

Требования к поперечным ребрам жесткости в соответствии с ТКП EN 1993-1-5

Скибинская Е.В.

(Научные руководители – Лагун Ю.И. и Надольский В.В.)

Белорусский национальный технический университет,
Минск, Беларусь

Введение

В последнее время очень активно обсуждается вопрос использования Еврокодов на территории стран СНГ. Анализ расчетных положений и проверочных формул, а также конструктивных требований, заложенных в Еврокоде, позволит критически оценить сложившуюся ситуацию. В данной работе показаны основные требования, предъявляемые к расчету и конструированию поперечных ребер жесткости по ТКП EN 1993-1-5.

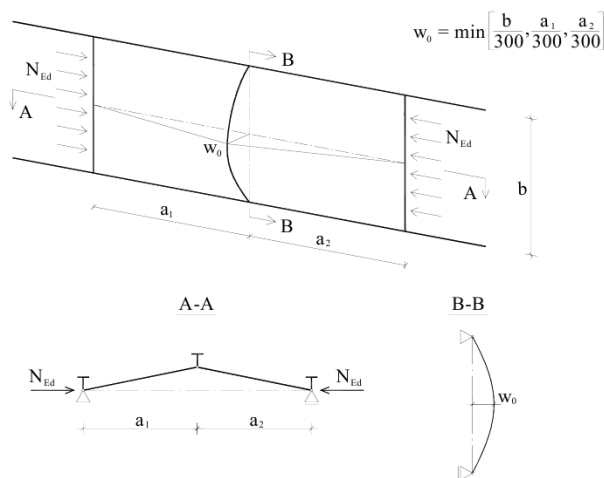


Рисунок 1 – Расчетная схема поперечного ребра жесткости

На рисунке 1 представлена статическая схема, применяемая при расчете поперечных ребер жесткости. Поперечное ребро жесткости рассматривается в виде шарнирно опертого стержня, с начальным синусоидальным выгибом с амплитудой w_0 .

В общем случае (рисунок 2) на поперечное ребро жесткости могут действовать следующие нагрузки:

- поперечная дестабилизирующая распределенная - нагрузка q_{dev} (deviation force), которая возникает от продольной сжимающей силы в смежных панелях N_{Ed} ;
- внешняя поперечная нагрузка q_{Ed} в горизонтальном направлении;
- осевая сила $N_{st,Ed}$, вызванная вертикальной поперечной нагрузкой;
- осевая сила $N_{st,ten}$, вызванная диагональной областью напряжений, развивающихся в процессе закритической стадии работы стенки на сдвиг.

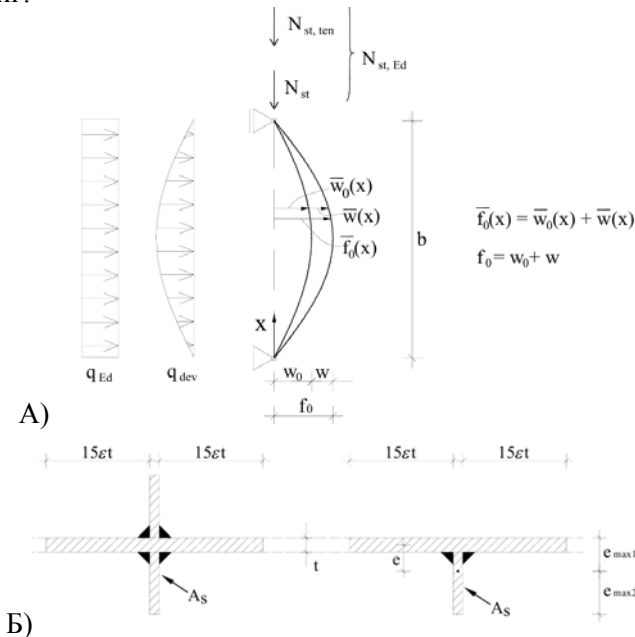


Рисунок 2 – К расчету поперечного ребра жесткости:
а) расчетная схема; б) расчетное поперечное сечение ребра жесткости

При расчете ребер жесткости должны удовлетворяться следующие базовые требования:

– максимальное напряжение в ребре жесткости не должно превышать f_y/γ_{M1} ;

– дополнительный выгиб не должен превышать $b/300$:

$$\sigma_{\max} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M1}}, \quad w \leq \frac{b}{300},$$

где b – ширина пластины (см. рисунок 1).

При этом должны учитываться эффекты второго рода.

Для частных случаев, вышеперечисленные базовые требования можно преобразовать в расчетные проверочные выражения.

