



УКРАИНСКИЙ ЦЕНТР  
СТАЛЬНОГО  
СТРОИТЕЛЬСТВА

## Определение эффективных характеристик сечений в соответствии с ДСТУ-Н Б EN1993-1-3

Семко Владимир,  
кандидат технических наук

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



# Определение геометрических характеристик поперечных сечений

Для определения геометрических характеристик поперечных сечений, с последующим расчетом прочности элемента, используются две методики:

с учетом угловых элементов;

без учета угловых элементов.

В случае, когда выполняется условие (3.1) допускается определять геометрические характеристики сечения, как для сечения с **острыми углами** (см. рисунок 3.1).

$$r \leq 5t \text{ и } r \leq 0,1b_p, \quad (3.1)$$

где

$r$  — внутренний радиус изгиба;

$t$  — расчетная толщина листа;

$b_p$  — теоретическая ширина плоского участка.

## Определение геометрических характеристик поперечных сечений

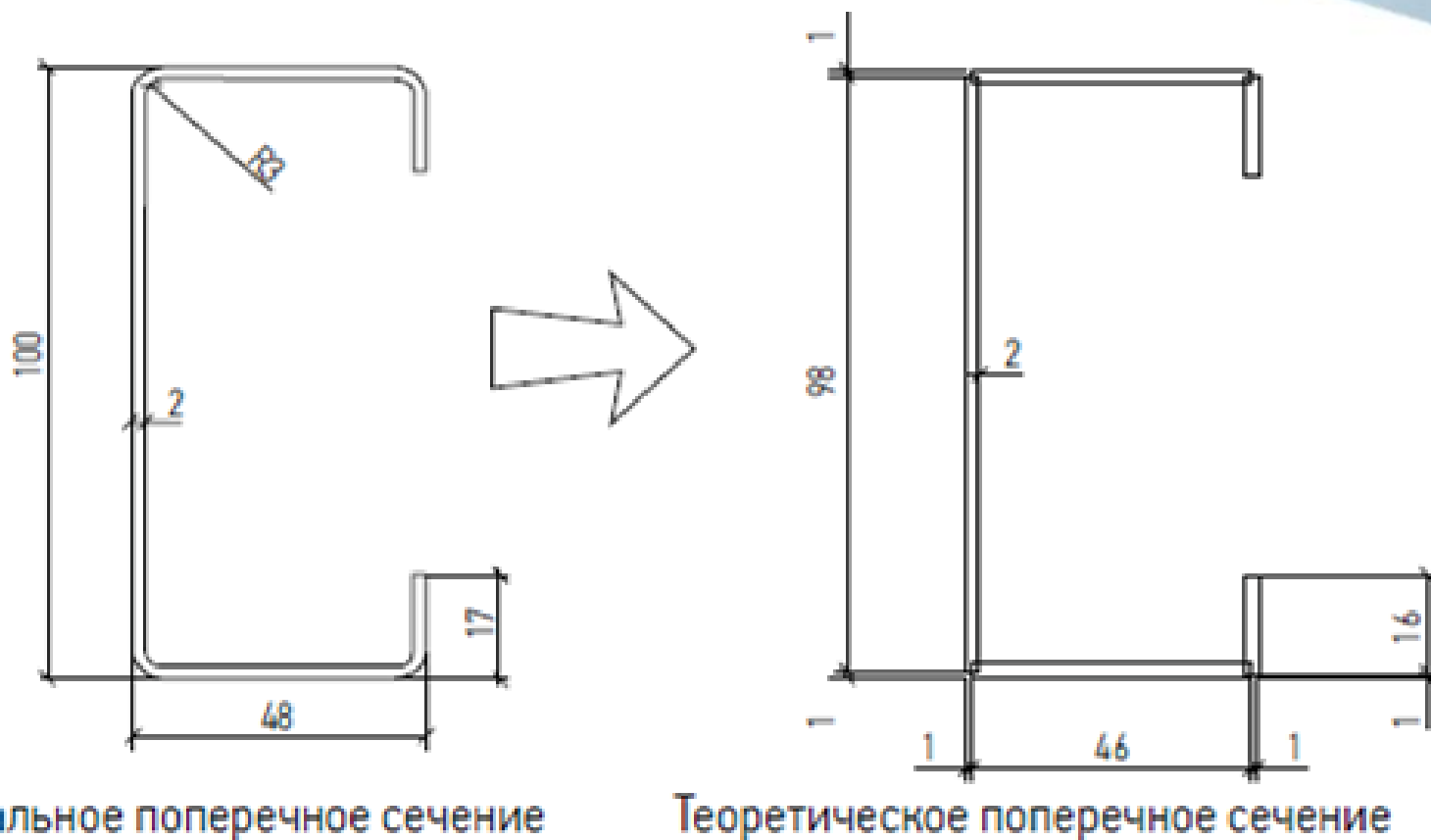


Рисунок 3.1 – Переход от реального поперечного сечения к теоретическому при выполнении условия (3.1)

## Определение геометрических характеристик поперечных сечений

В случае если внутренний радиус изгиба удовлетворяет условию (3.2), тогда несущая способность элемента должна определяться путем испытаний.

$$r > 0,04tE/f_y \quad (3.2)$$

В таблице 3.1 представлены граничные значения внутренних радиусов изгиба углов профилей для некоторых границ текучести стали. Модуль упругости стали равен  $E=210000$  МПа.

Таблица 3.1 – Предельные значения внутреннего радиуса изгиба

Предел текучести стали, МПа	Предельное значение внутреннего радиуса изгиба
235	35,7t
275	30,5t
355	23,6t
420	20,0t
460	18,2t

# Определение геометрических характеристик поперечных сечений

Определение геометрических характеристик с учетом влияния углов сгиба  
**(1 вариант).**

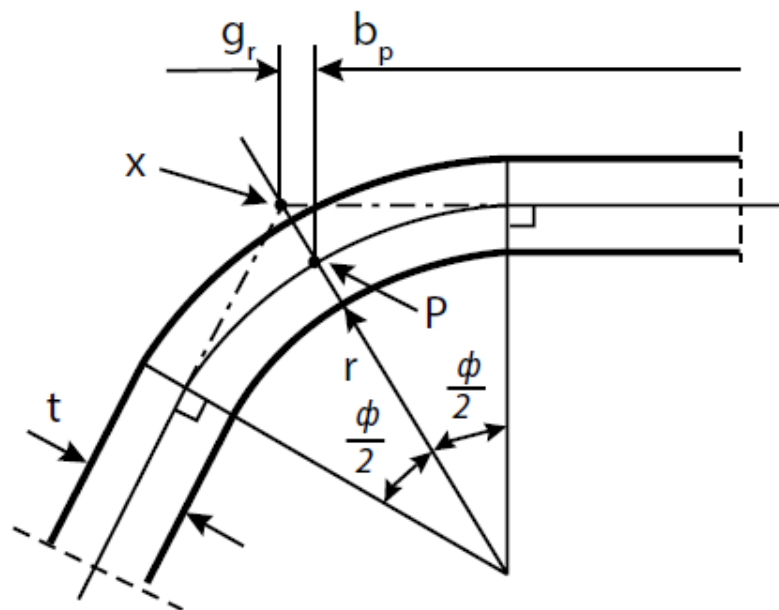


Рисунок 3.2 – Схема для определения расположения средней точки (P) угла

$$g_r = r_m \left[ \tan \left( \frac{\phi}{2} \right) - \sin \left( \frac{\phi}{2} \right) \right],$$

где  $r_m = r + t/2$ .

