



УКРАИНСКИЙ ЦЕНТР
СТАЛЬНОГО
СТРОИТЕЛЬСТВА

Проверки прочности элементов стальных конструкций из холодноформованных профилей при растяжении, сжатии и изгибе, а также при их совместном действии

Виталина Юрченко,
кандидат технических наук

Семинар «ЛСТК: проектирование, производство и монтаж»

16-17 апреля 2015



Проектирование несущих элементов из холодногнутых профилей

Проблемы проверочного расчета

- Неоднородное распределение свойств материала по сечению вследствие холодной обработки;
- Расчет геометрических характеристик сечений (с учетом гибов);
- Закритическая работа несущих элементов конструкций:
 - ▶ Потеря местной устойчивости элементов сечения (полок и стенок);
 - ▶ Потеря устойчивости формы сечения (искривление контура);
- Крутильная и изгибно-крутильная формы потери общей устойчивости.



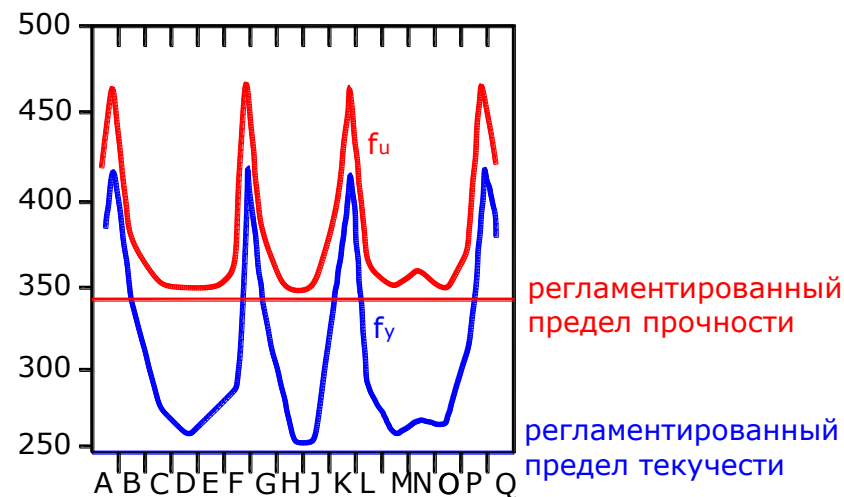
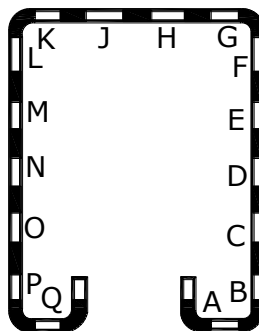
Прочностные расчеты холодноформованных профилей

Свойства стали

- Базовый предел текучести (f_{yb}) → усредненный (повышенный) предел текучести (f_{ya})

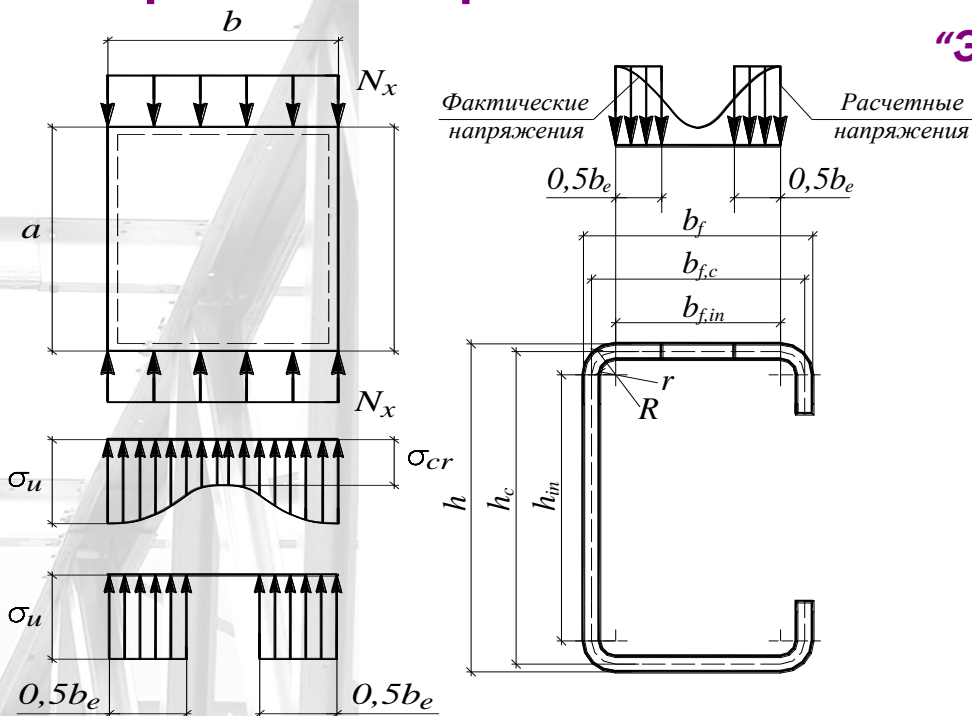
$$f_{ya} = f_{yb} + \frac{knt^2}{A_g} (f_u - f_{yb}) \leq \frac{f_u + f_{yb}}{2}$$

