

**ВОПРОСЫ ПЕРЕХОДА НА ЕВРОПЕЙСКИЕ НОРМЫ
ПРОЕКТИРОВАНИЯ СТРОИТЕЛЬНЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

(г. Минск, СФ БНТУ — 30.11.2010)

УДК 624.014

***ОСОБЕННОСТИ РАСЧЕТА НА ПРОЧНОСТЬ
И УСТОЙЧИВОСТЬ ИЗГИБАЕМЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ПО
ТКП EN 1993***

ЖАБИНСКИЙ А.Н.

Белорусский национальный технический университет
Минск, Беларусь

В отличие от СНиП II-23-81* при расчете элементов по ТКП EN 1993-1-1 различают четыре класса поперечных сечений, для которых определены граничные условия, при достижении которых несущая способность ограничивается потерей местной устойчивости. Для поперечных сечений классов 1 и 2 несущая способность достигается соответственно появлением полного шарнира пластичности или развитием пластических деформаций с ограничением вращательной способности, вследствие потери местной устойчивости отдельных элементов.

В конструкциях с сечением класса 3 расчет ведется в предположении, что в крайних сжатых волокнах напряжения достигают предела текучести, но потеря устойчивости элементами препятствует развитию пластических деформаций. К конструкциям с поперечными сечениями класса 4 относятся сечения, в которых потеря местной устойчивости наступает до достижения предела текучести в полке или стенке поперечного сечения.

Определенный интерес представляют собой изгибаемые элементы с поперечным сечением класса 4, в которых потеря местной устойчивости в полке или в стенке наступает до достижения предела текучести в наиболее нагруженных волокнах.

Для балок с поперечным сечением класса 4 проверка прочности и устойчивости производится с использованием геометрических характеристик эффективной площади поперечного сечения (A_{eff} , I_{eff} , W_{eff}), рассчитанных без учета сжатых участков пластин, для которых местная устойчивость не обеспечена. При определении эффективных площадей сечения сжатой и растянутой полок балки, необходимо также учитывать эффект сдвигового запаздывания, который не учитывается в национальных нормах.

Согласно [2] при расчете балок с широкими и тонкими полками необходимо учитывать эффект сдвигового запаздывания напряжений по сечению сжатых и растянутых поясов. На рис. 1 показана эффективная длина балок при определении эффективной ширины поясов.

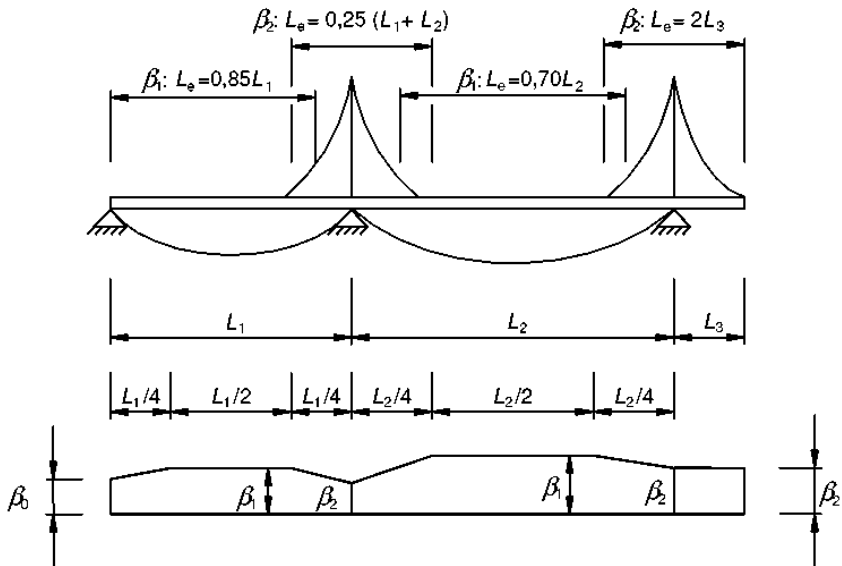


Рис. 1. Эффективная длина L_e для неразрезных балок и распределение эффективной^s ширины

Длина L_e , приведенная на рис. 1, равна расстоянию между нулевыми точками действующих моментов. Если смежные пролеты отличаются не более чем на 50 % или длина консолей составляет не более 50 % примыкающего пролета, то эффективную длину L_e допускается определять согласно рисунку 1. В других случаях L_e оценивают как расстояние между двумя нулевыми точками действующих моментов.

