



УКРАИНСКИЙ ЦЕНТР
СТАЛЬНОГО
СТРОИТЕЛЬСТВА

Проверки общей устойчивости элементов стальных конструкций из холодноформованных профилей при сжатии, изгибе и их совместном действии

Виталина Юрченко,
кандидат технических наук

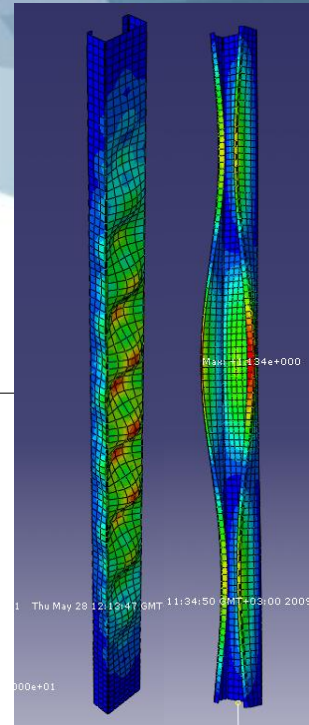
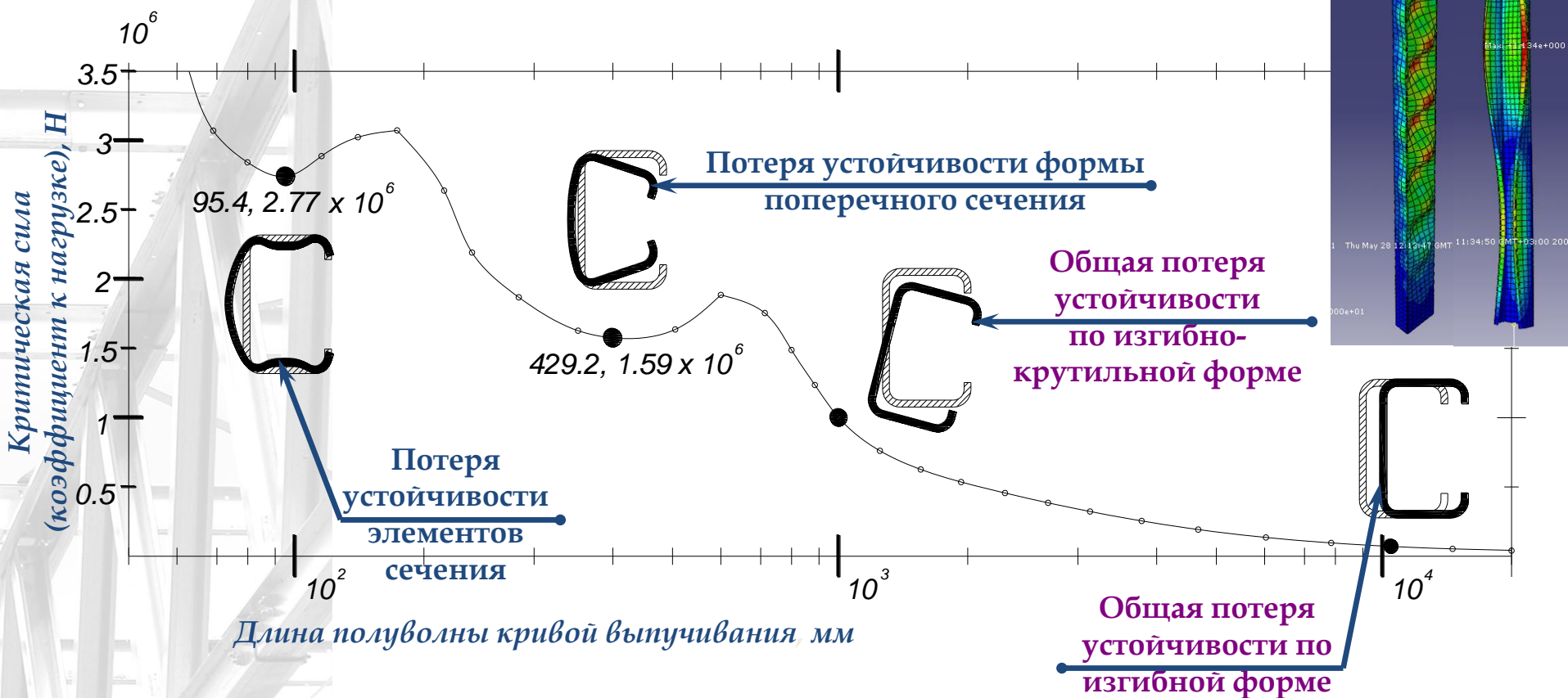
Семинар «ЛСТК: проектирование, производство и монтаж»