- Усредненный (повышенный) предел текучести зависит от технологии холодной формовки, количества гибов в расчетном сечении и толщины профиля
- Повышенный предел текучести не используется в проверочных расчетах элементов с сечениями 4-го класса



Проверочные расчеты холодноформованных профилей

Закритическая работа элементов сечения



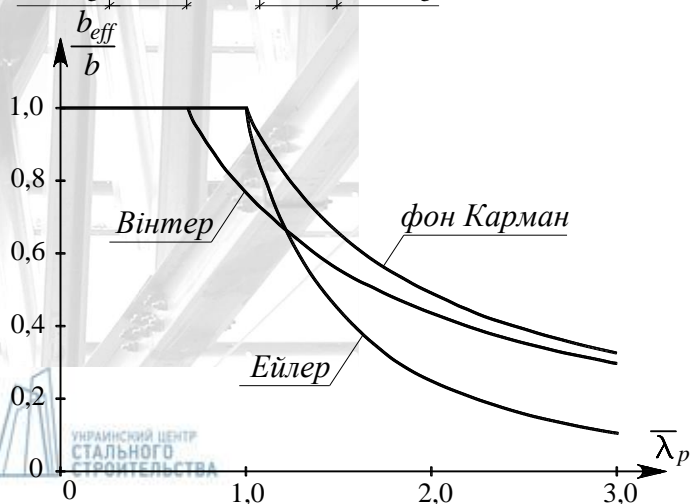
“Эффективная” ширина по фон Карману
для тонкой пластины при отсутствии
несовершенств:

$$\sigma_{cr,beff} = \frac{k_{\sigma} \pi^2 E}{12(1-\nu^2) \left(\frac{b_{eff}}{t} \right)^2} = f_y$$

$$\frac{b_{eff}}{b} = \sqrt{\frac{\pi^2 E}{f_y \lambda_p^2}} = \frac{\pi}{\lambda_p} \sqrt{\frac{E}{f_y}} = \frac{\lambda_1}{\lambda_p} = \frac{1}{\bar{\lambda}_p}$$

