$

## 2.3 Расчет на устойчивость элементов, подверженных действию осевой силы и изгибающих моментов

3.1 Устойчивость сжато-изгибаемых (внецентренно-сжатых) элементов обеспечена, если выполняются условия 6.3.3 [1]:

$$\left. \begin{aligned} \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} &\leq 1 \\ \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} &\leq 1 \end{aligned} \right\} \text{ для элементов сечением классов 1,2,3}$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} \cdot e_{N,y}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \cdot \frac{M_{z,Ed} + N_{Ed} \cdot e_{N,z}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} &\leq 1 \\ \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} \cdot e_{N,y}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \cdot \frac{M_{z,Ed} + N_{Ed} \cdot e_{N,z}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} &\leq 1 \end{aligned} \right\} \text{ для элементов}$$

сечением класса 4

где  $N_{Ed}$ ,  $M_{y,Ed}$  и  $M_{z,Ed}$  — расчетные значения сжимающей осевой силы и моментов относительно осей  $y$ – $y$  и  $z$ – $z$  соответственно;

$N_{Rk}$ ,  $M_{y,Rk}$  и  $M_{z,Rk}$  — нормативные значения несущей способности сечения по прочности при действии сжимающей осевой силы, изгибающих моментов относительно осей  $y$ – $y$  и  $z$ – $z$  соответственно. Значения  $N_{Rk} = f_y A_i$ ,  $M_{i,Rk} = f_y W_i$  определяются с использованием геометрических параметров, приведенных в таблице 8.1 для соответствующих классов сечений.

$e_{N,y}$ ,  $e_{N,z}$  — смещения центра тяжести эффективного сечения, вычисленного при действии только равномерного сжатия, относительно центра тяжести сечения брутто (для сечений 4 класса).

$\chi_y$  и  $\chi_z$  — понижающие коэффициенты при плоской форме потери устойчивости, по 6.3.1 [1];

$\chi_{LT}$  — понижающий коэффициент при потере устойчивости плоской формы изгиба, по 6.3.2 [1]. Для элементов, не чувствительных к деформациям кручения (элементы замкнутого сечения или элементы с непрерывным или дискретным боковым раскреплением) допускается принимать  $\chi_{LT}=1,0$ ;

$k_{yy}$ ,  $k_{yz}$ ,  $k_{zy}$ ,  $k_{zz}$  — коэффициенты взаимодействия, определяемые по приложению А или В [1].

**Таблица 1 – Значения геометрических параметров для вычисления  $N_{Rk}$ ,  $M_{i,Rk}$  и  $\Delta M_{i,Ed}$**

Величина	Класс сечений			
	1	2	3	4
$A_i$	A	A	A	$A_{eff}$
$W_y$	$W_{pl,y}$	$W_{pl,y}$	$W_{el,y}$	$W_{eff,y}$
$W_z$	$W_{pl,z}$	$W_{pl,z}$	$W_{el,z}$	$W_{eff,z}$

## 2.4 Примеры расчета

### 2.4.1 Пример расчета внецентренно – сжатых и сжато-изгибаемых элементов сечением классов 1 и 2.

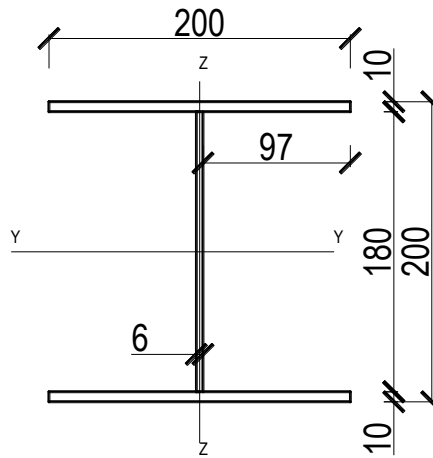
Проверить несущую способность сжато-изгибаемого элемента при следующих исходных данных:

– расчетное значение осевой силы  $N_{Ed}=160кН$ , изгибающего момента  $M_{Ed,y} = N_{Ed} \cdot e_y = 50кНм$ ;

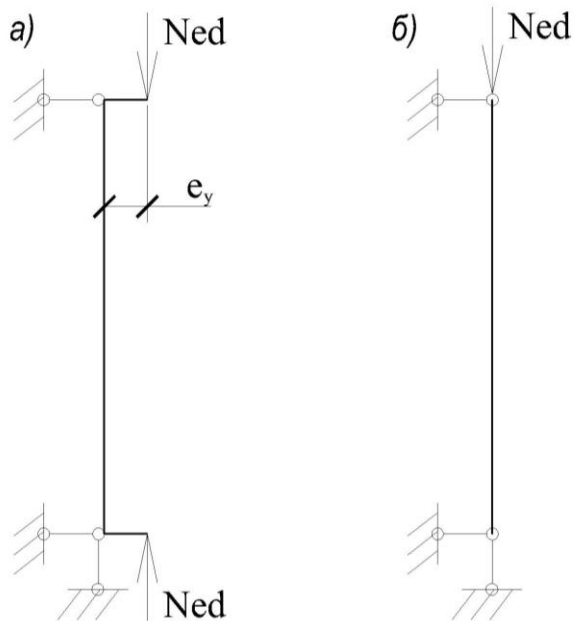
– оба конца элемента закреплены шарнирно от смещения и раскреплены от кручения относительно продольной оси X-X, расчетные длины  $l_{cr,y} = l_{cr,z} = 5м$  (рисунок 8.2);

– размеры поперечного сечения приведены на рисунке 8.1. геометрические характеристики сечения:  $A=50.8см^2$ ,  $I_y=3905см^4$ ,  $I_z=1334см^4$ ,  $W_{el,y}=390.5см^3$ ,  $W_{el,z}=133.4см^3$ , пластические моменты сопротивления  $W_{pl,y}=428.6см^3$ ,  $W_{pl,z}=201.6см^3$ . Отверстия в сечении отсутствуют.

- материал: сталь с пределом текучести  $f_y = 245 \text{ МПа}$ ;
- частные коэффициенты безопасности согласно Национальному приложению к [1] равны:  $\gamma_{M0} = \gamma_m / \gamma_c = 1.025 / 1.1 = 0.932$ ,  $\gamma_{M1} = \gamma_m / \gamma_c = 1.025 / 1 = 1.025$



**Рисунок 2.1 – Поперечное сечение**



а - относительно у-у, б - относительно z-z

**Рисунок 2.2 – Расчетные схемы стержня**

### 1 Классификация поперечного сечения(5.5 [1])

Класс полок поперечного сечения:  $c = 97 \text{ мм}$ ,  $t = 10 \text{ мм}$

$\frac{c}{t} = 9.7 < 10\epsilon = 10 \cdot \sqrt{\frac{235}{245}} = 9.8$  – согласно таблице 5.2 [1] полка относится к 2 классу

Класс стенки поперечного сечения:  $c=180\text{ мм}$ ,  $t=6\text{ мм}$

Примечание - При определении свободной высоты стенки не учтены катеты сварных швов.

$$\psi = \frac{\frac{N}{A} - \frac{M}{W}}{\frac{N}{A} + \frac{M}{W}} = \frac{\frac{160 \cdot 10^{-3}}{50.8 \cdot 10^{-4}} - \frac{50 \cdot 10^{-3}}{390.5 \cdot 10^{-6}}}{\frac{160 \cdot 10^{-3}}{50.8 \cdot 10^{-4}} + \frac{50 \cdot 10^{-3}}{390.5 \cdot 10^{-6}}} = \frac{-96.5}{159.5} = -0.605$$

$$\alpha = 1 / (1 - \psi) = 0.623$$

При  $\alpha \leq 0,5$ :  $\frac{c}{t} = 30 < \frac{36\varepsilon}{\alpha} = \frac{36 \cdot 0.98}{0.623} = 56.6$ . Согласно таблице 5.2 [1] стенка относится к 1 классу.

Таким образом, согласно 5.5.2 [1] сечение в целом относится к классу 2

2 Проверка прочности поперечного сечения (6.2 [1])

Прочность сечений классов 1 и 2 обеспечена, если выполняется условие:

$$M_{Ed} < M_{N,Rd}$$

Расчетное значение несущей способности поперечного сечения на изгиб  $M_{pl,Rd}$  в пластической стадии относительно оси у-у (6.2.5 EN 1993-1-1):

$$M_{pl,Rd} = \frac{W_{pl,y} f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{428.6 \cdot 10^{-6} \cdot 245 \cdot 10^3}{0.932} = 112.7 \text{ кНм}$$

Расчетное значение несущей способности поперечного сечения при равномерном сжатии  $N_{pl,Rd}$  (6.2.4 [1]):

$$N_{pl,Rd} = N_{c,Rd} = \frac{A f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{50.8 \cdot 10^{-4} \cdot 245 \cdot 10^3}{0.932} = 1335.4 \text{ кН}$$

Определение необходимости учета влияния осевой силы на несущую способность сечения на изгиб в пластической стадии относительно оси у-у (6.2.9.1(4) [1]):

$$N_{Ed} = 160 \text{ кН} \leq 0,25 N_{pl,Rd} = 0,25 \cdot 1335,4 = 333,9 \text{ кН}$$

$$N_{Ed} = 160 \text{ кН} > \frac{0,5 h_w t_w f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{0,5 \cdot 0,18 \cdot 0,006 \cdot 245 \cdot 10^3}{0,932} = 142,0 \text{ кН}$$

Необходимо учитывать влияние осевой силы на несущую способность элемента по прочности.

Расчетное значение несущей способности на изгиб в пластической стадии  $M_{N,y,Rd}$ , уменьшенное вследствие действия осевой силы  $N_{Ed}$  (6.2.9.1(5) [1])

$$M_{N,y,Rd} = \frac{M_{pl,y,Rd} \cdot (1 - \eta)}{(1 - 0,5a)} \leq M_{pl,y,Rd}$$



где  $n = N_{Ed} / N_{pl,Rd} = 160 / 1335.4 = 0.120$  ;

$$a = \frac{(A - 2bt_f)}{A} = \frac{(50.8 - 2 \cdot 20 \cdot 1)}{50.8} = 0.213 < 0.5 ;$$

Таким образом  $M_{N,y,Rd} = \frac{112.7 \cdot (1 - 0.12)}{(1 - 0.5 \cdot 0.213)} = 111.0 \text{ кНм}$

Проверка прочности

$$M_{Ed,y} = 50 \text{ кНм} < M_{N,y,Rd} = 111 \text{ кНм}$$

Несущая способность сжато-изгибаемого элемента по прочности обеспечена.

3 Проверка устойчивости (6.3 [1])

Устойчивость элементов 1 и 2 классов обеспечена, если выполняется условие:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1, \quad \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1$$

3.1 Определение понижающих коэффициентов при плоской форме потери устойчивости при центральном сжатии элемента  $\chi_y$  и  $\chi_z$  (6.3.1.2 [1]):

$$\chi_y = \frac{1}{\Phi_y + \sqrt{\Phi_y^2 - \bar{\lambda}_y^2}}, \quad \chi_z = \frac{1}{\Phi_z + \sqrt{\Phi_z^2 - \bar{\lambda}_z^2}}$$

Вычисление условных гибкостей элемента (6.3.1.3 [1]):

$$\bar{\lambda}_y = \frac{l_y}{i_y \cdot 93.9 \cdot \varepsilon} = \frac{500}{8.77 \cdot 93.9 \cdot 0.98} = 0.62 ,$$

$$\bar{\lambda}_z = \frac{l_z}{i_z \cdot 93.9 \cdot \varepsilon} = \frac{500}{5.12 \cdot 93.9 \cdot 0.98} = 1.06$$

Выбор кривых потери устойчивости:

– относительно оси y-y: при  $t_f \leq 40 \text{ мм}$  (таблица 6.2 [1]) – кривая *b*. Коэффициент, учитывающий начальные несовершенства элемента в плоскости действия момента для этой кривой  $\alpha_y = 0.34$  (таблица 6.1 [1]).

– относительно оси z-z: при  $t_f \leq 40 \text{ мм}$  (таблица 6.2 [1]) – кривая *c*. Коэффициент, учитывающий начальные несовершенства элемента из плоскости действия момента для этой кривой  $\alpha_z = 0.49$  (таблица 6.1 [1]).

$$\Phi_y = 0.5 [1 + \alpha_y (\bar{\lambda}_y - 0.2) + \bar{\lambda}_y^2] = 0.5 [1 + 0.34 (0.62 - 0.2) + 0.62^2] = 0.764$$

$$\Phi_z = 0.5 [1 + \alpha_z (\bar{\lambda}_z - 0.2) + \bar{\lambda}_z^2] = 0.5 [1 + 0.49 (1.06 - 0.2) + 1.06^2] = 1.273$$

$$\chi_y = \frac{1}{0.764 + \sqrt{0.764^2 - 0.62^2}} = 0.826$$

$$\chi_z = \frac{1}{1.273 + \sqrt{1.273^2 - 1.06^2}} = 0.506$$

3.2 Определение понижающего коэффициента при потере устойчивости плоской формы изгиба  $\chi_{LT}$  (6.3.2.2 [1]):

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}}$$

Определение условной гибкости:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{pl,y} f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{428.6 \cdot 10^{-6} \cdot 245}{155 \cdot 10^{-3}}} = 0.823$$

где  $M_{cr}$  – критический момент потери устойчивости плоской формы изгиба в упругой стадии:

$$\begin{aligned} M_{cr} &= C_1 \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{(\mu_{LT} \cdot l)^2} \cdot \sqrt{\frac{I_\omega}{I_z} + \frac{(\mu_{LT} \cdot l)^2 \cdot G \cdot I_t}{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}} = \\ &= 1 \cdot \frac{\pi^2 \cdot 2.1 \cdot 10^5 \cdot 1334 \cdot 10^{-8}}{(1.5)^2} \cdot \sqrt{\frac{120394 \cdot 10^{-12}}{1334 \cdot 10^{-8}} + \frac{(1.5)^2 \cdot 0.81 \cdot 10^5 \cdot 14.6 \cdot 10^{-8}}{\pi^2 \cdot 2.1 \cdot 10^5 \cdot 1334 \cdot 10^{-8}}} = \\ &= 0.155 \cdot M_{Hm} = 155 \text{ кНм} \end{aligned}$$

где  $C_1 = 1$  определяется по таблице П.1 приложения А при постоянном значении изгибающего момента по длине элемента, т.е. при  $\psi = 1$ ;

$\mu_{LT} = 1$  – коэффициент расчетной длины элемента;

$I_t$  – момент инерции при свободном кручении:

$$I_t = \frac{1}{3} \cdot (h_w \cdot t_w^3 + 2 \cdot b_f \cdot t_f^3) = \frac{1}{3} \cdot (18 \cdot 0.6^3 + 2 \cdot 20 \cdot 1^3) = 14.6 \text{ см}^4$$

$I_\omega$  – секториальный момент инерции:

$$I_\omega = I_y \cdot (h - t_f)^2 / 4 = 1334 \cdot (20 - 1)^2 / 4 = 120394 \text{ см}^6$$

$\alpha_{LT} = 0.49$  – коэффициент, учитывающий начальные несовершенства элемента для кривой потери устойчивости  $c$  (таблицы 6.3, 6.4 [1]).

$$\Phi_{LT} = 0.5 \left[ 1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - 0.2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right] = 0.5 \left[ 1 + 0.49 (0.823 - 0.2) + 0.823^2 \right] = 0.992$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{0.992 + \sqrt{0.992^2 - 0.823^2}} = 0.647$$

3.3 Вычисление коэффициентов взаимодействия по приложению А [1]

Коэффициенты взаимодействия для сечений классов 1 и 2 определяются по следующим формулам:

$$k_{yy} = C_{my} C_{mLT} \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} \frac{1}{C_{yy}}, \quad k_{zy} = C_{my} C_{mLT} \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} \frac{1}{C_{zy}} 0,6 \sqrt{\frac{W_y}{W_z}}$$

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{(\mu_y \cdot l)^2} = \frac{\pi^2 \cdot 2.1 \cdot 10^5 \cdot 3905 \cdot 10^{-8}}{(1.5)^2} = 3.234 \text{ МН} = 3234 \text{ кН},$$

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{(\mu_z \cdot l)^2} = \frac{\pi^2 \cdot 2.1 \cdot 10^5 \cdot 1334 \cdot 10^{-8}}{(1.5)^2} = 1.105 \text{ МН} = 1105 \text{ кН};$$

$$\mu_y = \frac{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}}{1 - \chi_y \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} = \frac{1 - \frac{160}{3234}}{1 - 0.826 \frac{160}{3234}} = 0.991; \quad \mu_z = \frac{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}}{1 - \chi_z \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}} = \frac{1 - \frac{160}{1105}}{1 - 0.506 \frac{160}{1105}} = 0.923;$$

$$W_y = \frac{W_{pl,y}}{W_{el,y}} = \frac{428.6}{390.5} = 1.1, \text{ но не более } 1.5; \quad W_z = \frac{W_{pl,z}}{W_{el,z}} = \frac{201.6}{133.4} = 1.51, \text{ но не более } 1.5$$

Принято  $W_y = 1.1$ ,  $W_z = 1.5$

Для определения параметров  $C_{my}$  и  $C_{mLT}$  в общем случае необходимо вычислить:

$\bar{\lambda}_0$  – условную гибкость при потере устойчивости плоской формы изгиба при постоянном значении изгибающего момента по длине элемента, т.е. при  $\psi = 1$ . В рассматриваемом примере распределение момента по длине элемента также постоянное, поэтому  $\bar{\lambda}_0 = \bar{\lambda}_{LT} = 0.823$ .