# Определение геометрических характеристик поперечных сечений

## Определение геометрических характеристик с учетом влияния углов сгиба (2 вариант).

$$A_g \approx A_{g,sh}(1-\delta),$$

$$I_g \approx I_{g,sh}(1-2\delta),$$

$$I_w \approx I_{w,sh}(1-4\delta),$$

$$\delta = 0,43 \cdot \frac{\sum_{j=1}^n r_j \cdot \frac{\phi_j}{90^\circ}}{\sum_{j=1}^m b_{p,i}},$$

где

$A_g$  — полная площадь поперечного сечения;

$A_{g,sh}$  — значение  $A_g$  для сечения с острыми углами;

$b_{p,i}$  — теоретическая ширина плоского  $i$ -го элемента в сечении с острыми углами;

$I_g$  — момент инерции полного поперечного сечения;

$I_{g,sh}$  — значение  $I_g$  для сечения с острыми углами;

$I_w$  — бимомент инерции полного сечения;

$I_{w,sh}$  — значение  $I_w$  для сечения с острыми углами;

$\phi$  — угол между двумя плоскими элементами;

$m$  — количество плоских элементов;

$n$  — количество криволинейных элементов;

$r_j$  — внутренний радиус криволинейного  $j$ -го элемента.

## Определение геометрических характеристик поперечных сечений

## Определение геометрических характеристик с учетом влияния углов сгиба (пример).

Общая высота

$$h = 100 \text{ mm}$$

Общая ширина полки

$$b = 48 \text{ mm}$$

Общая ширина краевого отгиба

 $c = 17 \text{ mm}$ 

Внутренний радиус

 $r = 3 \text{ mm}$ 

Толщина профиля

 $t = 2.00 \text{ mm}$ 

### Угол между плоскими элементами

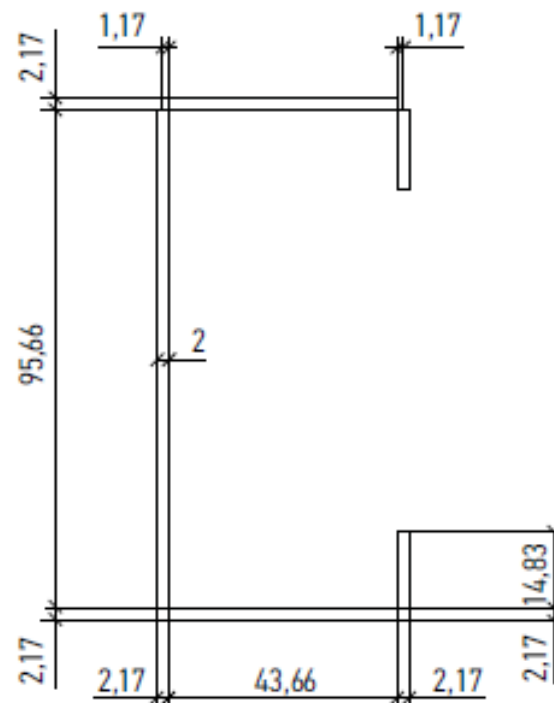
$$\phi = 90^\circ$$


Рисунок 3.4 – Теоретическое поперечное сечение (вариант Б)

# Определение геометрических характеристик поперечных сечений

Определение геометрических характеристик с учетом влияния углов сгиба  
**(пример).**

Вариант А.

Поперечное сечение показано на рисунке 3.1.

$$h_p = h - t = 100 - 2 = 98 \text{ мм};$$

$$b_p = b - t = 48 - 2 = 46 \text{ мм};$$

$$c_p = c - t/2 = 17 - 2/2 = 16 \text{ мм}.$$

$$A_{g,sh} = t(h_p + 2b_p + 2c_p) = 2(98 + 2 \cdot 46 + 2 \cdot 16) = 444 \text{ мм}^2.$$

$$\delta = 0,43 \cdot \frac{\sum_{j=1}^n r_j \cdot \frac{\phi_j}{90^\circ}}{\sum_{j=1}^m b_{p,i}} = 0,43 \cdot \frac{4 \cdot 3 \cdot \frac{90^\circ}{90^\circ}}{98 + 46 + 46 + 16 + 16} = 0,0232.$$

$$A_g = A_{g,sh}(1 - \delta) = 444(1 - 0,0232) = 433,7 \text{ мм}^2.$$



# Определение геометрических характеристик поперечных сечений

## Определение геометрических характеристик с учетом влияния углов сгиба (пример).

Вариант Б.

$$r_m = r + t/2 = 3 + 2/2 = 4 \text{ мм.}$$
$$g_r = r_m \left[ \tan\left(\frac{\Phi}{2}\right) - \sin\left(\frac{\Phi}{2}\right) \right] = 4 \cdot (\tan 45^\circ - \sin 45^\circ) = 1,172 \text{ мм.}$$

$$h_p = h - t - 2g_r = 100 - 2 - 2 \cdot 1,172 = 95,66 \text{ мм;}$$

$$b_p = b - t - 2g_r = 48 - 2 - 2 \cdot 1,172 = 43,66 \text{ мм;}$$

$$c_p = c - t/2 - g_r = 17 - 2/2 - 1,172 = 14,83 \text{ мм.}$$

$$A_g = t(h_p + 2b_p + 2c_p) = 2(95,66 + 2 \cdot 43,66 + 2 \cdot 14,83) = 425,28 \text{ мм}^2.$$

Схема теоретического поперечного сечения для варианта Б представлена на рисунке 3.4.

## Определение геометрических характеристик поперечных сечений

Для С-профиля из примера фактическая площадь сечения составляет 430 мм<sup>2</sup>, соответственно методика использованная в варианте А дает завышенное значение площади, а методика рассмотренная в примере Б – занижает площадь сечения.

Для профилей, у которых толщина более 2 мм, несмотря на выполнение условия (3.1), рекомендуется геометрические характеристики сечений определять с учетом влияния углов гиба.

При расчете элементов по условиям жесткости, характеристики поперечного сечения всегда необходимо определять с учетом влияния углов гиба.

# Допустимые геометрические пропорции профилей

Часть поперечного сечения		Максимальное значение
		$b/t \leq 50$
		$b/t \leq 60$ $c/t \leq 50$
		$b/t \leq 90$ $c/t \leq 60$ $d/t \leq 50$
		$b/t \leq 500$
		$45^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ$ $h/t \leq 500 \sin \varphi$






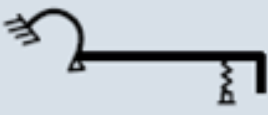

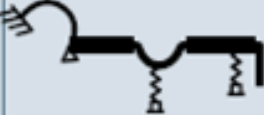

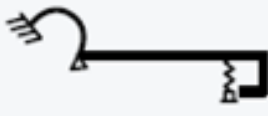


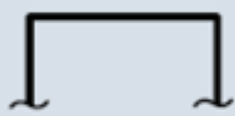
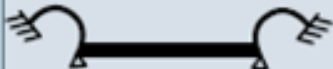






$$0,2 \leq c/b \leq 0,6;$$

$$0,1 \leq d/b \leq 0,3,$$

Размер отгиба  $c$  измеряется перпендикулярно полке, даже если он расположен не перпендикулярно по отношению к ней.

