



УКРАИНСКИЙ ЦЕНТР
СТАЛЬНОГО
СТРОИТЕЛЬСТВА

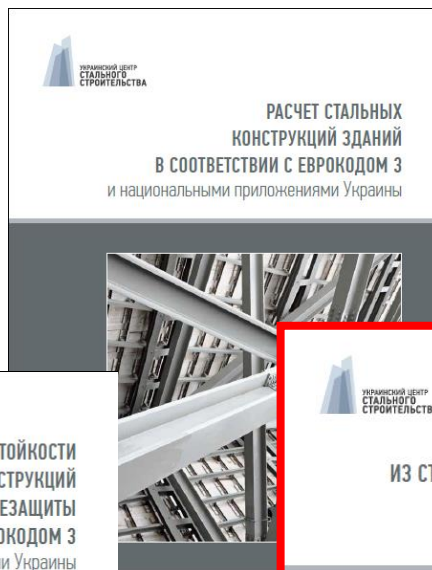
Численный пример. Определение характеристик эффективного поперечного сечения С-образного холодноформованного профиля с одинарными отгибами полок.

Никита Беляев
ведущий инженер-конструктор УЦСС

Семинар «ЛСТК: проектирование, производство и монтаж»
16-17 апреля 2015



Публикации УЦСС



Размеры поперечного сечения и характеристики материала

Высота сечения

$$h = 200 \text{ мм}$$

Ширина полки

$$b_1 = b_2 = 65 \text{ мм}$$

Высота отгиба полки

$$c = 25 \text{ мм}$$

Радиус закругления

$$r = 3 \text{ мм}$$

Номинальная толщина

$$t_{nom} = 2 \text{ мм}$$

Толщина стали

$$t = 1.96 \text{ мм}$$

Расчетный предел текучести

$$f_y = 350 \text{ Н/мм}^2$$

Модуль упругости

$$E = 210000 \text{ Н/мм}^2$$

Коэффициент Пуассона

$$\nu = 0.3$$

Частный коэффициент надежности

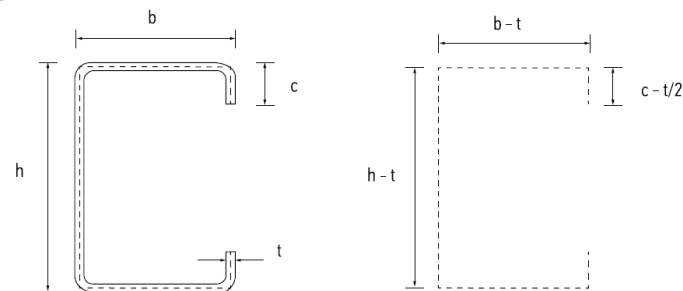
$$\gamma_{M0} = 1.00$$

$$h_p = h - t_{nom} = 200 - 2 = 198 \text{ мм}$$

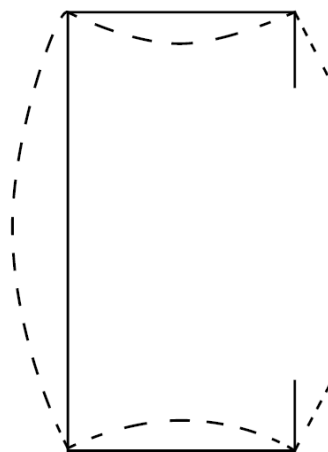
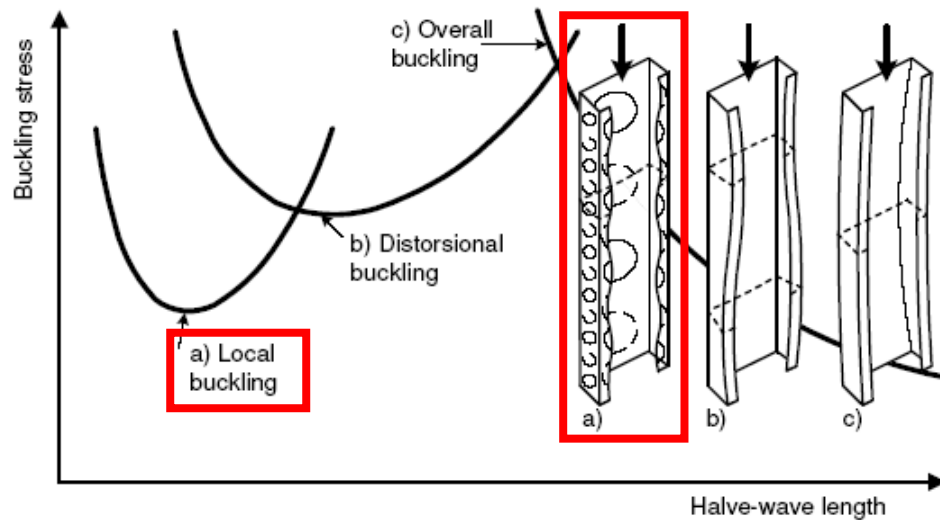
$$b_{p1} = b_{p2} = b_1 - t_{nom} = 65 - 2 = 63 \text{ мм}$$