На рис. 2 приведено распределение нормальных напряжений в полке при эффекте сдвигового запаздывания.

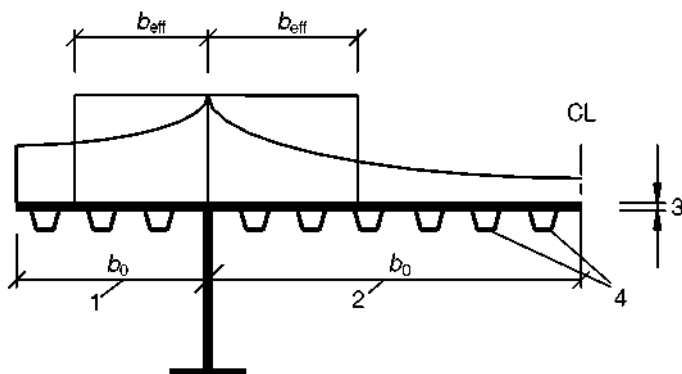


Рис. 2. К определению эффективной ширины:

- 1 — свес пояса при опирании на одну сторону;
- 2 — свес пояса при опирании на две стороны;
- 3 — толщина листа t ;
- 4 — продольные элементы жесткости

В поясах допускается не учитывать эффект сдвигового запаздывания, если выполнено условие $b_0 < L_e/50$. Для балок b_0 равно $0,5 b_f$ пояса, для поясов с двухсторонними опорами (см. рис. 2) b_0 равняется половине ширины пояса между опорами. Если указанное условие ($b_0 < L_e/50$) для b_0 не выполняется, то при оценке несущей способности и усталостной прочности материала необходимо учитывать влияние эффекта сдвигового запаздывания поясов, для этого определяют эффективную^s ширину поясов, которую определяют по формуле

$$b_{eff} = \beta b_0, \quad (1)$$

где коэффициент β указан в таблице 3.1 [2] и принимается в зависимости от параметров $k = \alpha_0 b_0 / L_e$ и $\alpha_0 = \sqrt{1 + \frac{A_{sl}}{b_0 t}}$.

При расчете по предельным состояниям эффект сдвигового запаздывания допускается учитывать следующим образом:

— воздействие эффекта сдвигового запаздывания в упругой стадии работы при определении несущей способности и усталостной прочности;

— при одновременном воздействии сдвигового запаздывания и потери устойчивости (выпучивания) пластин при действии нормальных сжимающих напряжений;

— при упруго-пластической работе материала воздействие эффекта сдвигового запаздывания допускается при учете ограничения пластических деформаций.

Одновременное действие потери устойчивости пластины и сдвигового запаздывания допускается рассчитывать с учетом эффективной площади сечения A_{eff} по формуле

$$A_{eff} = A_{c,eff} \beta_{ult}, \quad (2)$$

где $A_{c,eff}$ — эффективная^p площадь поперечного сечения сжатого пояса при потере устойчивости пластины от действия нормальных напряжений;

β_{ult} — понижающий коэффициент эффективной^s ширины для учета сдвигового запаздывания в предельном состоянии при определении несущей способности, β_{ult} допускается принимать равным β согласно таблице 3.1 [2], с заменой α_0 на α_0^* по формуле

$$\alpha_0^* = \sqrt{\frac{A_{c,eff}}{b_0 t_f}},$$

здесь t_f — толщина пояса.

При упруго-пластической работе материала воздействие эффекта сдвигового запаздывания с учетом ограничения пластических деформаций допускается учитывать посредством эффективной площади сечения A_{eff} по формуле

$$A_{eff} = A_{c,eff} \beta^k \geq A_{c,eff} \beta. \quad (3)$$

Формулы 2 и 3 допускается применять также для поясов, работающих на растяжение, в этом случае $A_{c,eff}$, как правило, заменяют на площадь сечения брутто растянутого пояса.