16-17 апреля 2015



Проверочные расчеты холодноформованных профилей

Формы потери устойчивости



Проверка общей устойчивости холодноформованных профилей

Изгибная форма выпучивания при центральном сжатии

Когда $A_{eff,jkm} < A_{g,j} \Rightarrow$ относительно оси $y - y$:

$$\frac{N_{jkm} \gamma_{M1}}{\chi_{y,jmk} A_{eff,jmk} f_{yb,j}} \leq 1,0$$

относительно оси $z - z$:

$$\frac{N_{jkm} \gamma_{M1}}{\chi_{z,jmk} A_{eff,jmk} f_{yb,j}} \leq 1,0$$

N_{jkm} – расчетное усилие сжатия;

$\chi_{y,jmk}, \chi_{z,jmk}$ – коэффициенты устойчивости для изгибного выпучивания стержня относительно осей $y - y$ и $z - z$;

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

$\gamma_{M1} = 1,0$ – частный коэффициент надежности в проверках устойчивости;

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

j – номер стержня;

k – номер расчетной комбинации нагрузок;

m – номер расчетного сечения.

Проверка общей устойчивости холодноформованных профилей

Вычисление условных гибкостей и коэффициентов устойчивости

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

$$\chi_{y,jmk} = \frac{1}{\Phi_{y,jmk} + \sqrt{\Phi_{y,jmk}^2 - \bar{\lambda}_{y,jmk}^2}} \leq 1,0$$

$$\chi_{z,jmk} = \frac{1}{\Phi_{z,jmk} + \sqrt{\Phi_{z,jmk}^2 - \bar{\lambda}_{z,jmk}^2}} \leq 1,0$$

$$\Phi_{y,jmk} = 0,5 \left(1 + \alpha_{y,j}^{imp} \left(\bar{\lambda}_{y,jmk} - 0,2 \right) + \bar{\lambda}_{y,jmk}^2 \right)$$

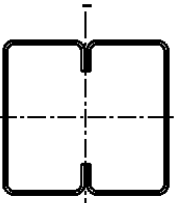
$$\Phi_{z,jmk} = 0,5 \left(1 + \alpha_{z,j}^{imp} \left(\bar{\lambda}_{z,jmk} - 0,2 \right) + \bar{\lambda}_{z,jmk}^2 \right)$$

$$\bar{\lambda}_{y,jmk} = \sqrt{\frac{A_{eff,jmk} f_{yb,j}}{N_{cr,y,j}}} = \sqrt{\frac{A_{eff,jmk} f_{yb,j}}{\pi^2 E \frac{i_{y,j}^2}{l_{ef,y}^2} A_{g,j}}} = \frac{l_{ef,y}}{i_{y,j} \pi} \sqrt{\frac{A_{eff,jmk}}{A_{g,j}}} \sqrt{\frac{f_{yb,j}}{E}} = \frac{l_{ef,y}}{93,9 i_{y,j} \varepsilon} \sqrt{\frac{A_{eff,jmk}}{A_{g,j}}}$$

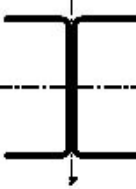
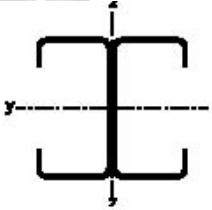
$$\bar{\lambda}_{y,jmk} = \sqrt{\frac{A_{eff,jmk} f_{yb,j}}{N_{cr,y,j}}} = \sqrt{\frac{A_{eff,jmk} f_{yb,j}}{\pi^2 E \frac{i_{y,j}^2}{l_{ef,y}^2} A_{g,j}}} = \frac{l_{ef,y}}{i_{y,j} \pi} \sqrt{\frac{A_{eff,jmk}}{A_{g,j}}} \sqrt{\frac{f_{yb,j}}{E}} = \frac{l_{ef,y}}{93,9 i_{y,j} \varepsilon} \sqrt{\frac{A_{eff,jmk}}{A_{g,j}}}$$