Граничное значение  $\bar{\lambda}_{0,lim}$ :

$$\bar{\lambda}_{0,lim} = 0.2 \cdot \sqrt{C_1} \sqrt{\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right) \cdot \left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,T}}\right)} = 0.2 \cdot \sqrt{1} \sqrt{\left(1 - \frac{160}{1105}\right) \cdot \left(1 - \frac{160}{2110}\right)} = 0.189,$$

где

$$N_{cr,T} = \frac{A}{I_0} \cdot \left( G \cdot I_t + \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{\omega}}{(\mu_{LT} \cdot l)^2} \right) = \frac{50.8 \cdot 10^{-4}}{5239 \cdot 10^{-8}} \cdot \left( 0.81 \cdot 10^5 \cdot 14.6 \cdot 10^{-8} + \frac{\pi^2 \cdot 2.1 \cdot 10^5 \cdot 120394 \cdot 10^{-12}}{5^2} \right) = 2.110 \text{ МНм} = 2110 \text{ кНм}$$

Для симметричного сечения  $I_0 = I_y + I_z = 3905 + 1334 = 5239 \text{ см}^4$

Так как  $\bar{\lambda}_{LT,0} = 0.823 > \bar{\lambda}_{0,lim} = 0.189$ , тогда  $C_{my}$  и  $C_{mLT}$  имеют следующие значения:

$$C_{my} = C_{my,0} + (1 - C_{my,0}) \frac{\sqrt{\varepsilon_y} \cdot a_{LT}}{1 + \sqrt{\varepsilon_y} \cdot a_{LT}} = 1.01 + (1 - 1.01) \frac{\sqrt{4.07} \cdot 0.996}{1 + \sqrt{4.07} \cdot 0.996} = 1.00;$$

$$C_{mLT} = C_{my}^2 \cdot \frac{a_{LT}}{\sqrt{\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right) \cdot \left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,T}}\right)}} = 1.0^2 \cdot \frac{0.996}{\sqrt{\left(1 - \frac{160}{1105}\right) \cdot \left(1 - \frac{160}{2110}\right)}} = 1.13 > 1,$$

где

$$C_{my,o} = 0.79 + 0.21\psi_y + 0.36(\psi_y - 0.33) \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}} = 0.79 + 0.21 \cdot 1 + 0.36(1 - 0.33) \frac{160}{3234} = 1.01,$$

$$a_{LT} = 1 - \frac{I_t}{I_y} = 1 - \frac{14.6}{3905} = 0.996 > 0$$

$$\varepsilon_y = \frac{M_{y,Ed}}{N_{Ed}} \frac{A}{W_{el,y}} = \frac{50}{160} \frac{50.8 \cdot 10^{-4}}{390.5 \cdot 10^{-6}} = 4.07$$

Вычисление параметров  $C_{yy}$  и  $C_{zy}$

$$C_{yy} = 1 + (W_y - 1) \left[ \left( 2 - \frac{1,6}{W_y} C_{my}^2 \bar{\lambda}_{\max} - \frac{1,6}{W_y} C_{my}^2 \bar{\lambda}_{\max}^2 \right) n_{pl} - b_{LT} \right] \geq \frac{W_{el,y}}{W_{pl,y}};$$

$$C_{zy} = 1 + (W_y - 1) \left[ \left( 2 - 14 \frac{C_{my}^2 \bar{\lambda}_{\max}^2}{W_y^5} \right) n_{pl} - d_{LT} \right] \geq 0,6 \sqrt{\frac{W_y}{W_z} \frac{W_{el,y}}{W_{pl,y}}},$$

$$\text{где } \left. \begin{array}{l} \bar{\lambda}_y = 0.62 \\ \bar{\lambda}_z = 1.06 \end{array} \right\} \bar{\lambda}_{\max} = 1.06;$$

$$n_{pl} = \frac{N_{Ed} \cdot \gamma_{M1}}{N_{Rk}} = \frac{N_{Ed} \cdot \gamma_{M1}}{A \cdot f_y} = \frac{160 \cdot 10^{-3} \cdot 1.025}{50.8 \cdot 10^{-4} \cdot 245} = 0.132 < 1.5;$$

$b_{LT} = 0$ , т.к. момент  $M_{Z,Ed} = 0$ ,  $d_{LT} = 0$ , т.к. момент  $M_{Z,Ed} = 0$ .

$$C_{yy} = 1 + (1.1 - 1) \left[ \left( 2 - \frac{1,6}{1.1} 1^2 \cdot 1.06 - \frac{1,6}{1.1} 1^2 1.06^2 \right) 0.132 \right] = 0.984 \geq \frac{390.5}{428.6} = 0.911$$

$$C_{zy} = 1 + (1.1 - 1) \left[ \left( 2 - 14 \frac{1^2 1.06^2}{1.1^5} \right) \cdot 0.132 \right] = 0.90 \geq 0,6 \sqrt{\frac{1.1}{1.5} \frac{390.5}{428.6}} = 0.47$$

Значения коэффициентов взаимодействия

$$k_{yy} = 1.1.13 \frac{0.991}{1 - \frac{160}{3234}} \frac{1}{0.984} = 1.20$$

$$k_{zy} = 1.1.13 \frac{0.923}{1 - \frac{160}{3234}} \frac{1}{0.9} 0,6 \sqrt{\frac{1.1}{1.5}} = 0.63$$

Проверка несущей способности по устойчивости (6.3.3 [1]):

$$\frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk}}}{\gamma_{M1}} = \frac{\frac{160 \cdot 10}{0.826 \cdot 50.8 \cdot 245} + 1.2 \frac{50 \cdot 10^3}{0.647 \frac{428.6 \cdot 245}{1}}}{1} = 0.16 + 0.88 = 1.04 > 1$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} = \frac{160 \cdot 10}{0.506 \cdot 50.8 \cdot 245} + 0.63 \frac{50 \cdot 10^3}{0.647 \frac{428.6 \cdot 245}{1}} = 0.25 + 0.46 = 0.71 \leq 1$$

Устойчивость элемента не обеспечена.

#### 2.4.2 Пример расчета внецентренно – сжатых и сжато-изгибаемых элементов сечением 3 класса

Проверить несущую способность сжато-изгибаемого элемента при следующих исходных данных:

– расчетное значение осевой силы  $N_{Ed} = 1100 \text{ кН}$ , изгибающего момента  $M_{Ed,y} = 146 \text{ кНм}$ , поперечная сила  $V_{Ed,y} = 51.4 \text{ кНм}$ , эпюры усилий см. рисунок 8.4;

– оба конца элемента закреплены шарнирно от смещения и раскреплены от кручения относительно продольной оси X-X, раскрепление из плоскости на опорах и в середине пролета, расчетная длина стержня относительно оси Y-Y  $l_{y,cr} = 6 \text{ м}$ , расчетная длина стержня относительно оси Z-Z  $l_{z,cr} = 3 \text{ м}$  (рисунок 8.4);

– размеры поперечного сечения приведены на рисунке 8.3. геометрические характеристики сечения:  $A = 84.3 \text{ см}^2$ ,  $I_y = 28699 \text{ см}^4$ ,  $W_y = 1287 \text{ см}^3$ ,  $i_y = 18.45 \text{ см}$ ,  $I_z = 1579.7 \text{ см}^4$ ,  $W_z = 158.8 \text{ см}^3$ ,  $i_z = 4.33 \text{ см}$ , момент инерции при свободном кручении  $I_t = 43.74 \text{ см}^4$ , секториальный момент инерции  $I_\omega = 743864.9 \text{ см}^6$ . Отверстия в сечении отсутствуют.

– материал: сталь с пределом текучести  $f_y = 345 \text{ МПа}$ ; коэффициент  $\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 0.825$ ;

– частные коэффициенты безопасности согласно Национальному приложению к [1] равны:  $\gamma_{M0} = \gamma_m / \gamma_c = 1.025 / 1.1 = 0.932$ ,  $\gamma_{M1} = \gamma_m / \gamma_c = 1.025 / 1 = 1.025$

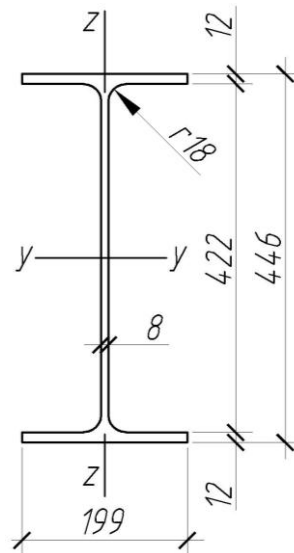
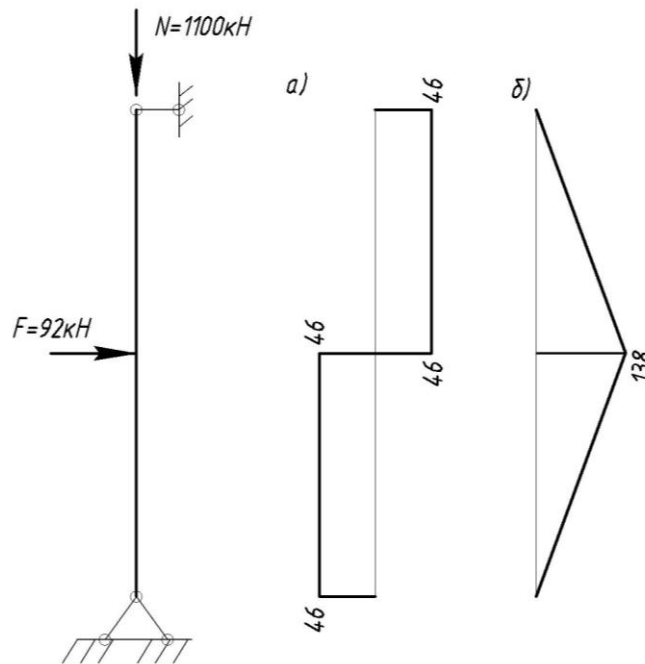


Рисунок 2.3 – Поперечное сечение



а) эпюра поперечных сил  $V_{Ed,y}$ , кН

б) эпюра моментов  $M_{Ed,y}$ , кНм

Рисунок 2.4 – Расчетная схема стержня

## 1 Классификация поперечного сечения (5.5 [1])

Класс полков поперечного сечения:

$$c = \frac{b_f - t_w - 2r}{2} = \frac{199 - 8 - 2 \cdot 18}{2} = 77.5 \text{ мм}, t = t_f = 12 \text{ мм}$$

$$\frac{c}{t} = \frac{77.5}{12} = 6.46 < 9\varepsilon = 9 \cdot 0.825 = 7.43 - \text{согласно таблице 5.2 [1]} \quad \text{полка}$$

относится к 1 классу

Класс стенки поперечного сечения:  $c = h - 2t_f - 2r = 446 - 2 \cdot 12 - 2 \cdot 18 = 386 \text{ мм}$ ,

$$t = t_w = 8 \text{ мм}$$

$$\psi = \frac{\frac{N_{Ed}}{A} - \frac{M_{y,Ed}}{W_{el}}}{\frac{N_{Ed}}{A} + \frac{M_{y,Ed}}{W_{el}}} = \frac{\frac{1100 \cdot 10^{-3}}{84.3 \cdot 10^{-4}} - \frac{146 \cdot 10^{-3}}{1287 \cdot 10^{-6}}}{\frac{1100 \cdot 10^{-3}}{84.3 \cdot 10^{-4}} + \frac{146 \cdot 10^{-3}}{1287 \cdot 10^{-6}}} = \frac{17.0}{243.9} = 0.07$$

$$\text{При } \psi > -1: \quad \frac{c}{t} = \frac{386}{8} = 48.25 < \frac{42\varepsilon}{0.67 + 0.33\psi} = \frac{42 \cdot 0.825}{0.67 + 0.33 \cdot 0.07} = 50 - \text{согласно}$$

таблице 5.2 [1] стенка относится к 3 классу

Таким образом, согласно 5.5.2 [1] сечение в целом относится к классу 3

## 2 Проверки прочности поперечного сечения (6.2 [1])

### 2.1 Учет действия поперечной силы в расчётах сечения на прочность

Несущая способность на сдвиг должна определяться с учетом потери местной устойчивости стенки, не подкрепленной ребрами жесткости, согласно разделу 5 [1], если:

$$\frac{h_w}{t_w} > 72 \frac{\varepsilon}{\eta} \quad (6.2.6(6) [1])$$

$$\text{где } h_w = h - 2t_f = 446 - 2 \cdot 12 = 422 ,$$

$$\eta = 1 \quad (\text{см. примечание к 6.2.6(2) [1]})$$

Тогда

$$\frac{h_w}{t_w} = \frac{422}{8} = 52.8 < 72 \frac{\varepsilon}{\eta} = 72 \frac{0.825}{1} = 59.4$$

Следовательно потерю местной устойчивости стенки по касательным напряжениям учитывать не требуется.

Проверка прочности поперечного сечения на сдвиг (6.2.6(1) [1]):

$$\frac{V_{Ed,y}}{V_{c,Rd}} \leq 1.0$$

где  $V_{Ed,y}$  - расчетное значение поперечной силы сечения;

$V_{c,Rd}$  - расчетное значение несущей способности поперечного сечения на сдвиг.

Значение  $V_{c,Rd}$  согласно 6.2.6(2) [1] принимается равным:

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

где  $A_V = A - 2b_f t_f + t_f (t_w + 2r) = 84.3 - 2 \cdot 19.9 \cdot 1.2 + 1.2 \cdot (0.8 + 2 \cdot 1.8) = 41.82 \text{ см}^2$ , но не менее  $\eta h_w t_w = 1 \cdot 42.2 \cdot 0.8 = 33.76 \text{ см}^2$

Тогда

$$V_{pl,Rd} = \frac{41.82 \cdot 10^{-4} \cdot 345 \cdot 10^3 / \sqrt{3}}{0.932} = 893.8 \text{ кН} > V_{Ed} = 46 \text{ кН}$$

Прочность сечения по поперечной силе обеспечена

2.2 Проверка прочности сечения на совместное действие изгибающего момента, поперечной и осевой силы

Если расчетное значение усилия сдвига  $V_{Ed}$  не превышает 50 % от расчетного значения несущей способности на сдвиг в пластической стадии  $V_{pl,Rd}$ , то согласно 6.2.10(2) [1] несущую способность, определяют без учета поперечной силы по указаниям 6.2.9 [1].

Так как  $V_{Ed} = 51,4 \text{ кН} < 0.5 V_{pl,Rd} = 446,9 \text{ кН}$ , то проверка прочности сечения класса 3 имеет следующий вид:

$$\frac{N_{Ed}}{A} + \frac{M_{y,Ed}}{W_{el,y}} = \frac{1100 \cdot 10^{-3}}{84.3 \cdot 10^{-4}} + \frac{146 \cdot 10^{-3}}{1287 \cdot 10^{-6}} = 243.9 \text{ МПа} < \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{345}{0.932} = 370.2 \text{ МПа}$$

Прочности поперечного сечения на совместное действие изгибающего момента, поперечной и осевой силы обеспечена.