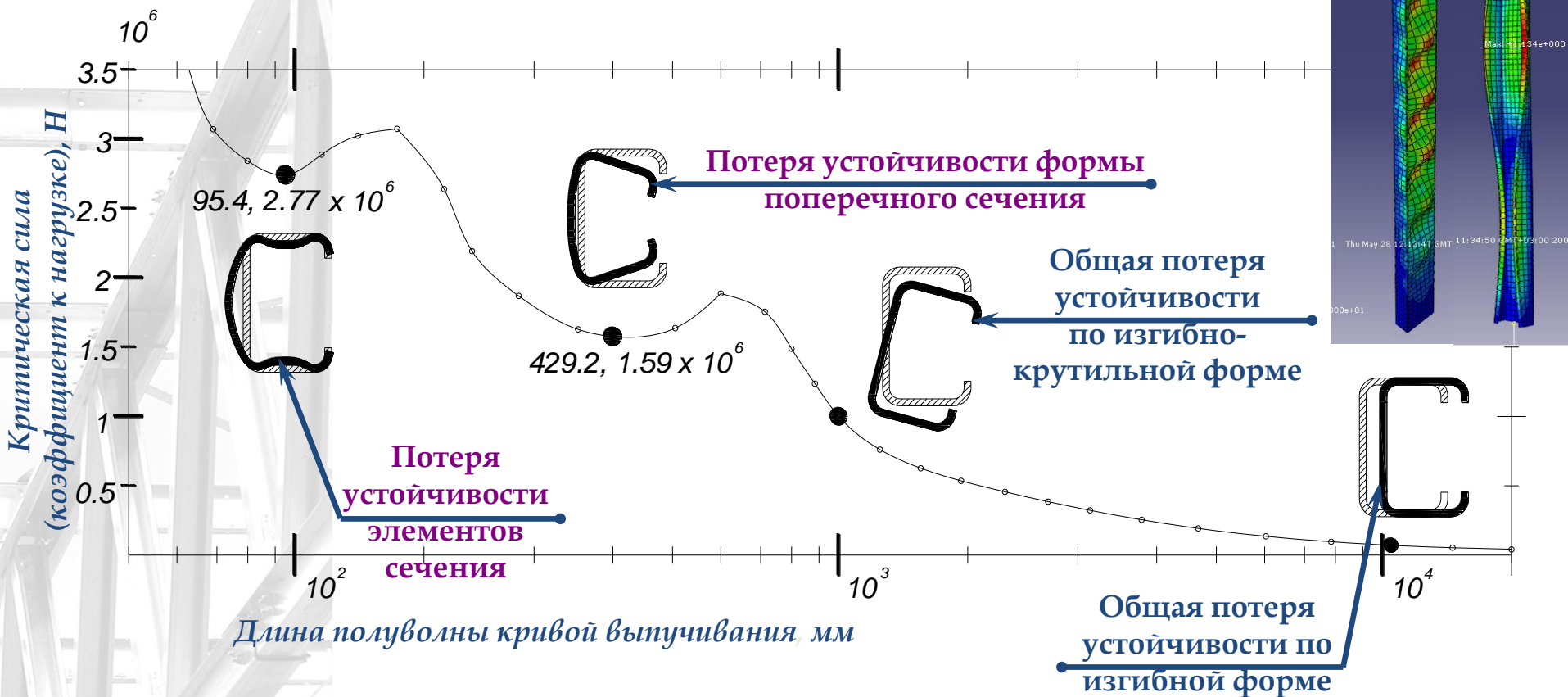
“Эффективная” ширина по Винтеру
для тонкой пластины с
несовершенствами::

$$\frac{b_{eff}}{b} = \frac{1}{\lambda_p} \left(1 - \frac{0,22}{\bar{\lambda}_p} \right); \quad \bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = 1,052 \frac{b}{t} \sqrt{\frac{f_y}{k_{\sigma} E}}$$



