



УКРАИНСКИЙ ЦЕНТР
СТАЛЬНОГО
СТРОИТЕЛЬСТВА

Проверки прочности элементов стальных конструкций из холодноформованных профилей на срез, кручение и локальное нагружение, а также при их совместном действии

Виталина Юрченко,
кандидат технических наук

Семинар «ЛСТК: проектирование, производство и монтаж»

16-17 апреля 2015



Прочностные расчеты холодноформованных профилей

Проверка прочности на срез

$$\frac{Q_{y,jmk}}{\sum_i Q_{yRd,ij}} - 1 \leq 0$$
$$\frac{Q_{z,jmk}}{\sum_i Q_{zRd,ij}} - 1 \leq 0$$

- $Q_{y,jmk}$ – расчетная поперечная сила вдоль оси $y - y$;
- $Q_{z,jmk}$ – расчетная поперечная сила вдоль оси $z - z$;
- $Q_{yRd,ij}$ – сопротивление i -й стенки сечения на действие $Q_{y,jmk}$;
- $Q_{zRd,ij}$ – сопротивление i -й стенки сечения на действие $Q_{z,jmk}$;
- j – номер стержня;
- k – номер расчетной комбинации нагрузок;
- m – номер расчетного сечения.

Прочностные расчеты холодноформованных профилей

Вычисление расчетных сопротивлений стенок на срез

При $\bar{\lambda}_{w,ij} \leq 0,83 \rightarrow$

$$Q_{yRd,ij} = \frac{0,58 t_j f_{yb,j} \sum_i S_{wy,ij}}{\gamma_{M0}}; \quad Q_{zRd,ij} = \frac{0,58 t_j f_{yb,j} \sum_i S_{wz,ij}}{\gamma_{M0}}$$

При $0,83 < \bar{\lambda}_{w,ij} < 1,40 \rightarrow$

$$Q_{yRd,ij} = \frac{0,48 t_j f_{yb,j} \sum_i S_{wy,ij}}{\bar{\lambda}_{w,ij} \gamma_{M0}}; \quad Q_{zRd,ij} = \frac{0,48 t_j f_{yb,j} \sum_i S_{wz,ij}}{\bar{\lambda}_{w,ij} \gamma_{M0}}$$

При отсутствии подкрепления расчетных сечений в местах приложения сосредоточенных сил (опорных реакций):

При $\bar{\lambda}_{w,ij} \geq 1,40 \rightarrow$

$$Q_{yRd,ij} = \frac{0,67 t_j f_{yb,j} \sum_i S_{wy,ij}}{\bar{\lambda}_{w,ij}^2 \gamma_{M0}}; \quad Q_{zRd,ij} = \frac{0,67 t_j f_{yb,j} \sum_i S_{wz,ij}}{\bar{\lambda}_{w,ij}^2 \gamma_{M0}}$$

$S_{wy,ij}$, $S_{wz,ij}$ – проекции высоты $h_{w,ij}$ i -го прямолинейного элемента сечения (стенки) на главные оси инерции;

$\bar{\lambda}_{w,ij}$ – условная гибкость i -ой стенки сечения.

Прочностные расчеты холодноформованных профилей

Вычисление условной гибкости стенки

При отсутствии продольных элементов жесткости



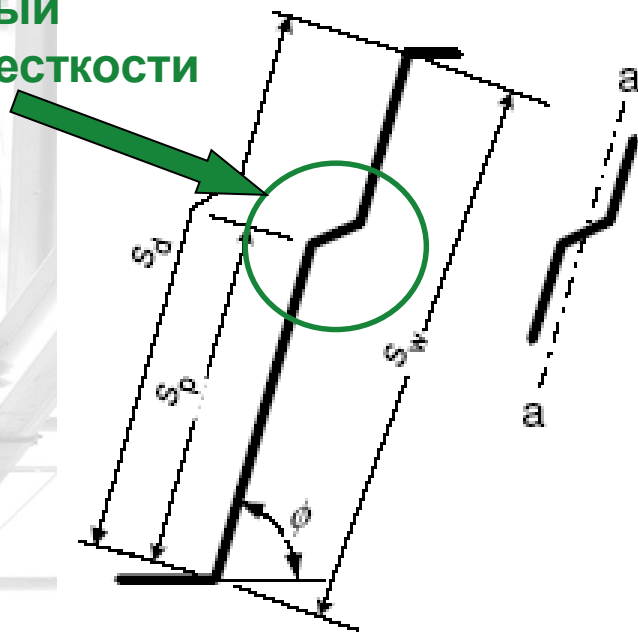
$$\bar{\lambda}_{w,ij} = 0,346 \frac{s_{w,ij}}{t_j} \sqrt{\frac{f_{yb,j}}{E}}$$

