

УДК 624.012.45.04

**ОСНОВЫ РАСЧЕТА ТОНКОСТЕННЫХ ХОЛОДНОГНУТЫХ СТЕРЖНЕЙ ПО МЕТОДИКЕ ТКП ЕН 1993-1-1; 1-3; 1-5 НА ЦЕНТРАЛЬНОЕ СЖАТИЕ**

**Р.В. КИБИСОВ, В.И. НАУМЕНКО**

(Представлено: канд. техн. наук, доц. В.Н. КИСЕЛЁВ)

Методику расчета рассмотрим на примере стержня С-образного профиля и найдем его расчетные размеры. При нахождении расчетного значения несущей способности стержня сравним коэффициент продольного изгиба  $\varphi$ , определяемый по отечественным нормам СП 53-102-2004, и соответствующий ему коэффициент  $\chi$  – по ТКП ЕН 1993-1-1; 1-3; 1-5. Сравним их. Определим эффективную (редуцированную) площадь сечения стержня, разбив стержень на пластины и исключив неработающие участки сечения.

**Введение.** В соответствии с ТКП ЕН 1993-1 различают четыре класса поперечных сечений тонкостенных стержней. В поперечных сечениях Класса 4 местная потеря устойчивости будет происходить перед достижением предела текучести в одной или более частях поперечного сечения. При этом для определения необходимых допусков при снижении несущей способности от допусков местной потери устойчивости должна использоваться эффективная ширина. Тонкостенные холодногнутые стержни открытого профиля относятся к Классу 4. Проведем расчет такого стержня на центральное сжатие.

**Определение расчетных характеристик поперечного сечения стержня.** Для определения эффективной площади поперечного сечения тонкостенный профиль расчленяют на отдельные пластинки. При этом необходимо учитывать при вычислении геометрических характеристик криволинейные участки сечений. При ручном счете возможна замена фактического профиля только прямоугольниками, исключая криволинейные участки, соблюдая инженерную точность вычислений.



Рис. 1. Заданная (а) и расчетная (б) формы поперечного сечения стержня

Исходные размеры:

$$h, b, c, r;$$

расчетные размеры поперечного сечения:

$$h_p = h - 2t; b_p = b - 2t; c_p = c - t;$$

геометрические характеристики расчетного сечения:

– площадь сечения

$$A = t(h_p + 2 \cdot b_p + 2 \cdot c_p);$$

– момент инерции при кручении

$$J_{kp} = 0,373 \cdot t^3 \cdot (h_p + 2 \cdot b_p + 2 \cdot c_p);$$

– осевые моменты инерции

$$J_x = t \cdot h_p^3 \cdot \left[ \frac{1}{12} + \frac{1}{2} \left( \frac{b_p}{h_p} \right) + \left( \frac{b_p}{h_p} \right) \left( \frac{t}{h_p} \right) + \frac{2}{3} \left( \frac{c_p}{h_p} \right)^3 + \left( \frac{c_p}{h_p} \right) - \left( \frac{c_p}{h_p} \right)^2 \right];$$

$$J_y = t \cdot b_p^3 \cdot \left[ \frac{1}{6} + \left( 1 + \frac{t}{b_p} \right)^2 \left( \frac{1}{4} + \frac{c_p}{b_p} \right) - A \cdot x_c^2 \right];$$

– положение центра тяжести сечения

$$x_c = \frac{t(b_p + t)(b_p + 2c_p)}{A};$$

– положение центра изгиба

$$x_A = 2 \cdot h_p \frac{\left(\frac{1}{8}\alpha_1^2 + \frac{1}{4}\alpha_1\alpha_2 - \frac{1}{3}\alpha_1\alpha_2^3\right)}{\left(\frac{1}{12} + \frac{1}{2}\alpha_1 + \frac{2}{3}\alpha_2^3 + \frac{1}{2}\alpha_2 - \alpha_2^3\right)},$$

где  $\alpha_1 = \frac{b_p}{h_p}; \alpha_2 = \frac{c_p}{h_p};$

– секториальный момент инерции

$$J_w = 2 \cdot t \left\{ \frac{1}{12} h^5 \left( \frac{1}{2} \gamma_1^2 + \gamma_1^3 + \gamma_2^3 \right) + H \left[ \frac{1}{2} \left( \frac{1}{2} + \frac{1}{3} \gamma_3 \right) + \left( \frac{1}{2} + \gamma_3 \right) \left( \frac{1}{2} + \frac{2}{3} \gamma_3 \right) \right] \right\},$$

где  $\gamma_1 = \frac{x_A}{h_p}; \gamma_2 = \frac{b_p - x_A}{h_p}; \gamma_3 = \frac{c_p}{h_p} \frac{(b_p + x_A)}{(b_p - x_A)}; H = \frac{1}{2} c_p \cdot h_p (b_p - x_A)^2.$

Физические характеристики стали:

$E = 2,06 \times 10^4$  кН/см<sup>2</sup> – модуль упругости;

$G = 0,79 \times 10^4$  кН/см<sup>2</sup> – модуль сдвига;

$\nu = 0,3$  – коэффициент Пуассона;

$\sigma_r = 25 \dots 35$  кН/см<sup>2</sup> – предел текучести.