Проверка общей устойчивости холодноформованных профилей

Вычисление условных гибкостей и коэффициентов устойчивости



$$\alpha_{y,j}^{imp} = 0,49; \alpha_{z,j}^{imp} = 0,49$$

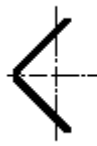


$$\alpha_{y,j}^{imp} = 0,21$$

$$\alpha_{z,j}^{imp} = 0,34$$

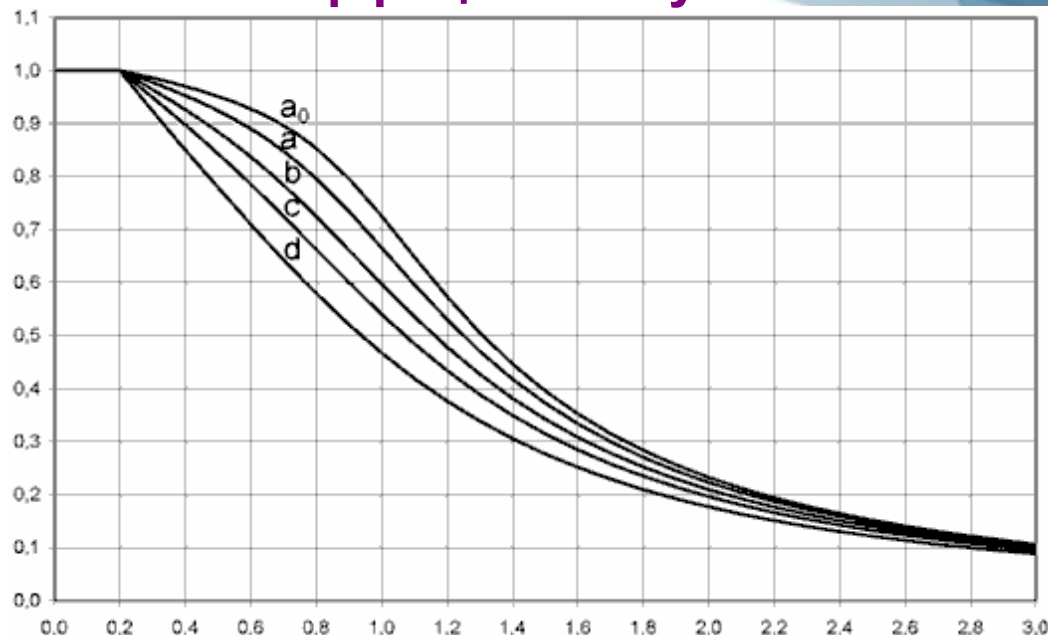



$$\alpha_{y,j}^{imp} = 0,34$$

$$\alpha_{z,j}^{imp} = 0,34$$

$$\alpha_{y,j}^{imp} = 0,49; \alpha_{z,j}^{imp} = 0,49$$



Кривая потери устойчивости	a_0	a	b	c	d
α_j^{imp} Коэффициент несовершенств	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76

Проверка общей устойчивости холодноформованных профилей

Изгибная форма выпучивания при центральном сжатии

Когда $A_{eff,jkm} = A_{g,j} \longrightarrow$ относительно оси $y - y$:

$$\frac{N_{jkm} \gamma_{M1}}{\chi_{y,j} A_{g,j} f_{ya,j}} - 1 \leq 0$$

относительно оси $z - z$:

$$\frac{N_{jkm} \gamma_{M1}}{\chi_{z,j} A_{g,j} f_{ya,j}} - 1 \leq 0$$

N_{jkm} – расчетное усилие сжатия;

$\chi_{y,j}, \chi_{z,j}$ – коэффициенты устойчивости для изгибного выпучивания стержня относительно осей $y - y$ и $z - z$;

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

$\gamma_{M1} = 1,0$ – частный коэффициент надежности в проверках устойчивости;

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

j – номер стержня;

k – номер расчетной комбинации нагрузок;

m – номер расчетного сечения.