3 Проверка устойчивости

Устойчивость элементов 3 класса обеспечена, если выполняется условие ( $M_{z,Ed} = 0$ ) (6.3.3(4) [1]):

$$\frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}}}{\gamma_{M1}} \leq 1, \quad \frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}}}{\gamma_{M1}} \leq 1$$

где  $N_{Rk} = A \cdot f_y = 84.3 \cdot 10^{-4} \cdot 345 \cdot 10^3 = 2908.4 \text{ кН}$

$M_{y,Rk} = W_{y,el} \cdot f_y = 1287 \cdot 10^{-6} \cdot 345 \cdot 10^3 = 444.0 \text{ кНм}$

$k_{yy}$  и  $k_{zy}$  – коэффициенты взаимодействия (приложение Б EN 1993-1-1).

3.1 Определение понижающих коэффициентов при плоской форме потери устойчивости  $\chi_y$  и  $\chi_z$  (6.3.1.2 [1]):

$$\chi_y = \frac{1}{\Phi_y + \sqrt{\Phi_y^2 - \bar{\lambda}_y^2}}, \quad \chi_z = \frac{1}{\Phi_z + \sqrt{\Phi_z^2 - \bar{\lambda}_z^2}}$$

Вычисление условных гибкостей элемента (6.3.1.3 [1]):



$$\bar{\lambda}_y = \frac{I_{y,cr}}{i_y \cdot 93.9 \cdot \varepsilon} = \frac{600}{18.45 \cdot 93.9 \cdot 0.825} = 0.42,$$

$$\bar{\lambda}_z = \frac{I_{z,cr}}{i_z \cdot 93.9 \cdot \varepsilon} = \frac{300}{4.33 \cdot 93.9 \cdot 0.825} = 0.894$$

Выбор кривых потери устойчивости:

– относительно оси у-у: при  $h/b = 446/199 = 2.24 > 1.2$  и  $t_f \leq 40 \text{ мм}$  (таблица 6.2 [1]) – кривая *a*. Коэффициент, учитывающий начальные несовершенства элемента для этой кривой  $\alpha_y = 0.21$  (таблица 6.1 [1]).

– относительно оси z-z: при  $h/b = 446/199 = 2.24 > 1.2$  и  $t_f \leq 40 \text{ мм}$  (таблица 6.2 [1]) – кривая *b*. Коэффициент, учитывающий начальные несовершенства элемента для этой кривой  $\alpha_z = 0.34$  (таблица 6.1 [1]).

$$\Phi_y = 0.5 \left[ 1 + \alpha_y (\bar{\lambda}_y - 0.2) + \bar{\lambda}_y^2 \right] = 0.5 \left[ 1 + 0.21(0.42 - 0.2) + 0.42^2 \right] = 0.611$$

$$\Phi_z = 0.5 \left[ 1 + \alpha_z (\bar{\lambda}_z - 0.2) + \bar{\lambda}_z^2 \right] = 0.5 \left[ 1 + 0.34(0.894 - 0.2) + 0.894^2 \right] = 1.018$$

$$\chi_y = \frac{1}{0.611 + \sqrt{0.611^2 - 0.42^2}} = 0.948$$

$$\chi_z = \frac{1}{1.018 + \sqrt{1.018^2 - 0.894^2}} = 0.664$$

3.2 Определение понижающего коэффициента устойчивости плоской формы изгиба  $\chi_{LT}$ .

Так как профиль прокатной, то коэффициент  $\chi_{LT}$  вычисляется по 6.3.2.3 [1]:

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \beta \bar{\lambda}_{LT}^2}}$$

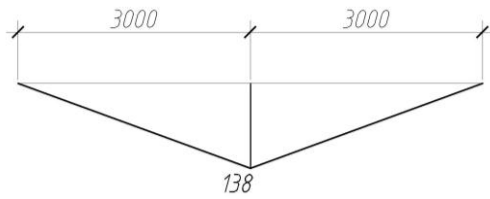
Определение условной гибкости:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{el,y} f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{1287 \cdot 10^{-6} \cdot 345}{1533.7 \cdot 10^{-3}}} = 0.538$$

где  $M_{cr}$  – критический момент потери устойчивости плоской формы изгиба в упругой стадии:

$$\begin{aligned} M_{cr} &= C_1 \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{I_{cr,LT}^2} \sqrt{\frac{I_\omega}{I_z} + \frac{I_{cr,LT}^2 \cdot G \cdot I_t}{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}} \\ &= 1.77 \cdot \frac{\pi^2 \cdot 2.1 \cdot 10^5 \cdot 1579.7 \cdot 10^{-8}}{3^2} \cdot \sqrt{\frac{743864.9 \cdot 10^{-12}}{1579.7 \cdot 10^{-8}} + \frac{3^2 \cdot 0.81 \cdot 10^5 \cdot 43.74 \cdot 10^{-8}}{\pi^2 \cdot 2.1 \cdot 10^5 \cdot 1579.7 \cdot 10^{-8}}} = \\ &= 1.533 \text{ МНм} = 1533 \text{ кНм} \end{aligned}$$

где  $l_{cr,LT} = l_{y,cr} = 3m$  – расстояние между боковыми раскреплениями,



$$C_1 = 1.77, \text{ так как } \psi = 0$$

$\alpha_{LT} = 0.49$  – коэффициент, учитывающий начальные несовершенства элемента для кривой потери устойчивости  $C$  (таблицы 6.3, 6.4 [1]).

$$\Phi_{LT} = 0.5 \left[ 1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0}) + \beta \bar{\lambda}_{LT}^2 \right] = 0.5 \left[ 1 + 0.49(0.538 - 0.4) + 0.75 \cdot 0.538^2 \right] = 0.642$$

где  $\bar{\lambda}_{LT,0} = 0.4$ ,  $\beta = 0.75$  (6.3.2.3(1) Национальное приложение к [1])

$$\chi_{LT} = \frac{1}{0.642 + \sqrt{0.642^2 - 0.75 \cdot 0.538^2}} = 0.922$$

Учёт характера распределения изгибающего момента в балке между элементами бокового раскрепления (6.3.2.3(2) [1]):

$$\chi_{LT,mod} = \frac{\chi_{LT}}{f}, \text{ но не более } 1$$

$$\text{где } f = 1 - 0.5(1 - k_c) \left[ 1 - 2(\bar{\lambda}_{LT} - 0.8)^2 \right] = 0.892,$$

$$k_c = \frac{1}{1.33 - 0.33\psi} = 1/1.33 = 0.752 \text{ (таблица 6.6 [1])}$$

$$\chi_{LT,mod} = \frac{0.922}{0.892} = 1.033 > 1 \Rightarrow \chi_{LT} = \chi_{LT,mod} = 1$$

### 3.3 Вычисление коэффициентов взаимодействия по приложению В [1]

Коэффициенты взаимодействия для сечений, не чувствительных к деформациям кручения определяются по следующим формулам (таблица В.2 приложения В [1]):

$$k_{yy} = C_{my} \left( 1 + 0.6 \bar{\lambda}_y \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right), \text{ но не более } C_{my} \left( 1 + 0.6 \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$$

$$k_{zy} = 1 - \frac{0.05 \bar{\lambda}_z}{(C_{mLT} - 0.25)} \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}}, \text{ но не менее } 1 - \frac{0.05}{(C_{mLT} - 0.25)} \cdot \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}}$$

Определения параметра  $C_{my}$ .

Для определения параметра  $C_{my}$  необходимо рассмотреть эпюру моментов между точками раскрепления из плоскости  $XOY$ .

$$\psi = 0, \alpha_h = \frac{M_h}{M_s} = 0 \Rightarrow C_{my} = 0.9 + 0.1\alpha_h = 0.9$$

Определения параметра  $C_{mLT}$ .

Для определения параметра  $C_{mLT}$  необходимо рассмотреть эпюру моментов между точками раскрепления из плоскости XOZ.

$$\psi = 0 \Rightarrow C_{mLT} = 0.6 + 0.4\psi = 0.6$$

Определение коэффициентов взаимодействия  $k_{yy}$  и  $k_{zy}$ .

$$k_{yy} = 0.9 \left( 1 + 0.6 \cdot 0.42 \frac{1100}{0.948 \cdot 2908.4 / 1.025} \right) = 0.99 < 0.9 \left( 1 + 0.6 \frac{1100}{0.948 \cdot 2908.4 / 1.025} \right) = 1.12$$

$$k_{zy} = 1 - \frac{0.05 \cdot 0.894}{(0.6 - 0.25)} \cdot \frac{1100}{0.664 \cdot 2908.4 / 1.025} = 0.931 > 1 - \frac{0.05}{(0.6 - 0.25)} \cdot \frac{1100}{0.664 \cdot 2908.4 / 1.025} = 0.917$$

Проверка несущей способности по устойчивости (6.3.3 [1]):

$$\frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}}}{\gamma_{M1}} + k_{yy} \frac{\frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk}}}{\gamma_{M1}} = \frac{1100}{0.948 \cdot 2908.4 / 1.025} + 0.99 \frac{167}{0.922 \cdot 444 / 1.025} = 0.781 < 1$$

$$\frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}}}{\gamma_{M1}} + k_{zy} \frac{\frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} M_{y,Rk}}}{\gamma_{M1}} = \frac{1100}{0.664 \cdot 2908.4 / 1.025} + 0.931 \frac{167}{0.922 \cdot 444 / 1.025} = 0.973 < 1$$

Устойчивость элемента на совместное действие изгибающего момента, поперечной и осевой силы обеспечена.

### 2.4.3 Пример расчета внецентренно – сжатых и сжато-изгибаемых элементов сечением 4 класса

Проверить несущую способность сжато-изгибаемого элемента при следующих исходных данных:

– расчетное значение осевой силы  $N_{Ed} = 167.4 \text{ кН}$ , изгибающего момента  $M_{y,Ed} = 670.6 \text{ кНм}$ , поперечная сила  $V_{z,Ed} = 112.0 \text{ кН}$ , эпюры усилий см. рисунок 8.6;

– оба конца элемента закреплены шарнирно от смещения и раскреплены от кручения относительно продольной оси X-X, раскрепление из плоскости на опорах и в середине пролета, расчетная длина стержня относительно оси Y-Y  $l_{y,cr} = 6 \text{ м}$ , расчетная длина стержня относительно оси Z-Z  $l_{z,cr} = 3 \text{ м}$ ;

– размеры поперечного сечения приведены на рисунке 8.5. геометрические характеристики сечения:  $A = 108 \text{ см}^2$ ,  $I_y = 124500 \text{ см}^4$ ,  $I_z = 3126 \text{ см}^4$ ,  $W_{el,y} = 3022 \text{ см}^3$ ,  $W_{el,z} = 250.1 \text{ см}^3$ ,  $i_y = 33.95 \text{ см}$ ,  $i_z = 5.38 \text{ см}$ . Отверстия в сечении отсутствуют.

– материал: сталь с пределом текучести  $f_y = 345 \text{ МПа}$ ;

коэффициент  $\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 0.825$ ;

– частные коэффициенты безопасности согласно Национальному приложению к [1] равны:  $\gamma_{M0} = \gamma_m / \gamma_c = 1.025 / 1.1 = 0.932$ ,  $\gamma_{M1} = \gamma_m / \gamma_c = 1.025 / 1 = 1.025$

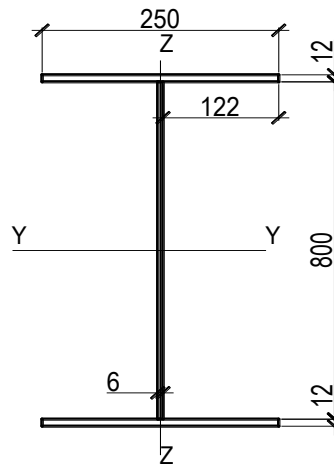


Рисунок 8.5 – Поперечное сечение

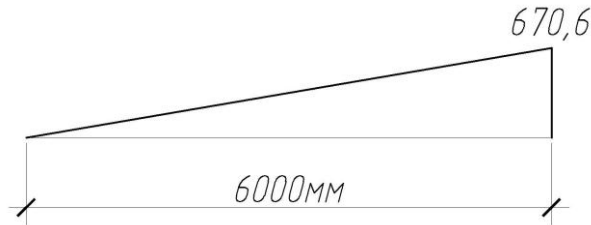


Рисунок 8.6 – Эпюра моментов  $M_{y, Eo}$ , кНм

### 1 Классификация поперечного сечения (5.5 [1])

Класс полки поперечного сечения:

$$c = \frac{b_f - t_w}{2} = 122 \text{ мм}, t = t_f = 12 \text{ мм}$$

$$\frac{c}{t} = \frac{122}{12} = 10.2 \left\{ \begin{array}{l} > 10\varepsilon = 10 \cdot 0.825 = 8.3 \\ < 14\varepsilon = 14 \cdot 0.825 = 11.5 \end{array} \right. \text{ — согласно таблице 5.2 EN 1993-1-1}$$

полка относится к 3 классу

Класс стенки поперечного сечения:  $c = 800 \text{ мм}, t = 6 \text{ мм}$

$$\psi = \frac{\frac{N_{Ed}}{A} - \frac{M_{y,Ed}}{W_{el}}}{\frac{N_{Ed}}{A} + \frac{M_{y,Ed}}{W_{el}}} = \frac{\frac{167.4 \cdot 10^{-3}}{108 \cdot 10^{-4}} - \frac{670.6 \cdot 10^{-3}}{3022 \cdot 10^{-6}}}{\frac{167.4 \cdot 10^{-3}}{108 \cdot 10^{-4}} + \frac{670.6 \cdot 10^{-3}}{3022 \cdot 10^{-6}}} = \frac{-206.4}{237.4} = -0.869$$

При  $\psi > -1$ :  $\frac{c}{t} = \frac{800}{6} = 133 > \frac{42\varepsilon}{0.67 + 0.33\psi} = \frac{42 \cdot 0.869}{0.67 + 0.33 \cdot (-0.869)} = 95.2$  — согласно

таблице 5.2 [1] стенка относится к 4 классу

Таким образом, согласно 5.5.2 [1] сечение в целом относится к классу 4

## 2 Определение характеристик эффективного поперечного сечения

### 2.1 Площадь эффективного сечения

Площадь эффективного сечения допускается определять при действии только осевой силы (4.4 [1])

Определяем характеристики только стенки, так как пояс относится к 3 классу и поэтому не редуцируется.

Понижающий коэффициент  $\rho$  при потере устойчивости стенки (4.4(2) [2])

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_\rho - 0.055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}_\rho^2} = \frac{2.85 - 0.055(3 + 1)}{2.85^2} = 0.323 \leq 1,0$$

где  $\psi = 1$

$$\bar{\lambda}_\rho = \frac{c/t}{28.4\varepsilon\sqrt{k_\sigma}} = \frac{800/6}{28.4 \cdot 0.825 \cdot \sqrt{4}} = 2.85 > 0.673 ;$$

где  $k_\sigma = 4$  (таблица 4.1 [2])

Эффективная высота сечения при действии только продольного усилия

$$h_{eff.N} = \rho \cdot h = 0.323 \cdot 800 = 258 \text{ мм}$$

Площадь эффективного поперечного сечения при действии только равномерного сжатия

$$A_{eff.N} = A - (h - h_{eff.N}) \cdot t_w = 108 - (80 - 25.8) \cdot 0.6 = 75.5 \text{ см}^2$$

2.2 Смещение центра тяжести эффективного сечения, определенного при равномерном сжатии, относительно центра тяжести сечения брутто.

$$e_{Ny} = e_{Nz} = 0$$

### 2.3 Момент сопротивления эффективного сечения

Момент сопротивления эффективного сечения определяется при действии только изгибающего момента (4.4 [2])

Определяем характеристики только стенки, так как пояс относится к 3 классу.