Эффективные^p площади пластин сжатых элементов стенки (с двухсторонним закреплением по краям поясами) должны определяться, используя таблицу 4.1 [2], а для пластин с односторонним закреплением (свесы листа пояса) — таблицу 4.2 [2]. Эффективная^p площадь сжатой зоны листа с поперечной площадью сечения брутто A_c , как правило, определяется по формуле

$$A_{c,eff} = \rho A_c, \quad (4)$$

где ρ — понижающий коэффициент при потере устойчивости пластины, принимают по формулам 5 и 6 в зависимости от условной

гибкости стенки равной $\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = \frac{\bar{b} / t}{28,4\epsilon \cdot \sqrt{k_\sigma}}$, где $\epsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y [l / l_i^2]}}$.

Для сжатой пластины с двухсторонним закреплением (для стенки)

$$\begin{aligned} \rho &= 1,0 \text{ для } \bar{\lambda}_p \leq 0,673; \\ \rho &= \frac{\bar{\lambda}_p - 0,055 \cdot (3 + \psi)}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1,0 \text{ для } \bar{\lambda}_p > 0,673, \text{ где } (3 + \psi) \geq 0. \end{aligned} \quad (5)$$

Для сжатой пластины с односторонним закреплением (свес пояса)

$$\begin{aligned} \rho &= 1,0 \text{ для } \bar{\lambda}_p \leq 0,748; \\ \rho &= \frac{\bar{\lambda}_p - 0,188}{\bar{\lambda}_p^2} \leq 1,0 \text{ для } \bar{\lambda}_p > 0,748, \end{aligned} \quad (6)$$

здесь ψ — отношение напряжений, определяемых согласно 4.4(3) и 4.4(4) [2];

\bar{b} — расчетная ширина пластины принимается следующей:

h_w — для стенки;

b — для элементов поясов с двухсторонним закреплением (кроме прямоугольных полых профилей);

c — для свесов поясов с односторонним закреплением;

k_σ — коэффициент, учитывающий потерю устойчивости в зависимости от отношения напряжений ψ по краям пластины и усло-

вий их закрепления. Для длинных пластин значения коэффициента k_{σ} указаны в таблице 4.1 или в таблице 4.2 [2];

t — толщина листа;

σ_{cr} — упругое критическое напряжение потери устойчивости (см. формулу (A.1), Приложение А [2]).

Для поясов I-сечений и коробчатых балок коэффициент отношения напряжений ψ , принятый в таблице 4.2 [2], является основой для определения характеристик поперечного сечения брутто, которые обязательно должны приниматься в расчете поясов при учете эффекта сдвигового запаздывания, если это имеет место. Для стенки определяют отношение напряжений ψ согласно таблицы 4.1 [2] с учетом распределения напряжений, которое определяется по эффективной ширине сжатого пояса и сечения брутто стенки.

Данный метод требует итеративного расчета, в котором отношение напряжений ψ повторно определяется на каждом этапе распределения напряжений с эффективным сечением предшествующего итеративного шага. Это касается в том числе и пластинок между поперечными элементами жесткости, где потеря устойчивости пластины сопоставима с потерей устойчивости стержня и требует применения понижающего коэффициента r_c для χ_c . Для пластин с продольными элементами жесткости потеря устойчивости, как для стержня, может также иметь место при $a/b \geq 1$.

Если эффект сдвигового запаздывания поясов не учитывается, тогда в расчете учитывают эффективную площадь поясов $A_{c,eff}$, определяемую по формуле (4). Характеристики эффективного поперечного сечения балки, как правило, определяются по эффективным площадям сжатых элементов полки и стенки и эффективной^s площади растянутого пояса, вследствие эффекта сдвигового запаздывания.

На схемах 1, 2 и 3 приведены блок-схемы расчета на прочность элементов поперечных сечений класса 4 на изгиб, поперечную силу и их совместное действие. При расчете таких сечений необходимо вначале определить эффективные сечения полки с учетом потери устойчивости от действия нормальных сжимающих напряжений и эффекта сдвигового запаздывания, а затем эффективное сечение стенки. После этого по ним определяют эффективные геометриче-

ские характеристики сечения всей балки. На схеме 1 приведена последовательность такого расчета при определении эффективных площадей полок и стенки, и проверка балки на изгиб. Если прочность поперечного сечения при работе на изгиб не достаточна, требуется постановка элементов жесткости.