$$c_p = c - t_{nom}/2 = 25 - 2/2 = 24 \text{ мм}$$

Определяем размеры сечения по срединным линиям



1. Учет местную потерю устойчивости СЖАТЫХ частей



Местная
потеря устойчивости

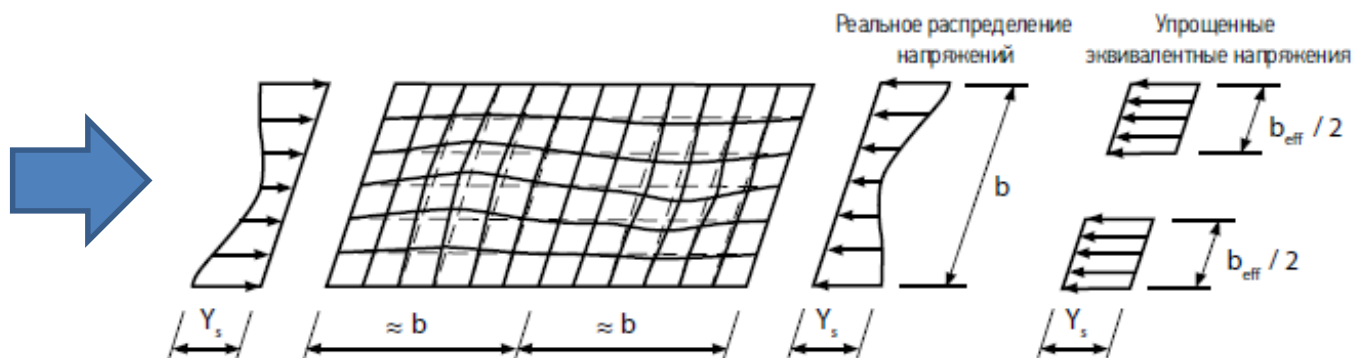


Рисунок 3.1 Концепция эффективной ширины применительно к пластине

Геометрические характеристики эффективного сечения без учета закруглений

Определение эффективного сечения полок и отгибов

Шаг 1

Эффективная ширина полок

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

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

$$\bar{\lambda}_{p,b} = \frac{b_{p1}/t}{28.4 \varepsilon \sqrt{k_\sigma}} = \frac{63 / 1.96}{28.4 \times \sqrt{235/350} \times \sqrt{4}} = 0.691$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_{p,b} - 0.055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}_{p,b}^2} = \frac{0.691 - 0.055 \times (3 + 1)}{0.691^2} = 0.986 \leq 1.0$$

$$b_{eff} = \rho b_{p1} = 0.987 \times 63 = 62.2 \text{ мм}$$

$$b_{e1} = b_{e2} = 0.5 b_{eff} = 0.5 \times 62.2 = 31.1 \text{ мм}$$

Таблица 3.1 Коэффициенты учета потери устойчивости для сжатых пластин с двухсторонним закреплением по краям

Распределение напряжений (сжатие со знаком "+")	Эффективная ширина b_{eff}
	$\psi = 1:$ $b_{eff} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = 0.5 \cdot b_{eff}, b_{e2} = 0.5 \cdot b_{eff}$
	$1 > \psi \geq 0:$ $b_{eff} = \rho \cdot \bar{b}$ $b_{e1} = \frac{2}{5 - \psi} \cdot b_{eff}, b_{e2} = b_{eff} - b_{e1}$
	$\psi < 0:$ $b_{eff} = \rho \cdot b_2 = \rho \cdot \bar{b} / (1 - \psi)$ $b_{e1} = 0.4 \cdot b_{eff}, b_{e2} = 0.6 \cdot b_{eff}$
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1
Коэффициент учета потери устойчивости k_σ	4.0