Понижающий коэффициент  $\rho$  при потере устойчивости стенки (4.4(2) [2])

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_\rho - 0,055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}_\rho^2} = \frac{1,16 - 0,055(3 - 1)}{1,16^2} = 0,78 \leq 1,0$$

где  $\psi = -1$

$$\bar{\lambda}_\rho = \frac{c/t}{28,4 \varepsilon \sqrt{k_\sigma}} = \frac{800/6}{28,4 \cdot 0,825 \cdot \sqrt{23,9}} = 1,16 > 0,673$$

где  $k_\sigma = 23,9$  (таблица 4.1 [2])

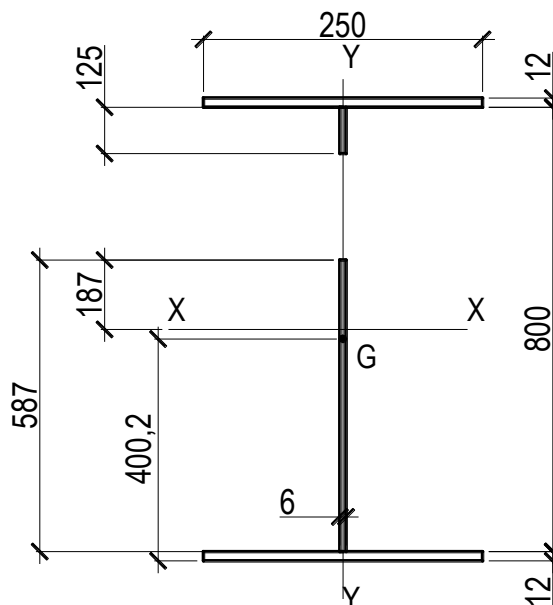
Эффективная высота сечения стенки, при действии только изгибающего момента

$$h_{eff.M} = \rho \cdot h_c = 0,78 \cdot 400 = 312 \text{ мм}$$

Распределения эффективной высоты по сечению (таблица 4.1 [2])

$$h_{eff.M,1} = 0,4 \cdot h_{eff.M} = 0,4 \cdot 312 = 125 \text{ мм}$$

$$h_{eff.M,2} = 0,6 \cdot h_{eff.M} = 0,6 \cdot 312 = 187 \text{ мм}$$



Площадь эффективного поперечного сечения при действии только изгибающего момента

$$A_{eff.M} = 102,7 \text{ см}^2$$

Расстояние от центра тяжести сечения до нижней грани растянутого пояса

$$y_{G.M} = 40,02 \text{ см}$$

Момент инерции эффективного поперечного сечения при действии только изгибающего момента

$$I_{eff.M} = 121304 \text{ см}^4$$

Моменты сопротивления эффективного сечения при действии только изгибающего момента:

$$W_{c,eff.M} = \frac{I_{eff.M}}{H - y_{G.M}} = \frac{121304}{82.4 - 40.02} = 2862.3 \text{ см}^3 - \text{ для сжатого волокна}$$

$$W_{t,eff.M} = \frac{I_{eff.M}}{y_{G.M}} = \frac{121304}{40.02} = 3031.1 \text{ см}^3 - \text{ для растянутого волокна}$$

### 3 Проверка прочности поперечного сечения (6.2 [1])

#### 3.1 Учет действия поперечной силы в расчетах сечений на прочность

В примере  $h_w/t_w = 133 > 72 \varepsilon/\eta = 72 \cdot 0.825/1 = 59.4$  (6.2.8 [1]), следовательно, необходимо учитывать потерю местной устойчивости стенки

Проверка прочности поперечного сечения на сдвиг (по 6.2.6 [1]):

$$\frac{V_{Ed}}{V_{c,Rd}} \leq 1,$$

$$\text{где } V_{c,Rd} = V_{b,Rd} = V_{bw,Rd} + V_{bf,Rd} \leq \frac{\eta \cdot f_{yw} \cdot h_w \cdot t_w}{\gamma_{M1} \sqrt{3}} \quad (5.2(1) [2])$$

$$\text{где } V_{bw,Rd} = \frac{\chi_w \cdot f_{yw} \cdot h_w \cdot t_w}{\gamma_{M1} \cdot \sqrt{3}} - \text{ составляющая несущей способности стенки на}$$

сдвиг при потере местной устойчивости;

$V_{bf,Rd}$  – составляющая несущей способности поясов на сдвиг, при потере местной устойчивости стенки (определяется по 5.4 [2]).

Определение несущей способности стенки на сдвиг (5.3 [2]).

Условная гибкость стенки определяется по формуле:

$$\bar{\lambda}_w = 0.76 \cdot \sqrt{\frac{f_y}{\tau_{cr}}},$$

$$\text{где } \tau_{cr} = k_\tau \cdot \sigma_{cr} \quad \text{и} \quad \sigma_{cr} = 190000 \left( \frac{t_w}{h_w} \right)^2 = 10.7 \text{ МПа} \quad (\text{приложение А [2]}). \text{ При}$$

отсутствии ребер жесткости  $k_\tau = 5.34$ . Тогда  $\bar{\lambda}_w = 0.76 \cdot \sqrt{\frac{345}{5.34 \cdot 10.7}} = 1.868$ ,

Согласно таблице 5.1 [2] при  $\bar{\lambda}_w = 1.868 > 1.08$  значение коэффициента  $\chi_w$ , учитывающего потерю местной устойчивости стенки, зависит от конструктивного решения опорной части. При опорной части по рисунку 5.1(с) [2] он будет равен:

$$\chi_w = 0.83 / \bar{\lambda}_w = 0.83 / 1.868 = 0.438.$$

Тогда имеем:

$$V_{bw,Rd} = \frac{0,438 \cdot 345 \cdot 10^3 \cdot 0,8 \cdot 0,006}{0,932 \cdot \sqrt{3}} = 449,3 \text{ кН}$$

Проверим вначале прочность сечения на сдвиг без учета составляющей несущей способности полки:

$$V_{b,Rd} = V_{bw,Rd} + V_{bt,Rd} = 449,3 \text{ кН}$$

$$\eta_3 = \frac{V_{Ed}}{V_{b,Rd}} = \frac{112}{449,3} = 0,25 < 1$$

Несущая способность на сдвиг обеспечена. При  $\eta_3 < 0,5$  влиянием поперечной силы при проверке прочности поперечного сечения на совместное действие изгибающего момента и продольной силы можно пренебречь (7.1(1) [2] и 6.2.10(2) [1]).

3.2 Прочность сечений класса 4 обеспечена, если выполняется условие:

$$\frac{N_{Ed}}{A_{eff,N} \cdot f_y / \gamma_{M0}} + \frac{M_{y,Ed} + N_{Ed} \cdot e_{Ny}}{W_{min,eff,M} \cdot f_y / \gamma_{M0}} \leq 1$$

$$\frac{167,4 \cdot 10^{-3}}{75,5 \cdot 10^{-4} \cdot 345 / 0,932} + \frac{670,6 \cdot 10^{-3} + 167,4 \cdot 10^{-3} \cdot 0}{2862,3 \cdot 10^{-6} \cdot 345 / 0,932} = 0,693 < 1$$

Прочность сечения обеспечена.

#### 4 Проверка устойчивости

Устойчивость элементов 4 класса обеспечена, если выполняется условие (6.3.3(4) [1]):

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1$$

где  $k_{yy}$  и  $k_{zy}$  – коэффициенты взаимодействия (приложение А [1]).

Дополнительные моменты  $\Delta M_{y,Ed} = \Delta M_{z,Ed} = 0$ , так как  $e_{Ny} = e_{Nz} = 0$

4.1 Определение понижающих коэффициентов при плоской форме потери устойчивости  $\chi_y$  и  $\chi_z$  (6.3.1.2 [1]):

$$\chi_y = \frac{1}{\Phi_y + \sqrt{\Phi_y^2 - \bar{\lambda}_y^2}}, \quad \chi_z = \frac{1}{\Phi_z + \sqrt{\Phi_z^2 - \bar{\lambda}_z^2}}$$

Вычисление условных гибкостей элемента (6.3.1.3 [1]):

$$\bar{\lambda}_y = \frac{l_y}{i_y \cdot 93,9 \cdot \varepsilon} \sqrt{\frac{A_{eff,N}}{A}} = \frac{600}{33,95 \cdot 93,9 \cdot 0,825} \sqrt{\frac{75,5}{108}} = 0,187 < 0,2,$$



то  $\chi_y = 1$  (по 6.3.1.3(4) [1])

$$\bar{\lambda}_z = \frac{I_z}{i_z \cdot 93.9 \cdot \varepsilon} \sqrt{\frac{A_{eff.N}}{A}} = \frac{300}{5.38 \cdot 93.9 \cdot 0.825} \sqrt{\frac{75.5}{108}} = 0.602$$

Выбор кривой потери устойчивости:

– относительно оси z-z: при  $t_f \leq 40 \text{ мм}$  (таблица 6.2 [1]) – кривая *c*. Коэффициент, учитывающий начальные несовершенства элемента в плоскости действия момента для этой кривой  $\alpha_z = 0.49$  (таблица 6.1 [1]).

$$\Phi_z = 0.5 [1 + \alpha_z (\bar{\lambda}_z - 0.2) + \bar{\lambda}_z^2] = 0.5 [1 + 0.49 (0.602 - 0.2) + 0.602^2] = 0.780$$

$$\chi_z = \frac{1}{0.780 + \sqrt{0.780^2 - 0.602^2}} = 0.784, \quad \chi_y = 1$$

4.2 Определение понижающего коэффициента потери устойчивости плоской формы изгиба  $\chi_{LT}$  (6.3.2.2 [1]):

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \bar{\lambda}_{LT}^2}}$$

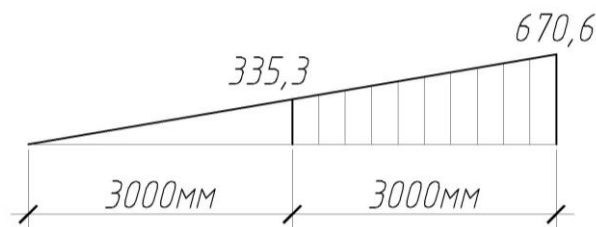
Определение условной гибкости:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{eff.M} f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{2862.3 \cdot 10^{-6} \cdot 345}{3873 \cdot 10^{-3}}} = 0.505$$

где  $M_{cr}$  – критический момент потери устойчивости плоской формы изгиба в упругой стадии:

$$\begin{aligned} M_{cr} &= C_1 \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{(\mu_{LT} \cdot l)^2} \cdot \sqrt{\frac{I_w}{I_z} + \frac{(\mu_{LT} \cdot l)^2 \cdot G \cdot I_t}{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}} = \\ &= 1.31 \cdot \frac{\pi^2 \cdot 2.1 \cdot 10^5 \cdot 3126 \cdot 10^{-8}}{3^2} \cdot \sqrt{\frac{5152770 \cdot 10^{-12}}{3126 \cdot 10^{-8}} + \frac{3^2 \cdot 0.81 \cdot 10^5 \cdot 34.56 \cdot 10^{-8}}{\pi^2 \cdot 2.1 \cdot 10^5 \cdot 3126 \cdot 10^{-8}}} = \\ &= 3.873 \text{ МНм} = 3873 \text{ кНм} \end{aligned}$$

где  $C_1 = 1.31$ , так как  $\psi = \frac{335.3}{670.6} = 0.5$



$I_t$  – крутящий момент инерции:

$$I_t = \frac{1}{3} \cdot (h_w \cdot t_w^3 + 2 \cdot b_f \cdot t_f^3) = \frac{1}{3} \cdot (80 \cdot 0.6^3 + 2 \cdot 25 \cdot 1.2^3) = 34.56 \text{ см}^4$$

$I_{\omega}$  – секториальный момент инерции:

$$I_{\omega} = I_z \cdot (h - t_f)^2 / 4 = 3126 \cdot (82.4 - 1.2)^2 / 4 = 5152770 \text{ см}^6$$

$\alpha_{LT} = 0.76$  – коэффициент, учитывающий начальные несовершенства элемента для кривой потери устойчивости  $d$  (таблица 6.3, 6.4 [1]).

$$\Phi_{LT} = 0.5 \left[ 1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - 0.2) + \bar{\lambda}_{LT}^2 \right] = 0.5 \left[ 1 + 0.76 (0.505 - 0.2) + 0.505^2 \right] = 0.743$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{0.743 + \sqrt{0.743^2 - 0.505^2}} = 0.776$$

### 4.3 Вычисление коэффициентов взаимодействия по приложению А [1]

Коэффициенты взаимодействия для сечения класса 4 определяются по следующим формулам:

$$k_{yy} = C_{my} C_{mLT} \frac{\mu_y}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}}, \quad k_{zy} = C_{my} C_{mLT} \frac{\mu_z}{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}}$$

$$N_{cr,y} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_y}{(\mu_y \cdot l)^2} = \frac{\pi^2 \cdot 2.1 \cdot 10^5 \cdot 124500 \cdot 10^{-8}}{6^2} = 71605 \text{ кН},$$

$$N_{cr,z} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{(\mu_z \cdot l)^2} = \frac{\pi^2 \cdot 2.1 \cdot 10^5 \cdot 3126 \cdot 10^{-8}}{3^2} = 7192 \text{ кН};$$

$$\mu_y = \frac{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}}{1 - \chi_y \frac{N_{Ed}}{N_{cr,y}}} = \frac{1 - \frac{167.4}{71605}}{1 - 1 \cdot \frac{167.4}{71605}} = 1; \quad \mu_z = \frac{1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}}{1 - \chi_z \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}} = \frac{1 - \frac{167.4}{7192}}{1 - 0.784 \cdot \frac{167.4}{7192}} = 0.995;$$

Для определения параметров  $C_{my}$  и  $C_{mLT}$  необходимо вычислить:

$$\bar{\lambda}_0 = \sqrt{\frac{W_{eff.M} f_y}{M_{cr,0}}} = \sqrt{\frac{2862.3 \cdot 10^{-6} \cdot 345}{2957 \cdot 10^{-3}}} = 0.578 - \text{условная гибкость при потере}$$

устойчивости плоской формы изгиба при  $\psi = 1$ , т.е.  $C_1 = 1$

$$\text{где } M_{cr,0} = C_{1,0} \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{(\mu_{LT} \cdot l)^2} \cdot \sqrt{\frac{I_{\omega}}{I_z} + \frac{(\mu_{LT} \cdot l)^2 \cdot G \cdot I_t}{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}} = 2957 \text{ кНм};$$

Граничное значение  $\bar{\lambda}_{0,lim}$ :

$$\bar{\lambda}_{0,lim} = 0.2 \cdot \sqrt{C_1} \sqrt{\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,z}}\right) \cdot \left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr,T}}\right)} = 0.2 \cdot \sqrt{1.31} \sqrt{\left(1 - \frac{167.4}{7192}\right) \cdot \left(1 - \frac{167.4}{10276}\right)} = 0.227$$

$$N_{cr.T} = \frac{A}{I_0} \cdot \left( G \cdot I_t + \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_\omega}{(\mu_{LT} \cdot l)^2} \right) = \frac{108 \cdot 10^{-4}}{127626 \cdot 10^{-8}} \cdot \left( 0.81 \cdot 10^5 \cdot 34.56 \cdot 10^{-8} + \frac{\pi^2 \cdot 2.1 \cdot 10^5 \cdot 5152770 \cdot 10^{-12}}{3^2} \right) =$$

$$= 10.276 \text{ МНм} = 10276 \text{ кНм}$$

$$I_0 = I_y + I_z = 124500 + 3126 = 127626 \text{ см}^4$$

Так как  $\bar{\lambda}_0 = 0.578 > \bar{\lambda}_{0,\text{lim}} = 0.227$ , тогда  $C_{my}$  и  $C_{mLT}$  имеют следующие значения:

$$C_{my} = C_{my,0} + (1 - C_{my,0}) \frac{\sqrt{\varepsilon_y} \cdot a_{LT}}{1 + \sqrt{\varepsilon_y} \cdot a_{LT}} = 0.79 + (1 - 0.79) \frac{\sqrt{10.6} \cdot 1}{1 + \sqrt{10.6} \cdot 1} = 0.951$$

$$C_{mLT} = C_{my}^2 \cdot \frac{a_{LT}}{\sqrt{\left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr.z}}\right) \cdot \left(1 - \frac{N_{Ed}}{N_{cr.T}}\right)}} = 0.951^2 \cdot \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{167.4}{7192}\right) \cdot \left(1 - \frac{167.4}{10276}\right)}} = 0.923, \text{ но не}$$

более 1, то  $C_{mLT} = 1$

где:

$$C_{my,0} = 0.79 + 0.21\psi_y + 0.36(\psi_y - 0.33) \frac{N_{Ed}}{N_{cr.y}} = 0.79 + 0.21 \cdot 0 + 0.36(0 - 0.33) \frac{167.4}{71605} = 0.79$$

$$\psi_y = \frac{0}{607.6} = 0$$

$$a_{LT} = 1 - \frac{I_t}{I_y} = 1 - \frac{34.56}{124500} \approx 1 > 0$$

$$\varepsilon_y = \frac{M_{y,Ed}}{N_{Ed}} \frac{A_{\text{eff},N}}{W_{\text{eff},M}} = \frac{670.6}{167.4} \frac{75.5 \cdot 10^2}{2862.3} = 10.6$$

**Значение коэффициентов взаимодействия**

$$k_{yy} = 0.923 \cdot 1 \frac{1}{1 - \frac{167.4}{71605}} = 0.953$$

$$k_{zy} = 0.951 \cdot 1 \frac{0.995}{1 - \frac{167.4}{71605}} = 0.948$$

Выполняем проверку несущей способности по устойчивости (6.3.3 [1]):

$$\frac{\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}}}{\gamma_{M1}} = \frac{167.4 \cdot 10^{-3}}{1.75 \cdot 5 \cdot 10^{-4} \cdot 345} + 0.953 \frac{670.6 \cdot 10^{-3}}{0.776 \frac{2862.3 \cdot 10^{-6} \cdot 345}{1.025}} = 0.921 < 1$$

$$\frac{N_{Ed}}{\gamma_{M1} \chi_z N_{Rk}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed} + \Delta M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \gamma_{M1} M_{y,Rk}} = \frac{167.4 \cdot 10^{-3}}{0.784 \cdot 75.5 \cdot 10^{-4} \cdot 345} + 0.948 \frac{670.6 \cdot 10^{-3}}{0.776 \frac{2862.3 \cdot 10^{-6} \cdot 345}{1.025}} = 0.943 < 1$$

Устойчивость элемента обеспечена.