На схеме 2 приведена последовательность расчета балки на срез. Отличительной особенностью расчета от национальных норм является то, что при отношении $h_w / t_w > 31\epsilon \sqrt{k_\tau} / \eta$ при расчете на срез должна учитываться потеря местной устойчивости стенки. Несущая способность стенки на срез определяется как сумма составляющих несущей способности стенки и поясов ($V_{bw,Rd} + V_{bf,Rd}$). При расчете первой составляющей $V_{bw,Rd}$ учитывается потеря местной устойчивости стенки введением понижающего коэффициента χ_w . Значение этого коэффициента определяется в зависимости от условной гибкости стенки $\overline{\lambda}_{LT} = \sqrt{W_y f_y / M_{cr}}$, где M_{cr} — критический момент потери устойчивости плоской формы потери устойчивости в упругой стадии. Составляющая несущей способности поясов $V_{bf,Rd}$ определяется в предположении, что при потере устойчивости стенки, по линии главных касательных растягивающих напряжений, на восприятие поперечной силы включаются полки на участке стенки длиной «С» (см. схему 2), повышая несущую способность стенки на срез.

На схеме 3 приведена блок-схема расчета на прочность элементов поперечных сечений класса 4 на совместное действие изгибающего момента и поперечной силы. Расчет по EN предусматривает влияние поперечной силы на несущую способность на изгиб. Если поперечная сила меньше половины несущей способности на сдвиг в пластической стадии $V_{Ed} < 0,5V_{pl,Rd}$, то его влияние на несущую способность на изгиб можно пренебречь, кроме случаев, когда потеря местной устойчивости при сдвиге уменьшает несущую способность поперечного сечения. Для этого случая уменьшенное значение несущей способности на изгиб следует принимать равному расчетному значению несущей способности поперечного сечения, рассчитанному по уменьшенному значению предела текучести равному $(1 - \rho) f_y$ (6.2.8 [2]).