Проверка общей устойчивости холодноформованных профилей

Крутильная и изгибно-крутильная формы выпучивания при центральном сжатии

Когда $A_{eff,jkm} < A_{g,j}$ \longrightarrow крутильная:

\longrightarrow изгибно-крутильная:

$$\frac{N_{jkm} \gamma_{M1}}{\chi_{T,jmk} A_{eff,jmk} f_{yb,j}} - 1 \leq 0$$

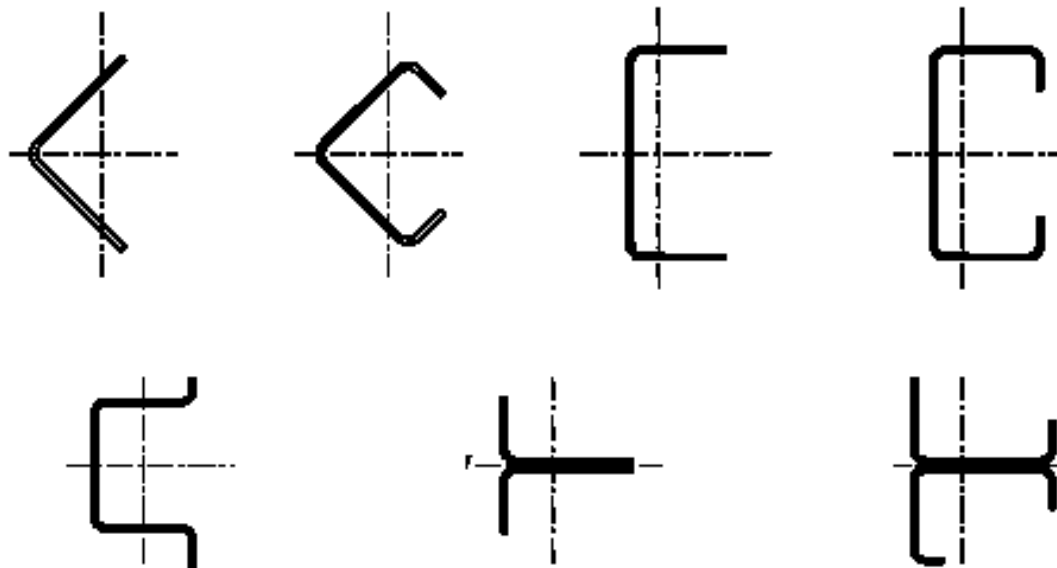
$$\frac{N_{jkm} \gamma_{M1}}{\chi_{TF,jmk} A_{eff,jmk} f_{yb,j}} - 1 \leq 0$$

N_{jkm} – расчетное усилие сжатия;

$\chi_{T,jkm}, \chi_{TF,jkm}$ – коэффициенты устойчивости для крутильного и изгибно-крутильного выпучивания стержня;

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

$f_{yb,j}$ – базовый предел текучести



Проверка общей устойчивости холодноформованных профилей

Вычисление упругих критических сил

→ Крутильная форма выпучивания при центральном сжатии:

$$N_{cr,T,j} = \frac{GI_{t,j} + \frac{\pi^2 EI_{\omega,j}}{l_{ef,T,j}^2}}{i_{y,j}^2 + i_{z,j}^2 + y_{0,j}^2 + z_{0,j}^2} = \frac{1}{i_{0,j}^2} \left(GI_{t,j} + \frac{\pi^2 EI_{\omega,j}}{l_{ef,T,j}^2} \right)$$

→ Изгибно-крутильная форма выпучивания при центральном сжатии:

$$N_{cr,TF,j} = \frac{N_{cr,y,j} i_{0,j}^2}{2(i_{0,j}^2 - y_{0,j}^2)} \left(1 + \frac{N_{cr,T,j}}{N_{cr,y,j}} - \sqrt{\left(1 - \frac{N_{cr,T,j}}{N_{cr,y,j}} \right)^2 + 4 \left(\frac{y_{0,j}}{i_{0,j}} \right)^2 \frac{N_{cr,T,j}}{N_{cr,y,j}}} \right)$$

$y_{0,j}, z_{0,j}$ – расстояние от центра массы до центра сдвига поперечного сечения брутто;

$l_{ef,T,j}$ – расчетная длина стержневого элемента при проверке устойчивости по крутильной формой выпучивания;

