

А.Н. ЖАБИНСКИЙ,

к. т. н., доцент, зав. кафедрой «Металлические
и деревянные конструкции» БНТУ

Особенности расчета элементов поперечных сечений класса 4 на прочность при действии изгибающего момента и поперечной силы по ТКП ЕН

В отличие от национальных стандартов 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.

Существенный 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. Проверка прочности и устойчивости балок с сечением 4-го класса 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 рисунке 1 показана эффективная длина балок при определении эффективной ширины поясов.

Длина L_e 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 рисунке 2 приведено распределение нормальных напряжений в полке при эффекте сдвигового запаздывания.

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 (рисунок 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

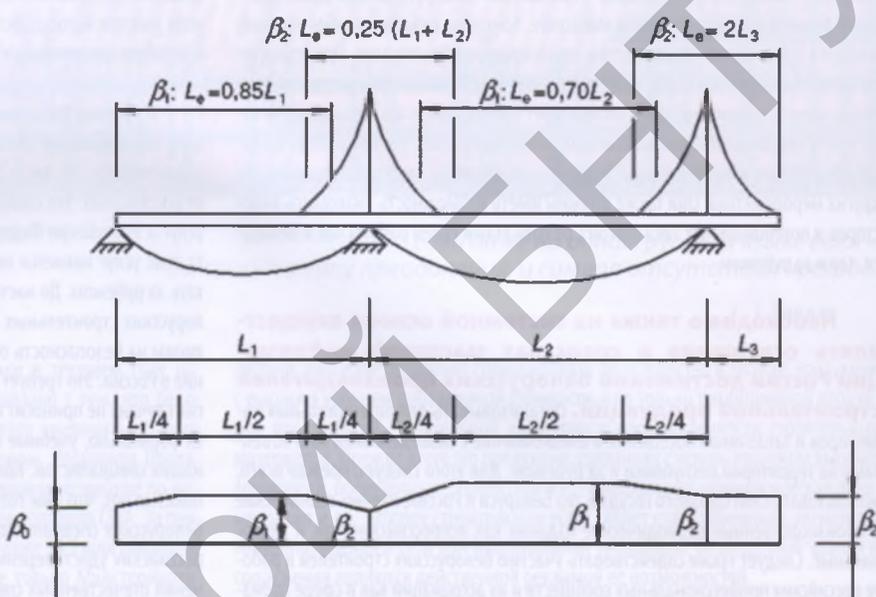


Рисунок 1 — Эффективная длина L_e для неразрезных балок и распределение эффективной ширины

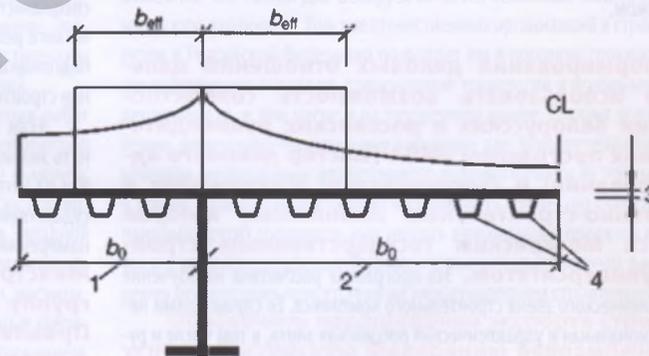


Рисунок 2 — К определению эффективной ширины пояса:

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

влияние эффекта сдвигового запаздывания поясов, для этого определяют эффективную⁵ 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 (выпу-

чивания) пластин при действии нормальных сжимающих напряжений;

в) 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:

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

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

β_{ult} — понижающий коэффициент эффективной 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:

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

где 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:

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

где β и k принимаются согласно таблице 1.

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^Р площади пластин сжатых элементов стенки (с двухсторонним закреплением по краям) должны определяться, используя таблицу 4.1 [2], а для пластин с односторонним закреплением (свесы листа) — таблицу 4.2 [2]. Эффективная^Р 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 $\bar{\lambda}_p = \sqrt{\frac{f_y}{\sigma_{cr}}} = \frac{b/t}{28,4 \varepsilon \sqrt{k_\sigma}}$, где $\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}}$ [Н/мм²];

ρ — для сжатой пластины с двухсторонним закреплением (для стенки):

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

ρ — для сжатой пластины с односторонним закреплением (свес пояса):

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

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 условий их закрепления. Для длинных пластин значения коэффициента k_σ указаны в таблице 4.1 или таблице 4.2 [2];

t — толщина листа;

σ_{cr} — упругое критическое напряжение потери устойчивости (формула (А.1) в А.1(2), 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 сечению 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 ρ_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 площади растянутого пояса вследствие эффекта сдвигового запаздывания.