Проверочные расчеты холодноформованных профилей

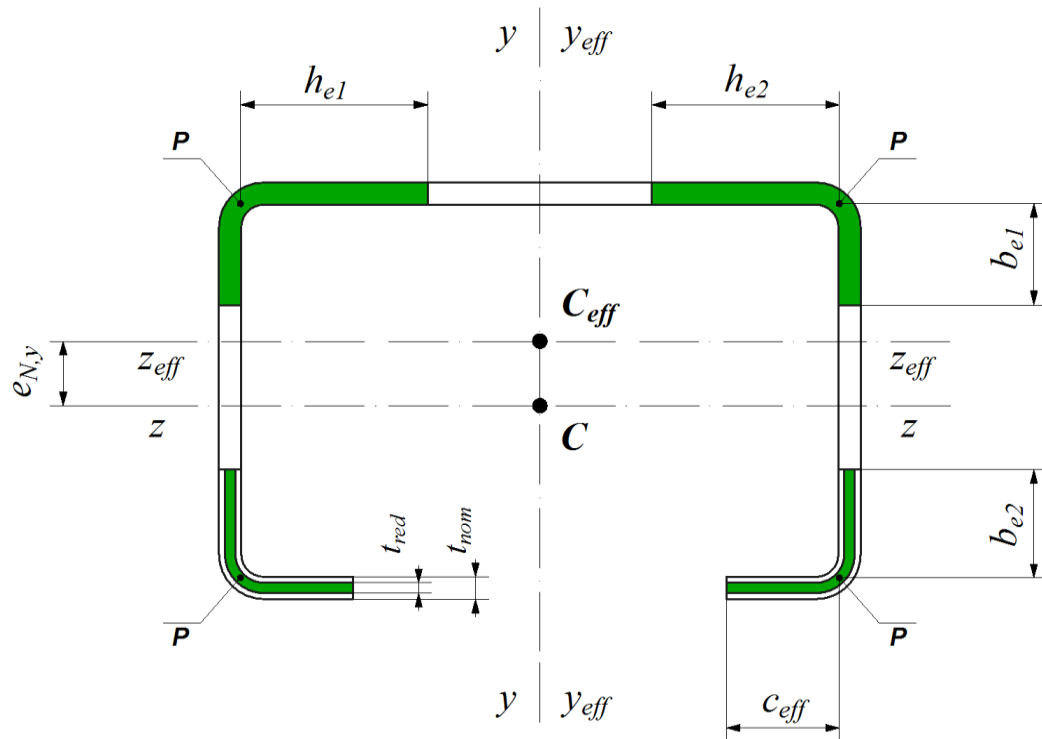
Формы потери устойчивости



Проверочные расчеты холодноформованных профилей

Последовательность построения «эффективного» сечения

- Расчет “эффективных” ширин сжатых элементов сечения, учитывающих *местную потерю устойчивости*
- Расчет «уменьшенных» толщин тех сжатых элементов сечения, потеря устойчивости которых провоцирует *потерю устойчивости формы сечения* (искривление контура)
- “Уменьшенные” толщины элементов сечения вычисляют после расчета “эффективных” ширин



Прочностные расчеты холодноформованных профилей

Проверка прочности при осевом растяжении

$$\frac{N_{jkm}}{N_{tRd,j}} = \frac{N_{jkm} \gamma_{M0}}{A_{g,j} f_{ya,j}} - 1, 0 \leq 0$$

N_{jkm} – расчетное усилие растяжения;

$N_{tRd,j}$ – сопротивление сечения на растяжение;

$A_{g,j}$ – площадь поперечного сечения брутто;

$\gamma_{M0} = 1,0$ – частный коэффициент надежности, принимаемый равным 1,0 (рекомендуемое Еврокодом значение, а также принятое в Национальном приложении Украины);

$f_{ya,j}$ – усредненный (повышенный) предел текучести;

j – номер стержня;

k – номер расчетной комбинации нагрузок;

m – номер расчетного сечения.

Прочностные расчеты холодноформованных профилей

Проверка прочности при осевом сжатии

Когда $A_{eff,jkm} < A_{g,j}$ \Rightarrow

$$\frac{N_{jkm}}{N_{cRd,jkm}} = \frac{N_{jkm} \gamma_{M0}}{f_{yb,j} A_{eff,jkm}} - 1, 0 \leq 0$$

N_{jkm} – расчетное усилие сжатия;

$N_{cRd,jkm}$ – несущая способность элемента при растяжении;

$A_{eff,jkm}$ – площадь эффективного поперечного сечения;

$\gamma_{M0} = 1,0$ – частный коэффициент надежности в прочностных проверках;

$f_{yb,j}$ – базовый предел текучести;

j – номер стержня;

k – номер расчетной комбинации нагрузок;

m – номер расчетного сечения.

Прочностные расчеты холодноформованных профилей

Проверка прочности при осевом сжатии

Когда $A_{eff,jkm} = A_{g,j}$ \rightarrow

$$\frac{N_{jkm}}{N_{cRd,j}} = \frac{N_{jkm} \gamma_{M0}}{A_{g,j} \left(f_{yb,j} + 4 \left(f_{ya,j} - f_{yb,j} \right) \left(1 - \frac{\bar{\lambda}_{e,max,j}}{\bar{\lambda}_{e0,cor,j}} \right) \right)} - 1, 0 \leq 0$$
$$\frac{N_{jkm}}{N_{cRd,j}} = \frac{N_{jkm} \gamma_{M0}}{A_{g,j} f_{ya,j}} - 1, 0 \leq 0$$

N_{jkm} – расчетное усилие сжатия;

$N_{cRd,jkm}$ – несущая способность элемента при растяжении;

$A_{g,j}$ – площадь поперечного сечения брутто;

$f_{ya,j}$ – усредненный (повышенный) предел текучести;

$\bar{\lambda}_{e,max,j}$ – условная гибкость элемента сечения с наибольшим $\bar{\lambda}_e / \bar{\lambda}_{e0}$;

$\bar{\lambda}_{e0,cor}$ – предельная условная гибкость, соответствующая $\bar{\lambda}_{e,max,j}$;