$N_{cr,y,j}$ – упругая критическая сила для изгибного выпучивания

Проверка общей устойчивости холодноформованных профилей

Изгибно-крутильная форма выпучивания при центральном сжатии

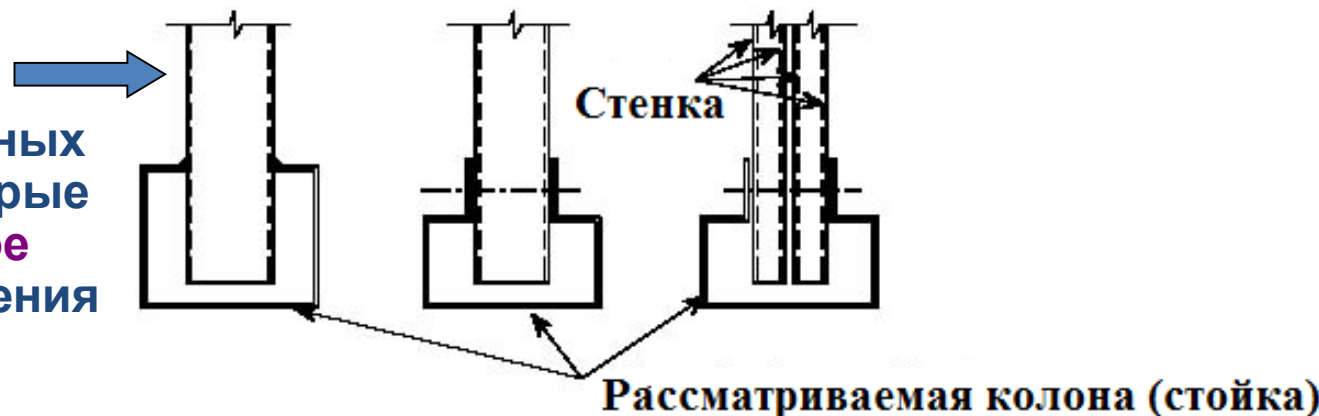
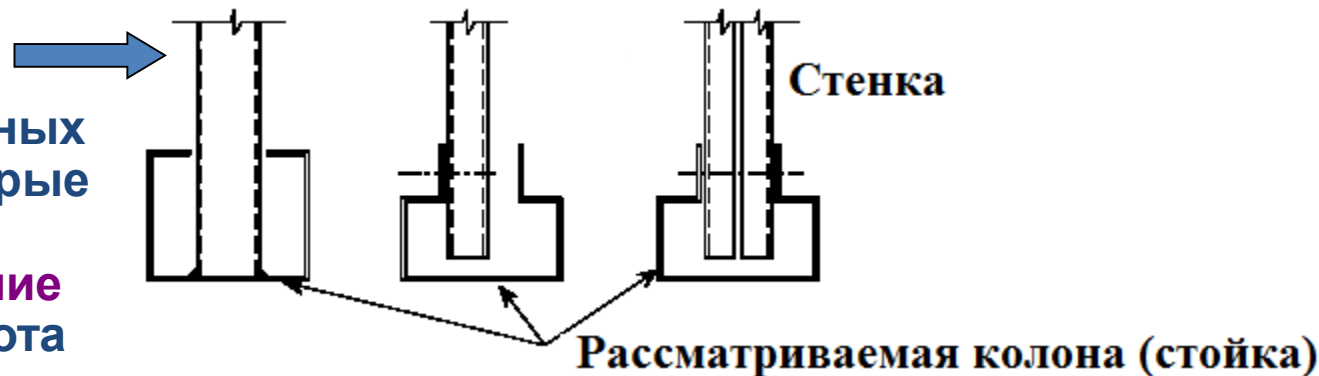
Расчетные длины:

- Для тех конструктивных решений узлов, которые обеспечивают **частичное закрепление** от кручения и поворота сечения:

$$\frac{l_T}{L_T} = 1,0$$

- Для тех конструктивных решений узлов, которые обеспечивают **полное закрепление** от кручения и поворота сечения:

$$\frac{l_T}{L_T} = 0,7$$



Проверка общей устойчивости холодноформованных профилей

Крутильная и изгибно-крутильная форма выпучивания при центральном сжатии

Когда $A_{eff,jkm} = A_{g,j}$ \longrightarrow крутильная:

\longrightarrow изгибно-крутильная:

$$\frac{N_{jkm} \gamma_{M1}}{\chi_{T,j} A_{g,j} f_{ya,j}} - 1 \leq 0$$

$$\frac{N_{jkm} \gamma_{M1}}{\chi_{TF,j} A_{g,j} f_{ya,j}} - 1 \leq 0$$

N_{jkm} – расчетное усилие сжатия;

$\chi_{T,j}, \chi_{TF,j}$ – коэффициенты устойчивости для крутильного и изгибно-крутильного выпучивания стержня;

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

$\gamma_{M1} = 1,0$ – частный коэффициент надежности в проверках устойчивости;

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

j – номер стержня;

k – номер расчетной комбинации нагрузок;

m – номер расчетного сечения.

