

СРАВНЕНИЕ МЕТОДИК РАСЧЕТА ПО ПОТЕРЕ УСТОЙЧИВОСТИ СЖАТОГО, СТАЛЬНОГО, ХОЛОДНОФОРМОВАННОГО ЭЛЕМЕНТА ПО EN 1993-1-3-2009 И СП 260.1325800.2016

Ющенко Никита Сергеевич

магистрант, Тульский государственный университет, РФ, г. Тула

Введение. Вопрос о необходимости согласования российских и европейских норм назрел давно. В условиях глобализации, в строительство все чаще вовлекают иностранных инвесторов и проектные организации. В связи с чем возникает необходимость выявления различий и сходств по Еврокоду и отечественных норм. Известно, что в пользу применения Еврокодов есть весомые аргументы: существенная экономия металла, снижение проектных и монтажных работ.

В последнее время в России на фоне растущего спроса на металлическую продукцию особое внимание уделяется легким стальным тонкостенным конструкциям (ЛСТК). Строятся больницы, инфекционные центры, клиники и другие профильные объекты. Также данные профили используются при реконструкции старых зданий и сооружений.

ЛСТК по сравнению с горячекатаными металлическими конструкциями имеют ряд достоинств такие как: малый удельный вес, долговечность, быстрота сроков возведения, всесезонность, экономичность. Высота сечения этих профилей варьируется от 100 до 400 мм. Прокатывают из рулонной оцинкованной стали толщиной от 0,8 мм до 4 мм с пределом текучести от 150 МПа до 350 МПа и относительным удлинением не менее 16%.

В этой работе рассмотрены методики расчета на устойчивость сжатого стального холодноформованного элемента по EN 1993-1-3-2009 и СП 260.1325800.2016.

Основная часть. Исходные данные.

Высота элемента $H = 4$ м

Сжимающая нагрузка $N_{Ed} = 60$ кН

Таблица 1

Размеры поперечного сечения:

h, мм	b, мм	c, мм	г, мм	t _{ном} , мм	t, мм
200	60	20	3	2	1,96

Таблица 2

Свойства материала:

f_{yb} , МПа	f_u , МПа	E, МПа	ν	γ_{M0}	γ_{M1}	γ_c	R_y	G
350	420	210000	0,3	1	1	0,95	330	81000

Геометрические характеристики полного поперечного сечения:

$A, \text{мм}^2$	$i_y, \text{мм}$	$i_z, \text{мм}$	$I_y, \text{мм}^4$	$I_z, \text{мм}^4$	$I_{\omega}, \text{мм}^6$	$I_t, \text{мм}^4$	$A_{eff}, \text{мм}^2$
1380	76,6	21,7	$86,33 \cdot 10^5$	$14,53 \cdot 10^5$	$24,6 \cdot 10^9$	1880	860

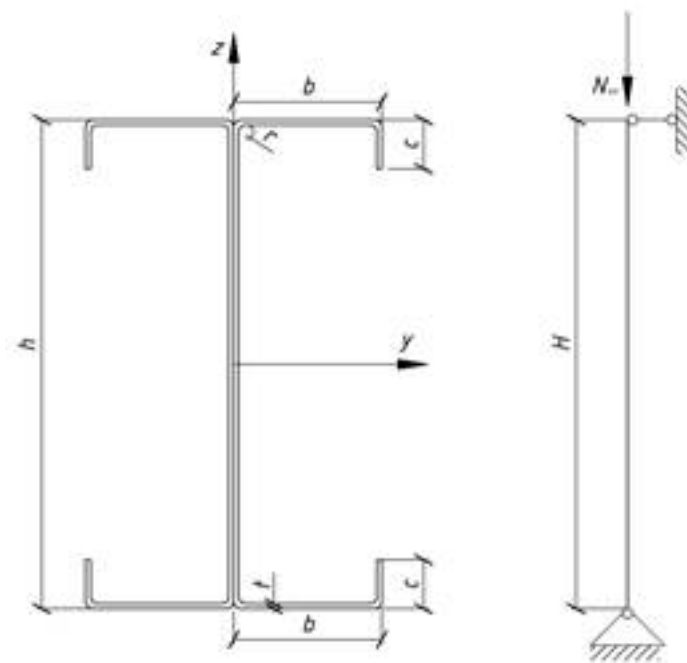


Рисунок 1. Расчетная схема и схема поперечного сечения стойки

Расчет на устойчивость сжатого стального холодноформованного элемента по [1,4-5].