Таблица 4.1, Еврокод 3, Часть 1-5 (элемент с двухсторонним закреплением)

ДСТУ-Н Б EN
1993-1-3
5.5.3.2(5a)

Эффективная ширина краевого элемента жесткости (отгиба)

Коэффициент потери устойчивости определяется следующим образом:

если $b_{p,c}/b_{pl} \leq 0.35$: $k_\sigma = 0.5$

если $0.35 < b_{p,c}/b_{pl} \leq 0.6$: $k_\sigma = 0.5 + 0.83 \sqrt[3]{(b_{p,c}/b_{pl} - 0.35)^2}$

см. страницу 19

$b_{p,c}/b_{pl} = 24/63 = 0.38$ следовательно, $k_\sigma = 0.5 + 0.83 \sqrt[3]{(0.38 - 0.35)^2} = 0.582$

ДСТУ-Н Б EN
1993-1-5
4.4

$\bar{\lambda}_{p,c} = \frac{c_p/t}{28.4 \varepsilon \sqrt{k_\sigma}} = \frac{24/1.96}{28.4 \times \sqrt{235/350} \times \sqrt{0.58}} = 0.690$

$\rho = \frac{\bar{\lambda}_{p,c} - 0.188}{\bar{\lambda}_{p,c}^2} = \frac{0.690 - 0.188}{0.690^2} = 1.05$

Для элемента с односторонним закреплением – см. страницу 17

но $\rho \leq 1$ следовательно, $\rho = 1$

Эффективная ширина определяется следующим образом:

$c_{eff} = \rho c_p = 1 \times 24 = 24 \text{ мм}$

Отгиб полностью эффективен

ДСТУ-Н Б EN
1993-1-3
5.5.3.2(5a)
5.5.3.2(6)

Эффективная площадь краевого элемента жесткости составляет:

$A_s = t(b_{e2} + c_{eff}) = 1.96 \times (31.1 + 24) = 108.0 \text{ мм}^2$

Аналогично для стенки
(элемент закреплен с двух краев)

Характеристики эффективного сечения стенки

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

$$\bar{\lambda}_{p,h} = \frac{h_p/t}{28.4 \varepsilon \sqrt{k_\sigma}} = \frac{198/1.96}{28.4 \times \sqrt{235/350} \times \sqrt{4}} = 2.172$$

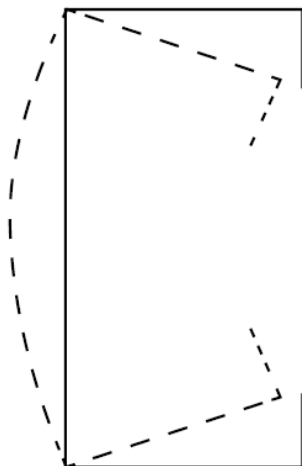
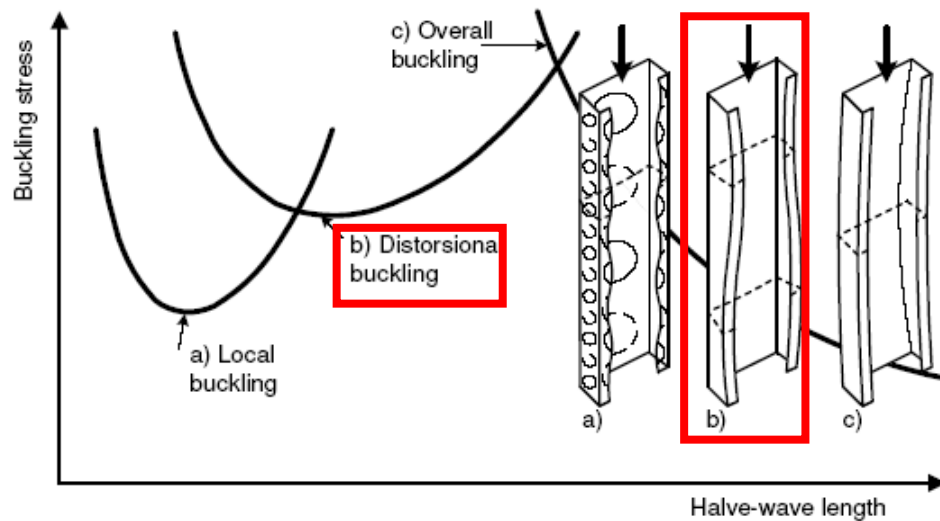
$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_{p,h} - 0.055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}_{p,h}^2} = \frac{2.171 - 0.055 \times (3 + 1)}{2.171^2} = 0.414$$