$\delta \geq 16\%$  – относительное удлинение после разрыва.

**Расчет несущей способности стержня.** Расчетное значение несущей способности стержня при потере устойчивости для поперечных сечений 4 класса определяется по формуле:

$$N_{b,Rd} = \chi \cdot A_{eff} \cdot \sigma_r, \quad (1)$$

где  $\chi$  – понижающий коэффициент для соответствующей формы потери устойчивости, аналогичный отечественному коэффициенту продольного изгиба  $\varphi$ ;

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

где  $\Phi = 0,5 \cdot [1 + \alpha(\bar{\lambda} - 0,2) + \bar{\lambda}^2]; \bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A_{eff} \cdot \sigma_r}{N_{cr}}};$

$\alpha$  – коэффициент отклонения, учитывающий профиль сечения стержня для С-образного профиля  $\alpha = 0,49$ ;

$N_{cr}$  – критическая сила для соответствующей формы общей потери устойчивости в упругой стадии, зависящей от характеристики поперечного сечения брутто (изгибная, крутильная, изгибно-крутильная – минимальная из них).

Критическая сила общей изгибной потери устойчивости:

$$N_{cr,x} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot A}{\lambda_x^2}; N_{cr,y} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot A}{\lambda_y^2}; \quad (2)$$

где  $\lambda_x = \frac{l_{ef,x}}{\sqrt{J_x/A}}; \lambda_y = \frac{l_{ef,y}}{\sqrt{J_y/A}}; l_{ef,x}, l_{ef,y}$  – соответственно, расчетные длины стержня относительно оси

x и y.

Критическая сила общей крутильной формы потери устойчивости:

$$N_{cr,f} = \frac{1}{i_0^2} \left[ G \cdot J_{kr} + \frac{\pi^2 \cdot E \cdot J_w}{l_{ef,1}^2} \right], \quad (3)$$

где  $i_0 = \sqrt{i_x^2 + i_y^2 + (x_A + x_c)^2}, l_{ef,1}$  – расчетная длина крутильной формы потери устойчивости.

Критическая сила общей изгибно-крутильной формы потери устойчивости:

$$N_{cr,et} = \frac{1}{2\beta} \left[ N_{cr,x} + N_{cr,t} - \sqrt{(N_{cr,x} + N_{cr,t})^2 - 4 \cdot \beta \cdot N_{cr,x} \cdot N_{cr,t}} \right], \quad (4)$$

где  $\beta = 1 - \left( \frac{x_A + x_C}{i_0} \right)^2$ .

Принимается минимальное значение критической силы из определяемых по формулам (2)–(4)  $N$ .

При сравнении величин коэффициента продольного изгиба  $\phi$ , определяемым по отечественным нормам СП 53-102-2004, и коэффициента  $\chi$  – по ТКП ЕН 1993-1-1; 1-3; 1-5 (рис. 2) максимальная разница около 5% наблюдается при гибкости стержня примерно равной 10. Это относится к кривой  $c$  ( $a = 0,49$ ), которая характерна для одиночных несимметричных профилей, т.е. для С-образного сечения.

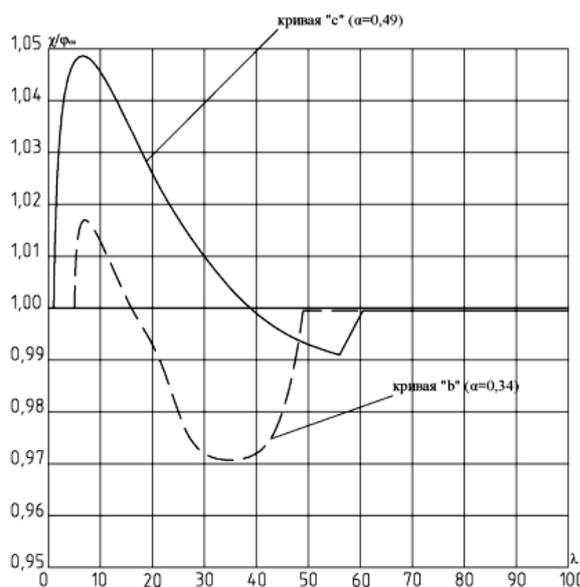


Рис. 2. Сравнение коэффициентов продольного изгиба  $\phi$  по отечественным нормам с соответствующим коэффициентом  $\chi$  – по ТКП ЕН 1993-1-1; 1-3; 1-5

Основная формула для определения несущей способности центрально сжатого стержня (1) содержит величину эффективной (редуцированной) площади поперечного сечения  $A_{eff}$  (рис. 3).