Если  $c/b < 0,2$  или  $d/b < 0,1$ , то отгиб не учитывается ( $c = 0$  или  $d = 0$ ).

# Расчетные модели элементов поперечных сечений

Тип элемента	Модель	Тип элемента	Модель
			
			
			
			
			

# Сжатые элементы, подкрепленные с двух сторон



Эпюра напряжений (сжатие положительное)				Эффективная ширина $b_{eff}$		
				$\psi=1:$ $b_{eff} = \rho \cdot b_p$ $b_{e1} = 0.5 b_{eff}; \quad b_{e2} = 0.5 b_{eff}$		
				$1 > \psi \geq 0:$ $b_{eff} = \rho \cdot b_p$ $b_{e1} = \frac{2}{5 - \psi} \cdot b_{eff};$ $b_{e2} = b_{eff} - b_{e1}.$		
				$\psi < 0:$ $b_{eff} = \rho \cdot b_c = \frac{\rho \cdot b_p}{1 - \psi},$ $b_{e1} = 0.4 \cdot b_{eff};$ $b_{e2} = 0.6 \cdot b_{eff}.$		
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1	$-1 > \psi > -3$
Коэффициент потери устойчивости $k_\sigma$	4,0	$8,2 / (1,05 + \psi)$	7,81	$7,81 - 6,29\psi + 9,78\psi^2$	23,9	$5,98(1 - \psi)^2$

## Сжатые элементы, подкрепленные с двух сторон



При максимальных напряжениях сжатия  $\sigma_{com,Ed} = f_y / \gamma_{M0}$  понижающий коэффициент  $\rho$  определяется по следующим формулам:

– для сжатых элементов подкрепленных с двух сторон:

$$\rho = 1,0 \text{ при } \bar{\lambda}_p \leq 0,673. \quad (3.18a)$$

$$\rho = \frac{\lambda_p - 0,055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}^2} \leq 1 \text{ при } \bar{\lambda}_p > 0,673, \text{ когда } (3 + \psi) \geq 0. \quad (3.18b)$$

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = \frac{b_p/t}{28,4 \varepsilon \sqrt{k_\sigma}}, \quad (3.20)$$

$\psi$  – соотношение напряжений;

$k_\sigma$  – коэффициент, учитывающий потерю устойчивости в зависимости от соотношения напряжений  $\psi$  по краям пластины и условий их закрепления. Для длинных пластин значения коэффициента  $k_\sigma$  указаны в таблице 3.4 или таблице 3.5;

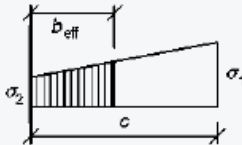
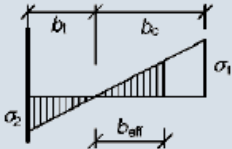
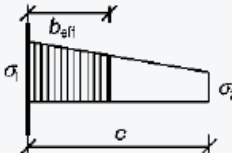
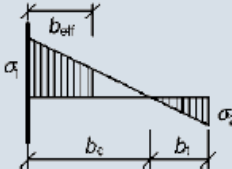
$\varepsilon$  – отношение  $\sqrt{235 / f_{yb}}$ , где  $f_{yb}$  в Н/мм<sup>2</sup>;

$t$  – толщина листа;

$\sigma_{cr}$  – упругое критическое напряжение потери устойчивости.

# Сжатые элементы, подкрепленные с одной стороны



Эпюра напряжений (сжатие положительное)			Эффективная ширина $b_{eff}$		
			$1 > \psi \geq 0:$ $b_{eff} = \rho \cdot c.$		
			$\psi < 0:$ $b_{eff} = \rho \cdot b_c = \frac{\rho \cdot c}{1 - \psi}.$		
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	0	-1	$-1 > \psi > -3$	
Коэффициент потери устойчивости $k_\sigma$	0,43	0,57	0,85	$0,57 - 0,21\psi + 0,07\psi^2$	
			$1 > \psi \geq 0:$ $b_{eff} = \rho \cdot c.$		
			$\psi < 0:$ $b_{eff} = \rho \cdot b_c = \frac{\rho \cdot c}{1 - \psi}.$		
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1	$1 > \psi > 0$	0	$0 > \psi > -1$	-1
Коэффициент потери устойчивости $k_\sigma$	0,43	$0,578 / (\psi + 0,24)$	1,7	$1,7 - 5\psi + 17,1\psi^2$	23,8

## Сжатые элементы, подкрепленные с одной стороны



При максимальных напряжениях сжатия  $\sigma_{com,Ed} = f_y / \gamma_{M0}$  понижающий коэффициент  $\rho$  определяется по следующим формулам:

— для сжатых элементов подкрепленных с одной стороны:

$$\rho = 1,0 \text{ при } \bar{\lambda}_p \leq 0,748. \quad (3.19a)$$

$$\rho = \frac{\lambda_p - 0,188}{\bar{\lambda}^2} \leq 1 \text{ при } \bar{\lambda}_p > 0,748, \quad (3.19b)$$

где

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = \frac{b_p/t}{28,4 \varepsilon \sqrt{k_\sigma}}, \quad (3.20)$$

$\psi$  — соотношение напряжений;

$k_\sigma$  — коэффициент, учитывающий потерю устойчивости в зависимости от соотношения напряжений  $\psi$  по краям пластины и условий их закрепления. Для длинных пластин значения коэффициента  $k_\sigma$  указаны в таблице 3.4 или таблице 3.5;

$\varepsilon$  — отношение  $\sqrt{235 / f_{yb}}$ , где  $f_{yb}$  в Н/мм<sup>2</sup>;

$t$  — толщина листа;

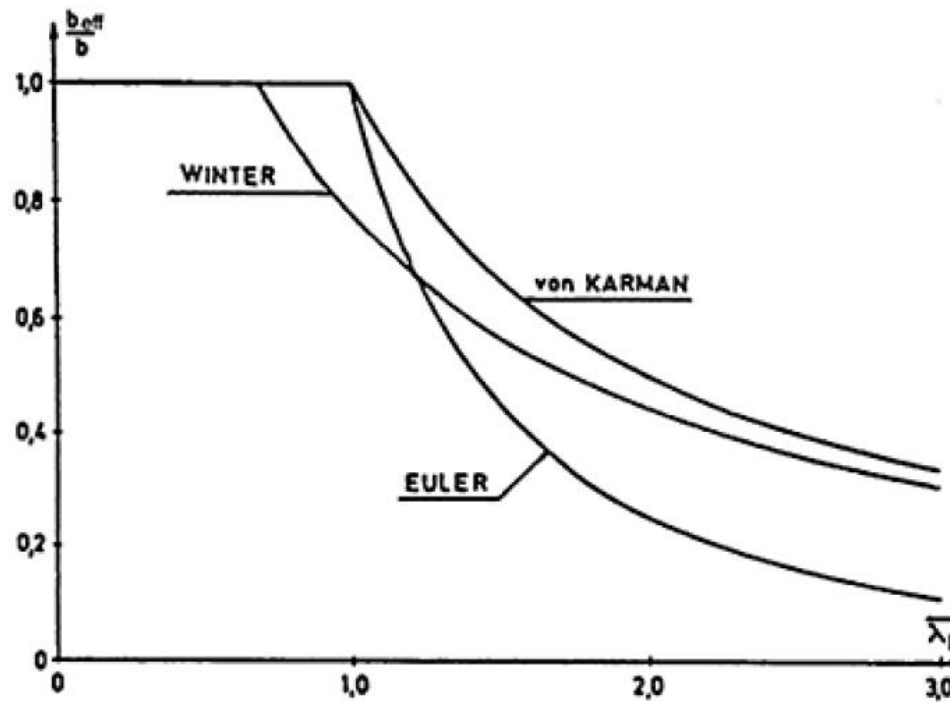
$\sigma_{cr}$  — упругое критическое напряжение потери устойчивости.