Поперечная дестабилизирующая распределенная нагрузка q_{dev} может быть выражена как:

$$q_{dev}(x) = \bar{f}_0(x) \frac{N_{Ed}}{b} \left(\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2} \right) \frac{\sigma_{cr,c}}{\sigma_{cr,p}} = (\bar{w}_0(x) + \bar{w}(x)) \sigma_m$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{cr,c}}{\sigma_{cr,p}} \frac{N_{Ed}}{b} \left(\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2} \right)$$

$$\bar{w}_0(x) = w_0 \sin\left(\frac{\pi x}{b}\right),$$

где $\sigma_{cr,c}$ и $\sigma_{cr,p}$ являются соответственно упругими критическими напряжениями потери устойчивости для шарнирно опертой колонны и для пластинки (см. 4.3.1 (5) EN 1993-1-5). Для самого неблагоприятного варианта, отношение $\sigma_{cr,c}/\sigma_{cr,p}$ можно допустить равным 1,0.

Для следующих двух частных случаев нагружения ребра жесткости показано преобразование базовых требований в расчетные проверки:

– ребро жесткости загружено только продольной силой сжатия N_{Ed} ;

– ребро жесткости, загружено продольной силой сжатия N_{Ed} и осевой силой в поперечном ребре жесткости ($N_{st,Ed}$ и/или $N_{st,tension}$);

Элементы жесткости при действии только продольной сжимающей силы N_{Ed}

Когда поперечное ребро жесткости загружено только дестабилизирующей силой, вызванной продольной силой сжатия N_{Ed} , действующей в смежных отсеках, базовые требования могут быть удовлетворены путем конструирования поперечных ребер жесткости с минимальным моментом инерции I_{st} .

Сила N_{Ed} предполагается равномерно распределенной по высоте панели, а начальное отклонение $w_0(x)$ – дополнительное отклонение $w(x)$, эквивалентная распределенная нагрузка $q_{dev}(x)$ принимаются распределенными по синусоидальной форме. С учетом этого, максимальное напряжение σ_{max} и максимальное дополнительное отклонение w могут быть определены по следующим выражениям:

$$\sigma_{max} = \frac{M_{max} e_{max}}{I_{st}} = \frac{q_{dev,0} b^2 e_{max}}{\pi^2 I_{st}} = \frac{(w_0 + w) \sigma_m b^2 e_{max}}{\pi^2 I_{st}} \quad (1)$$

$$w = \frac{q_{dev,0} b^4}{\pi^2 EI_{st}} = \frac{(w_0 + w) \sigma_m b^4}{\pi^2 EI_{st}} = \frac{\sigma_{max} b^2}{\pi^2 E e_{max}} \quad (2)$$

где M_{max} – максимальное значение изгибающего момента в ребре жесткости;

e_{max} – расстояние от крайнего волокна до центра ребра жесткости;

$q_{dev,0} = (w_0 + w) \sigma_m$ – амплитуда силы выпучивания $q_{dev}(x)$.

С учетом (1) и (2) получаем:

$$I_{st} \geq \frac{\sigma_m}{E} \left(\frac{b}{\pi} \right)^4 \left(1 + w_0 \frac{300}{b} u \right) \quad (3)$$

где:

$$u = \frac{\pi^2 E e_{max} \gamma_{M1}}{b 300 f_y} \geq 1.$$

Когда u меньше 1,0, проверка по перемещениям становится решающей, и u должно быть принято как 1,0 (9.7 EN 1993-1-5), в противном случае определяющей является проверка по прочности.

Элементы жесткости, нагруженные продольной силой сжатия (N_{Ed}) и осевой силой - в поперечном ребре жесткости ($N_{st,Ed}$ и/или $N_{st,ten}$)

Когда в дополнение к дестабилизирующей силе поперечные ребра жесткости воспринимают внешнее осевое сжатие, дестабилизирующая сила преобразована в дополнительную – осевую силу $\Delta N_{st,Ed}$:

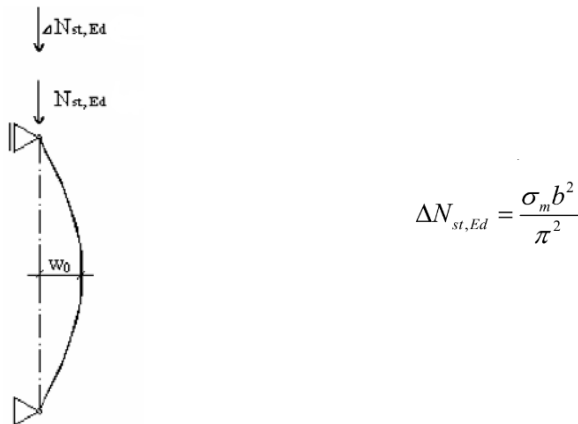


Рисунок 3 – Упрощенный анализ нагруженного в осевом направлении поперечного элемента жесткости

Для этого случая расчетная модель показана на рисунке 3 (исключая q_{Ed}). Элемент жесткости нагружен дестабилизирующей силой, вызванной продольным сжатием панели (N_{Ed}) и осевой силой $N_{st,Ed}$ в ребре жесткости, вследствие действия поля растягивающих напряжений ($N_{st,ten}$ – см. 9.3.3 EN 1993-1-5), и/или внешней нагрузки.