$$h_{\text{eff}} = \rho h_p = 0.414 \times 198 = 82.0 \text{ мм}$$

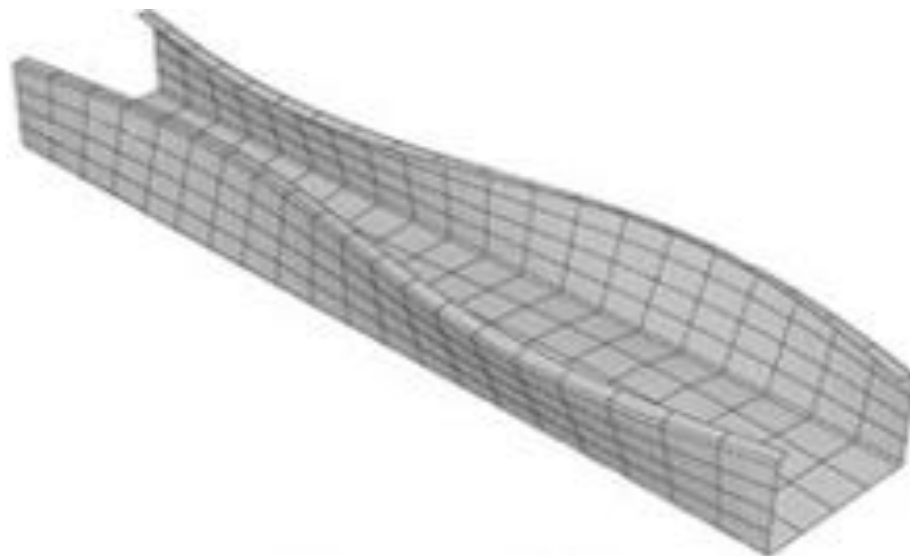
$$h_{e1} = h_{e2} = 0.5 h_{\text{eff}} = 0.5 \times 82.0 = 41.0 \text{ мм}$$

ДСТУ-Н Б EN
1993-1-5
4.4

2. Учет потерю устойчивости формы сечения



Потеря устойчивости
формы сечения



Шаг 2

ДСТУ-Н Б EN
1993-1-3
5.5.3.2(7)

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

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

где K – это жесткость пружины на единицу длины, а I_s – это эффективный момент инерции сечения элемента жесткости.

ДСТУ-Н Б EN
1993-1-3
5.5.3.1(5)

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

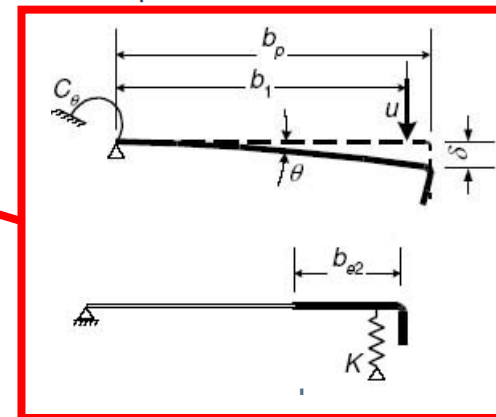
$$b_1 = b_{p1} - \frac{b_{e2} t b_{e2} / 2}{(b_{e2} + c_{eff}) t} = 63 - \frac{31.1 \times 1.96 \times 31.1 / 2}{(31.1 + 24) \times 1.96} = 54.22 \text{ мм}$$

$$b_2 = b_1 = 54.22 \text{ мм (для сечения с равными полками)}$$

$$k_f = \frac{A_{s2}}{A_{s1}} = \frac{108}{108} = 1.0 \text{ для элемента при осевом сжатии}$$

$$K = 0,421 \text{ (Н/мм)/мм}$$

$$I_s = \frac{b_{e2} t^3}{12} + \frac{c_{eff}^3 t}{12} + b_{e2} t \left[\frac{c_{eff}^2}{2(b_{e2} + c_{eff})} \right]^2 + c_{eff} t \left[\frac{c_{eff}}{2} - \left[\frac{c_{eff}^2}{2(b_{e2} + c_{eff})} \right] \right]^2 = 6101 \text{ мм}^4$$



Рассматривается, как сжатая стойка с непрерывным раскреплением условной пружиной

См. страницу 21

ДСТУ-Н Б EN
1993-1-3
5.5.3.1(7)

