

РАСЧЕТ И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ПОПЕРЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЖЕСТКОСТИ В СООТВЕТСТВИИ С ТКП EN 1993-1-5

Лагун Ю.И. магистр техн. наук, Надольский В.В., канд. техн. наук (БНТУ)

Аннотация. В связи с обязательностью применения Еврокодов для вновь проектируемых зданий на территории Республики Беларуси перед учеными и инженерами появляется актуальная необходимость критического анализа расчетных положений Еврокода, их полного понимания и корректного применения на практике. В статье дается разъяснение расчетных и конструктивных требований, предъявляемых к поперечным ребрам жесткости, в соответствии с ТКП EN 1993-1-5.

Введение

В последнее время активно обсуждается вопрос использования Еврокодов на территории стран СНГ, а в связи с обязательностью их применения для вновь проектируемых зданий на территории Республики Беларуси перед учеными и инженерами нашей страны появляется актуальная необходимость критического анализа расчетных положений Еврокода, их полного понимания и корректного применения на практике.

Требования к несущей способности и эксплуатационной пригодности элементов жесткости регламентированы в разделе 9 [0]. Однако в силу специфики построения документа интерпретация требований в ряде случаев вызывает затруднения. При этом прочностные и деформационные характеристики элементов жесткости связаны с расчетными зависимостями, заложенными в разных разделах Еврокода.

В настоящей статье авторы попытаются представить и объяснить расчетные и конструктивные требования к поперечным ребрам жесткости, приведенным ТКП EN 1993-1-5 [0].

1. Основные отличия по отношению к СНиП II-23

Согласно СНиП [0] ко всем элементам жесткости предъявлены конструктивные требования к геометрическим размерам и характеристикам из условия местной или общей их устойчивости, за исключением опорных ребер и поперечных ребер жесткости в балках с гибкой стенкой, которые дополнительно рассчитываются на общую устойчивость от действующих в них продольных сжимающих усилий.

В свою очередь Еврокод [0] наряду с конструктивными требованиями предъявляет к элементам жесткости и *расчетные*:

- 1) обеспечение прочности (п. 9.2.1(4));
- 2) обеспечение жесткости (п. 9.2.1(4));

3) обеспечение устойчивости (п. 9.2.1(8), п. 9.2.1(9), п. 9.4).

Отметим, что дополнительных специфических требований к продольным ребрам жесткости кроме тех, что указаны при рассмотрении устойчивости плоских отсеков согласно п.п. 4...6 [0], Еврокод 3 не предъявляет. По этой причине далее будем рассматривать только поперечные элементы жесткости.

Кроме этого, Еврокод [0], в отличие от СНиП [0], вводит следующую классификацию элементов жесткости:

- опорная часть (ребра): гибкие и жесткие;
- поперечные ребра жесткости: гибкие и жесткие;
- продольные ребра жесткости.

Следует отметить, что понятие «гибких» опорных частей и поперечных ребер жесткости связано с ограничением несущей способности элемента и трансформацией схемы работы отсека.

2. Общие положения расчета поперечных элементов жесткости

Основная проблема, с которой сталкиваются инженеры при расчете ребер жесткости, связана с отсутствием в Еврокоде [0] расчетных методик для обеспечения расчетных критериев (требований). Для объяснения расчётных критерием далее будем дополнительно использовать Комментарии к Еврокоду [0].

Согласно 9.2.1 (2) [0] расчетная модель поперечного ребра жесткости рассматривается в виде шарнирно опертого стержня с начальным синусоидальным выгибом из плоскости стенки с амплитудой $w_0 = s/300$, где s — наименьшее из значений a_1 , a_2 и b , где a_1 и a_2 являются длинами смежных панелей рассматриваемого ребра жесткости, а b является высотой между центрами поясов балки или длиной ребра жесткости. Площадь сечения поперечного ребра жесткости принимается равной площади самих ребер и примыкающей части стенки с обеих сторон длиной $15\epsilon t$, но не более фактической длины (Рисунок 1б).

В общем случае на поперечное ребро жесткости могут действовать следующие нагрузки (9.2.1 (3) [0], Рисунок 1а):

- поперечная дестабилизирующая нагрузка q_{dev} (*deviation force*), которая возникает от продольной сжимающей силы в смежных панелях N_{Ed} (суммарная сила от сжимающих напряжений в поперечном сечении, принимаемых равномерно распределенными в запас прочности);
- внешняя поперечная нагрузка q_{Ed} ;
- осевая сила N_{st} , вызванная вертикальной поперечной нагрузкой;
- осевая сила $N_{st,ten}$, вызванная диагональной областью напряжений, развивающихся в процессе критической стадии работы стенки на сдвиг в примыкающем отсеке.