Упрощенная процедура определения $N_{st,ten}$ приведена в EN 1993-1-5, раздел 9.3.3. Осевая сила в ребре жесткости $N_{st,ten}$ принимается как разница между поперечной силой V_{Ed} в панели и упругой критической поперечной силой вследствие действия поля растягивающих напряжений.

$$N_{st,ten} = V_{Ed} - \frac{1}{\lambda_w^2} \cdot t \cdot h_w \frac{f_{yw}}{\sqrt{3}}$$

Дифференциальное уравнение равновесия ребра жесткости может быть записано для $N_{st,Ed}$, для постоянного её значения или её эквивалентной постоянной:

$$EI_{st} \bar{w}_{,xxxx} + N_{st,Ed} (\bar{w}_{0,xx} + \bar{w}_{,xx}) = q_{dev}(x) = \sigma_m (\bar{w}_0 + \bar{w})$$

или

$$\bar{w}_{,xxxx} + \omega^2 \bar{w}_{,xx} - \alpha^2 \bar{w} = \alpha^2 \bar{w}_0 - \omega^2 \bar{w}_{0,xx}, \quad \omega^2 = \frac{N_{st,Ed}}{EI_{st}}, \quad \alpha^2 = \frac{\sigma_m}{EI_{st}}$$

Базовые требования могут быть выполнены в соответствии со следующей процедурой, которая учитывает эффекты второго порядка:

$$w = w_o \frac{1}{\frac{N_{cr,st}}{\Sigma N_{st,Ed}} - 1} \leq \frac{b}{300} \quad (4)$$

$$\sigma_{max} = \frac{N_{st,Ed}}{A_{st}} + \frac{\Sigma N_{st,Ed} e_{max}}{I_{st}} f = \frac{N_{st,Ed}}{A_{st}} + \frac{\Sigma N_{st,Ed} e_{max}}{I_{st}} w_o \frac{1}{1 - \frac{\Sigma N_{st,Ed}}{N_{cr,st}}} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \quad (5)$$

Отметим, что только осевую силу $N_{st,Ed}$ нужно рассмотреть в первой части (5). Вместо того, чтобы принять реальную осевую силу, $\Delta N_{st,Ed}$ просто эквивалентна q_{dev} дестабилизирующей силе. Для случая $N_{st,Ed} = 0$, выражения (4) и (5) преобразуются в (3). Требования (4) и (5) действительны только для двухсторонних ребер жесткости.

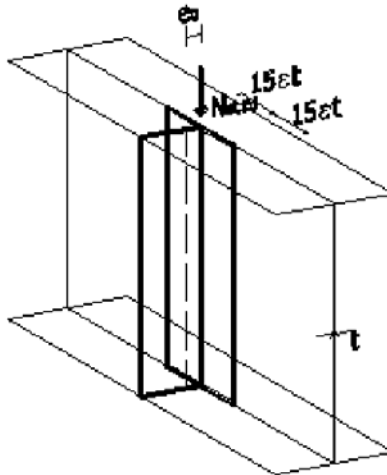


Рисунок 4 – Расчетная модель одностороннего ребра жесткости

Односторонние поперечные ребра жесткости могут быть проверены по следующим выражениям:

$$\sigma_{\max} = \frac{N_{st,Ed}}{A_{st}} + \frac{\Sigma N_{st,Ed} e_{\max} w_0}{I_{st}} \cdot \frac{1}{1 - \frac{\Sigma N_{st,Ed}}{N_{cr,st}}} (1 + 1,11q_m) \leq \frac{f_y}{\gamma_{M1}}$$

$$w = w_0 \frac{1}{\frac{N_{cr,st}}{\Sigma N_{st,Ed}} - 1} (1 + 1,25q_m) \leq \frac{b}{300}$$

Литература

2. Commentary and worked examples to EN 1993-1-5 “Plated structural elements”. First Edition, October 2007. – EUR 22898 EN, 2007.
3. ТКП EN 1993-1-5. Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций. Часть 1-5. Пластинчатые элементы конструкций. – Минск: МАиС, 2010.