Прочностные расчеты холодноформованных профилей

Подсчет условных и предельных гибкостей элементов сечения

Для стенок →

(подкрепленных элементов сечения - стенок, при центральном сжатии)

$$\bar{\lambda}_{e,jkm} = \bar{\lambda}_{e,j} = \frac{h_{w,ef,j}}{28,4t_{w,j}\sqrt{4,0}} \sqrt{\frac{f_{yb,j}}{235}} = \frac{h_{w,ef,j}}{56,8 \cdot t_{w,j}} \sqrt{\frac{f_{yb,j}}{235}} = \frac{h_j - t_j - 2r_j}{56,8 \cdot t_j} \sqrt{\frac{f_{yb,j}}{235}}$$
$$\bar{\lambda}_{e0,cor,jkm} = \bar{\lambda}_{e0,cor,j} = 0,5 + \sqrt{0,25 - 0,055(3 + \psi_{jkm})} = 0,673$$

$$\frac{\bar{\lambda}_{e,j}}{\bar{\lambda}_{e0,j}} = \frac{\bar{\lambda}_{e,jkm}}{\bar{\lambda}_{e0,cor,j}} = \frac{h_{w,ef,j}}{0,673 \cdot 56,8 \cdot t_{w,j}} \sqrt{\frac{f_{yb,j}}{235}} = \frac{h_{w,ef,j}}{38,2264 \cdot t_{w,j}} \sqrt{\frac{f_{yb,j}}{235}} = \frac{h_j - t_j - 2r_j}{38,2264 \cdot t_j} \sqrt{\frac{f_{yb,j}}{235}}$$

Для полок →

(не подкрепленных элементов сечения - полок, при центральном сжатии)

$$\bar{\lambda}_{e,jkm} = \bar{\lambda}_{p,jkm} = \frac{b_{f,ef,j}}{28,4t_{f,j}\sqrt{0,43}} \sqrt{\frac{f_{yb,j}}{235}} = \frac{0,054b_{f,ef,j}}{t_{f,j}} \sqrt{\frac{f_{yb,j}}{235}} = \frac{b_j - t_j - r_j}{18,5145 \cdot t_j} \sqrt{\frac{f_{yb,j}}{235}}$$
$$\bar{\lambda}_{e0,cor,jkm} = \bar{\lambda}_{e0,cor,j} = 0,5 + \sqrt{0,25 - 0,055(3 + \psi_{jkm})} = 0,673$$

$$\frac{\bar{\lambda}_{e,j}}{\bar{\lambda}_{e0,j}} = \frac{\bar{\lambda}_{e,jkm}}{\bar{\lambda}_{e0,cor,j}} = \frac{0,054b_{f,ef,j}}{0,673t_{f,j}} \sqrt{\frac{f_{yb,j}}{235}} = \frac{b_j - t_j - r_j}{12,463 \cdot t_j} \sqrt{\frac{f_{yb,j}}{235}}$$