## Сжатые элементы

В случае, когда напряжения сжатия  $\sigma_{com,Ed} \leq f_y/\gamma_{M0}$ , понижающий коэффициент  $\rho$  определяется аналогично, но уменьшенная условная гибкость  $\bar{\lambda}_{p,red}$  вычисляется по формуле:

$$\bar{\lambda}_{p,red} = \bar{\lambda}_p \cdot \sqrt{\frac{\sigma_{com,Ed}}{f_{yb}/\gamma_{M0}}} \quad (3.21)$$



# Пример

Для примера 3.2 из публикации «РАСЧЕТ НЕСУЩИХ И ОГРАЖДАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ИЗ СТАЛЬНЫХ ХОЛОДНОФОРМОВАННЫХ ПРОФИЛЕЙ В СООТВЕТСТВИИ С ЕВРОКОДОМ 3».

## Эффективная ширина сжатых полок

Сжатые полки рассматриваются, как элементы, подкрепленные с двух сторон. Напряжения по длине распределены равномерно, соответственно соотношение напряжений  $\psi=1$ . В соответствии с таблицей 3.4 коэффициент потери устойчивости  $k_\sigma=4$ .

$$\varepsilon = \sqrt{235 / f_{yb}} = 0,819.$$

Условная гибкость полки (3.20):

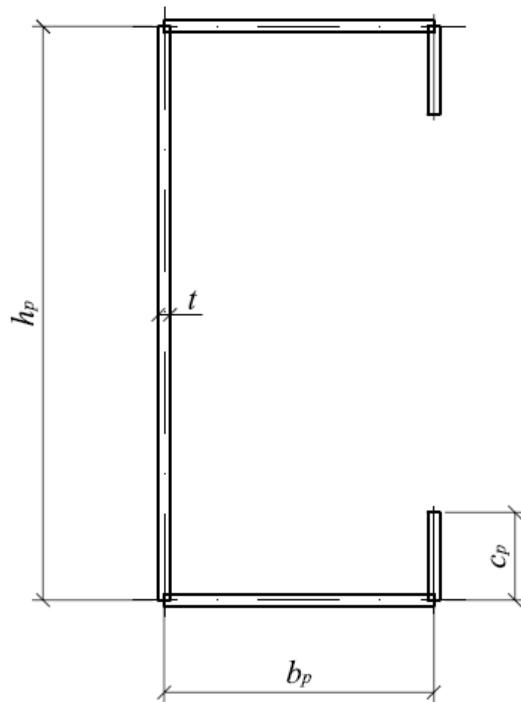
$$\bar{\lambda}_p = \frac{b_p / t}{28,4 \varepsilon \sqrt{k_\sigma}} = \frac{58,5 / 1,46}{28,4 \cdot 0,819 \cdot \sqrt{4}} = 0,86.$$

Понижающий коэффициент ширины полки (3.18):

$$\rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{0,86 - 0,055(3 + 1)}{0,86^2} = 0,864.$$

Эффективная ширина полок

$$b_{eff} = \rho \cdot b_p = 0,864 \cdot 58,5 = 50,58 \text{ мм},$$



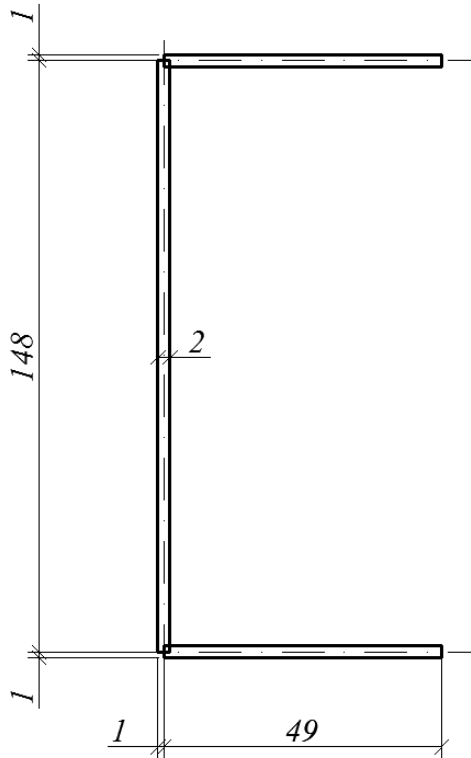
В случае максимальных сжимающих напряжений 87,5МПа, мы получим

$$\bar{\lambda}_{p,red} = \bar{\lambda}_p \cdot \sqrt{\frac{\sigma_{com,Ed}}{f_{yb} / \gamma_{M0}}} = 0,86 \times \sqrt{\frac{87,5}{350 / 1}} = 0,43 < 0,673.$$

Т.е полка будет полностью эффективной.

# Пример

Профиль П-образный 150х50х2 мм.



Выполняем проверку геометрических пропорций сечения:

$$b/t \leq 50 \quad b/t = 50/2 = 25 < 60 \quad \text{— выполняется;}$$

$$h/t \leq 500 \quad h/t = 150/2 = 75 < 500 \quad \text{— выполняется.}$$

Влияние углов изгибов можно не учитывать при выполнении условия:

$$r/t \leq 5$$

$$r/t = 4/2 = 2 < 5 \quad \text{— выполняется}$$

$$r/b_p \leq 0,1$$

$$r/b_p = 4/50 = 0,08 < 0,1 \quad \text{— выполняется.}$$

Определим условную гибкость полки:

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = \frac{b_p/t}{28,4 \varepsilon \sqrt{k_\sigma}} = \frac{49/2}{28,4 \times 0,819 \times \sqrt{0,43}} = 1,6.$$

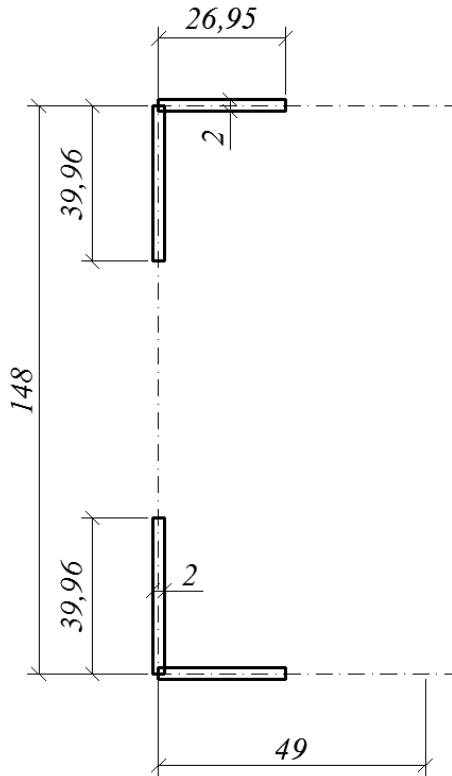
$$\varepsilon = \sqrt{235/f_{yb}} = \sqrt{235/350} = 0,819.$$

$$\text{При } \bar{\lambda}_p > 0,748 \quad \rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,188}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{1,6 - 0,188}{1,6^2} = 0,55 \leq 1.$$

$$b_{eff} = \rho \cdot b_p = 0,55 \times 49 = 26,95 \text{ мм.}$$

# Пример

Профиль П-образный 150х50х2 мм.