Проверка общей устойчивости холодноформованных профилей

Устойчивость плоской формы изгиба

$$\frac{M_{y,jkm}}{M_{by,Rd,jkm}} \leq 1,0$$

Когда $W_{y,eff,jkm} < W_{y,el,j}$ →

$$\frac{(M_{y,jkm} \oplus N_{jkm} e_{z,jkm}) \gamma_{M1}}{\chi_{LT,jmk} W_{y,eff,jkm} f_{yb,j}} \leq 1,0$$

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

$M_{by,Rd,jkm}$ – несущая способность элемента на потерю устойчивости плоской формы изгиба;

$\chi_{LT,jmk}$ – коэффициент устойчивости для плоской формы изгиба;

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

$\gamma_{M1} = 1,0$ – частный коэффициент надежности в проверках устойчивости;

$f_{yb,j}$ – базовый предел текучести

Проверка общей устойчивости холодноформованных профилей

Устойчивость плоской формы изгиба

$$\frac{M_{y,jkm}}{M_{by,Rd,jkm}} \leq 1,0$$

Когда $W_{y,eff,jkm} = W_{y,el,j}$ →

$$\frac{M_{y,jkm} \gamma_{M1}}{\chi_{LT,j} W_{y,el,j} f_{ya,j}} \leq 1,0$$

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

$M_{by,Rd,jkm}$ – несущая способность элемента на потерю устойчивости плоской формы изгиба;

$\chi_{LT,j}$ – коэффициент устойчивости для плоской формы изгиба;

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

$\gamma_{M1} = 1,0$ – частный коэффициент надежности в проверках устойчивости;

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

Проверка общей устойчивости холодноформованных профилей

Вычисление условных гибкостей и коэффициентов устойчивости плоской формы изгиба

Когда $W_{y,eff,jkm} < W_{y,el,j}$ →

$$\bar{\lambda}_{LT,jmk} = \sqrt{\frac{W_{y,eff,jmk} f_{yb,j}}{M_{cr,y,j}}}$$

$$\Phi_{LT,jmk} = 0,5 \left(1 + \alpha_{LT,j}^{imp} (\bar{\lambda}_{LT,jmk} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT,jmk}^2 \right) = 0,466 + 0,17 \bar{\lambda}_{LT,jmk} + 0,5 \bar{\lambda}_{LT,jmk}^2$$

$$\chi_{LT,jmk} = \frac{1}{\Phi_{LT,jmk} + \sqrt{\Phi_{LT,jmk}^2 - \bar{\lambda}_{LT,jmk}^2}} \leq 1,0$$