При наличии продольных элементов жесткости



$$\bar{\lambda}_{w,ij} = 0,346 \frac{s_{d,ij}}{t_j} \sqrt{\frac{5,34 f_{yb,j}}{\left(5,34 + \frac{2,10}{t_j} \sqrt[3]{\frac{I_s}{s_{d,ij}}} \right) E}}$$
$$\bar{\lambda}_{w,ij} \geq 0,346 \frac{s_{p,ij}}{t_j} \sqrt{\frac{f_{yb,j}}{E}}$$

Продольный элемент жесткости



$s_{w,ij}$, $s_{d,ij}$, $s_{p,ij}$ – геометрические размеры стенки по рисунку;

I_s – момент инерции сечения продольного элемента жесткости

Прочностные расчеты холодноформованных профилей

Проверки прочности на кручение

$$\sigma_{tot,jkm} = \sigma_{N,jkm} + \sigma_{My,jkm} + \sigma_{Mz,jkm} + \sigma_{\omega,jkm} \leq \frac{f_{ya,j}}{\gamma_{M0}}$$
$$\tau_{tot,jkm} = \tau_{Vy,jkm} + \tau_{Vz,jkm} + \tau_{t,jkm} + \tau_{\omega,jkm} \leq \frac{f_{ya,j}}{\gamma_{M0} \sqrt{3}}$$
$$\sqrt{\sigma_{tot,jkm}^2 + 3\tau_{tot,jkm}^2} \leq 1,1 \frac{f_{ya,j}}{\gamma_{M0}}$$

$\sigma_{N,jkm}$ – нормальные напряжения от действия продольной силы N_{jkm} ;

$\sigma_{My,jkm}$, $\sigma_{Mz,jkm}$ – нормальные напряжения от действия изгибающих моментов $M_{y,jkm} \oplus N_{jkm} e_{z,jkm}$ и $M_{z,jkm} \oplus N_{jkm} e_{y,jkm}$;

$\sigma_{\omega,jkm}$, $\tau_{\omega,jkm}$ – нормальные и касательные напряжения, обусловленные деформацией тонкостенного сечения;

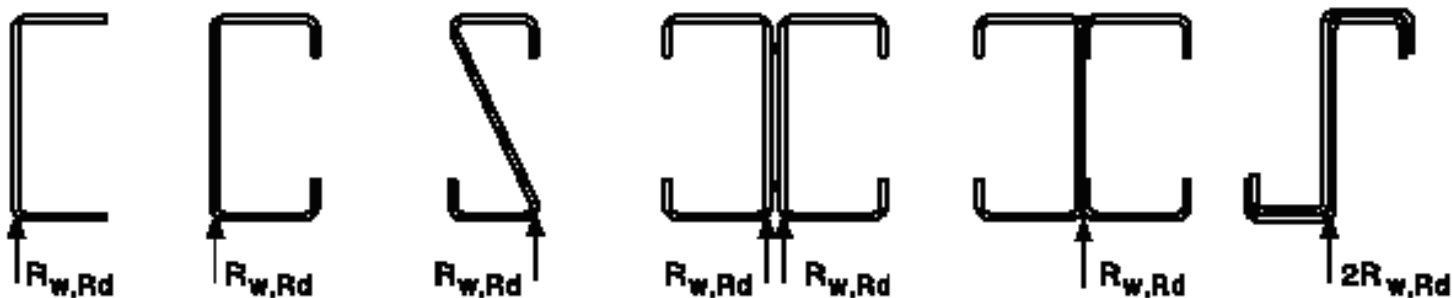
$\tau_{Qy,jkm}$, $\tau_{Qz,jkm}$ – касательные напряжения от действия поперечных сил $Q_{y,jkm}$, $Q_{z,jkm}$;

$\tau_{t,jkm}$ – касательные напряжения чистого кручения (по Сен-Венану).

Прочностные расчеты холодноформованных профилей

Проверка прочности при действии сосредоточенной силы для профилей с одной стенкой

$$\frac{F_{Ed,jkm}}{R_{wRd,j}} - 1,0 \leq 0$$



$F_{Ed,jkm}$ – расчетная сосредоточенная сила;

$R_{wRd,j}$ – расчетное сопротивление стенки на действие сосредоточенной силы;

j – номер стержня;

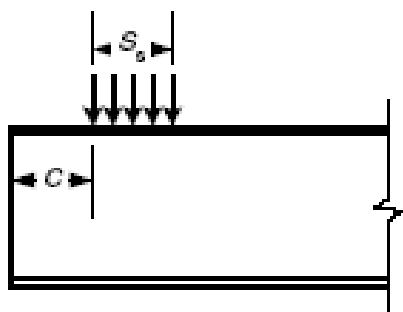
k – номер расчетной комбинации нагрузок;

m – номер расчетного сечения.