Определим условную гибкость стенки:

$$\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = \frac{h_p/t}{28,4\varepsilon\sqrt{k_\sigma}} = \frac{148/2}{28,4 \times 0,819 \times \sqrt{4}} = 1,59.$$

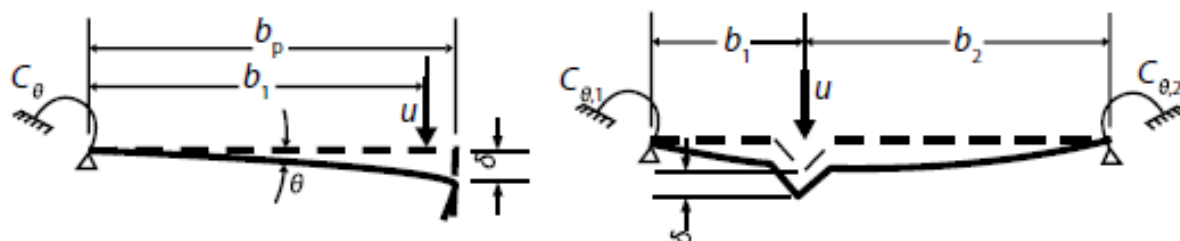
$$\varepsilon = \sqrt{235/f_{yb}} = \sqrt{235/350} = 0,819.$$

$$\text{При } \bar{\lambda}_p > 0,673 \quad \rho = \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055(3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} = \frac{1,59 - 0,055(3 + 1)}{1,59^2} = 0,54 \leq 1.$$

$$h_{\text{eff}} = \rho \cdot h_p = 0,54 \times 148 = 79,92 \text{ мм};$$

$$b_{e1} = b_{e2} = 0,5 b_{\text{eff}} = 0,5 \times 79,92 = 39,96 \text{ мм}.$$

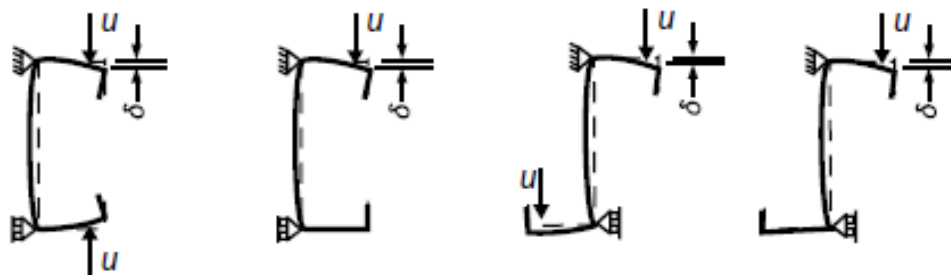
## Элементы с краевыми или промежуточными элементами жесткости



а) фактическая схема



б) эквивалентная схема



Сжатие

Изгиб

Сжатие

Изгиб

в) расчетные схемы поперечных сечений при определении  $\delta$  для С- и Z-образных сечений

## Элементы с краевыми или промежуточными элементами жесткости

Жесткость связей  $K$  для полок С- и Z-образных сечений с краевыми элементами жесткости определяется по формуле:

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

Для промежуточного элемента жесткости значения угловой жесткости связей  $C_{\theta,1}$  и  $C_{\theta,2}$  приближенно можно принять равными нулю и тогда жесткость связей  $K$  можно определить по формуле:

$$K = \frac{Et^3}{4(1-\nu^2)} \cdot \frac{(b_1 + b_2)}{b_1^2 b_2^2}$$

## Элементы с краевыми или промежуточными элементами жесткости

Коэффициент  $\chi_d$  снижения несущей способности вследствие потери устойчивости формы сечения (плоская форма потери устойчивости элемента жесткости) должен определяться с учетом относительной гибкости  $\bar{\lambda}_d$  следующим образом:

$$\begin{aligned}\chi_d &= 1,0 && \text{при } \bar{\lambda}_d \leq 0,65, \\ \chi_d &= 1,47 - 0,723\bar{\lambda}_d && \text{при } 0,65 < \bar{\lambda}_d < 1,38, \\ \chi_d &= 0,66/\bar{\lambda}_d && \text{при } \bar{\lambda}_d > 1,38, \\ \text{где } \bar{\lambda}_d &= \sqrt{f_{yb}/\sigma_{cr,s}},\end{aligned}$$

$\sigma_{cr,s}$  – критическое напряжение в упругой стадии для различных элементов жесткости.

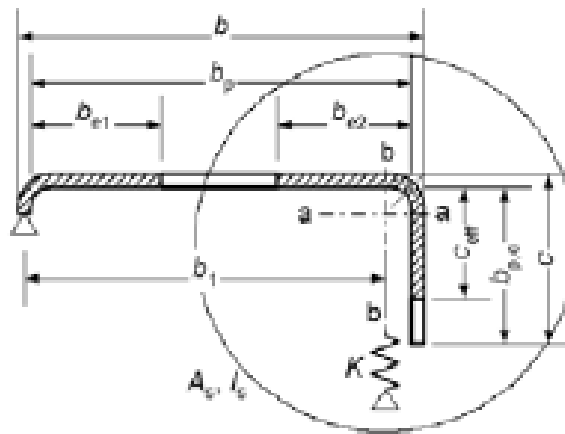




## Плоские элементы с краевыми отгибами

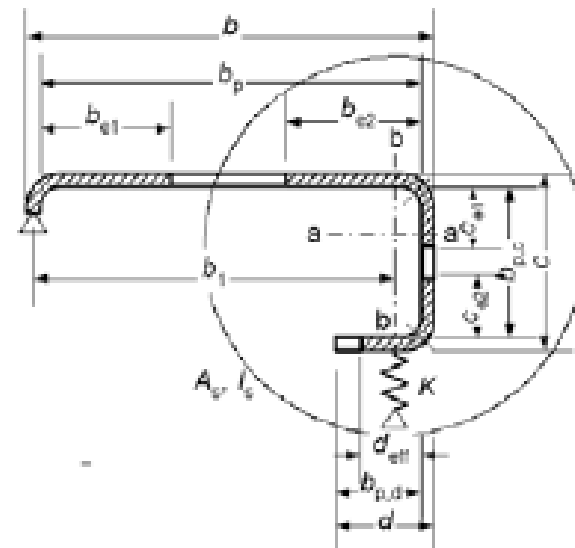
Определение эффективных геометрических характеристик краевых элементов жесткости возможно при выполнении следующих условий:

- угол между отгибом и плоским элементом находится в пределах от  $45^\circ$  до  $135^\circ$ ;
- ширина отгиба  $s$  не менее чем  $0,2b$ , где  $b$  и  $s$  показаны на рисунке;
- отношение  $b/t$  не превышает 60 для краевого отгиба из одного элемента (одинарного) или 90 для краевого отгиба из двух элементов (двойного).