#### 2.4.4 Пример расчета элемента, подверженного сжатию и изгибу в двух главных плоскостях

Проверить несущую способность сжато-изгибаемого элемента при следующих исходных данных:

– расчетное значение осевой силы  $N_{Ed} = 590 \text{ кН}$ , изгибающие моменты  $M_{y,Ed} = 30 \text{ кНм}$ ,  $M_{z,Ed} = 1 \text{ кНм}$ , эпюры усилий см. рисунок 8.8;

– оба конца элемента закреплены шарнирно от смещения и раскреплены от кручения относительно продольной оси X-X, раскрепление из плоскости на опорах и в середине пролета, расчетные длины стержня  $l_{y,cr} = l_{z,cr} = 5 \text{ м}$ ;

– размеры поперечного сечения приведены на рисунке 8.7. геометрические характеристики сечения:  $A = 63.53 \text{ см}^2$ ,  $I_y = 4716 \text{ см}^4$ ,  $W_{el,y} = 471.6 \text{ см}^3$ ,  $W_{pl,y} = 525.5 \text{ см}^3$ ,  $i_y = 8.62 \text{ см}$ ,  $I_z = 1601.4 \text{ см}^4$ ,  $W_{el,z} = 160.1 \text{ см}^3$ ,  $W_{pl,z} = 243.8 \text{ см}^3$ ,  $i_z = 5.02 \text{ см}$ , момент инерции при свободном кручении  $I_t = 30.16 \text{ см}^4$ , секториальный момент инерции  $I_w = 141499.7 \text{ см}^6$ . Отверстия в сечении отсутствуют;

– материал: сталь с пределом текучести  $f_y = 275 \text{ МПа}$ ; коэффициент  $\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 0.924$ ;

– частные коэффициенты безопасности согласно Национальному приложению к [1] равны:  $\gamma_{M0} = \gamma_m / \gamma_c = 1.025 / 1.1 = 0.932$ ,  $\gamma_{M1} = \gamma_m / \gamma_c = 1.025 / 1 = 1.025$

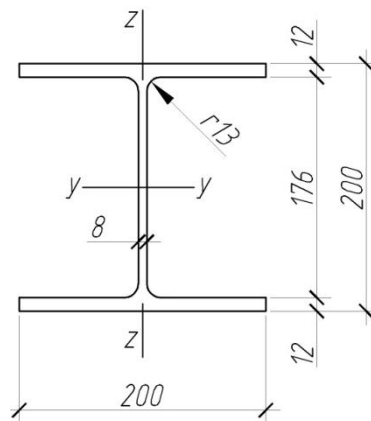
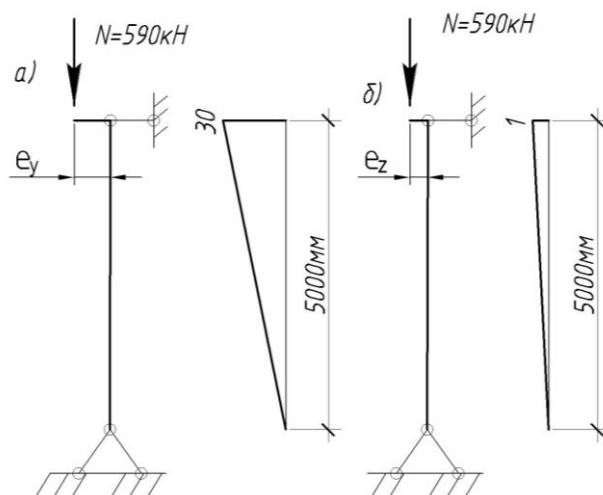


Рисунок 2.7 – Поперечное сечение



а) относительно оси у-у

б) относительно оси z-z

**Рисунок 2.8 – Расчетная схема**

## 1 Классификация поперечного сечения (5.5 [1])

Класс полок поперечного сечения:  $c = \frac{b_f - t_w - 2r}{2} = 83 \text{ мм}, t = t_f = 12 \text{ мм}$

$\frac{c}{t} = \frac{83}{12} = 6.92 < 9\varepsilon = 9 \cdot 0.924 = 8.32$  – согласно таблице 5.2 [1] полка относится

к 1 классу

Класс стенки поперечного сечения:  $c = h - 2t_f - 2r = 200 - 2 \cdot 12 - 2 \cdot 13 = 150 \text{ мм},$

$t = t_w = 8 \text{ мм}$

$$\psi = \frac{\frac{N_{Ed}}{A} - \frac{M_{y,Ed}}{W_{el}}}{\frac{N_{Ed}}{A} + \frac{M_{y,Ed}}{W_{el}}} = \frac{\frac{590 \cdot 10^{-3}}{63.53 \cdot 10^{-4}} - \frac{30 \cdot 10^{-3}}{471.6 \cdot 10^{-6}}}{\frac{590 \cdot 10^{-3}}{63.53 \cdot 10^{-4}} + \frac{30 \cdot 10^{-3}}{471.6 \cdot 10^{-6}}} = \frac{29.3}{156.5} = 0.19$$

Так как все сечение сжато, то коэффициент  $\alpha = 1$

При  $\alpha > 0.5$ :  $\frac{c}{t} = \frac{150}{8} = 18.75 < \frac{396\varepsilon}{13\alpha - 1} = \frac{396 \cdot 0.924}{13 - 1} = 30.5$  – согласно

таблице 5.2 [1] стенка относится к 1 классу

Таким образом, согласно 5.5.2 [1] сечение в целом относится к классу 1

## 2 Проверка прочности поперечного сечения (6.2 [1])

2.1 Несущая способность на изгиб поперечного сечения при действии осевой силы с изгибом (6.2.9 [1])

Прочность элемента обеспечена, если выполняется условие (6.2.9.1(6) [1]):

$$\left( \frac{M_{y, Ed}}{M_{N, y, Ed}} \right)^\alpha + \left( \frac{M_{z, Ed}}{M_{N, z, Ed}} \right)^\beta \leq 1$$

где  $\alpha$  и  $\beta$  — параметры, значения которых для двутавровых сечений:  $\alpha = 2$ ;  $\beta = 5n$  — при  $\beta \geq 1$ , где  $n = \frac{N_{Ed}}{N_{pl, Rd}}$

2.1.1 Влияние осевой силы на несущую способность на изгиб относительно оси  $y-y$  учитывать не следует, если выполняются следующие условия (6.2.9.1(4) [1]):

$$N_{Ed} \leq 0.25 N_{pl, Rd} \text{ и } N_{Ed} \leq \frac{0.5 h_w \cdot t_w \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$$

$$\text{где } N_{pl, Rd} = \frac{A \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = 1874.5 \text{ кН}$$

В данном примере  $N_{Ed} = 590 \text{ кН} > 0.25 N_{pl, Rd} = 468.6 \text{ кН}$ . Необходимо учитывать влияние осевой силы.

Расчетное значение несущей способности на изгиб в пластической стадии относительно оси  $y-y$   $M_{pl, y, Rd}$  поперечного сечения 1 класса (6.2.5(2) EN 1993-1-1):

$$M_{pl, y, Rd} = \frac{W_{pl, y} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{525.5 \cdot 10^{-6} \cdot 275 \cdot 10^3}{0.932} = 155.1 \text{ кНм}$$

Расчетное значение несущей способности на изгиб в пластической стадии относительно оси  $y-y$ , уменьшенное вследствие действия осевой силы  $N_{Ed}$ , поперечного сечения 1 класса (6.2.9.1(5) EN 1993-1-1):

$$M_{N, y, Rd} = M_{pl, y, Rd} \left( \frac{1-n}{1-0.5a} \right) = 155.1 \left( \frac{1-0.31}{1-0.5 \cdot 0.24} \right) = 121.6 \text{ кНм}$$

$$\text{где } n = \frac{N_{Ed}}{N_{pl, Rd}} = \frac{590}{1874.5} = 0.31;$$

$$a = \frac{A - 2b_f t_f}{A} = \frac{63.53 - 2 \cdot 20 \cdot 1.2}{63.53} = 0.24 < 0.5$$

2.1.2 Влияние осевой силы на несущую способность на изгиб относительно оси  $z-z$  учитывать не следует, если выполняются следующее условие (6.2.9.1(4) [1]):

$$N_{Ed} \leq \frac{h_w \cdot t_w \cdot f_y}{\gamma_{M0}}$$

где  $h_w = h - 2t_f = 200 - 2 \cdot 12 = 176 \text{ мм}$ ,

$$N_{Ed} = 590 \text{ кН} > \frac{h_w \cdot t_w \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{0.176 \cdot 0.008 \cdot 275 \cdot 10^3}{0.932} = 415 \text{ кН}, \quad \text{следовательно,}$$

необходимо учитывать влияние осевой силы.

Расчетное значение несущей способности на изгиб в пластической стадии относительно оси Z-Z  $M_{pl,z,Rd}$  поперечного сечения 1 класса (6.2.5(2) EN 1993-1-1):

$$M_{pl,z,Rd} = \frac{W_{pl,z} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{243.8 \cdot 10^{-6} \cdot 275 \cdot 10^3}{0.932} = 71.9 \text{ кНм}$$

Расчетное значение несущей способности на изгиб в пластической стадии относительно оси Z-Z, уменьшенное вследствие действия осевой силы  $N_{Ed}$ . поперечного сечения 1 класса (6.2.9.1(5) EN 1993-1-1) при  $n > a$  равно:

$$M_{N,z,Rd} = M_{pl,z,Rd} \left[ 1 - \left( \frac{n-a}{1-a} \right)^2 \right] = 71.9 \left[ 1 - \left( \frac{0.31-0.24}{1-0.24} \right)^2 \right] = 71.2 \text{ кНм}$$

Проверка прочности:

$$\left( \frac{M_{y,Ed}}{M_{N,y,Ed}} \right)^\alpha + \left( \frac{M_{z,Ed}}{M_{N,z,Ed}} \right)^\beta = \left( \frac{30}{121.6} \right)^2 + \left( \frac{1}{71.2} \right)^{1.55} = 0.06 < 1$$

где  $\alpha = 2$ ;  $\beta = 5n = 1.55 > 1$ ;

### 3 Проверка устойчивости (6.3 [1])

Устойчивость сжато-изгибаемых (внецентренно-сжатых) элементов обеспечена, если выполняется условие:

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk}} + k_{yy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \frac{M_{z,Ed}}{\gamma_{M1}} \leq 1,$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk}} + k_{zy} \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \frac{M_{z,Ed}}{\gamma_{M1}} \leq 1,$$

где  $N_{Rk} = A \cdot f_y = 63.53 \cdot 10^{-4} \cdot 275 \cdot 10^3 = 1747.1 \text{ кН}$

$$M_{y,Rk} = W_{pl,y} \cdot f_y = 525.5 \cdot 10^{-6} \cdot 275 \cdot 10^3 = 144.5 \text{ кНм}$$

$$M_{z,Rk} = W_{pl,z} \cdot f_y = 243.8 \cdot 10^{-6} \cdot 275 \cdot 10^3 = 67.0 \text{ кНм}$$

3.1 Определение понижающих коэффициентов при плоской форме потери устойчивости  $\chi_y$  и  $\chi_z$  (6.3.1.2 [1]):

$$\chi_y = \frac{1}{\Phi_y + \sqrt{\Phi_y^2 - \bar{\lambda}_y^2}}, \quad \chi_z = \frac{1}{\Phi_z + \sqrt{\Phi_z^2 - \bar{\lambda}_z^2}}$$

Условные гибкости элемента (6.3.1.3 [1]):

$$\bar{\lambda}_y = \frac{l_y}{i_y \cdot 93.9 \cdot \varepsilon} = \frac{500}{8.62 \cdot 93.9 \cdot 0.932} = 0.663$$

$$\bar{\lambda}_z = \frac{l_z}{i_z \cdot 93.9 \cdot \varepsilon} = \frac{500}{5.02 \cdot 93.9 \cdot 0.932} = 1.138$$

Кривые потери устойчивости:

– относительно оси у-у: при  $h/b = 200/200 = 1 < 1.2$  и  $t_f \leq 40 \text{ мм}$  (таблица 6.2 [1]) – кривая *b*. Коэффициент, учитывающий начальные несовершенства элемента для этой кривой  $\alpha_y = 0.34$  (таблица 6.1 [1]).

– относительно оси z-z: при  $h/b = 200/200 = 1 < 1.2$  и  $t_f \leq 40 \text{ мм}$  (таблица 6.2 [1]) – кривая *c*. Коэффициент, учитывающий начальные несовершенства элемента из плоскости действия момента для этой кривой  $\alpha_z = 0.49$  (таблица 6.1 [1]).

$$\Phi_y = 0.5 \left[ 1 + \alpha_y (\bar{\lambda}_y - 0.2) + \bar{\lambda}_y^2 \right] = 0.5 \left[ 1 + 0.34 (0.663 - 0.2) + 0.663^2 \right] = 0.798$$

$$\Phi_z = 0.5 \left[ 1 + \alpha_z (\bar{\lambda}_z - 0.2) + \bar{\lambda}_z^2 \right] = 0.5 \left[ 1 + 0.49 (1.138 - 0.2) + 1.138^2 \right] = 1.377$$

$$\chi_y = \frac{1}{0.798 + \sqrt{0.798^2 - 0.663^2}} = 0.805$$

$$\chi_z = \frac{1}{1.377 + \sqrt{1.377^2 - 1.138^2}} = 0.465$$

3.2 Определение понижающего коэффициента при потере устойчивости плоской формы изгиба  $\chi_{LT}$  (6.3.2.3 [1]):

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \beta \bar{\lambda}_{LT}^2}}$$

Определение условной гибкости:

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_{pl.y} f_y}{M_{cr}}} = \sqrt{\frac{525.5 \cdot 10^{-6} \cdot 275}{387.6 \cdot 10^{-3}}} = 0.611$$

где  $M_{cr}$  – критический момент потери устойчивости плоской формы изгиба в упругой стадии:



$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_z}{(\mu_{LT} \cdot l)^2} \cdot \left[ \sqrt{\frac{I_w}{I_z} + \frac{(\mu_{LT} \cdot l)^2 \cdot G \cdot I_t}{\pi^2 \cdot E \cdot I_z} + (C_2 \cdot z_g)^2} - C_2 \cdot z_g \right] =$$

$$= 1.77 \cdot \frac{\pi^2 \cdot 2.1 \cdot 10^5 \cdot 1601.4 \cdot 10^{-8}}{5^2} \cdot \sqrt{\frac{141499.7 \cdot 10^{-12}}{1601.4 \cdot 10^{-8}} + \frac{5^2 \cdot 0.81 \cdot 10^5 \cdot 30.16 \cdot 10^{-8}}{\pi^2 \cdot 2.1 \cdot 10^5 \cdot 1601.4 \cdot 10^{-8}}} =$$

$$= 0.3876 \text{ МНм} = 387.6 \text{ кНм}$$

где  $C_1 = 1.77$ , так как  $\psi = 0$ ;  $C_2 = 0$

$\alpha_{LT} = 0.34$  – коэффициент, учитывающий начальные несовершенства элемента для кривой потери устойчивости  $b$  (таблицы 6.3, 6.5 [1]).