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

$$\sigma_{cr,s} = \frac{2 \times \sqrt{0.421 \times 210000 \times 6101}}{108.0} = 430.1 \text{ Н/мм}^2$$

$$\bar{\lambda}_d = \sqrt{f_y / \sigma_{cr,s}} = \sqrt{350 / 430} = 0.902$$

поскольку $0.65 < \bar{\lambda}_d < 1.38$, $\chi_d = 1.47 - 0.723 \bar{\lambda}_d$

$$\chi_d = 1.47 - 0.723 \times 0.902 = 0.818$$

Шаг 3

ДСТУ-Н Б EN 1993-1-3 позволяет произвести дополнительную итерацию с целью уточнения значения χ_d . Такая итерация не производилась для данного примера, поэтому используются первоначальные значения.

$$t_{red} = t \chi_d = 1.96 \times 0.818 = 1.60 \text{ мм}$$

для $\bar{\lambda}_d \leq 0.65$, $\chi_d = 1.0$;

для $0.65 \leq \bar{\lambda}_d \leq 1.38$, $\chi_d = 1.47 - 0.723 \bar{\lambda}_d$;

для $\bar{\lambda}_d > 1.38$, $\chi_d = 0.66 / \bar{\lambda}_d$.

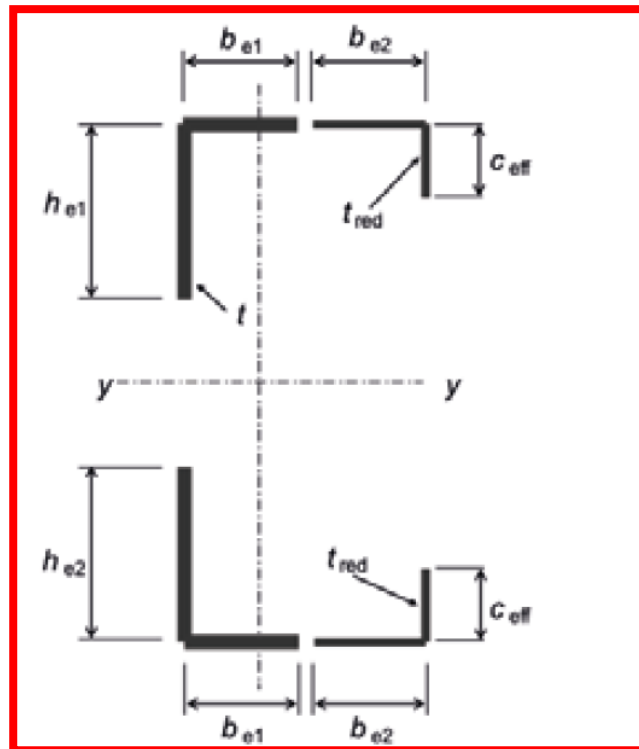
см. страницу 23

ДСТУ-Н Б EN
1993-1-3
5.5.3.2(12)

Сделаны упрощения для ручного расчета. Можно уточнять эффективные размеры отгиба. Принять $\bar{\lambda}_{p,red} = \bar{\lambda}_p \sqrt{\chi_d}$ и пересчитать отгиб, начиная с его размеров.

Геометрические характеристики всего эффективного поперечного сечения

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



Так будет выглядеть эффективное (редуцированное) сечение, но согласно Примеру 1 нужно еще учесть скругления

Сведенные геометрические характеристики эффективного сечения без учета закруглений

Эффективная площадь

$$A_{eff} = 459.0 \text{ мм}^2$$

Расстояние от центра тяжести эффективного сечения до полки

$$z_{gc} = 99.0 \text{ мм}$$

Расстояние от центра тяжести эффективного сечения до стенки

$$y_{gc} = 25.0 \text{ мм}$$

Расстояние от центра тяжести эффективного сечения до отгибов

$$y_{lip} = 38.0 \text{ мм}$$

Момент инерции эффективного сечения относительно оси наибольшей жесткости

$$I_y = 3780000 \text{ мм}^4$$

Момент инерции эффективного сечения относительно оси наименьшей жесткости

$$I_z = 311800 \text{ мм}^4$$

Геометрические характеристики эффективного сечения с учетом закруглений

Для такого сечения должно учитываться влияние закругленных углов. Для таких характеристик, как положение главных осей, значения для сечения с закругленными углами берутся равными тем, что были рассчитаны для сечения без учета закруглений.