Проверка прочности поперечного сечения:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{c,Rd}} \leq 1,0 \quad (1.1)$$

где:

$$N_{c,Rd} = \frac{f_{yb} A_{eff}}{\gamma_{M0}}$$

Так как поперечное сечение дважды симметричное, то эксцентриситет вертикальной нагрузки относительно оси $y'-y'$ равен нулю.

Проверка прочности:

$$\frac{60 \cdot 10^3}{860 \cdot 350 / 1} = 0,2 \leq 1,0$$

Условие прочности выполняется.

Проверка устойчивости элемента:

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1,0 \quad (1.2)$$

где

$$N_{b,Rd} = \frac{f_{yb} A_{eff}}{\gamma_{M^0}}$$

Определение понижающих коэффициентов χ_y, χ_z, χ_T :

Для приведенной выше расчетной схемы $\mu=1$, тогда

$$L_{cr,y} = L_{cr,z} = H = 4000 \text{ мм} \quad (1.3)$$

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}} = \pi \sqrt{\frac{210000}{350}} = 76,95 \quad (1.4)$$

Устойчивость относительно оси $y-y$: (1.5)

$$\bar{\lambda} = \frac{L_{cr,y}}{i_y} \sqrt{\frac{A_{eff}}{A}} = \frac{4000}{76,6} \sqrt{\frac{860}{1380}} = 0,54$$

Для кривой потери устойчивости a , коэффициент учитывающий начальные несовершенства равен:

$$a_y = 0,21 \quad (1.6)$$

$$\phi_y = 0,5 \cdot (1 + a(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2) = \quad (1.7)$$

$$= 0,5 \cdot (1 + 0,21(0,54 - 0,2) + 0,54^2) = 0,682$$

Редуцирующий коэффициент:

$$\chi_y = \frac{1}{0,682 + \sqrt{0,682^2 - 0,54^2}} = 0,91 \quad (1.8)$$

Устойчивость относительно оси $z - z$:

$$\bar{\lambda} = \frac{L_{cr,y}}{i_y} \sqrt{\frac{A_{eff}}{A}} = \frac{4000}{21,7} \sqrt{\frac{860}{1380}} = 1,89 \quad (1.9)$$

Для кривой потери устойчивости b , коэффициент учитывающий начальные несовершенства равен:

$$a_y = 0,34 \quad (1.10)$$

$$\phi_y = 0,5 \cdot (1 + a(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2) = \quad (1.11)$$

$$= 0,5 \cdot (1 + 0,34(1,89 - 0,2) + 1,89^2) = 2,40$$

Редуцирующий коэффициент:

$$\chi_z = \frac{1}{2,4 + \sqrt{2,4^2 - 1,89^2}} = 0,26 \quad (1.12)$$

Устойчивость при кручении по:

$$N_{\sigma,T} = \frac{1}{i_0^2} \left(GI_t + \frac{\pi^2 EI \omega}{I_T^2} \right), \quad (1.13)$$

где:

$$i_0^2 = i_y^2 + i_z^2 + y_0^2 + z_0^2 \quad (1.14)$$

y_0, z_0 координаты центра сдвига относительно центра тяжести полного поперечного сечения:

$$i_0^2 = 76,6^2 + 21,7^2 + 0 + 0 = 6338,45^2 \quad (1.15)$$

$$I_t = H \cdot 0,7 = 4000 \cdot 0,7 = 2800 \text{ мм} \quad (1.16)$$

Критическая сила для крутильной формы потери устойчивости в упругой стадии равна:

(1.17)

$$N_{\sigma,T} = \frac{1}{i_0^2} \left(GI_t + \frac{\pi^2 EI \omega}{I_T^2} \right) =$$

$$= \frac{1}{6338,45} \left(81000 \cdot 1880 + \frac{\pi^2 210000 \cdot 24,6 \cdot 10^9}{2800^2} \right) = 10299,23 \text{ кН}$$

Условная гибкость $\bar{\lambda}_T$ при крутильной форме потери устойчивости:

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff} f_y}{N_{\sigma}}} = \sqrt{\frac{860 \cdot 350}{10299230}} = 0,171 \quad (1.18)$$

$$a_T = 0,34 \quad (1.19)$$

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

$$= 0,5 \cdot (1 + 0,34(0,171 - 0,2) + 0,171^2) = 0,51 \quad (1.20)$$

Редуцирующий коэффициент:

$$\chi_T = \frac{1}{0,51 + \sqrt{0,51^2 - 0,171}} = 1,24 \quad (1.22)$$

Минимальное значение понижающего

коэффициента среди коэффициентов χ_y, χ_z, χ_T :

$$\chi_z = 0,26 \quad (1.23)$$

Несущая способность на сжатие при потере устойчивости:

$$N_{b,Rd} = \frac{0,26 \cdot 860 \cdot 350}{1} = 78260 \text{ Н} = 78,26 \text{ кН} \quad (1.24)$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} = \frac{60}{78,26} = 0,767 \leq 1,0 \quad (1.25)$$

Устойчивость элемента обеспечена.