$$\Phi_{LT} = 0.5 \left[ 1 + \alpha_{LT} (\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT0}) + \beta \bar{\lambda}_{LT}^2 \right] = 0.5 \left[ 1 + 0.34(0.611 - 0.4) + 0.75 \cdot 0.611^2 \right] = 0.676$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{0.676 + \sqrt{0.676^2 - 0.75 \cdot 0.611^2}} = 0.99$$

Учёт характера распределения изгибающего момента в балке между элементами бокового раскрепления (по 6.3.2.3(2) [1]):

$$\chi_{LT,mod} = \frac{\chi_{LT}}{f}, \text{ но не более } 1$$

где

$$f = 1 - 0.5(1 - k_c) \left[ 1 - 2.0(\bar{\lambda}_{LT} - 0.8)^2 \right] = 1 - 0.5(1 - 0.752) \left[ 1 - 2.0(0.611 - 0.8)^2 \right] = 0.88$$

$$k_c = 1/1.33 = 0.752 \text{ по таблице 6.6 [1]}$$

$$\chi_{LT,mod} = \frac{0.99}{0.88} = 1.12 > 1 \Rightarrow \chi_{LT} = \chi_{LT,mod} = 1$$

### 3.3 Вычисление коэффициентов взаимодействия по приложению Б [1]

Коэффициенты взаимодействия для сечений классов 1, чувствительных к деформациям кручения определяются по следующим формулам (таблица В.2 приложение Б [1]):

$$k_{yy} = C_{my} \left( 1 + (\bar{\lambda}_y - 0.2) \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right), \text{ но не более } C_{my} \left( 1 + 0.8 \frac{N_{Ed}}{\chi_y N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$$

$$k_{zz} = C_{mz} \left( 1 + (2\bar{\lambda}_z - 0.6) \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right), \text{ но не более } C_{mz} \left( 1 + 1.4 \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}} \right)$$

$$k_{yz} = 0.6 k_{zz}$$

При  $\bar{\lambda}_z = 1.138 > 0.4$  коэффициент  $k_{zy}$  равен:

$$k_{zy} = 1 - \frac{0.1 \bar{\lambda}_z}{(C_{mLT} - 0.25)} \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}}, \text{ но не менее } 1 - \frac{0.1}{(C_{mLT} - 0.25)} \frac{N_{Ed}}{\chi_z N_{Rk} / \gamma_{M1}}$$

Определения параметра  $C_{my}, C_{mz}, C_{mLT}$ :

$$\psi = 0$$

$$C_{my} = C_{mz} = C_{mLT} = 0.6 + 0.4\psi = 0.6$$

Значение коэффициентов взаимодействия:

$$k_{yy} = 0.6 \left( 1 + (0.663 - 0.2) \frac{590}{0.805 \cdot 1747.1 / 1.025} \right) = 0.72 < 0.6 \left( 1 + 0.8 \frac{590}{0.805 \cdot 1747.1 / 1.025} \right) = 0.806$$

$$k_{zz} = 0.6 \left( 1 + (2 \cdot 1.138 - 0.6) \frac{590}{0.465 \cdot 1747.1 / 1.025} \right) = 1.37 > 0.6 \left( 1 + 1.4 \frac{590}{0.465 \cdot 1747.1 / 1.025} \right) = 1.23$$

$$k_{yz} = 0.6 k_{zz} = 0.6 \cdot 1.23 = 0.74$$

$$k_{zy} = 1 - \frac{0.1 \cdot 1.138}{(0.6 - 0.25)} \frac{590}{0.465 \cdot 1747.1 / 1.025} = 0.76 < 1 - \frac{0.1}{(0.6 - 0.25)} \frac{590}{0.465 \cdot 1747.1 / 1.025} = 0.79$$

3.4 Проверка устойчивости элемента (6.3.3 [1]):

$$\frac{590}{0.805 \cdot 1747.1 / 1.025} + 0.72 \frac{30}{1 \cdot 144.5 / 1.025} + 0.74 \frac{1}{67 / 1.025} = 0.59 < 1,$$

$$\frac{590}{0.465 \cdot 1747.1 / 1.025} + 0.79 \frac{30}{1 \cdot 144.5 / 1.025} + 1.23 \frac{1}{67 / 1.025} = 0.93 < 1,$$

Устойчивость обеспечена

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

### Определение геометрических параметров для двутавровых моносимметричных сечений [0]

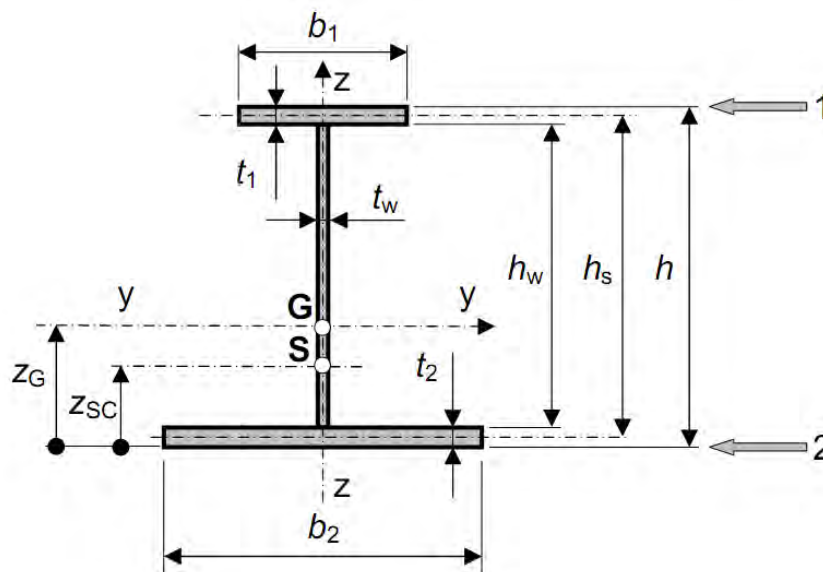


Рисунок А.1 – Двутавровое моносимметричное сечение (1 – верхнее волокно, 2 – нижнее волокно)

1) Площадь поперечного сечения:

$$A = b_1 t_1 + h_w t_w + b_2 t_2 \quad (\text{A.1})$$

2) Положение центра тяжести сечения относительно нижнего волокна:

$$z_G = \frac{b_1 t_1 \left( h - \frac{t_1}{2} \right) + h_w t_w \left( t_2 + \frac{h_w}{2} \right) + b_2 \frac{t_2^2}{2}}{A} \quad (\text{A.2})$$

3) Момент инерции сечения относительно оси y-y:

$$I_y = \frac{b_1 t_1^3 + t_w h_w^3 + b_2 t_2^3}{12} + b_1 t_1 \left( h - \frac{t_1}{2} - z_G \right)^2 + h_w t_w \left( t_2 + \frac{h_w}{2} - z_G \right)^2 + b_2 t_2 \left( \frac{t_2}{2} - z_G \right)^2 \quad (\text{A.3})$$

4) Момент инерции сечения относительно оси z-z:

$$I_z = \frac{b_1^3 t_1 + t_w^3 h_w + b_2^3 t_2}{12} \quad (\text{A.4})$$

5) Момент сопротивления сечения в упругой стадии:

$$\text{для верхнего волокна} - W_{\text{el,y,top}} = \frac{I_y}{h - z_G} ,$$

$$\text{для нижнего волокна} - W_{\text{el,y,bottom}} = \frac{I_y}{z_G} .$$

6) Положение центра сдвига (изгиба) сечения относительно нижнего волокна:

$$z_{SC} = \frac{t_2}{2} + h_s \frac{b_1^3 t_1}{b_1^3 t_1 + b_2^3 t_2} \quad (\text{A.5})$$

7) Момент инерции сечения при свободном кручении (St.Venant torsional constant):

$$I_t = \frac{b_1 t_1^3 + t_w^3 h_w + b_2 t_2^3}{3} \quad (\text{A.6})$$

8) Секториальный момент инерции сечения (Warping constant):

$$I_w = h_s^2 I_z \frac{(b_1^3 t_1 b_2^3 t_2)}{(b_1^3 t_1 + b_2^3 t_2)^2} \quad (\text{A.7})$$

9) Радиусы инерции сечения:

относительно оси у-у –  $i_y = \sqrt{\frac{I_y}{A}}$ , (A.8)

относительно оси z-z –  $i_z = \sqrt{\frac{I_z}{A}}$ . (A.9)

10) Координаты центра сдвига (изгиба) сечения относительно собственного центра тяжести:

$$y_o = 0, z_o = z_{SC} - z_G. \quad (\text{A.10})$$

## ПРИЛОЖЕНИЕ Б

### Определение критической сжимающей силы [0]

1) Критическая сила плоской формы потери устойчивости центрально сжатого стержня:

относительно оси у-у –  $N_{cr,y} = \frac{\pi^2 E I_y}{(\mu_y l_y)^2}$ , (Б.1)

относительно оси z-z –  $N_{cr,z} = \frac{\pi^2 E I_z}{(\mu_z l_z)^2}$ . (Б.2)

где  $\mu_y, \mu_z$  – коэффициенты, учитывающие условия закрепления стержня относительно осей у-у и z-z соответственно;

$l_y, l_z$  – конструктивные длины стержня между закреплениями относительно осей у-у и z-z соответственно;

$E$  – модуль упругости (модуль Юнга), принимаемый для стали  $E = 210$  ГПа.

2) Критическая сила по крутильной форме потери устойчивости центрально сжатого стержня:

$$N_{cr,T} = \frac{1}{i_0^2} \left( G l_t + \frac{\pi^2 E I_w}{l_t^2} \right), \quad (\text{Б.3})$$

$$i_0^2 = i_y^2 + i_z^2 + y_0^2 + z_0^2, \quad (\text{Б.4})$$

где  $G$  – модуль сдвига, принимаемый для стали  $G = 80.77$  ГПа;

$l_t$  – расчетная длины стержня, соответствующая крутильной форме потери устойчивости. В общем случае может быть принята равной конструктивной длине стержня, за исключением отдельных случаев, при которых концевые закрепления препятствуют его деформации;

$y_0, z_0$  – координаты центра сдвига (изгиба) сечения относительно собственного центра тяжести (см. рисунок Б.1).

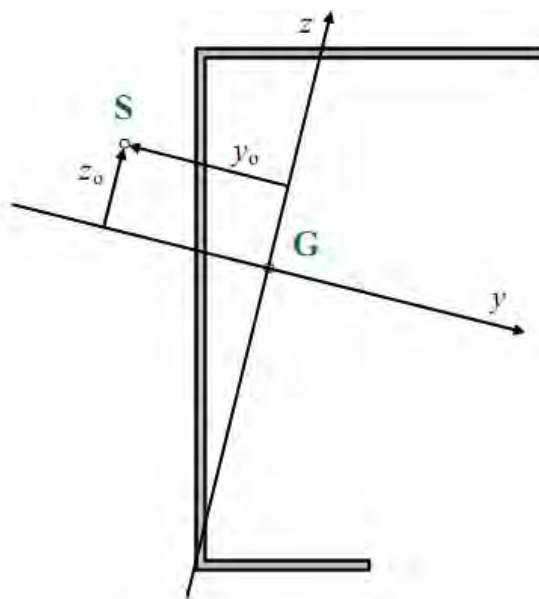


Рисунок Б.1 – К определению координат центра сдвига (изгиба) сечения

3) Критическая сила по изгибно-крутильной форме потери устойчивости центрально сжатого стержня:

а) для сечения, симметричного относительно оси  $y$ - $y$

$$N_{cr,TF,y} = \frac{i_0^2}{2(i_y^2 + i_z^2)} \left( N_{cr,y} + N_{cr,T} - \sqrt{(N_{cr,y} + N_{cr,T})^2 - 4N_{cr,y}N_{cr,T} \frac{(i_y^2 + i_z^2)}{i_0^2}} \right); \quad (\text{Б.5})$$

б) для сечения, симметричного относительно оси  $z$ - $z$

$$N_{cr,TF,z} = \frac{i_o^2}{2(i_y^2 + i_z^2)} \left( N_{cr,z} + N_{cr,T} - \sqrt{(N_{cr,z} + N_{cr,T})^2 - 4N_{cr,z}N_{cr,T} \frac{(i_y^2 + i_z^2)}{i_o^2}} \right) \quad (B.6)$$

4)\* Расчетные формулы для критических сил потери устойчивости центрально сжатого стержня по крутильной и изгибно-крутильной формам потери устойчивости справедливы для случаев, когда оба конца стержня раскреплены:

- а) от бокового смещения;
- б) от кручения относительно продольной оси.

## ПРИЛОЖЕНИЕ В

### Определение критического изгибающего момента [0, 0]

1) Критический момент потери устойчивости по изгибно-крутильной форме (потеря плоской формы изгиба) элемента моносимметричного сечения, изгибаемого в плоскости симметрии:

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 E I_z}{(k_z L)^2} \left\{ \sqrt{\left( \frac{k_z}{k_w} \right)^2 \frac{I_w}{I_z} + \frac{(k_z L)^2 G I_t}{\pi^2 E I_z} + (C_2 z_g - C_3 z_j)^2} - (C_2 z_g - C_3 z_j) \right\}, \quad (B.1)$$

где  $L$  – расстояние между точками элемента, в которых он раскреплен от бокового смещения;

$C_1, C_2, C_3$  – коэффициенты, зависящие от внешней нагрузки, действующей на элемент, и условия раскрепления концов элемента;

$k_z$  – коэффициент, учитывающие условия закрепления концов элемента от поворота относительно оси  $Z-Z$ ;

$k_w$  – коэффициент, учитывающие условия закрепления концов элемента от деформации;

$z_g = z_a - z_s$  – координата точки приложения внешней нагрузки относительно центра сдвига (изгиба) сечения;

$z_a$  – координата точки приложения внешней нагрузки относительно центра тяжести сечения;

$z_s = z_G - z_{SC}$  – координата центра сдвига (изгиба) сечения относительно центра тяжести сечения;

$$z_j = z_s - \frac{1}{2I_y} \int_A z(y^2 + z^2) dA \quad \text{– координата.}$$

Коэффициенты, учитывающие условия закрепления концов элемента,  $k_z$  и  $k_w$  могут быть приняты:

0,5 – раскреплены оба конца элемента;

0,7 – раскреплен один конец элемента;

1,0 – раскрепления концов элемента отсутствуют.

Координаты  $z$ ,  $z_a$ ,  $z_g$  и  $z_j$  определены на рисунке В.1, и принимаются по следующему правилу:

$z$  – принимается положительной со стороны сжатой полки;

$z_a$  – принимается положительной если внешняя нагрузка имеет дестабилизирующий эффект;

$z_g$  – принимается положительной если внешняя нагрузка действует по направлению к центру сдвига (изгиба) сечения;

$z_j$  – принимается положительной если полка с наибольшим собственным моментом инерции относительно оси  $z-z$  сжата в точке наибольшего изгибающего момента.