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

$$A_{eff} = A_{eff, sharp} (1 - \delta) = 459.0 (1 - 0.014) = 452.6 \text{ мм}^2$$

$$I_y = I_{y, sharp} (1 - 2\delta) = 3780000 (1 - 2 \times 0.014) = 3675000 \text{ мм}^4$$

$$I_z = I_{z, sharp} (1 - 2\delta) = 311800 (1 - 2 \times 0.014) = 303100 \text{ мм}^4$$

см. страницу 14

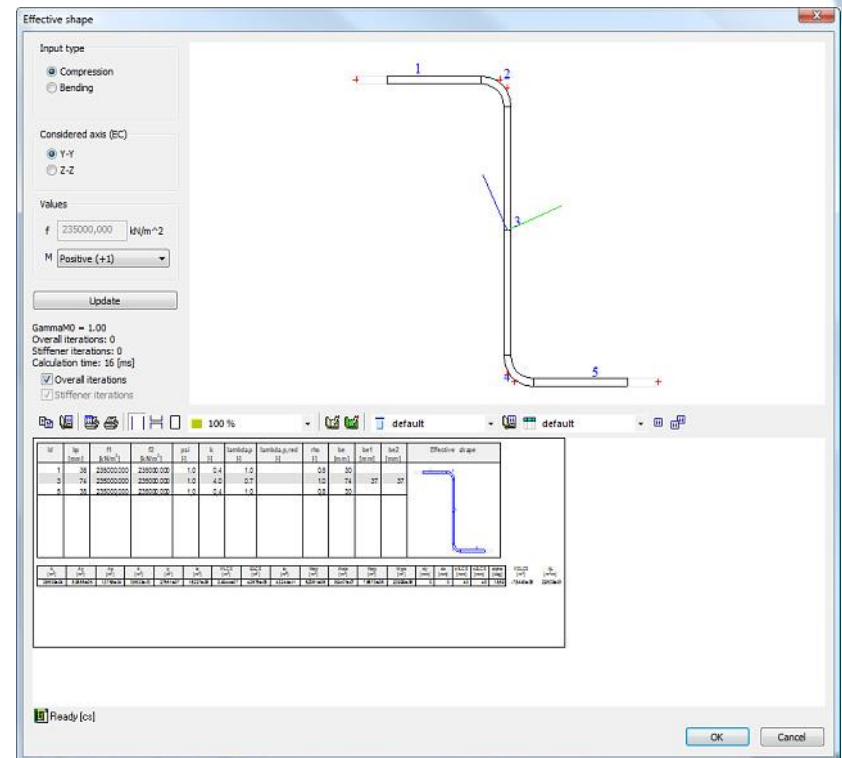
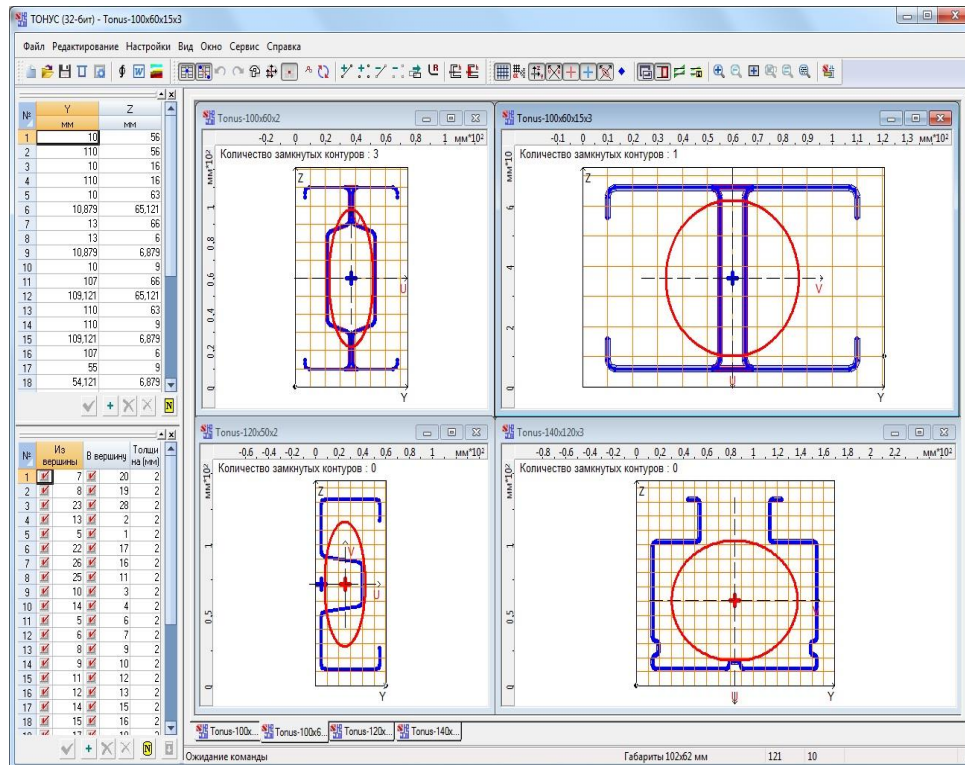
Сведенные геометрические характеристики эффективного сечения с учетом закруглений