Прочностные расчеты холодноформованных профилей

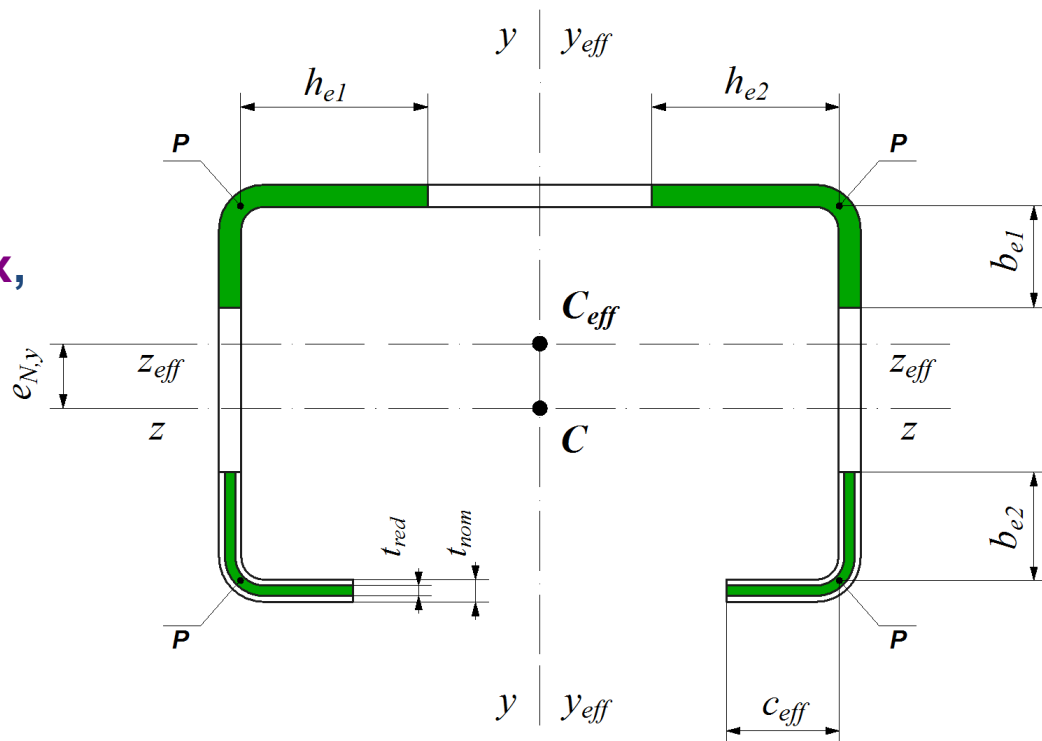
Корректировка внутренних усилий

Необходимо выполнять только:

- ▶ для расчетных сечений, в которых происходит **местная потеря устойчивости элементов сечения** (стенок, полок);
- ▶ и/или **потеря устойчивости формы сечения** (искривление контура сечения);
- ▶ и только лишь в тех случаях, когда такая корректировка приводит к **увеличению значений изгибающих моментов!!!!**

$$M_{y,jkm} \leftarrow M_{y,jkm} \oplus N_{jkm} e_{z,jkm}$$

$$M_{z,jkm} \leftarrow M_{z,jkm} \oplus N_{jkm} e_{y,jkm}$$



Прочностные расчеты холодноформованных профилей

Проверка прочности при изгибе

Когда $W_{y,eff,jmk} < W_{y,el,j}$ 

$$\frac{M_{y,jkm}}{M_{cRd,jkm}} = \frac{(M_{y,jkm} \oplus N_{jkm} e_{z,jkm}) \gamma_{M0}}{W_{y,eff,jmk} f_{yb,j}} \leq 1,0$$

$M_{y,jkm}$ – расчетные изгибающий момент;

$M_{cRd,jkm}$ – несущая способность элемента на изгиб;

$W_{y,eff,jmk}$ – упругий момент сопротивления эффективного сечения;

$\gamma_{M0} = 1,0$ – частный коэффициент надежности в прочностных проверках;

$f_{yb,j}$ – базовый предел текучести;

j – номер стержня;

k – номер расчетной комбинации нагрузок;

m – номер расчетного сечения.

Прочностные расчеты холодноформованных профилей

Проверка прочности при изгибе

Когда $W_{y,eff,jmk} = W_{y,el,j}$ →

$$\frac{M_{y,jkm} \gamma_{M0}}{f_{yb,j} \left(W_{y,el,j} + 4(W_{y,pl,j} - W_{y,el,j}) \left(1 - \frac{\bar{\lambda}_{e,max,jkm}}{\bar{\lambda}_{e0,cor,j}} \right) \right)} \leq 1,0$$

$$\frac{M_{y,jkm} \gamma_{M0}}{W_{y,pl,j} f_{yb,j}} \leq 1,0$$

$M_{y,jkm}$ – расчетный изгибающий момент;

$M_{cRd,jkm}$ – несущая способность элемента на изгиб;

$W_{y,el,j}$ – упругий момент сопротивления сечения **брутто**;

$W_{y,pl,j}$ – пластический момент сопротивления сечения **брутто**;

$f_{yb,j}$ – усредненный (повышенный) предел текучести;

$\bar{\lambda}_{e,max,j}$ – условная гибкость элемента сечения с наибольшим $\bar{\lambda}_e / \bar{\lambda}_{e0}$;

$\bar{\lambda}_{e0,cor}$ – предельная условная гибкость, соответствующая $\bar{\lambda}_{e,max,j}$;