На схемах 1, 2 и 3 приведены алгоритмы расчета на прочность элементов поперечных сечений класса 4 на изгиб, поперечную силу и их совместное действие. Особенностью расчета таких сечений является то, что необходимо вначале определить эффективное сечение полки и стенки, а затем по ним — эффективные геометрические характеристики сечения балки. На схеме 1 приведена последовательность такого расчета при определении эффективных площадей полки и стенки и проверка балки на изгиб. Если прочность поперечного сечения при работе на изгиб недостаточна, требуется постановка элементов жесткости.

На схеме 2 приведена последовательность расчета балки на срез.

Отличительной особенностью расчета от национальных норм является то, что несущая способность 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. 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» (схема 2), повышая несущую способность стенки на срез.

На схеме 3 показан алгоритм расчета на прочность элементов поперечных сечений класса 4 на совместное действие изгибающего момента и поперечной силы. При таком расчете EN предусматривает влияние поперечной силы на несущую способность на изгиб. Если поперечная сила меньше половины несущей способности на сдвиг в пластической стадии, то ее влияние на несущую способность на изгиб можно пренебречь, кроме случаев, когда потеря местной устойчивости при сдвиге уменьшает несущую способность поперечного сечения. В этом случае уменьшенное значение несущей способности на изгиб следует принимать равным расчетному значению несущей способности поперечного сечения, рассчитанному по уменьшенному значению предела текучести $(1-\rho)f_y$ (6.2.8 [1]).