Эффективная площадь	$A_{eff} = 452.6 \text{ мм}^2$
Расстояние от центра тяжести эффективного сечения до полки	$z_{gc} = 99.0 \text{ мм}$
Расстояние от центра тяжести эффективного сечения до стенки	$y_{gc} = 25.0 \text{ мм}$
Расстояние от центра тяжести эффективного сечения до отгибов	$y_{lip} = 38.0 \text{ мм}$
Момент инерции эффективного сечения относительно оси наибольшей жесткости	$I_y = 3675000 \text{ мм}^4$
Момент инерции эффективного сечения относительно оси наименьшей жесткости	$I_z = 303100 \text{ мм}^4$

см. страницу 40 (Пример 1)

Когда параметры эффективного сечения известны, можно воспользоваться стандартным ПО для тонкостенных профилей

Есть и специализированное ПО, включающие расчет эффективной геометрии



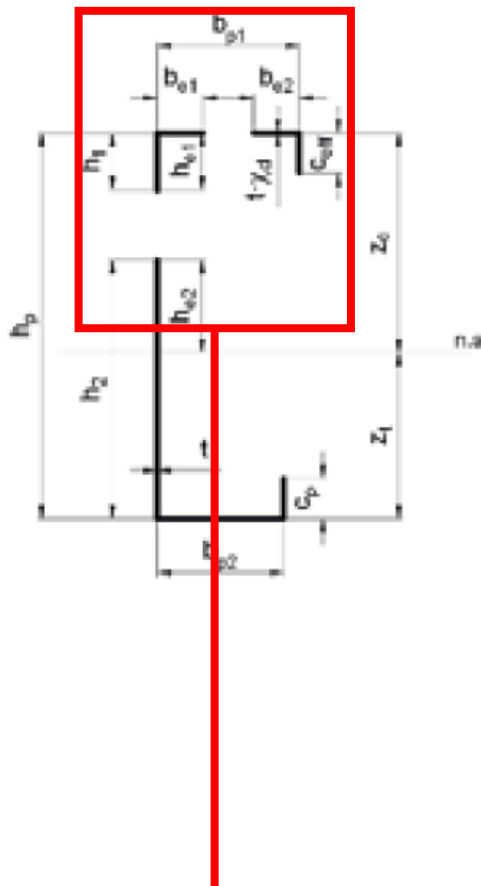
Сравнение с аналогичным профилем при изгибе

Геометрические характеристики эффективного сечения без учета закруглений

ДСТУ-Н Б EN
1993-1-3
5.5

Эффективное поперечное сечение С-образного профиля с отгибами полок при изгибе показано на рисунке ниже. Следует обратить внимание на исключаемые участки полки и стенки, а также уменьшенную толщину $t\chi_d$ элемента жесткости и прилегающего участка полки.

Алгоритм предполагает вначале расчет отдельно полки и стенки сечения, после чего может быть произведен расчет для всего сечения.



Редуцирование происходит
только в сжатой зоне

Основные отличия в расчете – страница 53

Шаг 2

ДСТУ-Н Б EN
1993-1-3
5.5.3.2(7)

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

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

ДСТУ-Н Б EN
1993-1-3
5.5.3.1(5)

$$K = \frac{E t^3}{4(1-\nu^2)} \cdot \frac{1}{b_1^2 h_p + b_1^3 + 0.5 b_1 b_2 h_p k_f}$$

$$b_1 = b_{p1} - \frac{b_{e2} t b_{e2} / 2}{(b_{e2} + c_{eff}) t} = 63 - \frac{31.1 \times 1.96 \times 31.1 / 2}{(31.1 + 24) \times 1.96} = 54.22 \text{ мм}$$