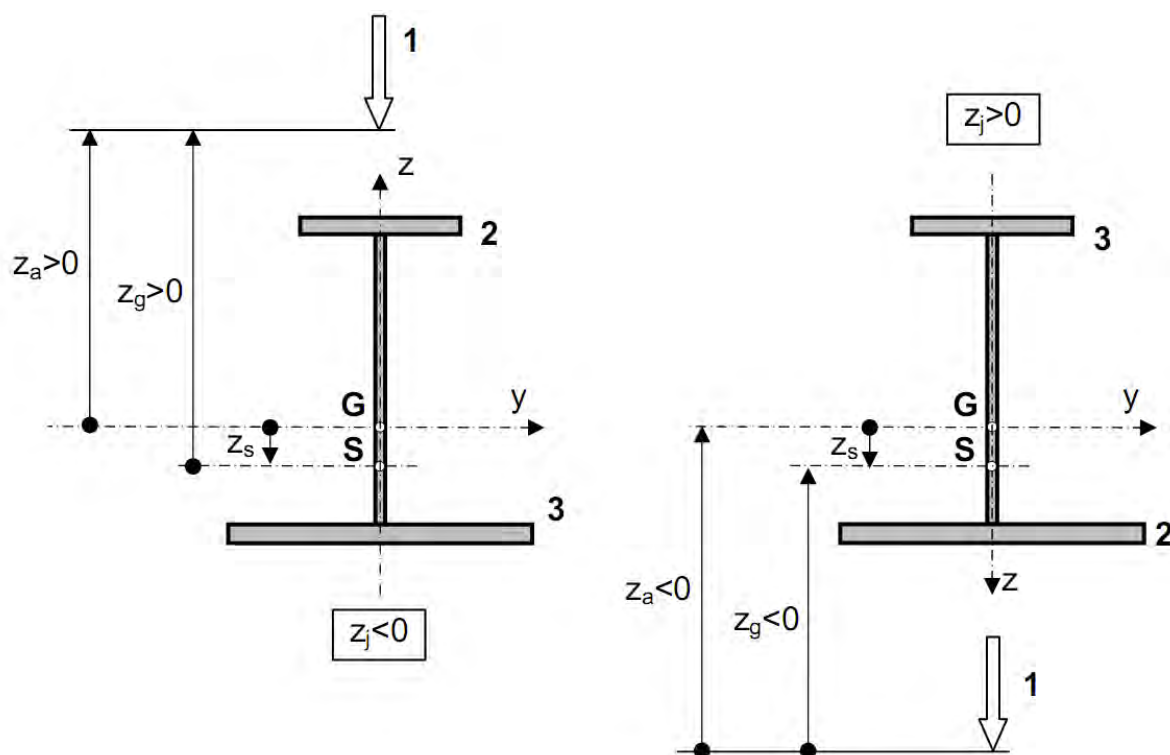


Рисунок В.1 – К определению координат  $z$ ,  $z_a$ ,  $z_g$  и  $z_j$  (1 – точка приложения внешней нагрузки; 2 – сжатая полка, 3 – растянутая полка)

Приблизительно значение  $z_j$  может быть определено по формулам:

$$z_j = 0.4h_s(2\beta_f - 1) \text{ – если } \beta_f > 0.5,$$

$$z_j = 0.5h_s(2\beta_f - 1) \text{ – если } \beta_f > 0.5,$$

где  $\beta_f = \frac{b_c^3 t_c}{b_c^3 t_c + b_t^3 t_t} = \frac{I_{fc} - I_{ft}}{I_{fc} + I_{ft}}$  – отношение разницы и суммы

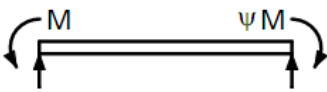









собственных моментов инерции полок относительно оси  $z-z$ , в [0]  $\beta_f = \psi_f$ ;

$b_c, t_c, b_t, t_t$  – ширина и толщина соответственно сжатой и растянутой полок;

$I_{fc}, I_{ft}$  – собственные моменты инерции полок (сжатой и растянутой соответственно) относительно оси z-z.

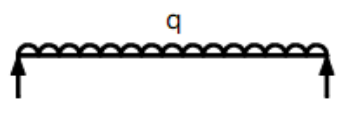

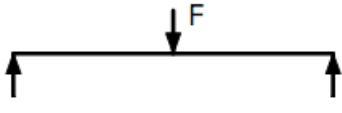

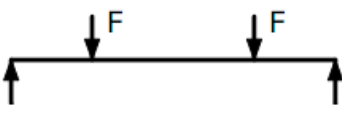
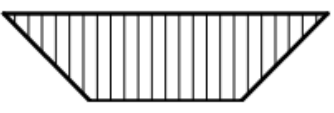
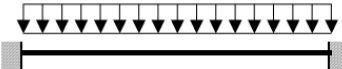



Коэффициенты  $C_1$  и  $C_3$  учитывают условия закрепления, а  $C_2$  – наличие и вид внешней нагрузки на элементе, и согласно  $[0, 0, 0]$  могут быть определены по следующим таблицам.

**Таблица В.1 – Значение коэффициентов  $C_1$  и  $C_2$  для элементов, нагруженных только концевыми моментами, согласно [0]**

Вид нагружения	Изменение изгибающих моментов вдоль элемента		kz	C1	C3	
	Вид эпюры	$\psi$			$\beta_f \leq 0$	$\beta_f > 0$
		+1.00	1.0	1.00	1.000	
			0.5	1.05	1.019	
		+0.75	1.0	1.14	1.000	
			0.5	1.19	1.017	
		+0.50	1.0	1.31	1.000	
			0.5	1.37	1.000	
		+0.25	1.0	1.52	1.000	
			0.5	1.60	1.000	
		0	1.0	1.77	1.000	
			0.5	1.86	1.000	
		-0.25	1.0	2.06	1.000	0.850
			0.5	2.15	1.000	0.650
		-0.50	1.0	2.35	1.000	$1.3 - 1.2\beta_f$
			0.5	2.42	0.950	$0.77 - \beta_f$
		-0.75	1.0	2.60	1.000	$0.55 - \beta_f$
			0.5	2.57	0.850	$0.35 - \beta_f$
		-1.00	1.0	2.60	$-\beta_f$	
			0.5	2.45	$0.125 - 0.7\beta_f$	$-0.125 - 0.7\beta_f$



**Таблица В.2 – Значение коэффициентов  $C_1$ ,  $C_2$  и  $C_3$  для элементов, нагруженных только внешней нагрузкой, согласно [0, 0]**

Вид нагружения	Изменение изгибающих моментов вдоль элемента	$k_z$	$C_1$	$C_2$	$C_3$
		1.0	1.12	0.45	0.525
		0.5	0.97	0.36	0.478
		1.0	1.35	0.59	0.411
		0.5	1.05	0.48	0.338
		1.0	1.04	0.42	0.562
		0.5	0.95	0.31	0.539
		1.0	2.57	1.55	0.750
		1.0	1.68	1.64	2.640

Если расчетный случай для моносимметричного элемента не соответствует рассмотренным вариантам, то для определения критического момента потери устойчивости по изгибно-крутильной форме следует использовать специальное программное обеспечение, например LTBeam (<http://www.cticm.com>), или любым пакетом КЭ – анализа с обязательным учетом следующих факторов:

- учет фактической геометрии поперечного сечения;
- учет фактической депланации поперечного сечения;
- учет фактического положения внешней нагрузки относительно центра сдвига (изгиба);
- учет фактического раскрепления элемента.

2) Критический момент потери устойчивости по изгибно-крутильной форме (потеря плоской формы изгиба) элемента симметричного сечения, изгибаемого в плоскости симметрии можно определить по редуцированной формуле  $M_{cr}$ :

$$M_{cr} = C_1 \frac{\pi^2 E I_z}{(k_z L)^2} \left\{ \sqrt{\left( \frac{k_z}{k_w} \right)^2 \frac{I_w}{I_z} + \frac{(k_z L)^2 G I_t}{\pi^2 E I_z} + (C_2 z_g)^2} - C_2 z_g \right\} \quad (B.4)$$

Коэффициенты  $C_1$  и  $C_2$  могут быть определены в зависимости от двух параметров:

отношения концевых моментов  $\psi$ ;

отношение максимального пролетного момента к максимальному концевому моменту  $\mu = \frac{M_{\text{пр}}}{M_{\text{оп}}}$ .

Согласно [0] номограммы, приведенные на рисунках В.3–В.6, учитывают два самых распространенных случая:

действует внешняя распределенная нагрузка и концевые моменты (рисунок В.2а) –  $\mu = \frac{qL^2}{8M}$ ;

действует внешняя одиночная сосредоточенная нагрузка и концевые моменты (рисунок В.2б) –  $\mu = \frac{FL}{4M}$ .

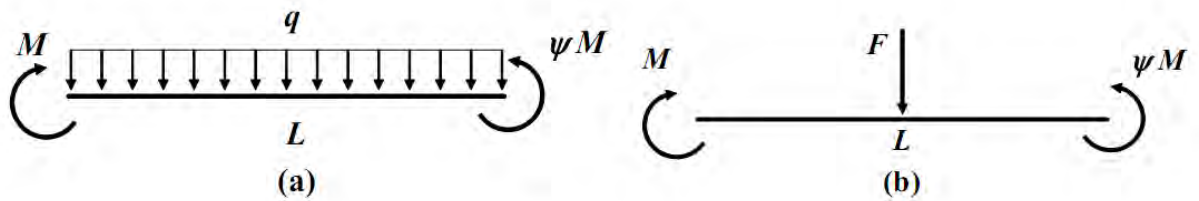
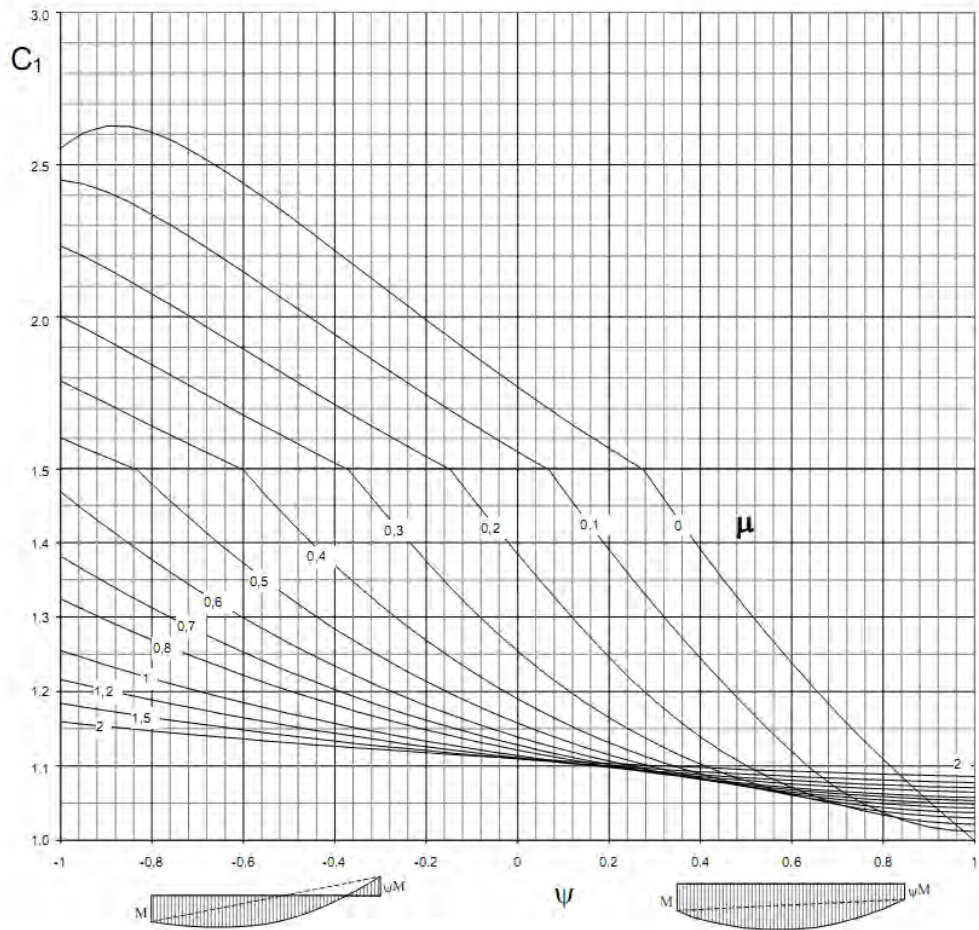
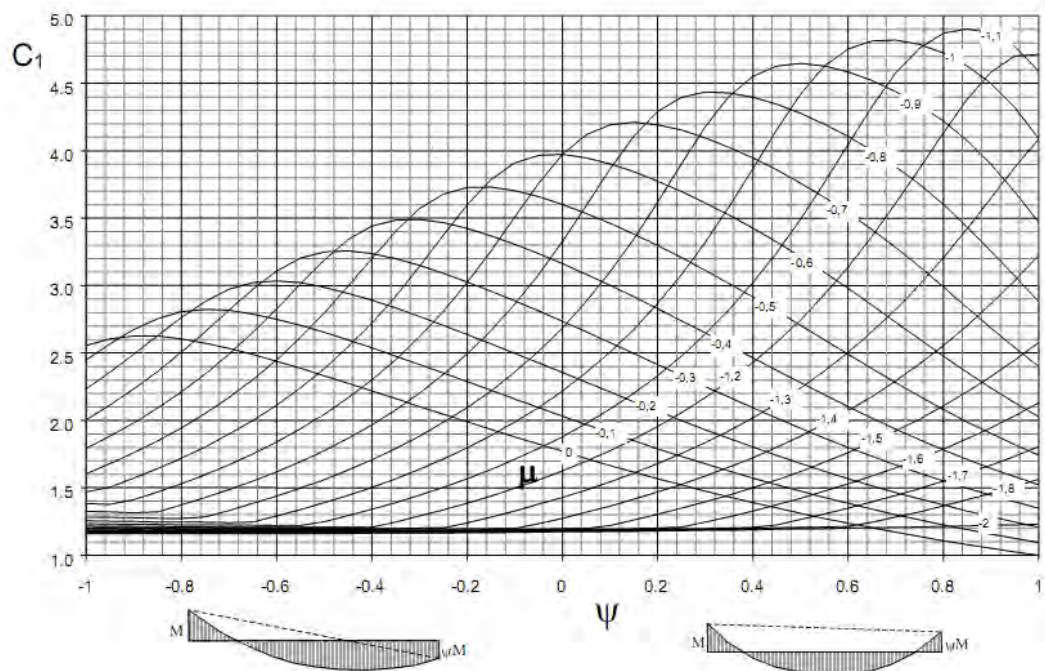


Рисунок В.2 – Расчетные схемы элементов



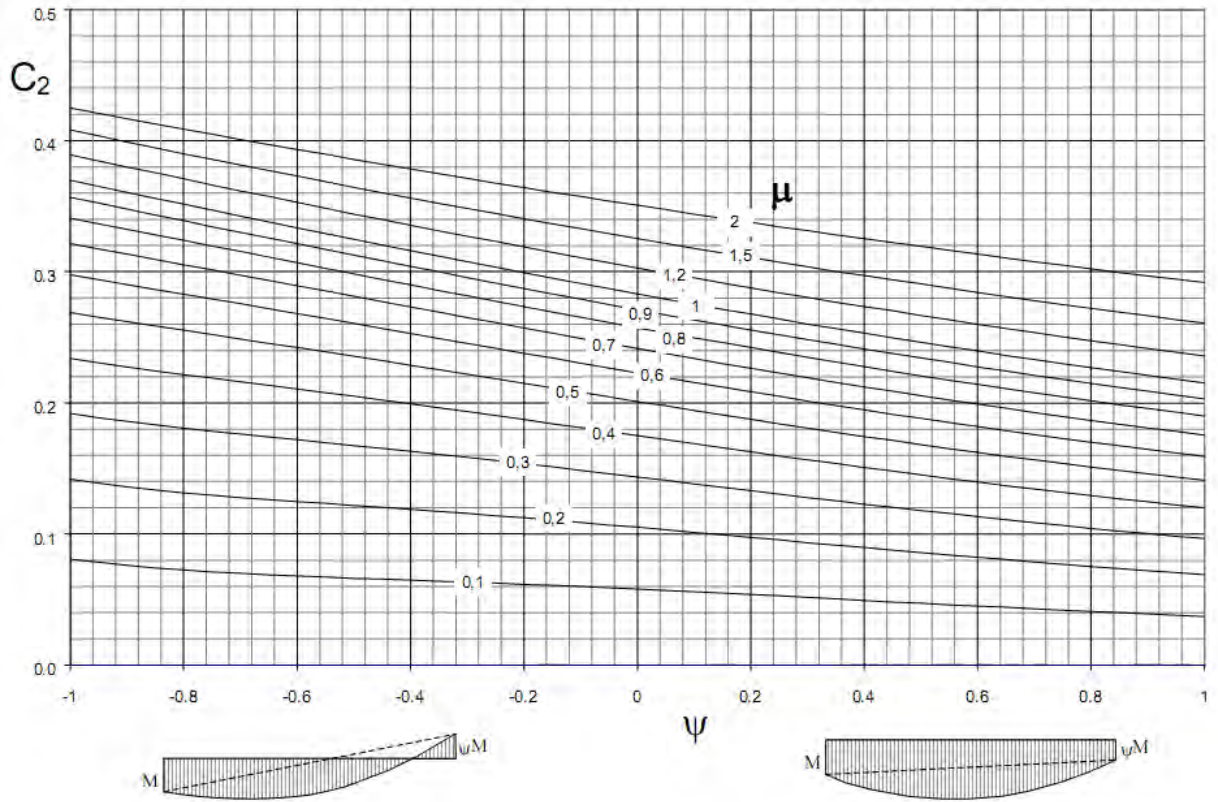
а)