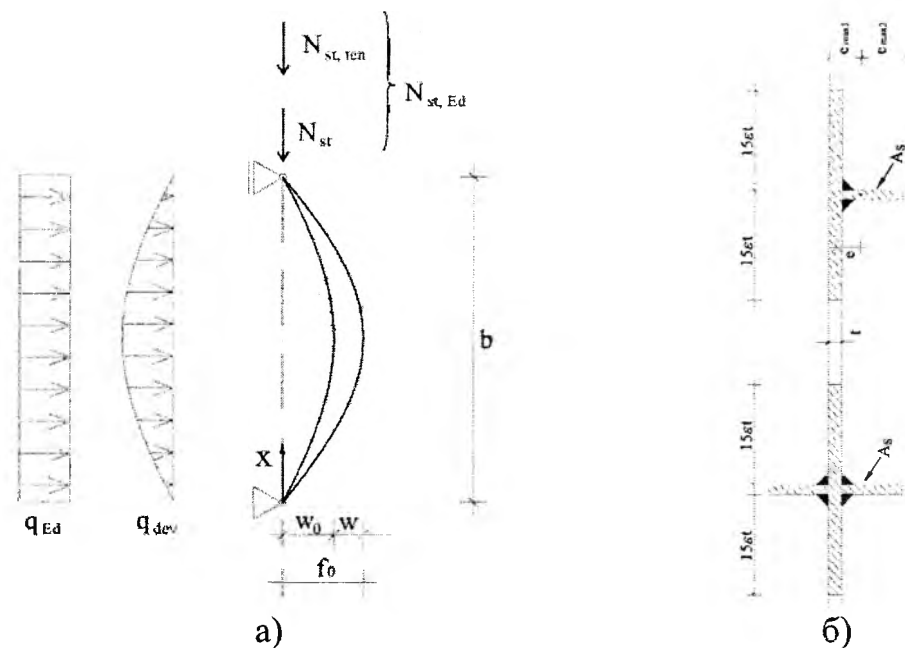


Рисунок 1 – К расчету поперечного ребра жесткости:
 а) расчетная схема; б) расчетное поперечное сечение ребра жесткости

Расчет поперечных ребер жесткости следует выполнять с учетом *эффектов второго порядка* (9.2.1 (4) [0]) и обеспечивать, как было выше указано, следующие критерии

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

где σ_{max} – максимальное напряжение в поперечном сечении;
 w – дополнительный выгиб.

В общем случае данные критерии должны быть удовлетворены *расчетным методом* с учетом всех составляющих усилий. Однако, как вариант, для отдельных частных случаев в Еврокоде 3 [0] и Комментариях [0] приведены упрощенные процедуры, позволяющие удовлетворить указанные выше критерии.

3. Общий случай: действуют продольная сила сжатия $N_{st,Ed}$ (N_{st} и/или $N_{st,ten}$), поперечная нагрузка q_{Ed} и дестабилизирующая нагрузка q_{dev}

Для определения расчетных критериев следует решить дифференциальное уравнение равновесия внецентренно сжатого стержня с переменными коэффициентами, что с математической точки зрения аналитически возможно сделать только при ряде допущений, неприменимых для рассматриваемых условия работы поперечных ребер жесткости. По этой причине вывод универсальных расчетных критериев для общего случая не представляется возможным и инженер должен выполнить анализ расчетной схемы приведенной на рисунке 1, при этом:

1) форму локального несовершенства следует задавать по синусоиде:

$$w_0(x) = w_0 \sin\left(\frac{\pi x}{b}\right);$$

2) форму дестабилизирующей силы принять по синусоиде:

$$q_{dev}(x) = (w_0(x) + w(x))\sigma_m;$$

3) учесть характер закрепления и точку приложения сжимающих продольных сил.

Для упрощения, Еврокод 3 допускает переход от синусоидальной формы дестабилизирующей нагрузки к эквивалентной прямоугольной со значением (п.9.2.1(7)[0]):

$$q_{dev} = \frac{\pi}{4} \sigma_m (w_0 + w_{el}),$$

где w_{el} – упругий выгиб поперечного ребра жесткости, который допускается принимать итерационно или максимальному дополнительному выгибу $b/300$.

4. Частные случаи действия внешней нагрузки

Если рассмотреть ситуацию, при которой, например, на поперечное ребро жесткости действует только дестабилизирующая сила $q_{dev}(x)$, вызванной продольной силой сжатия N_{Ed} , действующей в смежных отсеках, расчетные критерии в наиболее нагруженном поперечном сечении ребра жесткости принимают вид:

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

$$w = \frac{q_{dev} \cdot b^4}{\pi^2 \cdot E \cdot I_{st}} = \frac{\sigma_m \cdot (w_0 + w) \cdot b^2}{\pi^2 \cdot E \cdot I_{st}},$$

где M_{max} – максимальное значение изгибающего момента в ребре жесткости;
 e_{max} – расстояние от крайнего волокна до центра тяжести ребра жесткости;