Прочностные расчеты холодноформованных профилей

Расчетное сопротивление на действие сосредоточенной силы для профилей с одной стенкой

Схема приложения сосредоточенной нагрузки: для сосредоточенной нагрузки (опорной реакции), расположенной на расстоянии $c \leq 1,5h_{w,j}$ от свободного края стержневого элемента



- для холодногнутых профилей с полками, подкрепленными элементами жесткости:

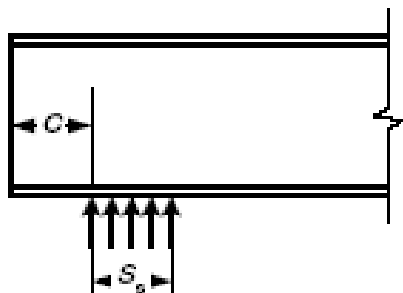
$$R_{wRd,j} = \frac{k_{1j}k_{2j}k_{3j}}{\gamma_{M1}} \left(9,04t_j - \frac{h_{w,j}}{60} \right) (t_j + 0,01s_s) t_j f_{yb,j}$$

- для холодногнутых профилей с полками при отсутствии их подкрепления элементами жесткости при $s_s/t_j \leq 60$:

$$R_{wRd,j} = \frac{k_{1j}k_{2j}k_{3j}}{\gamma_{M1}} \left(5,92t_j - \frac{h_{w,j}}{132} \right) (t_j + 0,01s_s) t_j f_{yb,j}$$

- для холодногнутых профилей с полками при отсутствии их подкрепления элементами жесткости при $s_s/t_j > 60$:

$$R_{wRd,j} = \frac{k_{1j}k_{2j}k_{3j}}{\gamma_{M1}} \left(5,92t_j - \frac{h_{w,j}}{132} \right) (0,71t_j + 0,015s_s) t_j f_{yb,j}$$



Прочностные расчеты холодноформованных профилей

Расчетное сопротивление на действие сосредоточенной силы для профилей с одной стенкой

Схема приложения сосредоточенной нагрузки: для сосредоточенной нагрузки (опорной реакции), расположенной на расстоянии $c > 1,5h_{w,j}$ от свободного края стержневого элемента

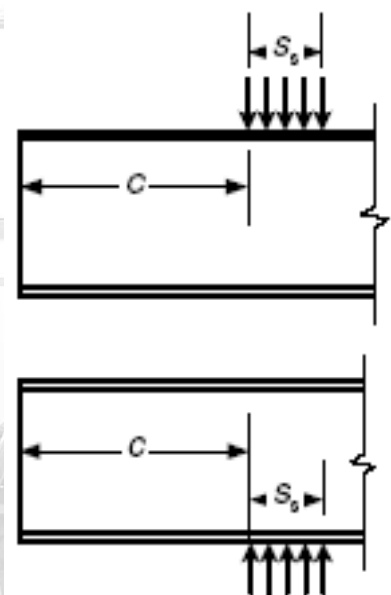
- для холодногнутых профилей с полками, подкрепленными элементами жесткости, или при отсутствии их подкрепления:

- при $s_s/t_j \leq 60$:

$$R_{wRd,j} = \frac{k_{3j}k_{4j}k_{5j}}{\gamma_{M1}} \left(14,7t_j - \frac{h_{w,j}}{49,5} \right) (t_j + 0,007s_s) t_j f_{yb,j}$$

- при $s_s/t_j > 60$:

$$R_{wRd,j} = \frac{k_{3j}k_{4j}k_{5j}}{\gamma_{M1}} \left(14,7t_j - \frac{h_{w,j}}{49,5} \right) (0,75t_j + 0,011s_s) t_j f_{yb,j}$$



Прочностные расчеты холодноформованных профилей

Расчетное сопротивление на действие сосредоточенной силы для профилей с одной стенкой

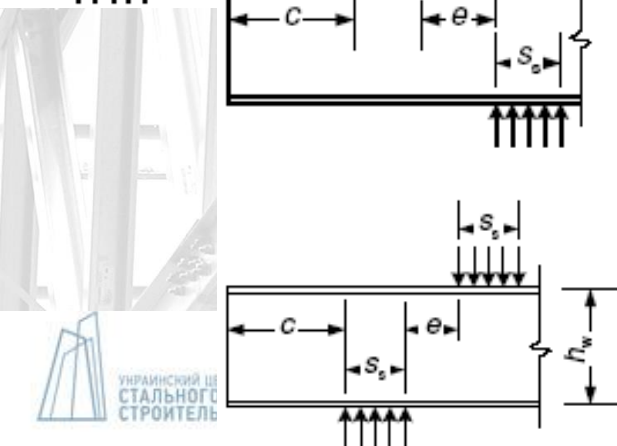
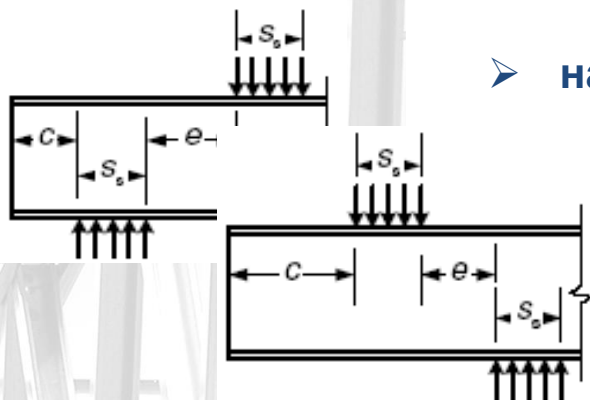
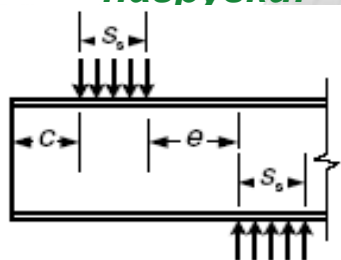
Схема приложения сосредоточенной нагрузки: для двух сосредоточенных нагрузок, ориентированных параллельно стенке в противоположных направлениях, с расстоянием между ними $e < 1,5h_{w,j}$ и расположенных:

- на расстоянии $c \leq 1,5h_{w,j}$ от свободного края:

$$R_{wRd,j} = \frac{k_{1j}k_{2j}k_{3j}}{\gamma_{M1}} \left(6,66t_j - \frac{h_{w,j}}{64} \right) (t_j + 0,01s_s) t_j f_{yb,j}$$

- на расстоянии $c > 1,5h_{w,j}$ от свободного края:

$$R_{wRd,j} = \frac{k_{3j}k_{4j}k_{5j}}{\gamma_{M1}} \left(21,0t_j - \frac{h_{w,j}}{16,3} \right) (t_j + 0,0013s_s) t_j f_{yb,j}$$



Прочностные расчеты холодноформованных профилей

Расчетное сопротивление на действие сосредоточенной силы для профилей с одной стенкой

Схема приложения
сосредоточенной нагрузки:

УПРОЩЕННЫЙ ПОДХОД

- для сосредоточенной нагрузки (опорной реакции), расположенной на расстоянии $c \leq 1,5h_{w,j}$ от свободного края:

$$R_{wRd,j} = \frac{k_{7j}}{\gamma_{M1}} \left(8,8 + 1,1 \sqrt{\frac{s_s}{t_j}} \right) t_j^2 f_{yb,j}$$

- для сосредоточенной нагрузки (опорной реакции), расположенной на расстоянии $c > 1,5h_{w,j}$ от свободного края:

$$R_{wRd,j} = \frac{k_{5j}^* k_{6j}}{\gamma_{M1}} \left(13,2 + 2,87 \sqrt{\frac{s_s}{t_j}} \right) t_j^2 f_{yb,j}$$

- требования к расчетному сечению:

$$\frac{h_{w,j}}{200t_j} - 1,0 \leq 0; \quad \frac{r_j}{6t_j} - 1,0 \leq 0; \quad 1,0 - \frac{\phi_j}{45^\circ} \leq 0; \quad \frac{\phi_j}{90^\circ} - 1,0 \leq 0$$

Прочностные расчеты холодноформованных профилей

Расчетное сопротивление на действие сосредоточенной силы для профилей с одной стенкой

Схема приложения
сосредоточенной нагрузки:

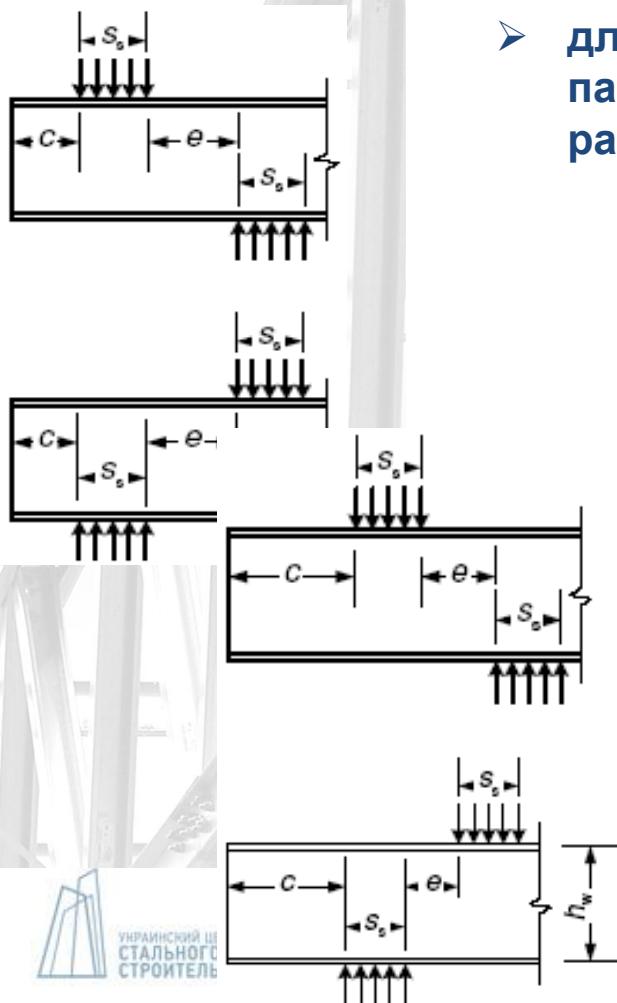
УПРОЩЕННЫЙ ПОДХОД

- для двух сосредоточенных нагрузок, ориентированных параллельно стенке в противоположных направлениях, с расстоянием между ними $e < 1,5h_{w,j}$ и расположенных:
 - на расстоянии $c \leq 1,5h_{w,j}$ от свободного края:

$$R_{wRd,j} = \frac{k_{10j}k_{11j}}{\gamma_{M1}} \left(8,8 + 1,1 \sqrt{\frac{s_s}{t_j}} \right) t_j^2 f_{yb,j}$$

- на расстоянии $c > 1,5h_{w,j}$ от свободного края:

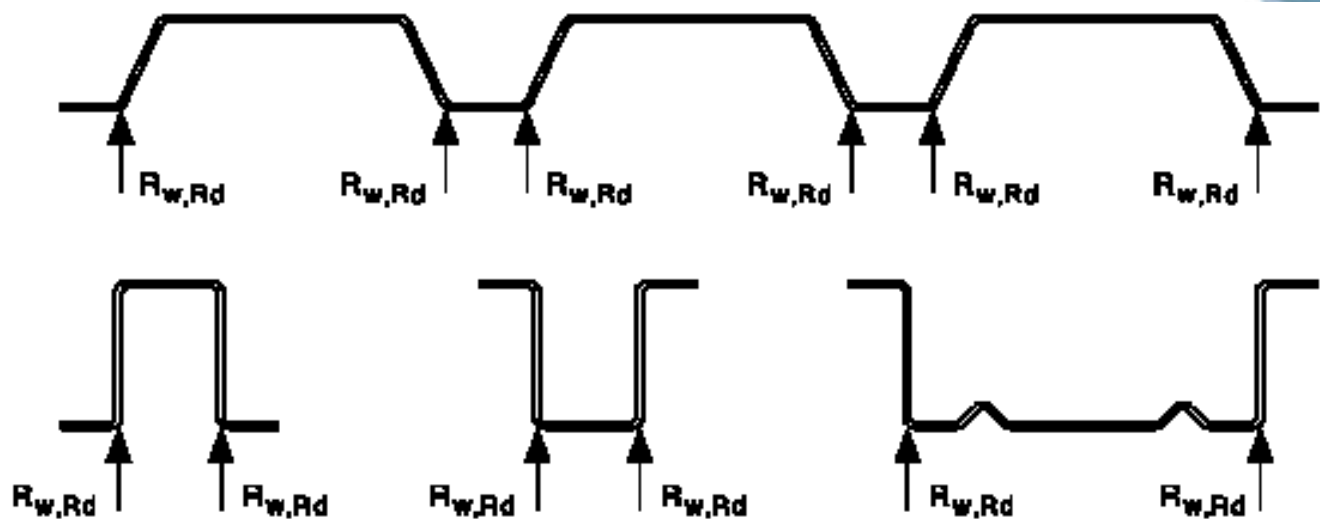
$$R_{wRd,j} = \frac{k_{8j}k_{9j}}{\gamma_{M1}} \left(13,2 + 2,87 \sqrt{\frac{s_s}{t_j}} \right) t_j^2 f_{yb,j}$$



Прочностные расчеты холодноформованных профилей

Проверка прочности при действии сосредоточенной силы для профилей с двумя стенками

$$\frac{F_{Ed,jkm}}{\sum_i R_{wRd,ij}} - 1, 0 \leq 0$$



$F_{Ed,jkm}$ – расчетная сосредоточенная сила;

$\sum_i R_{wRd,ij}$ – суммарное расчетное сопротивление всех стенок сечения на действие сосредоточенной силы;

j – номер стержня;

k – номер расчетной комбинации нагрузок;

m – номер расчетного сечения.