Дополнительно рассчитаем несущую способность на сжатие при крутильной форме потере устойчивости с использованием понижающего коэффициента χ_T для сравнения значений по методике СП 260.1325800.2016.

$$N_{b,Rd} = \frac{1,24 \cdot 860 \cdot 350}{1} = 373240 \text{ Н} = 373,24 \text{ кН} \quad (1.26)$$

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} = \frac{60}{373,24} = 0,161 \leq 1,0 \quad (1.27)$$

Расчет на устойчивость сжатого стального холодноформованного элемента по СП 260.1325800.2016.

Прочность при центральном сжатии стержней вычисляют по формуле:

$$\frac{N}{A_{ef} R_y \gamma_c} \leq 1,0 \quad (2.1)$$

$$\frac{60 \cdot 10^3}{860 \cdot 330 \cdot 0,95} = 0,22$$

Определение понижающих коэффициентов χ_y, χ_z .

Для приведенной выше расчетной схемы $\mu=1$, тогда

$$L_{cr,y} = L_{cr,z} = H = 4000 \text{ мм} \quad (2.2)$$

$$\lambda_1 = \pi \sqrt{\frac{E}{f_y}} = \pi \sqrt{\frac{210000}{350}} = 76,95 \quad (2.3)$$

Устойчивость относительно оси $y-y$: (2.4)

$$\bar{\lambda} = \frac{L_{cr,y}}{i_y} \frac{\sqrt{\frac{A_{ef}}{A}}}{\lambda_1} = \frac{4000}{76,6} \frac{\sqrt{\frac{860}{1380}}}{76,95} = 0,54$$

Для кривой потери устойчивости a , коэффициент учитывающий начальные несовершенства равен:

$$a_y = 0,21 \quad (2.5)$$

$$(2.6)$$

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

$$= 0,5 \cdot (1 + 0,21(0,54 - 0,2) + 0,54^2) = 0,682$$

Редуцирующий коэффициент:

$$\chi_y = \frac{1}{0,682 + \sqrt{0,682^2 - 0,54^2}} = 0,91 \quad (2.7)$$

Устойчивость относительно оси $z-z$:

$$\bar{\lambda} = \frac{L_{cr,y}}{i_y} \sqrt{\frac{A_{ef}}{A}} = \frac{4000}{21,7} \sqrt{\frac{860}{1380}} = 1,89 \quad (2.8)$$

Для кривой потери устойчивости b , коэффициент учитывающий начальные несовершенства равен:

$$a_y = 0,14 \quad (2.9)$$

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

$$= 0,5 \cdot (1 + 0,34(1,89 - 0,2) + 1,89^2) = 2,40 \quad (2.10)$$

Редуцирующий коэффициент:

$$\chi_z = \frac{1}{2,4 + \sqrt{2,4^2 - 1,89^2}} = 0,26 \quad (2.11)$$

Минимальное значение понижающего

коэффициента среди коэффициентов χ_y, χ_z .

$$\chi_z = 0,26 \quad (2.12)$$

$$\frac{N}{\chi_z A_{ef} R_y \gamma_c} = \frac{1000 \cdot 60}{0,26 \cdot 0,95 \cdot 330 \cdot 860} = 0,856 \quad (2.13)$$

Расчет на устойчивость по крутильной форме потери устойчивости производится по формуле:

$$\frac{N}{\varphi A_{ef} R_y \gamma_c} \leq 1,0 \quad (2.14)$$

где φ – минимальный коэффициент устойчивости по

крутильной форме потери устойчивости, определяемый по максимальному значению $\bar{\lambda}_{TIF} = \max$. При этом, тип сечения определяется по Таблице 7.5 и $\lambda = \pi \cdot \bar{\lambda}_{TIF}$. Приведенная гибкость $\bar{\lambda}_{TIF}$ вычисляется по формуле (7.91) [3]:

$$\bar{\lambda}_{TIF} = \sqrt{\frac{A_{\sigma} R_y}{N_{\sigma}}} = \sqrt{\frac{860 \cdot 350}{10299230}} = 0,171 \quad (2.15)$$

$$\varphi_T = (\pi \bar{\lambda}_T) \quad (2.16)$$

, приложение Д = 0,99

$N_{cr,T}$ – критическая сила для крутильной формы потери устойчивости в соответствии с п. 7.7.8.3 [1] определяется по формуле

$$N_{\sigma,T} = \frac{1}{i_0^2} \left(GI_t + \frac{\pi^2 EI \omega}{I_T^2} \right) = \quad (2.17)$$

$$= \frac{1}{6338,45} \left(81000 \cdot 1880 + \frac{\pi^2 210000 \cdot 24,6 \cdot 10^9}{2800^2} \right) = 10299,23 \text{ кН}$$