$b/t \leq 60$

а) одинарный краевой отгиб

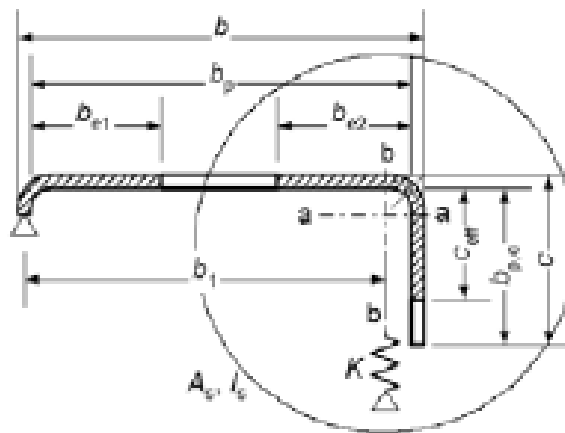


$b/t \leq 90$

б) двойной краевой отгиб

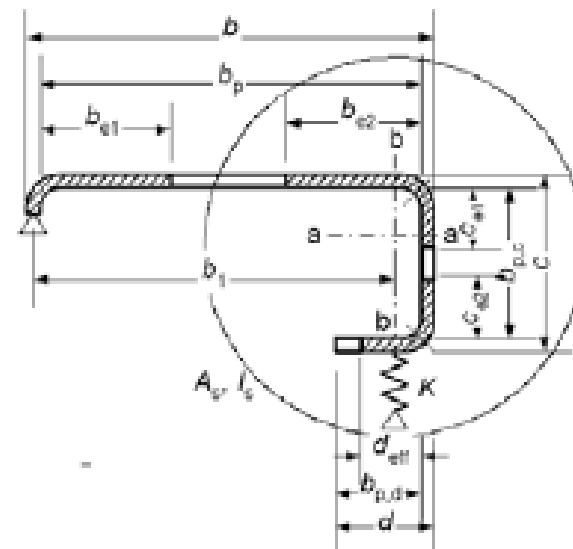
## Плоские элементы с краевыми отгибами

Поперечное сечение краевого отгиба должно быть принято состоящим из эффективной части элемента жесткости, т. е. части с или частей с и  $d$ , как показано на рисунке, плюс примыкающая эффективная часть плоского участка  $b_p$ .



$$b/t \leq 60$$

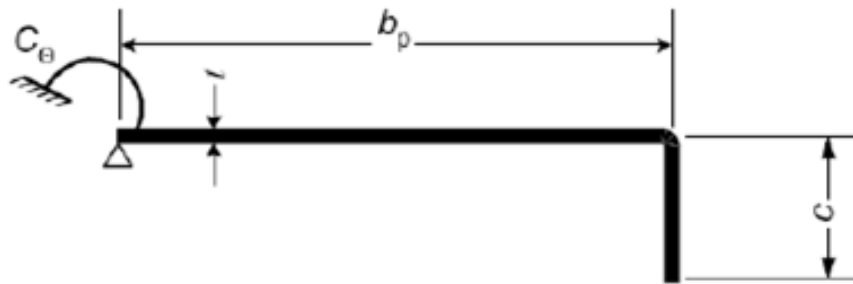
а) одинарный краевой отгиб



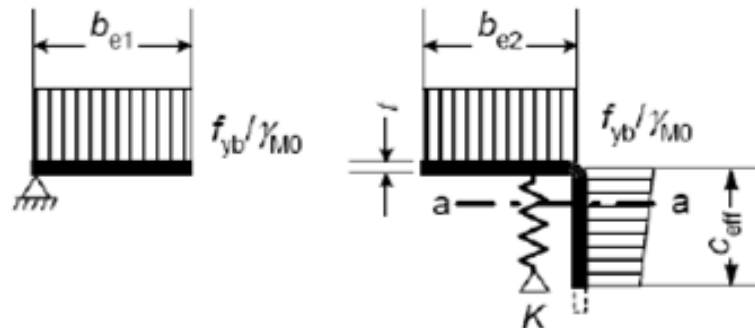
$$b/t \leq 90$$

б) двойной краевой отгиб

# Алгоритм определения эффективной ширины сжатых полок с элементами жесткости в виде отгибов



а) Полное поперечное сечение и граничные условия



б) Шаг 1. Эффективное поперечное сечение при  $K = \infty$  основанное на  $\sigma_{com,Ed} = f_{yb}/\gamma_{M0}$

для одинарного краевого отгиба

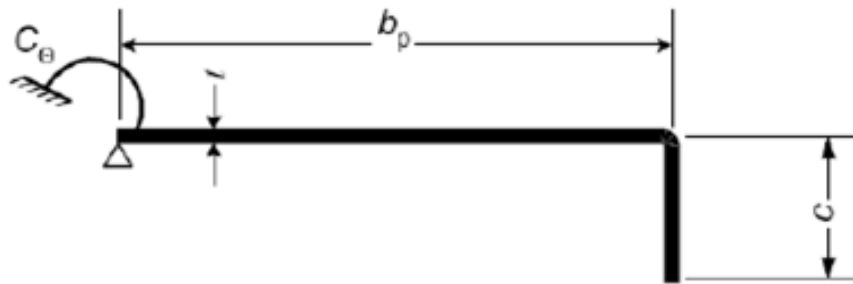
$$c_{eff} = \rho \cdot b_{p,c},$$

где  $\rho$  определяется с учетом коэффициента потери устойчивости  $k_\sigma$ :

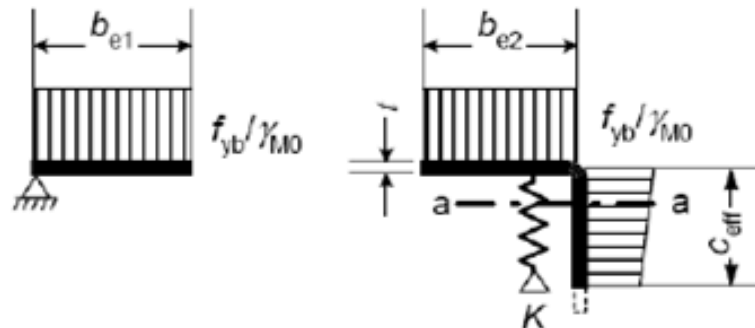
$$k_\sigma = 0,5 \quad \text{при} \quad b_{p,c}/b_p \leq 0,35,$$

$$k_\sigma = 0,5 + 0,83 \cdot \sqrt[3]{\left(\frac{b_{p,c}}{b_p} - 0,35\right)^2} \quad \text{при} \quad 0 < b_{p,c}/b_p \leq 0,6,$$

## Алгоритм определения эффективной ширины сжатых полок с элементами жесткости в виде отгибов



а) Полное поперечное сечение и граничные условия



б) Шаг 1. Эффективное поперечное сечение при  $K = \infty$  основанное на  $\sigma_{com,Ed} = f_{yb} / \gamma_{M0}$