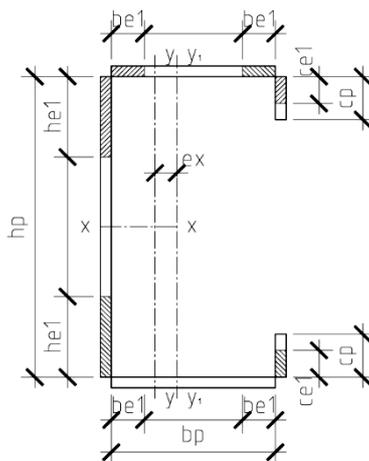


Рис. 3. Эффективная площадь поперечного сечения  $A_{eff}$

С-образный профиль состоит из стенки, двух полок и двух отгибов. Каждый из этих элементов профиля под воздействием нормальных напряжений может находиться в закритической стадии, т.е. терять устойчивость. При этом часть сечения элемента исключается из работы. Участки сечения профиля,

примыкающие к граням стержня и заштрихованные на рис. 3 составляют эффективную площадь сечения  $A_{eff}$ . Для определения эффективной площади сечения в целом рассматривают каждую грань (пластинку) отдельно.

Находим условную гибкость.

$$\lambda_c = \frac{c_p}{t \cdot \pi} \sqrt{\frac{12(1-\nu^2) \cdot \sigma_\tau}{E \cdot K_\sigma}}$$

Редукционный коэффициент:

$$\rho_w = \begin{cases} 1,0, & \text{если } \lambda_w \leq 0,673; \\ \frac{1}{\lambda_w} - \frac{0,22}{\lambda_w^2}, & \text{если } \lambda_w > 0,673. \end{cases}$$

Эффективную площадь:

$$A_{eff} = 2 \cdot t(I t_{e1} + 2 \cdot b_{e1} + 2 \cdot c_{e1}).$$

Ось  $y$ -у на рис. 3 соответствует полному сечению профиля. Редуцированное сечение профиля имеет свою ось  $y_1$ - $y_1$ . Поэтому у редуцированного сечения центр тяжести смещается на величину  $e$ , и продольное усилие приобретает эксцентриситет. Стержень становится внецентренно сжатым.

$$A_{i,red} = \chi_d \cdot A_x \cdot \frac{\sigma_r}{\sigma_\tau} \leq A_i,$$

где  $A_y = t \cdot (b_{c1} + c_{c1})$ ;  $\chi_d$  – коэффициент снижения несущей способности с учетом потери устойчивости формы сечения,

$$\begin{aligned} \chi_d &= 1,0 & \text{при } \bar{\lambda}_d \leq 0,65; \\ \chi_d &= 1,47 - 0,723 \cdot \bar{\lambda}_d & \text{при } 0,65 < \bar{\lambda}_d \leq 1,38; \\ \chi_d &= \frac{0,66}{\bar{\lambda}_d} & \text{при } \bar{\lambda}_d \geq 1,38. \end{aligned}$$

При определении геометрических характеристик эффективного поперечного сечения уменьшенная эффективная площадь  $A_{s,red}$  должна быть определена с учетом уменьшенной толщины для всех элементов, включенных в  $A_s$ .

Эффективная площадь всего сечения определяется по формуле

$$A'_{eff} = 2 \cdot t(h_{e1} + b_{e1}) + 2 \cdot t_{red}(b_{e1} + c_{e1}).$$

**Проверка.** Проверяем стержень на устойчивость, как внецентренно сжатый по формуле

$$\left( \frac{N}{N_{b,Rb}} \right)^{0,8} + \left( \frac{\Delta M}{M_{b,Rd}} \right)^{0,8} \leq 1, \text{ где } \Delta M = N \cdot e; M_{b,Rb} - \text{изгибающий момент.}$$

**Заключение.** При расчете стержней по методике ТКП ЕН 1993-1-1; 1-3; 1-5 следует, что при вычислении геометрических характеристик криволинейные участки сечений следует учитывать, но при ручном счете возможна замена фактического профиля только прямоугольниками, исключая криволинейные участки, соблюдая инженерную точность вычислений. Также, при сравнении величин коэффициента продольного изгиба  $\varphi$ , определяемым по отечественным нормам СП 53-102-2004, и коэффициента  $\chi$  – по ТКП ЕН 1993-1-1; 1-3; 1-5, наблюдается максимальная разница около 5%. Также при расчетах составляют эффективную площадь сечения  $A_{eff}$ , т.к. часть сечения исключается из работы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций. Ч. 1-1. Общие правила и правила для зданий : технический кодекс установившейся практики ТКП ЕН 1993-1-1-2009 (02250) / Мин-во архитектуры и строительства Республики Беларусь. – Минск, 2009.
2. Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций. Ч. 1-3. Общие правила. Дополнительные правила для холодноформованных элементов и профилированных листов : технический кодекс установившейся практики ТКП ЕН 1993-1-3-2009 (02250) / Мин-во архитектуры и строительства Республики Беларусь. – Минск, 2009.
3. Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций. Ч. 1-5. Пластинчатые элементы конструкций : технический кодекс установившейся практики ТКП ЕН 1993-1-5-2009 (02250) / Мин-во архитектуры и строительства Республики Беларусь. – Минск, 2009.