Прочностные расчеты холодноформованных профилей

Подсчет условных и предельных гибкостей элементов сечения

Для стенок →

(подкрепленных элементов сечения - стенок, при чистом изгибе)

$$\bar{\lambda}_{e,jkm} = \bar{\lambda}_{e,j} = \frac{h_{w,ef,j}}{28,4t_{w,j}\sqrt{23,9}} \sqrt{\frac{f_{yb,j}}{235}} = \frac{h_{w,ef,j}}{138,84 \cdot t_{w,j}} \sqrt{\frac{f_{yb,j}}{235}} = \frac{h_j - t_j - 2r_j}{138,84 \cdot t_j} \sqrt{\frac{f_{yb,j}}{235}}$$

$$\bar{\lambda}_{e0,cor,jkm} = \bar{\lambda}_{e0,cor,j} = 0,5 + \sqrt{0,25 - 0,055(3 + \psi_{jkm})} = 0,8742$$

$$\frac{\bar{\lambda}_{e,j}}{\bar{\lambda}_{e0,j}} = \frac{\bar{\lambda}_{e,jkm}}{\bar{\lambda}_{e0,cor,j}} = \frac{h_{w,ef,j}}{0,8742 \cdot 138,84 \cdot t_{w,j}} \sqrt{\frac{f_{yb,j}}{235}} = \frac{h_{w,ef,j}}{121,37 \cdot t_{w,j}} \sqrt{\frac{f_{yb,j}}{235}} = \frac{h_j - t_j - 2r_j}{121,37 \cdot t_j} \sqrt{\frac{f_{yb,j}}{235}}$$

Для полок →

(не подкрепленных элементов сечения - полок, при сжатии)

$$\bar{\lambda}_{e,jkm} = \bar{\lambda}_{p,jkm} = \frac{b_{f,ef,j}}{28,4t_{f,j}\sqrt{0,43}} \sqrt{\frac{f_{yb,j}}{235}} = \frac{0,054b_{f,ef,j}}{t_{f,j}} \sqrt{\frac{f_{yb,j}}{235}} = \frac{b_j - t_j - r_j}{18,5145 \cdot t_j} \sqrt{\frac{f_{yb,j}}{235}}$$

$$\bar{\lambda}_{e0,cor,jkm} = \bar{\lambda}_{e0,cor,j} = 0,5 + \sqrt{0,25 - 0,055(3 + \psi_{jkm})} = 0,673$$

$$\frac{\bar{\lambda}_{e,j}}{\bar{\lambda}_{e0,j}} = \frac{\bar{\lambda}_{e,jkm}}{\bar{\lambda}_{e0,cor,j}} = \frac{0,054b_{f,ef,j}}{0,673t_{f,j}} \sqrt{\frac{f_{yb,j}}{235}} = \frac{b_j - t_j - r_j}{12,463 \cdot t_j} \sqrt{\frac{f_{yb,j}}{235}}$$

Прочностные расчеты холодноформованных профилей

Проверка прочности при изгибе

Когда $W_{y,eff,jmk} = W_{y,el,j}$ 

$$\frac{M_{y,jkm} \gamma_{M0}}{f_{yb,j} \left(W_{y,el,j} + 4(W_{y,pl,j} - W_{y,el,j}) \left(1 - \frac{\bar{\lambda}_{e,max,jkm}}{\bar{\lambda}_{e0,cor,j}} \right) \right)} \leq 1,0$$
$$\frac{M_{y,jkm} \gamma_{M0}}{W_{y,pl,j} f_{yb,j}} \leq 1,0$$

Сформулированная проверка прочности справедлива только:

- при условии **отсутствия изгибающего момента**, действующего относительно другой оси;
- и только для тех расчетных сечений стержневых элементов, которые **не подвержены кручению**,
- **не подвержены потере общей устойчивости** (при изгибной и изгибно-крутильной формах выпучивания);
- а также **потере устойчивости плоской формы изгиба**.

Прочностные расчеты холодноформованных профилей

Проверка прочности при изгибе

Когда $W_{y,eff,jmk} = W_{y,el,j}$ →

$$\frac{M_{y,jkm} \gamma_{M0}}{W_{y,el,j} f_{ya,j}} - 1 \leq 0$$

В том случае, когда хотя бы одно условие не выполняется:

- при условии **отсутствия** изгибающего момента, действующего относительно другой оси;
- и только для тех расчетных сечений стержневых элементов, которые **не подвержены кручению**,
- **не подвержены потере общей устойчивости** (при изгибной и изгибно-крутильной формах выпучивания);
- а также **потере устойчивости плоской формы изгиба**.