Схема 1 — Расчет элементов поперечных сечений класса 4 на изгиб по ТКП EN

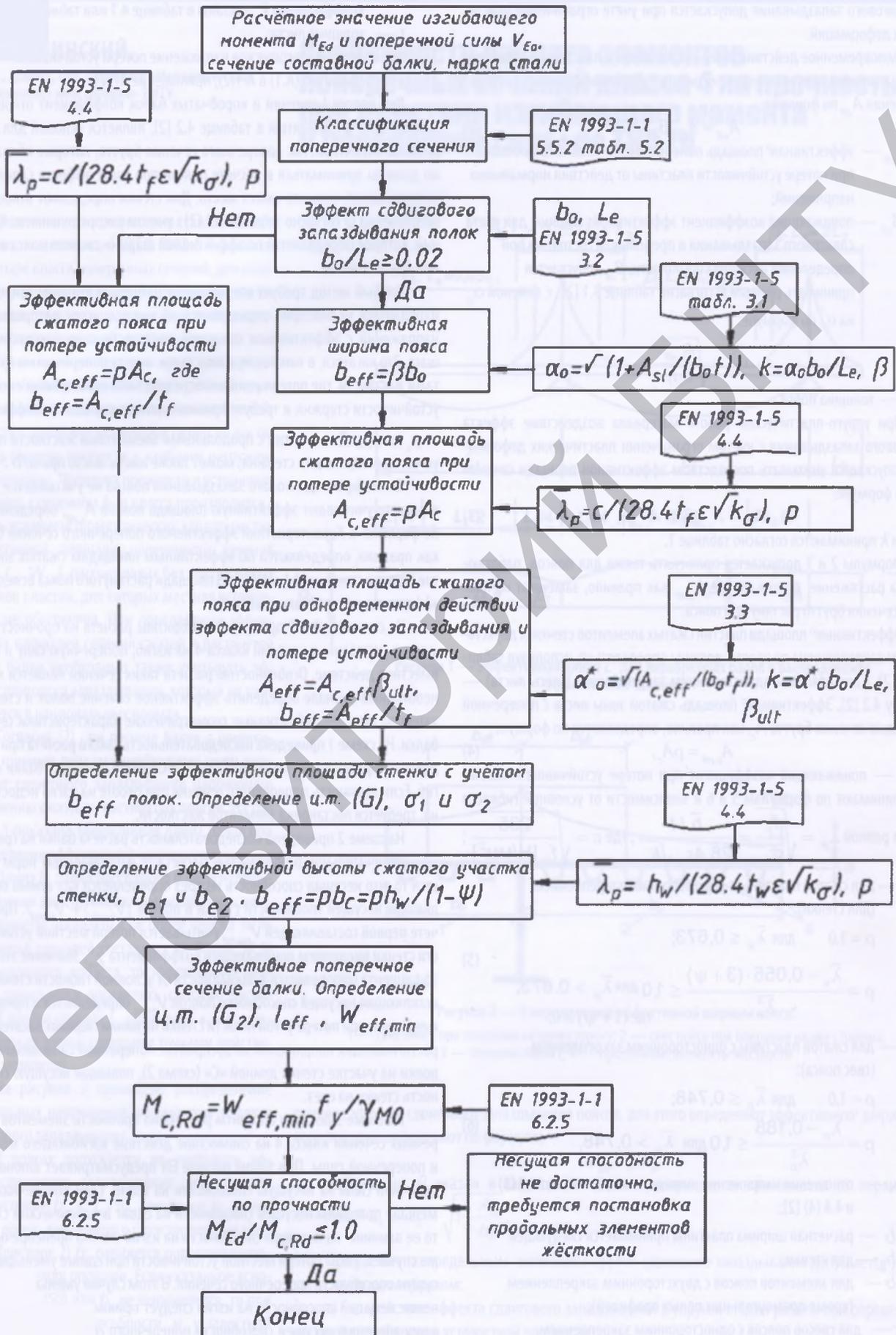


Схема 2 — Расчет на срез элементов поперечных сечений класса 4 по ТКП EN

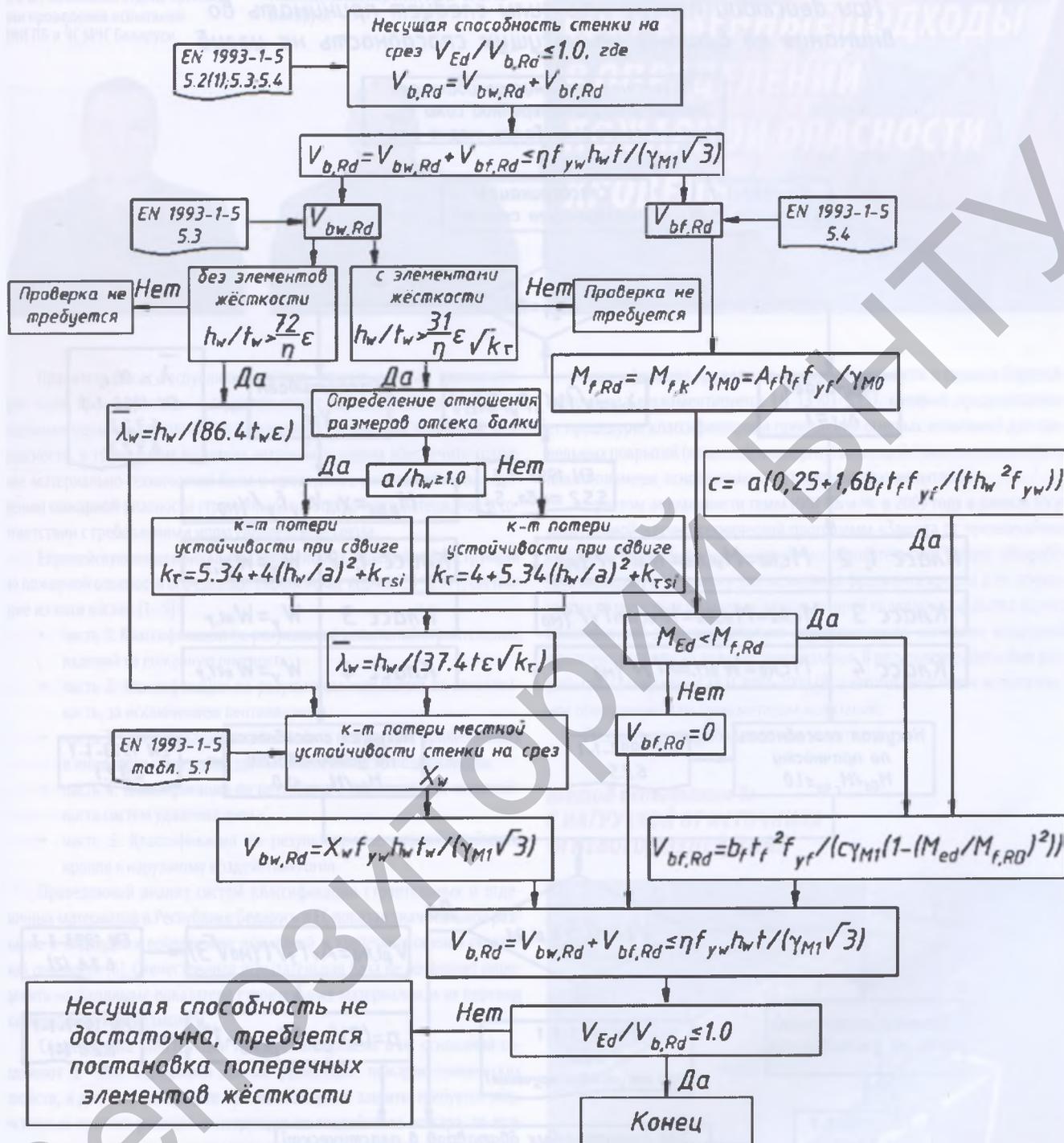