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

После несложных преобразований мы получаем простое конструктивное требование к поперечному ребру жесткости приведенное в Еврокоде:

$$I_{st} = \frac{\sigma_m}{E} \cdot \left(\frac{b}{\pi}\right)^4 \cdot \left(1 + w_0 \frac{300}{b} u\right),$$

где $\sigma_m = \frac{\sigma_{cr,c}}{\sigma_{cr,p}} \cdot \frac{N_{Ed}}{b} \cdot \left(\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a_2}\right)$ – приведенное среднее напряжение;

$$u = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot e_{\max} \cdot \gamma_{M1}}{300 \cdot b \cdot f_y} \geq 1,0 \text{ – коэффициент, указывающий на тип проверки,}$$

которая будет определяющей при расчете ребра жесткости. Если u меньше 1,0 – проверка по перемещениям становится определяющей и u должно быть принято равным 1,0, в противном случае определяющей является проверка по прочности;

N_{Ed} – расчетное значение действующего усилия сжатия в смежных панелях, но не менее усилия, равного наибольшему напряжению сжатия, умноженному на половину эффективной^P сжатой площади поперечного сечения панели, включая элементы жесткости;

$\sigma_{cr,c}$ – упругое критическое напряжение потери устойчивости пластины по стержневому типу (п.4.5.3 [0]);

$\sigma_{cr,p}$ – упругое критическое напряжение потери устойчивости пластины по пластинчатому типу (п.4.5.2 [0]).

Отношение $\sigma_{cr,c} / \sigma_{cr,p}$ позволяет учесть тип потери устойчивости пластин смежных отсеков и понизить значение дестабилизирующей нагрузки. Неявно, данное отношение должно быть в пределах (п.4.5.4 [0]):

$$0,5 \leq \frac{\sigma_{cr,c}}{\sigma_{cr,p}} \leq 1,0.$$

Для самого неблагоприятного варианта, отношение $\sigma_{cr,c} / \sigma_{cr,p}$ можно допустить равным 1,0.

Если в дополнение к дестабилизирующей силе $q_{dev}(x)$ поперечное двустороннее симметричное ребро жесткости (Рисунок 1б) воспринимает внешнюю осевую силу $N_{st,Ed}$, расчетные критерии в наиболее нагруженном поперечном сечении получают следующий вид:

$$w = w_0 \frac{1}{\frac{N_{cr,st}}{\sum N_{st,Ed}} - 1} \leq \frac{b}{300},$$

$$\sigma_{\max} = \frac{N_{st,Ed}}{A_{st}} + \frac{\sum N_{st,Ed} \cdot e_{\max}}{I_{st}} \quad f = \frac{N_{st,Ed}}{A_{st}} + \frac{\sum N_{st,Ed} \cdot e_{\max}}{I_{st}} w_0 \frac{1}{1 - \frac{\sum N_{st,Ed}}{N_{cr,st}}} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M1}},$$

где $\sum N_{st,Ed} = N_{st,Ed} + \Delta N_{st,Ed}$;

$N_{cr,st} = \frac{\pi^2 EI_{st}}{b^2}$ – критическая сила потери устойчивости поперечного

ребра жесткости.

Для односторонних ребер жесткости (рисунок 1б) расчетные критерии имеют следующий вид:

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

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

где $q_m = \frac{N_{st,Ed} e_0}{\sum N_{st,Ed} w_0}$ – учет влияния внешней сосредоточенной силы;

1,11 и 1,25 – корректирующие коэффициенты, полученные на основе параметрического изучения точного решения дифференциального уравнения равновесия [0].

Выводы. 1. Согласно Еврокоду 3 к элементам жесткости наряду с конструктивными требованиями предъявляются и *расчетные*: обеспечение прочности; обеспечение жесткости; обеспечение устойчивости. Однако в силу специфики построения документа интерпретация требований в ряде случаев вызывает затруднения. 2. Для определения расчетных критериев в общем случае следует решить дифференциальное уравнение равновесия внецентренно сжатого стержня с переменными коэффициентами, что с математической точки зрения аналитически возможно сделать только при ряде допущений, неприменимых для рассматриваемых условия работы поперечных ребер жесткости. По этой причине вывод универсальных расчетных критериев для общего не представляется возможным. В рамках данной статьи реализован ряд частных случаев применения ребер жесткости и представлены для них практические рекомендации по обеспечению нормативных требований.

Литература. 1. Commentary and worked examples to EN 1993-1-5 “Plated structural elements”. First Edition, October 2007. - EUR 22898 EN, 2007. 2. ТКП EN 1993-1-5. Еврокод 3. Проектирование стальных конструкций. Часть 1-5. Пластинчатые элементы конструкций. – Минск: МАиС, 2010. 3. СНиП II-23-81* «Стальные конструкции». Москва, 1991 г. 4. D. Beg, J. Dujc, Eccentric loading on single sided transverse stiffeners, background document DB-C008 to EN 1993-1-5, 2005.