Когда $W_{y,eff,jkm} = W_{y,el,j}$ →

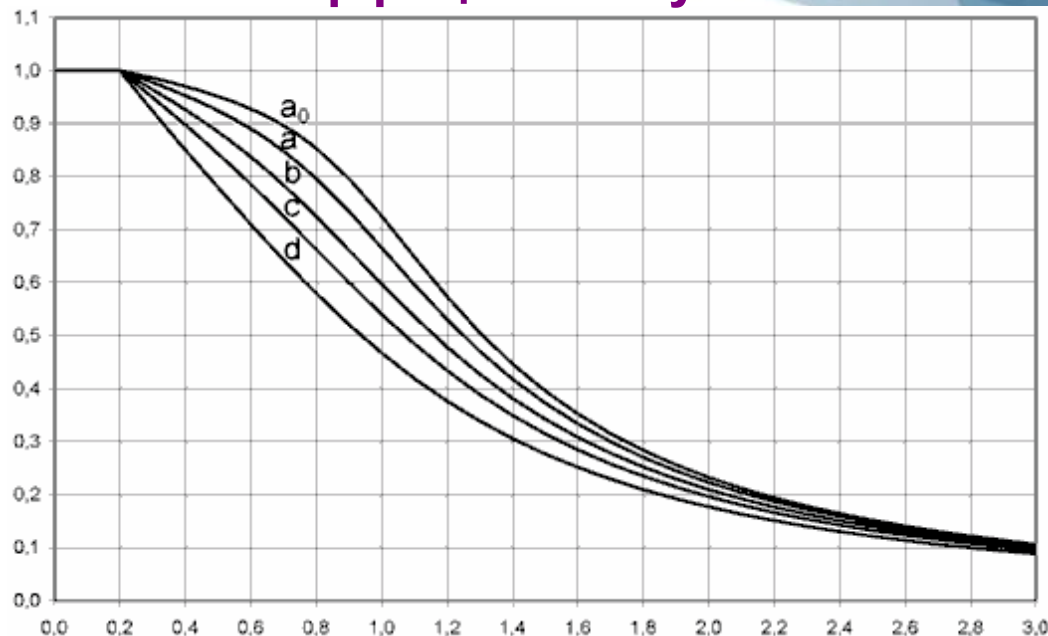
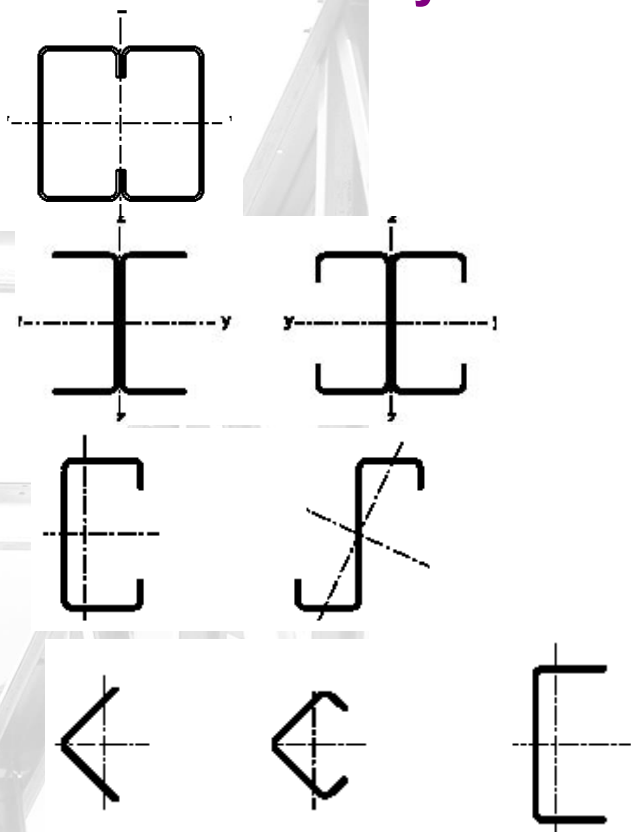
$$\bar{\lambda}_{LT,j} = \sqrt{\frac{W_{y,el,j} f_{ya,j}}{M_{cr,y,j}}}$$

$$\Phi_{LT,j} = 0,5 \left(1 + \alpha_{LT,j}^{imp} (\bar{\lambda}_{LT,j} - 0,2) + \bar{\lambda}_{LT,j}^2 \right) = 0,466 + 0,17 \bar{\lambda}_{LT,j} + 0,5 \bar{\lambda}_{LT,j}^2$$

$$\chi_{LT,j} = \frac{1}{\Phi_{LT,j} + \sqrt{\Phi_{LT,j}^2 - \bar{\lambda}_{LT,j}^2}} \leq 1,0$$

Проверка общей устойчивости холодноформованных профилей

Вычисление условных гибкостей и коэффициентов устойчивости



$$\alpha_{LT,j}^{imp} = 0,34$$

Кривая потери устойчивости	a_0	a	b	c	d
α_j^{imp} Коэффициент несовершенств	0,13	0,21	0,34	0,49	0,76

Проверка общей устойчивости холодноформованных профилей

Устойчивость плоской формы изгиба

Вычисление критического момента

$$M_{cr,y,j} = C_{1,j} \frac{\pi^2 EI_{z,j}}{(k_{z,j} L_j)^2} \sqrt{\frac{I_{y,j}}{I_{y,j} - I_{z,j}} \left(\sqrt{\frac{k_{z,j}}{k_{w,j}} \frac{I_{w,j}}{I_{z,j}} + \frac{(k_{z,j} L_j)^2 GI_{t,j}}{\pi^2 EI_{z,j}}} + (C_{2,j} z_{g,j})^2 - (C_{2,j} z_{g,j} - C_{3,j} z_{j,j}) \right)}$$