Схема 1

Расчёт элементов поперечных сечений класса 4 на изгиб по ТКП EN

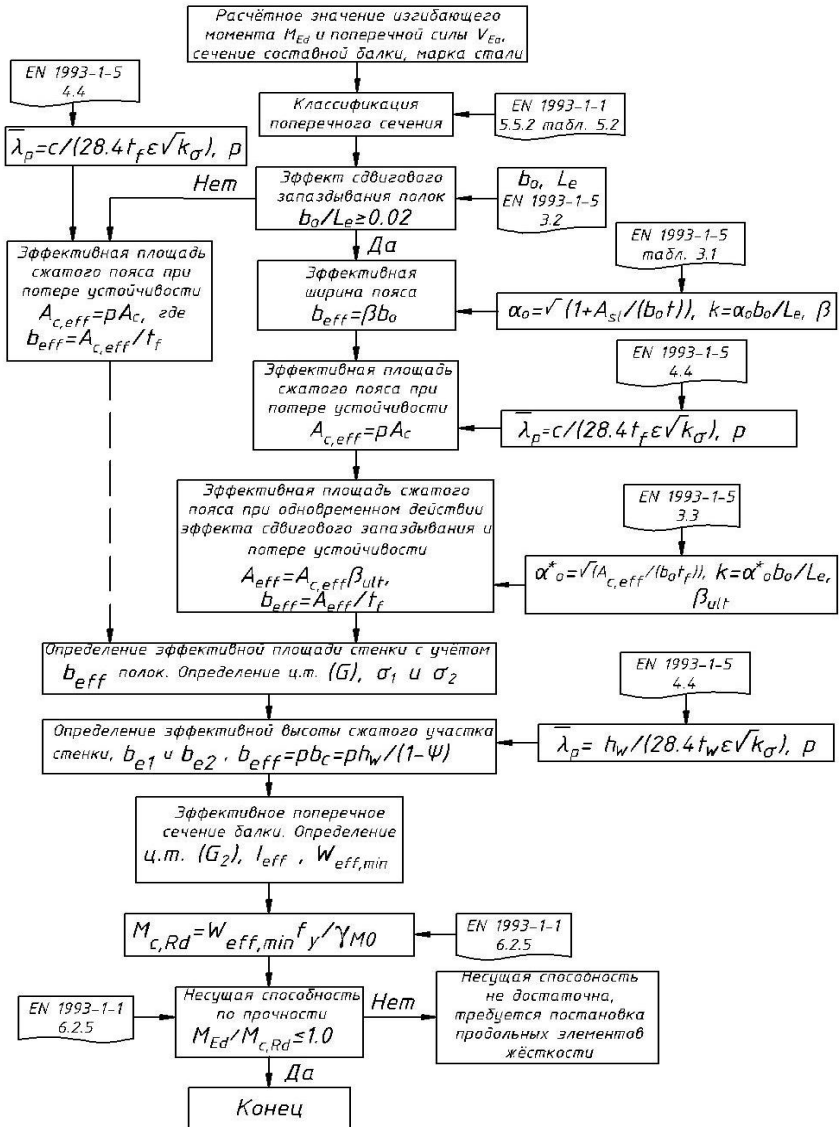


Схема 2

Расчёт на срез элементов поперечных сечений класса 4 по ТКП EN

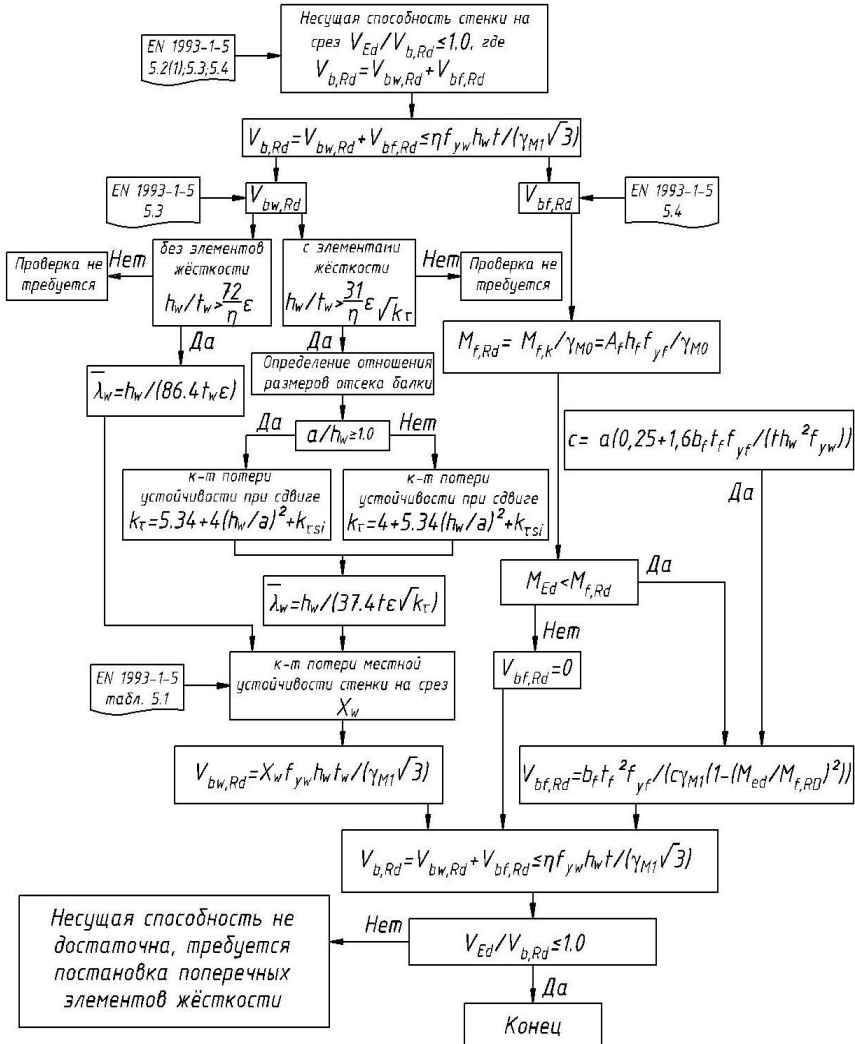
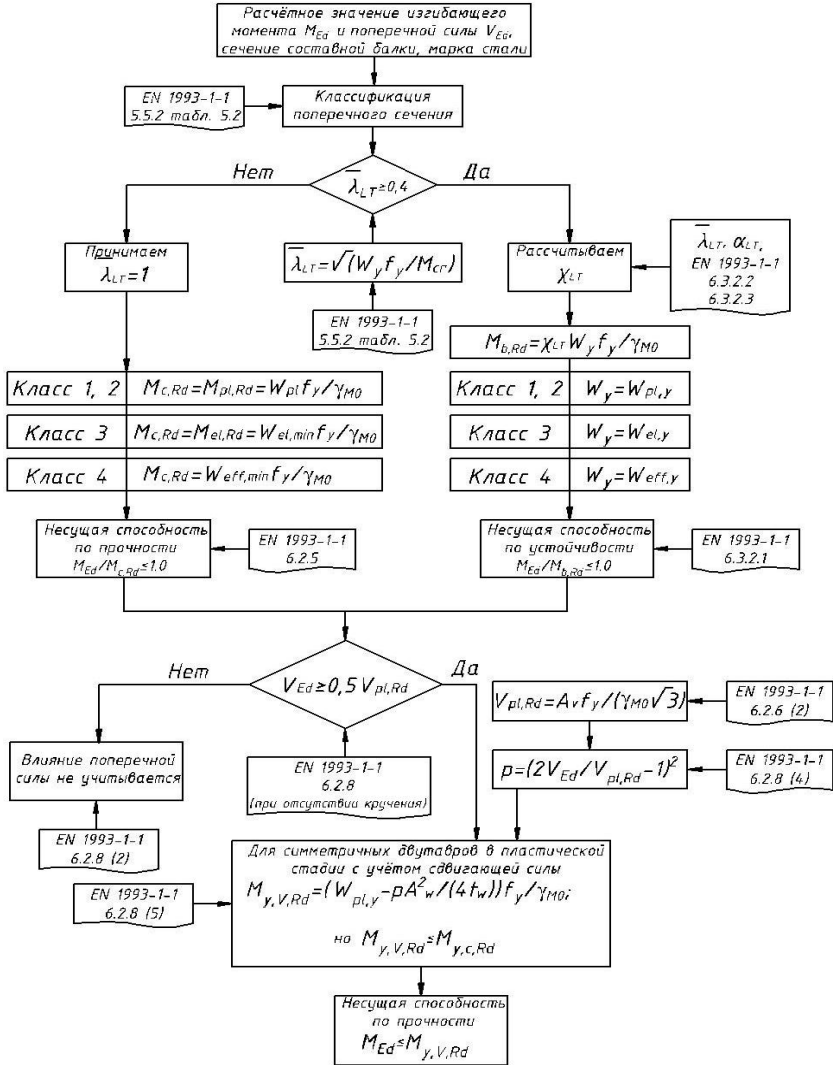


Схема 3

Расчёт элементов подверженных действию изгибающего момента и поперечной силы по ТКП EN

При действии поперечной силы следует принимать во внимание её влияние на несущую способность на изгиб



Анализ расчета стальных конструкций на изгиб по Еврокоду 3 показывает, что имеются значительные отличия от национальных норм в подходах, некоторых формулах и требованиях к расчету стальных конструкций, хотя конечные результаты прочностных расчетов сопоставимы между собой.

Обучение студентов по дисциплине металлические конструкции по Еврокоду 3, на наш взгляд, надо вести по действующим национальным нормам с объяснением по каждому разделам курса тех отличий, которые имеют правила расчета по европейским стандартам. Только в этом случае выпускники университета будут знать нормы расчета по национальным стандартам и владеть навыками расчета по европейским правилам.

ЛИТЕРАТУРА

1. EN 1993-1-1 Проектирование стальных конструкций. Общие правила и правила для зданий.
2. EN 1993-1-5 Проектирование стальных конструкций. Пластинчатые элементы.