Прочностные расчеты холодноформованных профилей

Расчетное сопротивление на действие сосредоточенной силы для профилей с двумя и более стенками

➤ для одной стенки:

$$R_{wRd,ij} = \frac{\alpha t_j^2 \sqrt{f_{yb,j}} E}{\gamma_{M1}} \left(1 - 0,1 \sqrt{\frac{r_{ij}}{t_j}} \right) \left(0,5 + \sqrt{\frac{0,02 l_a}{t_j}} \right) \left(2,4 + \left(\frac{\phi_{ij}}{90^\circ} \right)^2 \right)$$

➤ для всех стенок сечения:

$$R_{wRd,j} = \sum_i R_{wRd,ij} = \sum_i \frac{\alpha t_j^2 \sqrt{f_{yb,j}} E}{\gamma_{M1}} \left(1 - 0,1 \sqrt{\frac{r_{ij}}{t_j}} \right) \left(0,5 + \sqrt{\frac{0,02 l_a}{t_j}} \right) \left(2,4 + \left(\frac{\phi_{ij}}{90^\circ} \right)^2 \right)$$

➤ требования к расчетным поперечным сечениям:

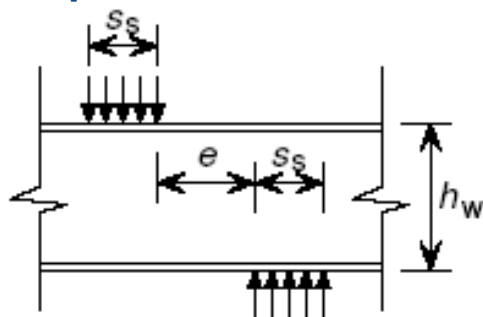
$$\frac{h_{w,j}}{200 t_j \sin \phi_{ij}} - 1,0 \leq 0; \quad \frac{r_{ij}}{10 t_j} - 1,0 \leq 0; \quad 1,0 - \frac{\phi_j}{45^\circ} \leq 0; \quad \frac{\phi_j}{90^\circ} - 1,0 \leq 0.$$

Прочностные расчеты холодноформованных профилей

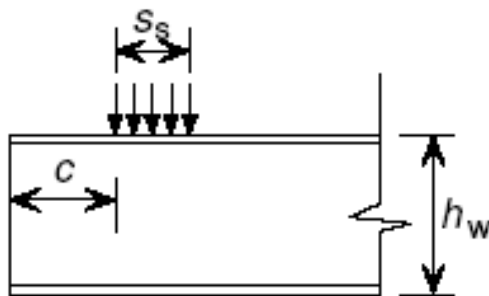
Расчетное сопротивление на действие сосредоточенной силы для профилей с двумя и более стенками

Схемы приложения сосредоточенной нагрузки (ПЕРВЫЙ ТИП)

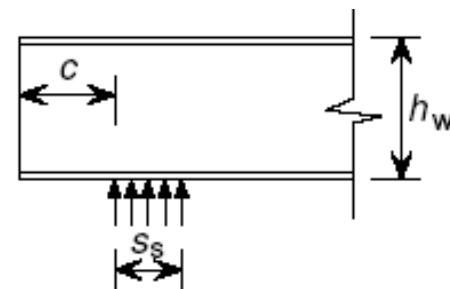
- сосредоточенная нагрузка расположена на расстоянии $e \leq 1,5h_{w,ij}$ от ближайшей опоры:



- сосредоточенная нагрузка расположена на расстоянии $c \leq 1,5h_{w,ij}$ от ближайшей опоры:



- опорная реакция расположена на расстоянии $c \leq 1,5h_{w,ij}$ от ближайшей опоры:



- для профилированных листов настилов: $\alpha = 0,075$
- для кассетных и корытообразных холодногнутых профилей: $\alpha = 0,057$
- эффективная длина площадки передачи сосредоточенной нагрузки:

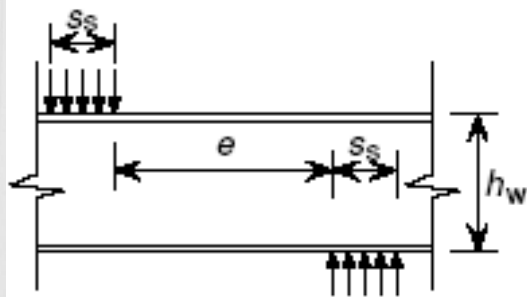
$$l_a = 10 \text{ мм}$$

Прочностные расчеты холодноформованных профилей

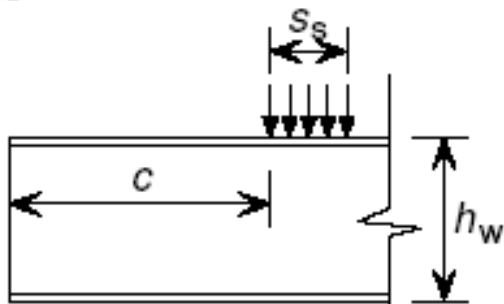
Расчетное сопротивление на действие сосредоточенной силы для профилей с двумя и более стенками

Схемы приложения сосредоточенной нагрузки (ВТОРОЙ ТИП)