б)

Рисунок В.3 – Коэффициент  $C_1$  для расчетного случая по рисунку П.4а

а)



б)

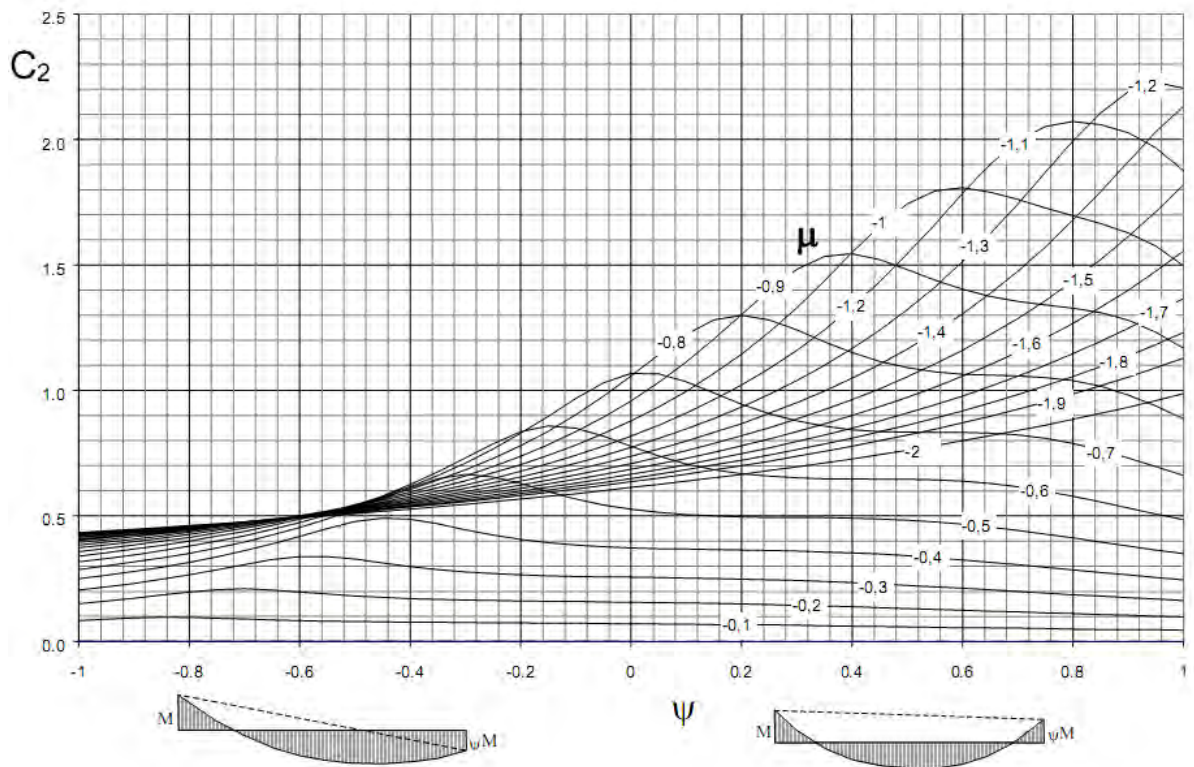
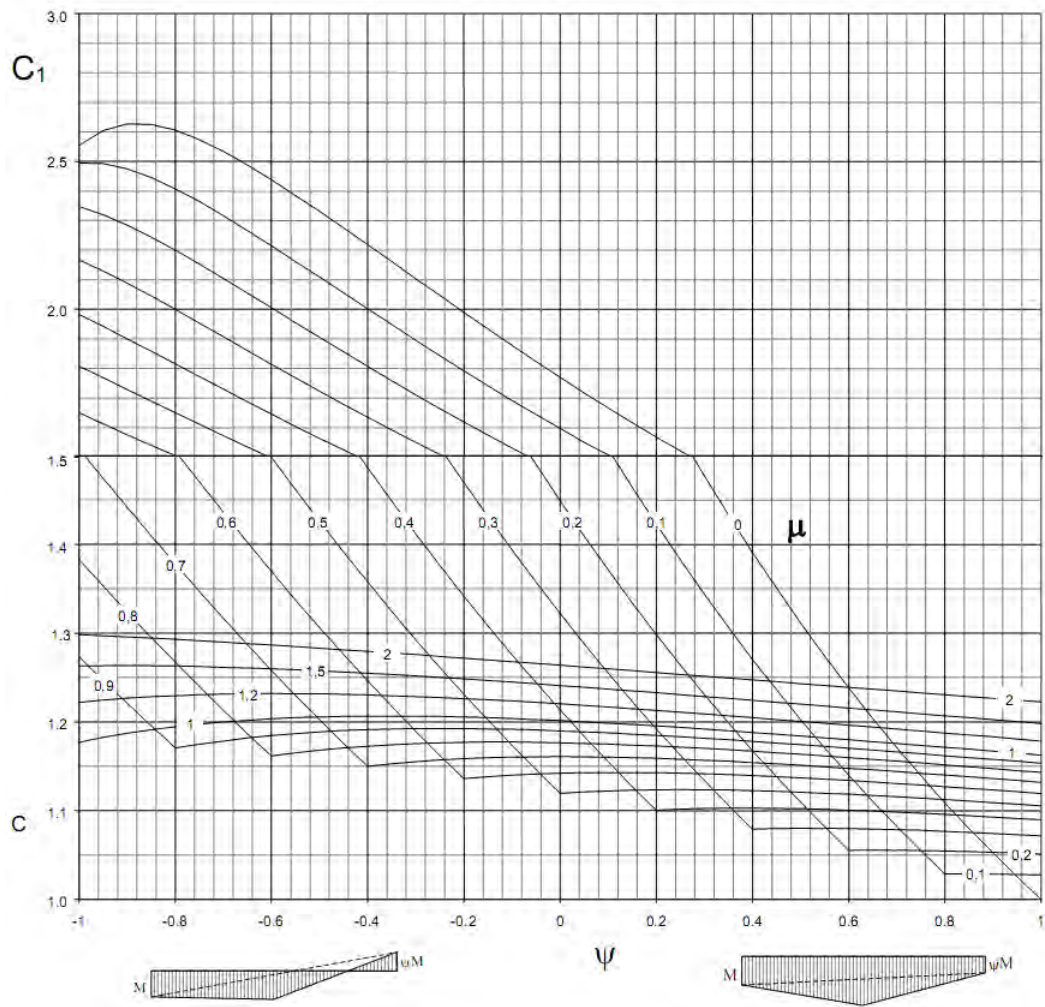
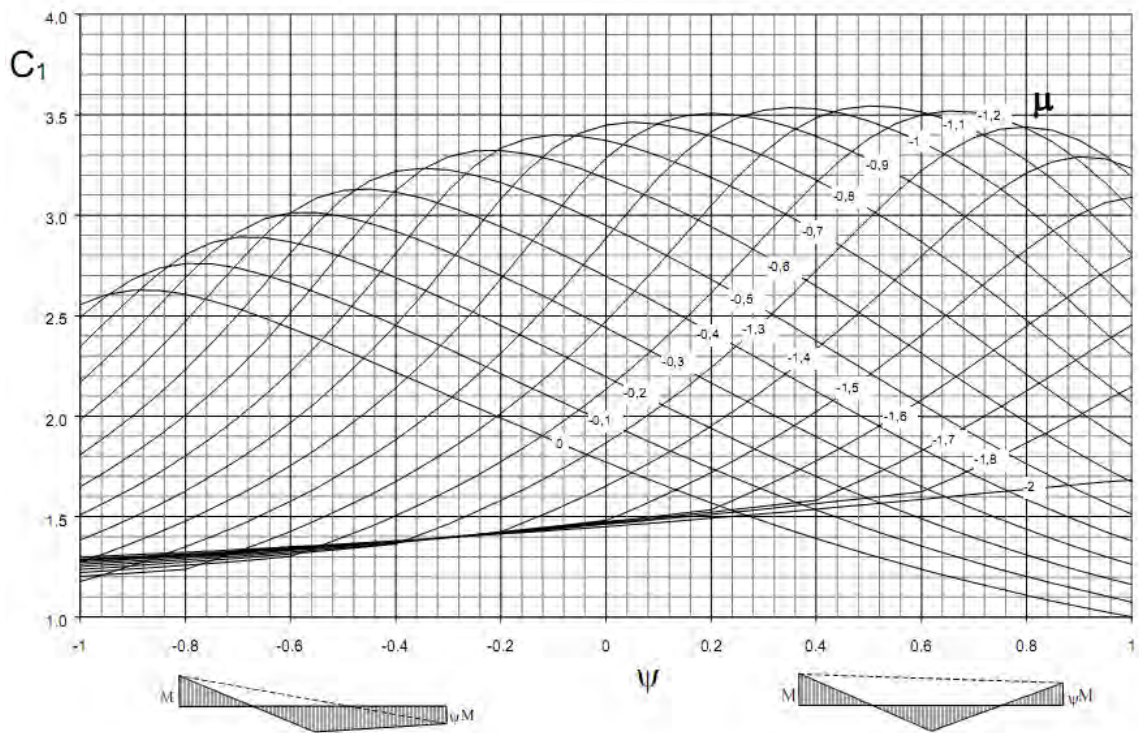


Рисунок В.4 – Коэффициент  $C_2$  для расчетного случая по рисунку П.4а



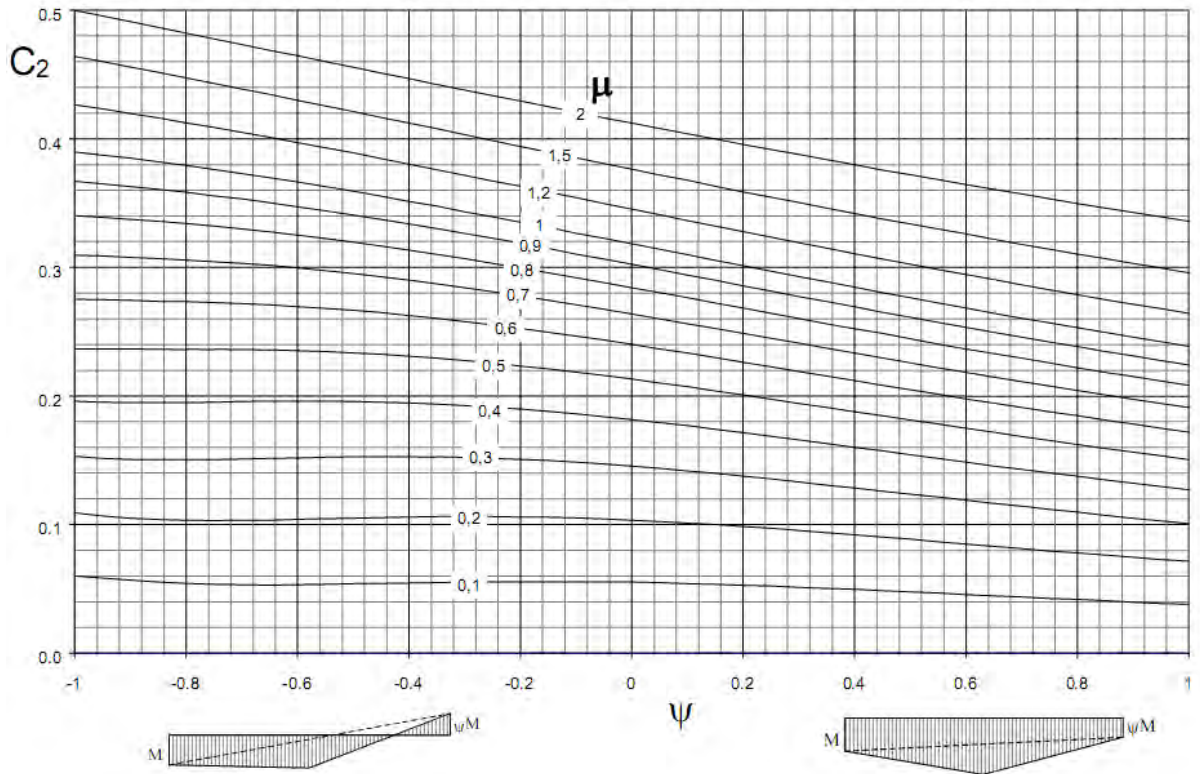
a)



б)

Рисунок В.5 – Коэффициент  $C_1$  для расчетного случая по рисунку П.4б

а)



б)

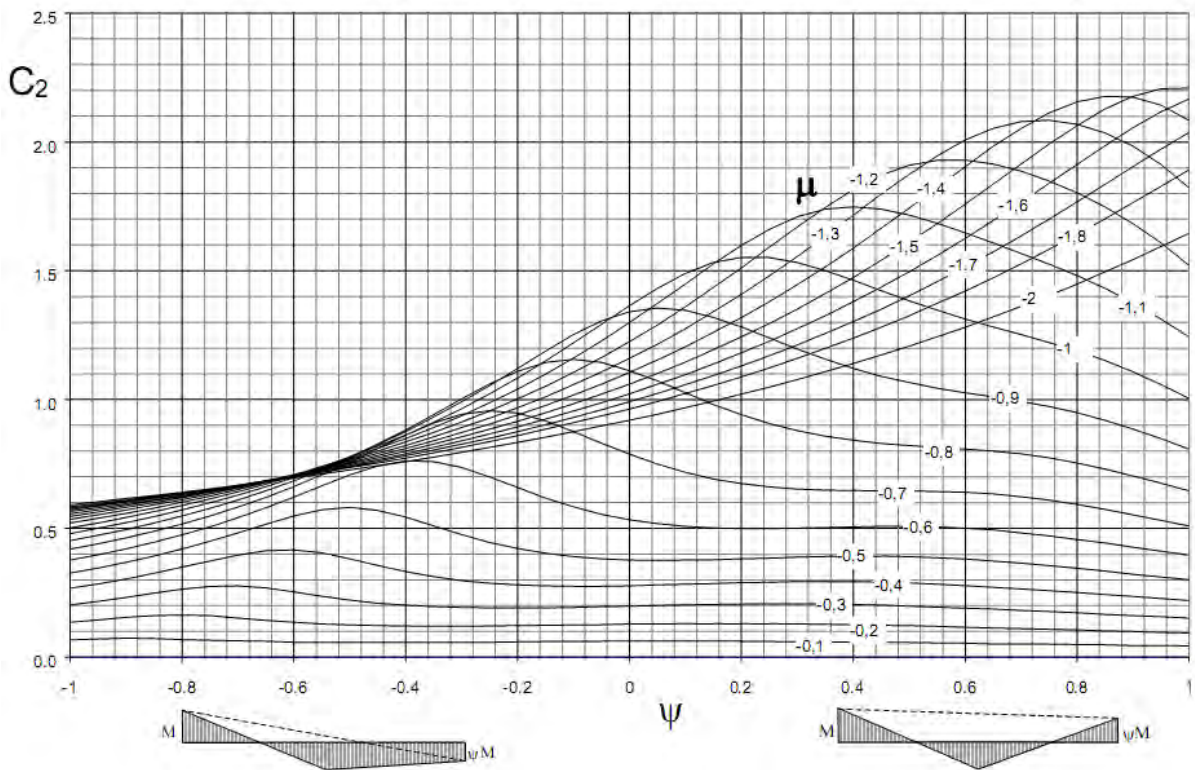


Рисунок В.6 – Коэффициент  $C_2$  для расчетного случая по рисунку П.4б

## ЛИТЕРАТУРА

1. ТКП EN 1993-1-1 Проектирование стальных конструкций. Общие правила и правила для зданий.
2. ТКП EN 1993-1-5 Проектирование стальных конструкций. Пластинчатые элементы.
3. NCCI: Critical axial load for torsional and flexural torsional buckling modes. SN001a-EN-EU.
4. NCCI: Elastic critical moment for lateral torsional buckling. SN003a-EN-EU.
5. NCCI: Buckling lengths of columns: rigorous approach. SN008a-EN-EU.
6. NCCI: Mono-symmetrical uniform members under bending and axial compression. SN030a-EN-EU.
7. Design manual for structural stainless steel. Third edition. Euro Inox. 2006.