$C_{1,j}$ – коэффициент, учитывающий характер эпюры изгибающего момента;

$C_{2,j}$ – коэффициент, учитывающий положение точки приложения нагрузки по отношению к центру сдвига;

$C_{3,j}$ – коэффициент, учитывающий асимметрию сечения относительно оси большей жесткости;

$k_{z,j} L_j$ – расчетная длина элемента при проверке устойчивости плоской формы изгиба (расстояние между поперечным раскреплением элемента из плоскости изгиба);

$k_{w,j} L_j$ – расстояние между сечениями элемента, закрепленными от деформации

Проверка общей устойчивости холодноформованных профилей

Совместное действие сжатия с изгибом

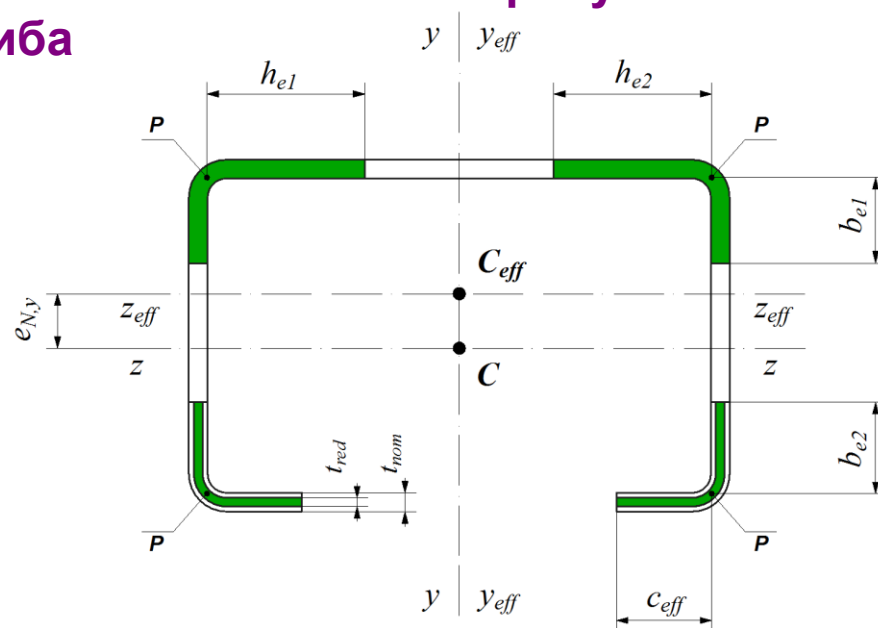
$$\left(\frac{N_{jkm}}{N_{b,Rd,jkm}} \right)^{0,8} + \left(\frac{M_{y,jkm} \oplus N_{jkm} e_{z,jkm}}{M_{yb,Rd,jkm}} \right)^{0,8} \leq 1,0$$

$N_{b,Rd,jkm}$

– несущая способность элемента на потерю устойчивости при центральном сжатии;

$M_{yb,Rd,jkm}$

– несущая способность элемента на потерю устойчивости плоской формы изгиба



Проверка общей устойчивости холодноформованных профилей

Совместное действие сжатия с изгибом

Когда $A_{eff,jkm} < A_{g,j}$ →

Когда $W_{y,eff,jkm} < W_{y,el,j}$ →

$$N_{b,Rd,jkm} = \min\{\chi_{y,jkm}, \chi_{z,jkm}, \chi_{T,jkm}, \chi_{TF,jkm}\} \times \frac{A_{eff,jkm} f_{yb,j}}{\gamma_{M1}}$$
$$M_{yb,Rd,jkm} = \frac{\chi_{LT,jkm} W_{y,eff,jkm} f_{yb,j}}{\gamma_{M1}}$$

Когда $A_{eff,jkm} = A_{g,j}$ →

Когда $W_{y,eff,jkm} = W_{y,el,j}$ →

$$N_{b,Rd,j} = \min\{\chi_{y,j}, \chi_{z,j}, \chi_{T,j}, \chi_{TF,j}\} \times \frac{A_{g,j} f_{ya,j}}{\gamma_{M1}}$$
$$M_{yb,Rd,j} = \frac{\chi_{LT,j} W_{y,el,j} f_{ya,j}}{\gamma_{M1}}$$

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

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