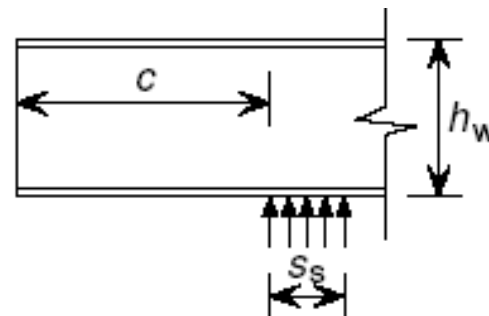
- сосредоточенная нагрузка расположена на расстоянии $e > 1,5h_{w,ij}$ от ближайшей опоры:



- сосредоточенная нагрузка расположена на расстоянии $c > 1,5h_{w,ij}$ от ближайшей опоры:



- опорная реакция расположена на расстоянии $c > 1,5h_{w,ij}$ от ближайшей опоры:



- для профилированных листов настилов:
 $\alpha = 0,15$
- для кассетных и корытообразных холодногнутых профилей:
 $\alpha = 0,115$

Прочностные расчеты холодноформованных профилей

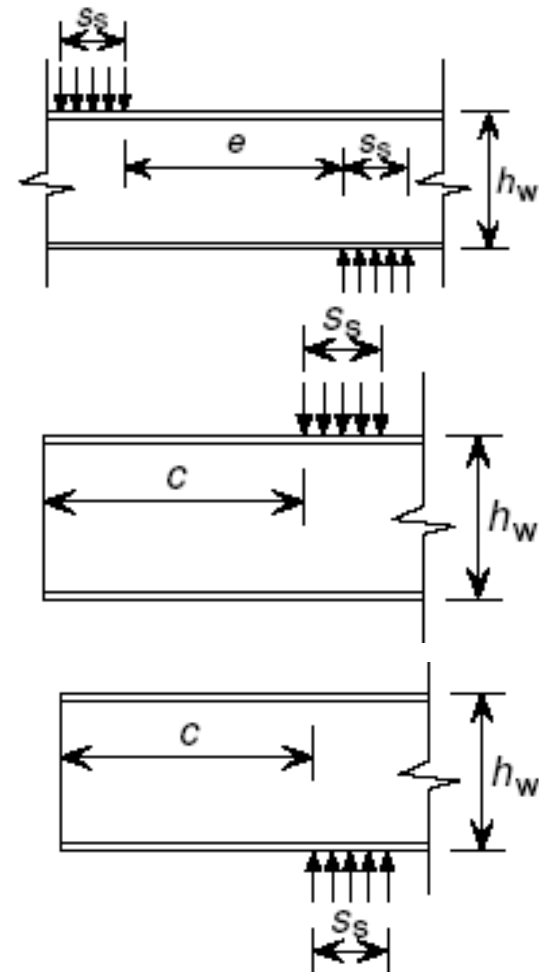
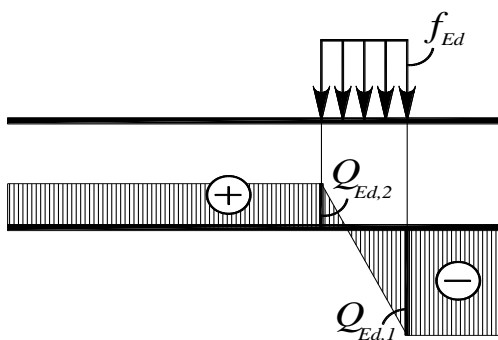
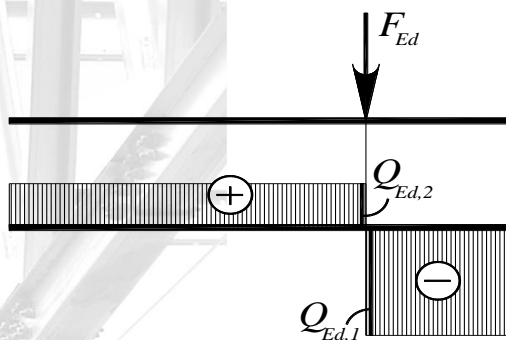
Расчетное сопротивление на действие сосредоточенной силы для профилей с двумя и более стенками

Схемы приложения сосредоточенной нагрузки (ВТОРОЙ ТИП)

- эффективная длина площадки передачи сосредоточенной нагрузки:

$$l_a = \begin{cases} s_s, & \text{если } \beta_{Q,jkm} \leq 0,2 \\ 10\text{мм}, & \text{если } \beta_{Q,jkm} \geq 0,3 \end{cases} \quad l_a \leq 200\text{мм}$$

$$\beta_{Q,jkm} = \frac{\left| Q_{Ed,1,jkm} \right| - \left| Q_{Ed,2,jkm} \right|}{\left| Q_{Ed,1,jkm} \right| + \left| Q_{Ed,2,jkm} \right|}$$