где

$$i_0^2 = i_y^2 + i_z^2 + y_0^2 + z_0^2 = 76,6^2 + 21,7^2 + 0 + 0 = 6338,45^2 \quad (2.18)$$

(x_0, y_0 – координаты центра сдвига относительно центра тяжести полного сечения), I_t –

момент инерции при свободном кручении; I_{ω} – секторальный момент инерции; l_t – расчетная длина элемента при потере устойчивости по крутильной или изгибно-крутильной форме; определяется с учётом степени его защемления от кручения и деформации на каждом

конце ($I_T = k_T l$) В соответствии с п. 7.7.8.6 [2] в зависимости от условий закрепления на

концах элемента могут приниматься следующие значения $k_T = l_T / l$ 1,0 – для соединений, обеспечивающих частичное закрепление от кручения и деформации (Рисунок 7.18а [2]); 0,7 – для соединений, обеспечивающих значительное закрепление от кручения и деформации (Рисунок 6.18б [2])

$$I_t = H \cdot 0,7 = 4000 \cdot 0,7 = 2800 \text{ мм} \quad (2.19)$$

$$(2.20)$$

$$\frac{N}{\varphi A_{ef} R_y \gamma_c} = \frac{1000 \cdot 60}{0,99 \cdot 0,95 \cdot 330 \cdot 860} = 0,225$$

Таблица 4

Сравнение результатов:

	N _{ср,Т} , кН	Прочность при центральном сжатии стержней	Несущая способность на сжатие при потере устойчивости при χ_z	Несущая способность на крутильной форме потери
Расчет по СП 260.1325800.2016	10299,23	0,22	0,856	0,225
Расчет по EN 1993-1-3-2009	10299,23	0,22	0,767	0,161
Процент расхождения	0	10%	12%	40%

Выводы. Известно, что вступивший в силу в 2017 году СП 260.1325800.2016 «Конструкции стальные тонкостенные из холодногнутых оцинкованных профилей и гофрированных листов», основан на принципах расчета по EN 1993-1-3-2009 [1-2]. В ходе исследования выяснено, что в некоторых формулах применяются разные компоненты. Значения прочности при центральном сжатии имеет различие в 10% (табл.4), различие вызвано разными компонентами в формулах

(1.1), (2.1), где по EN 1993-1-3-2009 применяется f_{yb} – основной предел текучести и γ_{M0} – коэффициент надежности, а по СП 260.1325800.2016 R_y – расчетное сопротивление стали растяжению, сжатию, изгибу по пределу текучести и γ_c – коэффициент условия работы (табл.2).

Несущая способность на сжатие при потере устойчивости при минимальном коэффициенте понижения χ_z отличается на 12% (табл.4). Несущая способность на сжатие при крутильной форме потери устойчивости отличается на 40% (табл.4). Это вызвано тем, что по методике EN 1993-1-3-2009 использовался коэффициент понижения χ_T , а по методике СП

260.1325800.2016 φ – минимальный коэффициент устойчивости по крутильной форме потери устойчивости (табл.2). В итоге мы получаем, что потеря несущей способности по СП 260.1325800.2016 наступает раньше, чем по EN 1993-1-3-2009.

Список литературы:

1. EN 1993-1-3-2009 Проектирование стальных конструкций Часть 1-3. Общие правила. Дополнительные правила для холодноформованных элементов и профилированных листов. 133с.
2. СП 260.1325800.2016 Конструкции стальные тонкостенные из холодногнутых оцинкованных профилей и гофрированных листов. 122с.
3. СП 16.13330.2017 «Стальные конструкции. Актуализированная редакция СНиП II-23-81*» Москва 2011. 142с.
4. Семко В.А. Расчет несущих и ограждающих конструкций из стальных холодноформованных профилей в соответствии с EN 1993-1-3-2009. 148с

5. Э. Уэй. Расчет элементов из стальных холодноформованных профилей в соответствии с еврокодом 3, © Украинский Центр Стального Строительства, 2015. 103с.