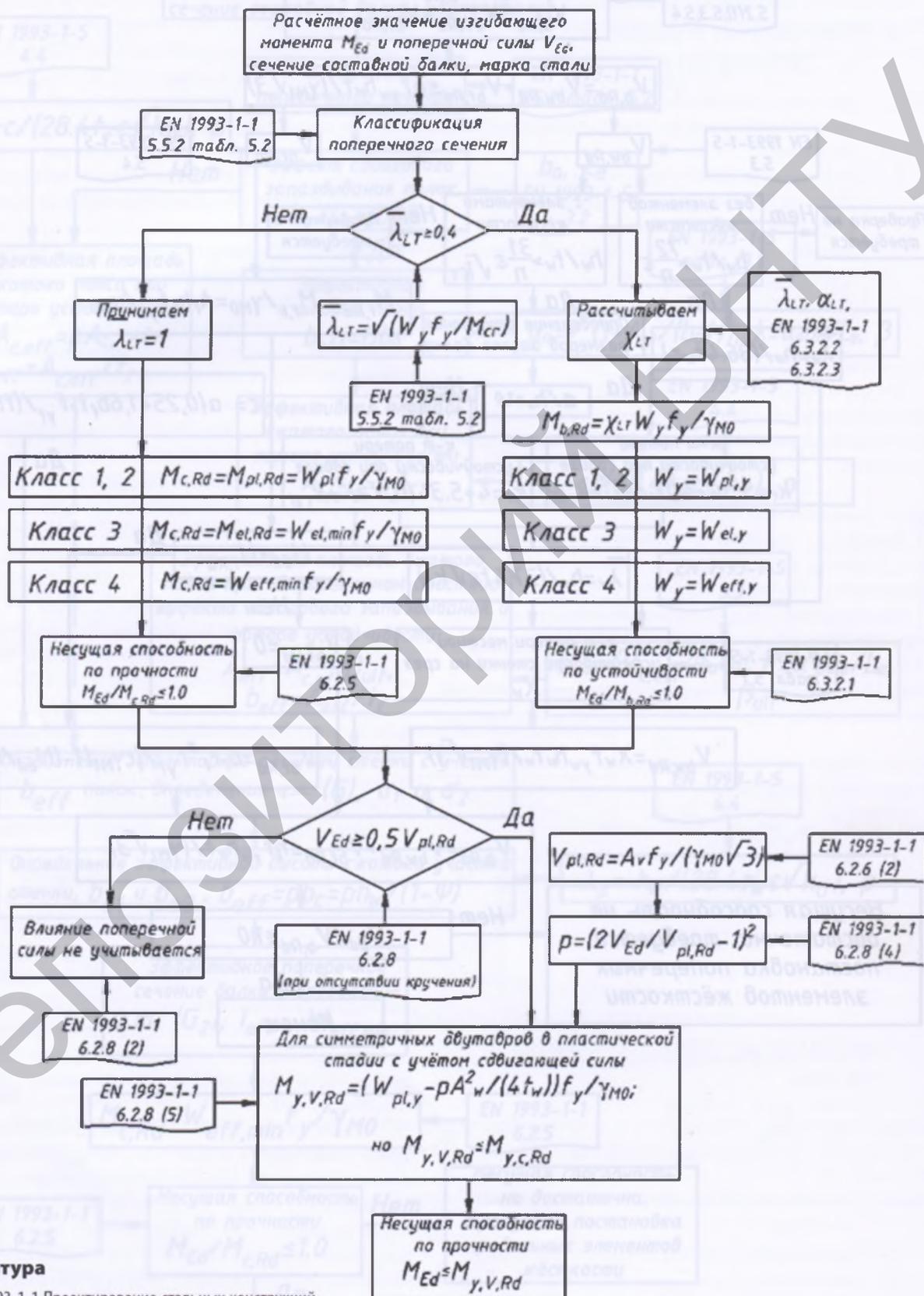


Схема 3 — Расчет элементов, подверженных действию изгибающего момента и поперечной силы по ТКП EN

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



Литература

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