Прочностные расчеты холодноформованных профилей

Проверка прочности при изгибе в двух главных плоскостях

Когда $W_{y,eff,jmk} < W_{y,el,j}$ \Rightarrow

Когда $W_{z,eff,jmk} < W_{z,el,j}$ \Rightarrow

$$\frac{\gamma_{M0}}{f_{yb,j}} \left(\frac{M_{y,jkm} \oplus N_{jkm} e_{z,jkm}}{W_{y,eff,jmk}} + \frac{M_{z,jkm} \oplus N_{jkm} e_{y,jkm}}{W_{z,eff,jmk}} \right) \leq 1,0$$

$M_{y,jkm}, M_{z,jkm}$ – расчетные изгибающие моменты;

$W_{y,eff,jmk}$ – упругий момент сопротивления **эффективного** сечения относительно оси $y - y$;

$W_{z,eff,jmk}$ – упругий момент сопротивления **эффективного** сечения относительно оси $z - z$;

$\gamma_{M0} = 1,0$ – частный коэффициент надежности в прочностных проверках;

$f_{yb,j}$ – базовый предел текучести;

j – номер стержня;

k – номер расчетной комбинации нагрузок;

m – номер расчетного сечения.

Прочностные расчеты холодноформованных профилей

Проверка прочности при изгибе в двух главных плоскостях

Когда $W_{y,eff,jmk} = W_{y,el,j}$ →

Когда $W_{z,eff,jmk} = W_{z,el,j}$ →

$$\frac{\gamma_{M0}}{f_{ya,j}} \left(\frac{M_{y,jkm}}{W_{y,el,j}} + \frac{M_{z,jkm}}{W_{z,el,j}} \right) \leq 1,0$$

$M_{y,jkm}, M_{z,jkm}$ – расчетные изгибающие моменты;

$W_{y,el,j}$ – упругий момент сопротивления сечения брутто относительно оси $y - y$;

$W_{z,el,j}$ – упругий момент сопротивления сечения брутто относительно оси $z - z$;

$f_{ya,j}$ – усредненный (повышенный) предел текучести;

Прочностные расчеты холодноформованных профилей

Проверки прочности при растяжении и изгибе в двух главных плоскостях

- для наиболее растянутого волокна сечения:

$$\frac{N_{jkm}}{N_{tRd,jkm}} + \frac{M_{y,jkm} \oplus N_{jkm} e_{z,jkm}}{M_{y,tRd,jkm}} + \frac{M_{z,jkm} \oplus N_{jkm} e_{y,jkm}}{M_{z,tRd,jkm}} \leq 1$$

- для сжатого волокна сечения:

$$\frac{M_{y,jkm} \oplus N_{jkm} e_{z,jkm}}{M_{y,cRd,jkm}} + \frac{M_{z,jkm} \oplus N_{jkm} e_{y,jkm}}{M_{z,cRd,jkm}} - \frac{N_{jkm}}{N_{tRd,jkm}} \leq 1$$

- или для менее растянутого волокна сечения:

$$\frac{N_{jkm}}{N_{tRd,jkm}} - \frac{M_{y,jkm} \oplus N_{jkm} e_{z,jkm}}{M_{y,cRd,jkm}} - \frac{M_{z,jkm} \oplus N_{jkm} e_{y,jkm}}{M_{z,cRd,jkm}} \leq 1$$

Прочностные расчеты холодноформованных профилей

Проверки прочности при сжатии и изгибе в двух главных плоскостях

- для наиболее сжатого волокна сечения:

$$\frac{N_{jkm}}{N_{cRd,jkm}} + \frac{M_{y,jkm} \oplus N_{jkm} e_{z,jkm}}{M_{y,cRd,jkm}} + \frac{M_{z,jkm} \oplus N_{jkm} e_{y,jkm}}{M_{z,cRd,jkm}} \leq 1$$

- для растянутого волокна сечения:

$$\frac{M_{y,jkm} \oplus N_{jkm} e_{z,jkm}}{M_{y,tRd,jkm}} + \frac{M_{z,jkm} \oplus N_{jkm} e_{y,jkm}}{M_{z,tRd,jkm}} - \frac{N_{jkm}}{N_{cRd,jkm}} \leq 1$$

- или для менее сжатого волокна сечения:

$$\frac{N_{jkm}}{N_{cRd,jkm}} - \frac{M_{y,jkm} \oplus N_{jkm} e_{z,jkm}}{M_{y,tRd,jkm}} - \frac{M_{z,jkm} \oplus N_{jkm} e_{y,jkm}}{M_{z,tRd,jkm}} \leq 1$$

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ

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