Прочностные расчеты холодноформованных профилей

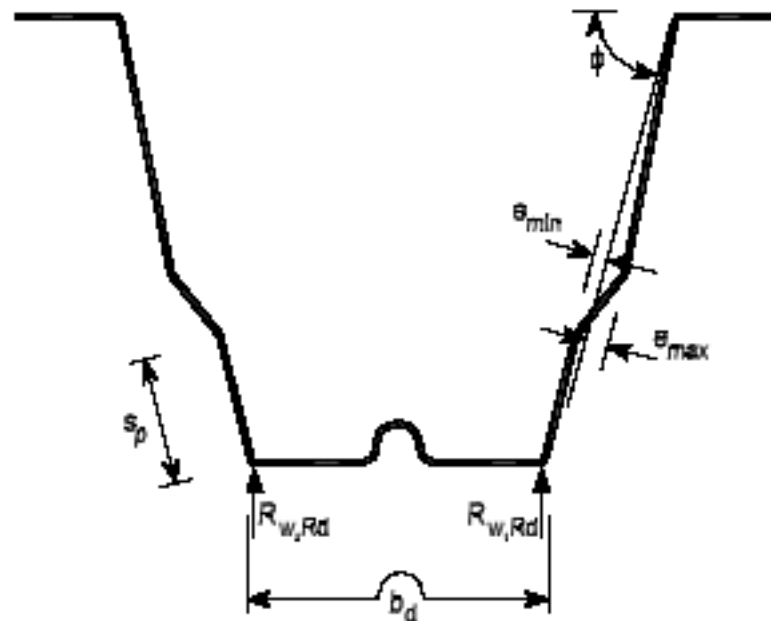
Расчетное сопротивление на действие сосредоточенной силы для профилей с подкрепленными стенками

- для профилей с одной стенкой:

$$R_{wRd,j} \leftarrow \kappa_{as,j} R_{wRd,j}$$

- для профилей с двумя и более стенками:

$$R_{wRd,j} \leftarrow \sum_i \kappa_{as,ij} R_{wRd,ij}$$



$$\kappa_{as,(i)j} = 1,45 - 0,05 \frac{e_{\max,(i)j}}{t_j} \leq 0,95 + 35000 t_j^2 \frac{e_{\min,(i)j}}{b_{d,(i)j}^2 s_{p,(i)j}}$$

Прочностные расчеты холодноформованных профилей

Проверка прочности при совместном действии продольной силы, изгибающего момента и поперечной силы $Q_{z,jkm} > 0,5 \sum_i Q_{zRd,ij}$

➤ при действии продольной силы сжатия:

$$\frac{N_{jkm}}{N_{cRd,jkm}} + \frac{M_{y,jkm} \oplus N_{jkm} e_{z,jkm}}{M_{y,cRd,jkm}} + \left(1 - \frac{M_{yf,pl,Rd,j}}{M_{y,pl,cRd,j}} \right) \left(\frac{2Q_{z,jkm}}{\sum_i Q_{zRd,ij}} - 1 \right)^2 \leq 1,0$$

➤ при действии продольной силы растяжения:

$$\frac{N_{jkm}}{N_{tRd,jkm}} + \frac{M_{y,jkm} \oplus N_{jkm} e_{z,jkm}}{M_{y,tRd,jkm}} + \left(1 - \frac{M_{yf,pl,Rd,j}}{M_{y,pl,tRd,j}} \right) \left(\frac{2Q_{z,jkm}}{\sum_i Q_{zRd,ij}} - 1 \right)^2 \leq 1,0$$

$N_{tRd,jkm}$, $N_{cRd,jkm}$ – сопротивление сечения на действие продольной силы;

$M_{y,tRd,jkm}$, $M_{c,tRd,jkm}$ – сопротивление сечения на действие изгибающего момента;

$M_{yf,pl,Rd,j}$ – сопротивление на изгиб части сечения или его элементов, не подверженных действию поперечной силы $Q_{z,jkm}$

Прочностные расчеты холодноформованных профилей

Проверка прочности при совместном действии изгибающего момента и сосредоточенной нагрузки (опорной реакции)

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

➤ для сечений с одной стенкой:

$$\frac{Q_{z,jkm}}{R_{wRd,j}} \leq 1,0$$

➤ для сечений с двумя и более стенками:

$$\frac{Q_{z,jkm}}{\sum_i R_{wRd,ij}} \leq 1,0$$

$$\frac{M_{y,jkm} \oplus N_{jkm} e_{z,jkm}}{M_{cRd,jkm}} + \frac{Q_{z,jkm}}{R_{wRd,j}} \leq 1,25$$

$$\frac{M_{y,jkm} \oplus N_{jkm} e_{z,jkm}}{M_{cRd,jkm}} + \frac{Q_{z,jkm}}{\sum_i R_{wRd,ij}} \leq 1,25$$

$M_{cRd,jkm}$ – расчетное сопротивление сечения на действие изгибающего момента;

$R_{wRd,ij}$, $\sum_i R_{wRd,ij}$ – суммарное расчетное сопротивление сечения на действие сосредоточенной нагрузки

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

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