$k_f = 0$ (для изгиба относительно главной оси $y-y$)

см. страницу 21

$$K = 0.586 \text{ (Н/мм)/мм}$$

$$I_s = \frac{b_{e2} t^3}{12} + \frac{c_{eff}^3 t}{12} + b_{e2} t \left[\frac{c_{eff}^2}{2(b_{e2} + c_{eff})} \right]^2 + c_{eff} t \left[\frac{c_{eff}}{2} - \frac{c_{eff}^2}{2(b_{e2} + c_{eff})} \right]^2 = 6101 \text{ мм}^4$$

ДСТУ-Н Б EN
1993-1-3
5.5.3.2(7)

$$\sigma_{cr,s} = \frac{2 \times \sqrt{0.586 \times 210000 \times 6101}}{108} = 507.4 \text{ Н/мм}^2$$

Основные отличия в расчете – страница 54

Определение эффективного сечения стенки

Размер сжатой зоны с учетом эффективного сечения полки:

$$h_c = \frac{c_p(h_p - c_p/2) + b_{p2}h_p + h_p^2/2 + c_{eff}^2\chi_d/2}{c_p + b_{p2} + h_p + b_{e1} + (b_{e2} + c_{eff})\chi_d}; \quad h_c = 101.1 \text{ мм}$$

Соотношение напряжений определяется следующим образом:

$$\psi = \frac{h_c - h_p}{h_c} = \frac{101.1 - 198}{101.1} = -0.958$$

В соответствии с таблицей 3.1 коэффициент потери устойчивости для участков определяется следующим образом:

$$k_\sigma = 7.81 - 6.29\psi + 9.78\psi^2; \quad k_\sigma = 22.81$$

$$\bar{\lambda}_{p,h} = \frac{h_p/t}{28.4 \varepsilon \sqrt{k_\sigma}} = \frac{198/1.96}{28.4 \times \sqrt{235/350} \times \sqrt{22.81}} = 0.909$$

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_{p,h} - 0.055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}_{p,h}^2} = \frac{0.909 - 0.055 \times (3 - 0.958)}{0.909^2} = 0.964$$

$$h_{eff} = \rho h_c = 0.965 \times 101.1 = 97.5 \text{ мм}$$

$$h_{e1} = 0.4h_{eff} = 0.4 \times 97.5 = 39.0 \text{ мм}$$

$$h_{e2} = 0.6h_{eff} = 0.6 \times 97.5 = 58.5 \text{ мм}$$

Эффективная ширина стенки разделяется на два участка следующим образом:

$$h_1 = h_{e1} = 39.0 \text{ мм}$$

$$h_2 = h_p - (h_c - h_{e2}) = 198 - (101.1 - 58.5) = 155.4 \text{ мм}$$

Только часть стенки сжата,
поэтому необходимо
высчитать соотношение
напряжений

Таблица 3.1 Коэффициенты учета потери устойчивости для сжатых пластин с двусторонним закреплением по краям

Распределение напряжений (сжатие со знаком "+")	Эффективная ширина b_{eff}					
<p>σ_1 σ_2</p> <p>b_{e1} b_{e2} \bar{b}</p>	$\psi = 1:$ $b_{eff} = \rho \bar{b}$ $b_{e1} = 0,5 \cdot b_{eff}, \quad b_{e2} = 0,5 \cdot b_{eff}$					
<p>σ_1 σ_2</p> <p>b_{e1} b_{e2} \bar{b}</p>	$1 > \psi \geq 0:$ $b_{eff} = \rho \cdot \bar{b}$ $b_{e1} = \frac{2}{5 - \psi} \cdot b_{eff}, \quad b_{e2} = b_{eff} - b_{e1}$					
<p>σ_1 σ_2</p> <p>b_{e1} b_{e2} \bar{b}</p>	$\psi < 0:$ $b_{eff} = \rho \cdot b_1 = \rho \cdot \bar{b} / (1 - \psi)$ $b_{e1} = 0,4 \cdot b_{eff}, \quad b_{e2} = 0,6 \cdot b_{eff}$					
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1	$-1 > \psi > -3$
Коэффициент учета потери устойчивости k_σ	4,0	$8,2 / (1,05 + \psi)$	7,81	$7,81 - 6,29\psi + 9,78\psi^2$	23,9	$5,98(1 - \psi)^2$

ДСТУ-Н Б EN
1993-1-5
4.4

СПАСИБО!

www.uscc.com.ua | +38-044-590-01-56