для двойного краевого отгиба

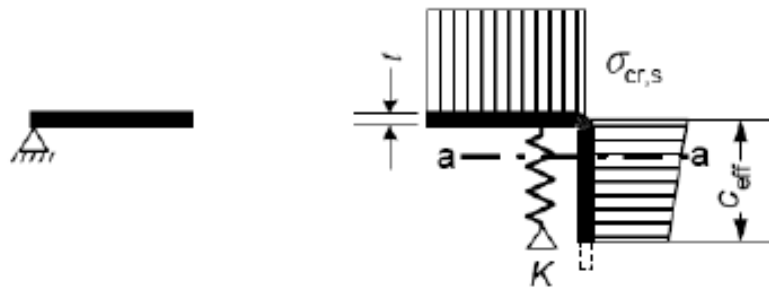
$$c_{eff} = \rho \cdot b_{p,c},$$

где  $\rho$  определяется с учетом коэффициента потери устойчивости  $k_\sigma$  для опертого по двум сторонам элемента;

$$d_{eff} = \rho \cdot b_{p,d},$$

где  $\rho$  определяется с учетом коэффициента  $k_\sigma$  как для отдельно стоящего элемента.

## Алгоритм определения эффективной ширины сжатых полок с элементами жесткости в виде отгибов



в) **Шаг 2.** Критическое напряжение  $\sigma_{cr,s}$  в упругой стадии для эффективной площади  $A_s$  элемента жесткости из шага 1

Эффективная площадь поперечного сечения  $A_s$  краевого отгиба определяется по формулам:

$$A_s = t(b_{e2} + c_{eff}),$$

или

$$A_s = t(b_{e2} + c_{e1} + c_{e2} + d_{eff}),$$

При необходимости, можно учитывать закругления.

Критическое напряжение  $\sigma_{cr,s}$  потери устойчивости краевого отгиба в упругой стадии определяется по формуле

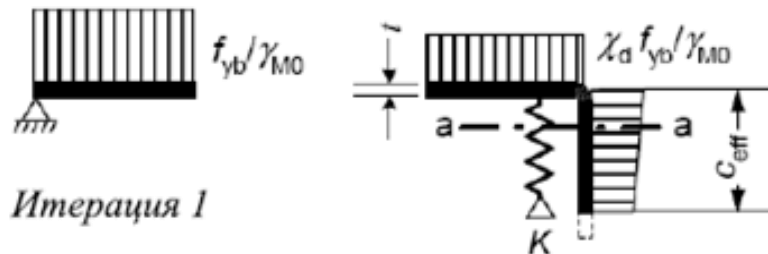
$$\sigma_{cr,s} = \frac{2 \cdot \sqrt{KEI_s}}{A_s},$$

где

$K$  жесткость связи на единицу длины,;

$I_s$  момент инерции эффективного сечения отгиба, определенный по эффективной площади  $A_s$ , относительно центральной оси а-а эффективного поперечного сечения.

## Алгоритм определения эффективной ширины сжатых полок с элементами жесткости в виде отгибов



г) Сниженная прочность  $\chi_d f_{yb}/\gamma_{M0}$  для элемента жесткости с эффективной площадью  $A_s$  и снижающим коэффициентом  $\chi_d$ , основанным на  $\sigma_{cr,s}$

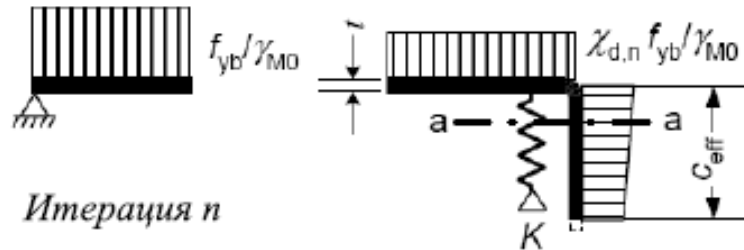
Коэффициент  $\chi_d$  снижения несущей способности вследствие потери устойчивости формы сечения (плоская форма потери устойчивости элемента жесткости) должен определяться с учетом относительной гибкости  $\bar{\lambda}_d$  следующим образом:

$$\begin{aligned} \chi_d &= 1,0 && \text{при } \bar{\lambda}_d \leq 0,65, \\ \chi_d &= 1,47 - 0,723\bar{\lambda}_d && \text{при } 0,65 < \bar{\lambda}_d < 1,38, \\ \chi_d &= 0,66/\bar{\lambda}_d && \text{при } \bar{\lambda}_d > 1,38, \end{aligned}$$

где  $\bar{\lambda}_d = \sqrt{f_{yb}/\sigma_{cr,s}}$ ,

$\sigma_{cr,s}$  – критическое напряжение в упругой стадии для различных элементов жесткости.

## Алгоритм определения эффективной ширины сжатых полок с элементами жесткости в виде отгибов



д) Шаг 3. Повторяется шаг 1 для расчета эффективной ширины с уменьшенным сжимающим напряжением  $\sigma_{com,Ed,i} = \chi_d f_{yb}/\gamma_{M0}$  с  $\chi_d$  из предыдущей итерации до тех пор, пока не выполняются следующие условия:  $\chi_{d,n} \approx \chi_{d,(n-1)}$ , но  $\chi_{d,n} \leq \chi_{d,(n-1)}$

При условии  $\chi_d < 1$  значение снижающего коэффициента можно определить итерационно, начиная итерацию с модифицированных значений  $\rho$ , полученных по 3.5.1 с  $\sigma_{com,Ed,i} = \chi_d f_{yb}/\gamma_{M0}$  таким образом, что

$$\bar{\lambda}_{p,red} = \bar{\lambda}_p \sqrt{\chi_d}.$$

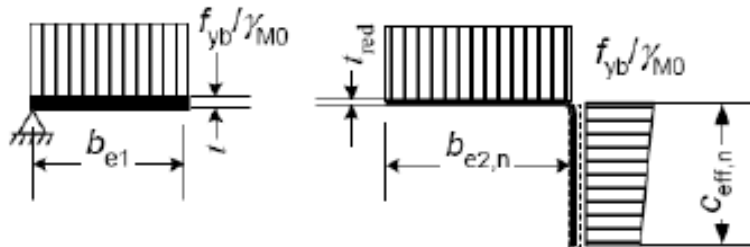
Уменьшенная эффективная площадь элемента жесткости  $A_{s,red}$ , с учетом плоской формы потери устойчивости, определяется как

$$A_{s,red} = \chi_d A_s \frac{f_{yb}/\gamma_{M0}}{\sigma_{com,Ed}} \leq A_s,$$

где

$\sigma_{com,Ed}$  — сжимающее напряжение вдоль центральной оси элемента жесткости, рассчитанное для эффективного поперечного сечения.

## Алгоритм определения эффективной ширины сжатых полок с элементами жесткости в виде отгибов



е) Принимается эффективное поперечное сечение с  $b_{e2,eff}$  и уменьшенная толщина  $t_{red}$ , соответствующая  $\chi_{d,n}$

Уменьшенная толщина краевого отгиба определяется согласно рисунка е по формуле:

$$t_{red} = t \cdot \chi_d$$

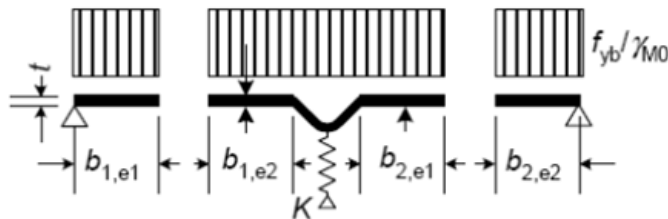


## Алгоритм определения эффективной ширины участков с промежуточными элементами жесткости

Нижеприведенный алгоритм применим для одного или двух одинаковых элементов жесткости в виде канавки или гiba.



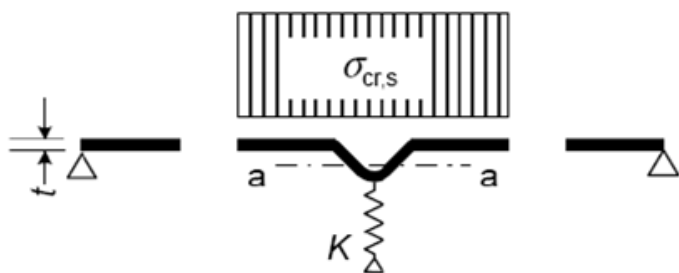
а) Полное поперечное сечение и граничные условия



б) Этап 1. Эффективное поперечное сечение при  $K = \infty$ , основанное на  $\sigma_{com,Ed} = f_{yb}/\gamma_{M0}$

Начальные значения эффективной ширины  $b_{1,e2}$  и  $b_{2,e1}$ , показанные на рисунке, должны определяться с допущением, что плоские элементы  $b_{p,1}$  и  $b_{p,2}$  оперты по двум сторонам.

## Алгоритм определения эффективной ширины участков с промежуточными элементами жесткости



в) Этап 2. Критическое напряжение  $\sigma_{cr,s}$  в упругой стадии для эффективной площади  $A_s$  элемента жесткости из этапа 1

Начальные значения эффективной ширины  $b_{1,e2}$  и  $b_{2,e1}$ , показанные на рисунке, должны определяться с допущением, что плоские элементы  $b_{p,1}$  и  $b_{p,2}$  оперты по двум сторонам.

Эффективная площадь поперечного сечения промежуточного элемента жесткости  $A_s$  определяется по формуле:

$$A_s = t(b_{1,e2} + b_{2,e1} + b_s),$$

где  $b_s$  — ширина элемента жесткости.

Критическое напряжение  $\sigma_{cr,s}$  потери устойчивости промежуточного элемента жесткости определяется по формуле:

$$\sigma_{cr,s} = \frac{2 \cdot \sqrt{KEI_s}}{A_s},$$

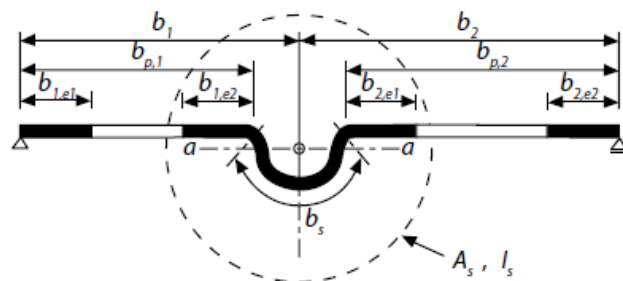
где

$K$

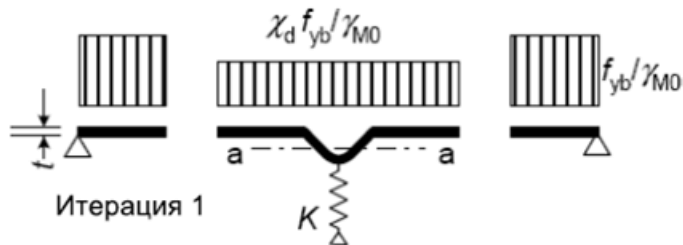
жесткость связи на единицу длины;

$I_s$

момент инерции эффективного сечения отгиба, определенный по эффективной площади  $A_s$ , относительно центральной оси  $a-a$  эффективного поперечного сечения.



## Алгоритм определения эффективной ширины участков с промежуточными элементами жесткости



г) Сниженная прочность  $\chi_d f_{yb}/\gamma_{M0}$  для элемента жесткости с эффективной площадью  $A_s$  и снижающим коэффициентом  $\chi_d$ , основанным на  $\sigma_{cr,s}$

При условии  $\chi_d < 1$  значение снижающего коэффициента можно определить итерационно, начиная итерацию с модифицированных значений  $\rho$ , полученных по 3.5.1 с  $\sigma_{com,Ed,i} = \chi_d f_{yb}/\gamma_{M0}$  таким образом, что

$$\bar{\lambda}_{p,red} = \bar{\lambda}_p \sqrt{\chi_d}.$$

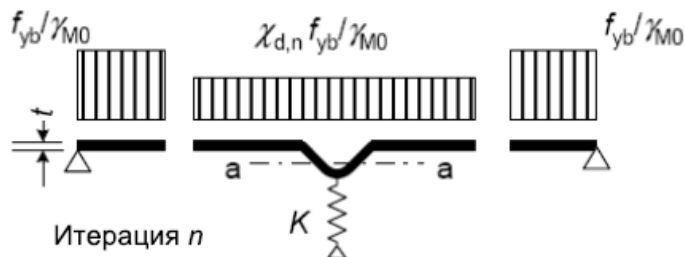
Уменьшенная эффективная площадь элемента жесткости  $A_{s,red}$ , с учетом плоской формы потери устойчивости, определяется как

$$A_{s,red} = \chi_d A_s \frac{f_{yb}/\gamma_{M0}}{\sigma_{com,Ed}} \leq A_s,$$

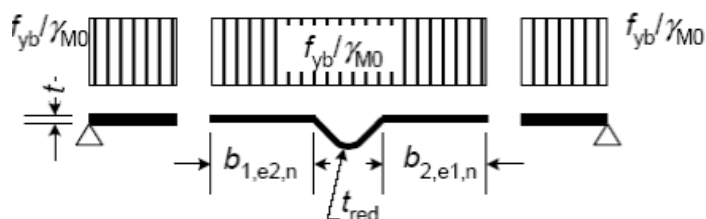
где

$\sigma_{com,Ed}$  сжимающее напряжение вдоль центральной оси элемента жесткости, рассчитанное для эффективного поперечного сечения.

## Алгоритм определения эффективной ширины участков с промежуточными элементами жесткости



д) Этап 3. Повторяется этап 1 для расчета эффективной ширины с уменьшенным сжимающим напряжением  $\sigma_{com,Ed,i} = \chi_d f_{yb} / \gamma_{M0}$  с  $\chi_d$  из предыдущей итерации, до тех пор, пока не выполняются следующие условия:  
 $\chi_{d,n} \approx \chi_{d,(n-1)}$ , но  $\chi_{d,n} \leq \chi_{d,(n-1)}$



е) Принимается эффективное поперечное сечение с  $b_{1,e2}$ ,  $b_{2,e1}$  и уменьшенная толщина  $t_{red}$ , соответствующая  $\chi_{d,n}$

Уменьшенная толщина краевого отгиба определяется согласно по формуле:

$$t_{red} = t \cdot \chi_d$$

# СПАСИБО!

[www.uscc.com.ua](http://www.uscc.com.ua) | +38-044-590-01-56

